

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Tugas Akhir ini bersumber dari penelitian-penelitian, buku ajar, buku standard an buku yang berkaitan tentang jaringan distribusi listrik. Beberapa sumber tersebut adalah.

Gilang Lanang Gumilang (2017) melakukan penelitian tentang Penerapan Proteksi *Fuse Cut Out* (FCO) pada Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) Rayon Grogol. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa FCO merupakan proteksi utama dari jaringan cabang yang berkerja saat arus gangguan yang mengalir ke *fuselink* melebihi arus maksimum. Jika arus gangguan melebihi arus maksimum maka *fuselink* akan melebur. Tetapi agar FCO berkerja lebih handal meminimalisir daerah padam harus dipasang proteksi lain seperti Recloser.

Faqih Andi Alfian (2017) melakukan penelitian tentang Koordinasi Proteksi antar *Fuse Cut Out* (FCO) pada Sistem Jaringan Distribusi PT. PLN (Persero) Rayon Tulung. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa pemasangan FCO di suatu cabang lebih dari satu FCO harus memperlihatkan arus beban maksimum dan waktu kerja pelebur pada sisi hilir pelebur cabang.

Aji Setiawan (2017) melakukan penelitian tentang Analisis Koordinasi Proteksi pada PT. PLN (Persero) Gardu Induk Wonosobo Menggunakan Software Aplikasi ETAP. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa Relai berfungsi untuk memberikan perintah ke PMT untuk membuka (*trip*) ketika terjadi gangguan, sedangkan Recloser dapat membuka (*trip*) ketika ada gangguan dan menutup balik secara otomatis ketika gangguan dirasa sudah hilang.

Adha Priantiku Aranda (2017) melakukan penelitian tentang Koordinasi Penempatan Peralatan Proteksi Jenis Arus Lebih (OCR) Dan Pelebur (FCO) Pada Penyulang di Gardu Induk 150/20 kV Gejayan Yogyakarta. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa ketika terjadi gangguan hubung singkat, OCR akan

bekerja dengan memerintahkan Circuit Breaker untuk membuka dengan waktu yang lebih cepat daripada FCO. Disaat OCR mengalami kerusakan atau tidak berfungsi, maka FCO sebagai pengaman *backup* akan bekerja untuk melindungi peralatan yang ada pada jaringan.

Ir. Wahyudi Sarimun. N. MT (2016) menulis buku tentang Proteksi Sistem Distribusi Tenaga Listrik Edisi Kedua. Ia menjabarkan tentang cara kerja sistem proteksi di jaringan tegangan menengah beserta perhitungan *setting* tiap peralatan proteksi yang ada di jaringan.

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah gabungan dari sistem pembangkit, transmisi, distribusi dan beban yang saling berhubungan dan berkerja sama untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik. Sistem tenaga listrik dimulai dari pembangkit hingga disalurkan ke pelanggan. Secara garis besar dapat digambarkan seperti Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Penyaluran Energi Listrik

Pada gambar 2.1. Tenaga listrik bermula pada sistem pembangkit. Tenaga listrik dibangkitkan di pusat-pusat tenaga listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTD lalu tenaga listrik disalurkan ke transmisi untuk ditransmisikan pada Gardu Induk. Tetapi sebelum di Transmisikan, listrik harus dinaikan tegangan menggunakan

Transformator Daya jenis *step up*. Listrik dinaikan menjadi tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi. Hal ini dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi saat tenaga listrik di transmisikan.

Sistem transmisi memiliki saluran untuk mentransmisikan listrik dari pembangkit ke Gardu Induk (GI). Saluran yang digunakan untuk mentransmisikan adalah saluran udara tegangan tinggi (SUTT) dan saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Setelah listrik sampai di Gardu Induk, listrik langsung di salurkan ke Transformator Daya jenis *step down* untuk menurunkan tegangan listrik. Listrik diturunkan dari tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi menjadi tegangan menengah. Tegangan menengah PLN yang dikembangkan sebesar 20 kV.

Setelah listrik di turunkan menjadi tegangan menengah di Gardu Induk (GI) dengan Transformator Daya jenis *step down*, listrik disalurkan ke pusat beban. Pada pusat beban terdapat Transformator Distribusi. Sebelum masuk ke pelanggan listrik tegangan menengah akan diturunkan lagi pada transformator distribusi menjadi listrik tegangan rendah sebesar 380/220 V. Lalu proses terakhir listrik disalurkan ke jaringan tegangan rendah (JTR) kemudian disalurkan ke pelanggan melalui saluran rumah (SR).

Proses diatas merupakan proses untuk pelanggan-pelanggan listrik tegangan rendah. Adapun proses untuk pelanggan-pelanggan tegangan menengah, listrik dari Gardu Induk (GI) disalurkan ke kubikel pelanggan. Lalu pada kubikel tersebut listrik diolah sedemikian rupa agar menjadi tegangan rendah yang dapat digunakan untuk perlatan-peralatan listrik. Pelanggan tegangan menengah ini biasanya merupakan pabrik-pabrik dan memiliki prioritas khusus dalam hal kehandalan.

2.2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem Distribusi merupakan salah satu bagian dari sistem tenaga listrik. sistem distribusi berfungsi untuk menyalurkan listrik ke konsumen dengan proses yang panjang yang dimulai dari Gardu Distribusi. Sistem Distribusi

bermula dari PMT *Incoming* di Gardu Induk sampai dengan alat penghitung dan pembatas di instalasi konsumen. Untuk menyalurkan listrik ke konsumen membutuhkan saluran distribusi yang menghantarkan listrik dari Gardu Induk ke pusat beban (konsumen).

Setelah listrik masuk ke Gardu Induk (GI) Distribusi, listrik akan masuk ke Transformator Tenaga jenis *step down* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan tinggi atau ekstra tinggi menjadi tegangan menengah (20/11.5 KV). Kemudian listrik akan dialirkan ke transformator distribusi untuk diturunkan kembali menjadi tegangan rendah (380/220 V). Setelah diturunkan menjadi tegangan rendah lalu disalurkan ke konsumen melalui jaringan tegangan rendah (JTR) kemudian disalurkan ke pembatas instalasi rumah pelanggan melalui Saluran Rumah (SR).

Saluran distribusi dari Gardu Induk Distribusi disalurkan dengan 3 buah kabel konduktor R, S dan T. Tegangan yang diterukur dari tiga konduktor tersebut sebesar 20KV. Tiga konduktor tersebut merupakan jenis konduktor AAAC/AAACS dengan diameter sebesar 240 mm². Jarak antara tiang listrik satu dengan lainnya berjarak sekitar 40-50 m.

Listrik dari Gardu Induk disalurkan ke pelanggan menggunakan jaringan distribusi tegangan menengah jaringan ini dapat disebut juga dengan jaringan distribusi primer. Penyaluran menggunakan kabel Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM), Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) atau Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah (SKTM). Sebelum di salurkan ke pelanggan listrik akan diturunkan tegangannya menjadi tegangan rendah menggunakan transformator distribusi. Lalu setelah itu baru disalurkan ke pelanggan untuk digunakan. Tetapi untuk pelanggan JTM, dari jaringan distribusi akan di salurkan ke kubikel pelanggan dan tegangan diturunkan menjadi tegangan rendah.

Dilihat dari tegangan, sistem distribusi pada saat ini dibedakan menjadi 2 macam yaitu:

a. Distribusi Primer

Distribusi primer memiliki tegangan kerja sebesar 20/11.5 KV. Distribusi primer, tegangan disuplai dari sisi sekunder transformator daya pada Gardu Induk. bentuk fisik dilapangan berupa 3 buah kabel konduktor fase R, S dan T. Saluran distribusi primer memiliki 3 jenis kontruksi, yaitu:

- 1) Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM), penggunaan penghantar telanjang jenis A3C yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton.



Gambar 2.2. Kabel A3C

- 2) Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM), penggunaan penghantar berisolasi jenis A3CS yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton.



Gambar 2.3. Kabel A3CS

- 3) Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah (SKTM), Saluran kabel tegangan menengah yang kabel di tanam pada bawah tanah



Gambar 2.4. Kabel SKTM

b. Distribusi sekunder

Distribusi sekunder memiliki tegangan kerja sebesar 380/220 V. Tegangan sekunder bersumber dari Transformatro Distribusi yang menurunkan tegangan dari tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Lalu disalurkan ke jaringan tegangan rendah (JTR). Kemudian di salurkan ke pembatas pelanggan melalui saluran rumah (SR).

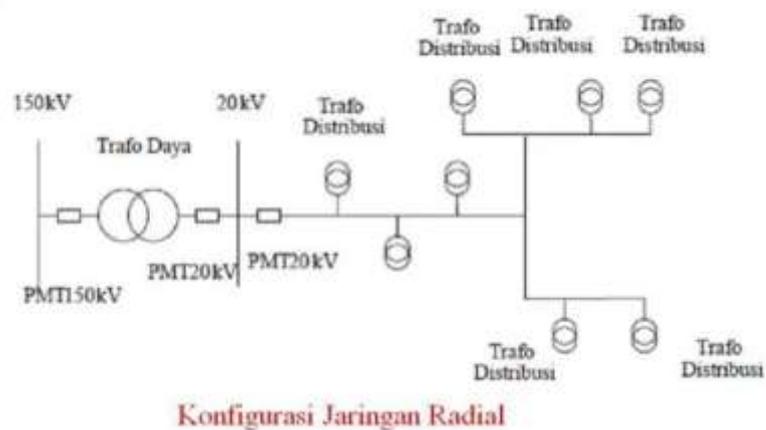
Pada saluran distribusi primer, penyaluran listrik ke beban memiliki jarak yang cukup jauh. Dalam penyaluran listrik tersebut tentu terdapat rugi-rugi daya yang hilang dalam penyaluran serta mempertimbangkan kehandalan listrik, untuk itu listrik harus disalurkan dengan struktur jaringan yang tepat. PLN memiliki berbagai struktur jaringan.

- 1) Jaringan distribusi radial.
- 2) Jaringan distribusi ring (*loop*), dengan model: bentuk lingkaran terbuka dan bentuk lingkaran tertutup.
- 3) Jaringan distribusi jaring-jaring (*network*).
- 4) Jaringan distribusi spindel.

5) Saluran radial interkoneksi.

Struktur jaringan yang paling banyak digunakan di Indonesia terdapat tiga jenis struktur. Struktur-struktur jaringan memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pemilihan struktur jaringan di lapangan tergantung pada kondisi wilayahnya, Jenis-jenis struktur jaringan di Indonesia sebagai berikut

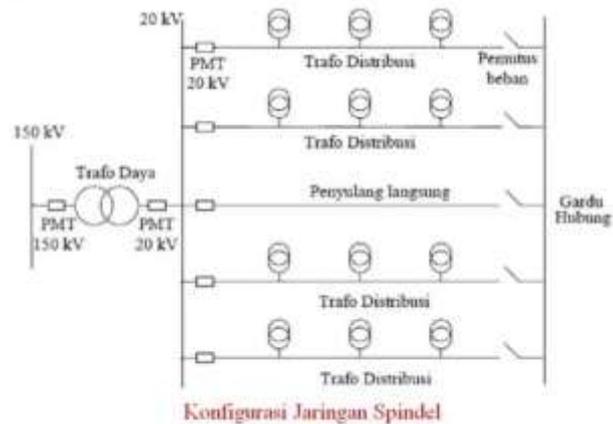
a. Struktur Jaringan Radial



Gambar 2.5. Struktur Jaringan Radial

Jaringan radial memiliki struktur jaringan yang sederhana dan biaya konstruksi lebih murah dibanding struktur jaringan lain. Jaringan radial memiliki satu jalur utama yang menyuplai trafo distribusi. Sehingga saat terjadi gangguan pada jalur utama maka seluruh transformator akan padam. Dan pada gardu yang paling ujung akan terjadi drop tegangan. Sehingga jika dilihat dari sisi kehandalan struktur jaringan ini lebih rendah dari struktur lain

b. Struktur Jaringan Spindle



Gambar 2.6. Konfigurasi Jaringan Spindle

Struktur jaringan spindle merupakan gabungan dari jaringan radial dan jaringan ring. Struktur jaringan distribusi spindle memiliki satu penyulang utama dan beberapa penyulang cadangan. Struktur jaringan spindle akan berakhir pada Gardu Hubung.

c. Struktur Jaringan Loop



Gambar 2.7. Konfigurasi Jaringan Loop

Struktur jaringan loop merupakan gabungan dari 2 struktur jaringan radial. Jaringan loop memiliki keuntungan yaitu memiliki pemasokan sumber dari beberapa penyulang sehingga bila suatu penyulang memiliki gangguan dan harus padam total, beban pada penyulang tersebut dapat dilimpahkan ke penyulang lain agar daerah padam berkurang.

2.2.3. Gangguan Pada Sistem Distribusi

Sistem distribusi harus mengedepankan kehandalan dalam pendistribusian ke pelanggan. Menjaga kehandalan distribusi cukup sulit karena sering terdapat faktor yang mempengaruhi kehandalan salah satunya gangguan. Gangguan dapat terjadi pada sistem atau peralatan distribusi.. penyebab gangguan dapat dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu:

- a. Gangguan intern, yaitu gangguan yang disebabkan oleh sistem sendiri. Contohnya hubung singkat, kerusakan pada alat, kegagalan isolasi, switching dan lain-lain
- b. Gangguan extern, yaitu gangguan yang disebabkan oleh alam, bukan sistem. Contoh, kabel putus yang disebabkan oleh angin, badai, petir, hubung singkat dengan pepohonan dan lain-lain.
- c. Gangguan akibat manusia, gangguan yang disebabkan oleh kecerobohan atau kelalaian operator, ketidaktepatan, dan tidak mengedepankan peraturan pengamanannya dan lain-lain.

Bila ditinjau dari segi waktu gangguan yang dialami. Gangguan memiliki dua macam yaitu gangguan temporer dan gangguan permanen yang masing-masing memiliki cara mengatasi gangguan.

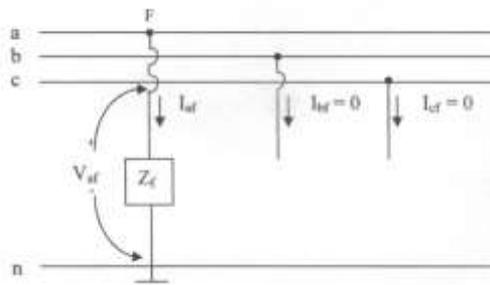
- a. Gangguan temporer, adalah gangguan yang cara mengatasi gangguan dengan cara memutuskan daerah yang terkena gangguan dari sumber tegangan. Jika gangguan temporer masih ada setelah dilepas dari sumber maka gangguan temporer ini akan berubah menjadi gangguan permanen
- b. Gangguan permanen, adalah gangguan yang mengharuskan melakukan tindakan perbaikan untuk mengatasi gangguan yang terjadi

Pada sistem distribusi, terdapat macam-macam Gangguan dalam sistem distribusi listrik. Macam-macam gangguan adalah:

a. Gangguan hubung singkat

Gangguan hubung singkat sering terjadi pada sistem distribusi. Penyebab dari hubung singkat bermacam-macam. Bisa karena kerusakan peralatan atau karena cuaca yang buruk. Gangguan hubung singkat bisa bersifat temporer dan permanen. Hubung singkat temporer seperti flashover akibat petir, flashover akibat bersentuhan dengan pohon, hubung singkat akibat hembusan angin yang kencang. Hubung singkat permanen seperti hubung singkat pada kabel, hubung singkat belitan transformator, hubung singkat akibat kegagalan isolasi. Hubung singkat ada tiga macam jenis, yaitu hubung singkat satu fase, hubung singkat dua fase, dan hubung singkat tiga fase.

1) Hubung singkat fase tunggal



Gambar 2.8. Hubung singkat fase tunggal

Hubung singkat fase tunggal atau hubung singkat fase dengan dengan tanah. Terjadi akibat adanya impedansi gangguan antara penghantar fase dan tanah. Biasanya mengakibatkan *flashover* pada isolator jika gangguan permanen dan dapat menimbulkan beban antar fase tidak seimbang. Penyebab yang sering terjadi akibat dari faktor cuaca (petir, angin dll) dan faktor lingkungan (pohon, hewan dan manusia). Sifat dari gangguan fase tunggal-tanah adalah temporer dan bisa juga permanen. Temporer atau sementara tidak akan menimbulkan kerusakan

jaringan pada daerah gangguan. Bersifat permanen jika terjadi kerusakan pada jaringan. Menghitung arus gangguan, dapat dicari dengan rumus.

$$I = \frac{3E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f)}$$

Keterangan:

E = tegangan kerja (v)

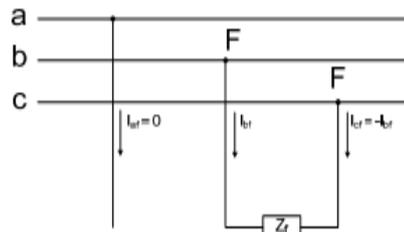
Z_1 = tegangan urutan positif rangkaian (Ω)

Z_2 = tegangan urutan negatif rangkaian (Ω)

Z_0 = tegangan urutan nol rangkaian (Ω)

Z_f = impedansi gangguan (Ω)

2) Hubung singkat dua fase



Gambar 2.9. Hubung singkat dua fase

Hubung singkat dua fase merupakan hubung singkat yang terjadi antara satu penghantar dengan penghantar lain. Akibat dari hubung singkat dua fase adalah arus lebih (*over current*) dan arus tidak seimbang. Gangguan hubung singkat dua fase terjadi akibat adanya angin yang berhembus kencang. Arus hubung singkat dua fase yang terjadi dapat di hitung dengan rumus.

$$I = \frac{E\sqrt{3}}{(Z_1 + Z_2 + Z_f)}$$

Keterangan:

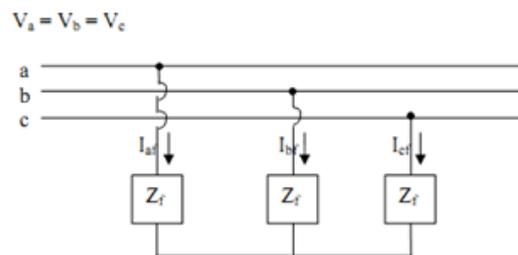
E = tegangan fase kerja (v)

$Z_1 = \text{tegangan urutan positif rangkaian } (\Omega)$

$Z_2 = \text{tegangan urutan negatif rangkaian } (\Omega)$

$Z_f = \text{impedansi gangguan } (\Omega)$

3) Hubung singkat tiga fase



Gambar 2.10. Hubung singkat tiga fase

Hubung singkat tiga fase terjadi karena ketiga penghantar fase R, S, dan T bersentuhan. Gangguan hubung singkat 3 fase terjadi akibat adanya pohon tumbang atau hembusan angin kencang. Mencari besar arus hubung singkat tiga fase dihitung dengan rumus.

$$I = \frac{E}{(Z_1 + Z_F)}$$

Keterangan:

$E = \text{tegangan kerja (v)}$

$Z_1 = \text{tegangan urutan positif rangkaian } (\Omega)$

$Z_f = \text{impedansi gangguan } (\Omega)$

b. Gangguan tegangan lebih

Gangguan tegangan lebih merupakan gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi. Gangguan tegangan lebih dapat disebabkan oleh cuaca atau dari sistem itu sendiri. Penyebab gangguan lebih dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu:

1) Tegangan lebih *power frekuensi*

Terjadi akibat adanya kesalahan sistem pada pengaturan tap transformator distribusi. Jika tegangan yang diajarkan oleh PLN sebesar 220 volt. Pada gangguan lebih ini tegangan bisa melebihi 220 volt. Sehingga tidak bagus untuk peralatan listrik atau bahkan dapat merusak peralatan.

2) Tegangan lebih surja.

Tegangan lebih surja dapat dibagi menjadi menjadi dua macam lagi yaitu, surja hubung dan surja petir. Surja hubung disebabkan adanya switching yang tidak sempurna pada sistem. Saat switching tidak sempurna akan menyebabkan tegangan menjadi besar. Kedua, surja petir, surja petir disebabkan oleh petir yang menyambar pada jaringan. Saat petir menyambar pada jaringan akan terjadi lonjakan tegangan yang sangat besar sekali. Sehingga terjadi tegangan lebih.

c. Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih adalah gangguan yang disebabkan karena pembebanan pada sistem distribusi melebihi kapasitas sistem. Gangguan beban lebih terjadi karena pertumbuhan beban yang tidak terpantau secara berkala. Sehingga pembebanan sistem melebihi kapasitas.

Hal untuk mencegah gangguan lebih, harus dilakukan pengukuran beban secara berkala. Dengan adanya pengukuran, pertumbuhan pada sistem dapat terpantau dengan jelas. Sehingga distribusi tenaga listrik dapat lebih handal.

2.2.4. Sistem Proteksi

Sistem proteksi berfungsi untuk mencegah dan mengamankan jaringan distribusi dari semua gangguan yang dapat merusak peralatan-peralatan utama distribusi. Adapun sistem proteksi memiliki beberapa persyaratan, diantaranya yaitu:

- a. Sensitifitas (*Sensitivity*), Fungsi dari peralatan proteksi adalah untuk mengamankan suatu jaringan dan alat sistem tenaga listrik dari gangguan. Peralatan proteksi harus memiliki sensitifitas yang bagus sehingga jika

terdapat gangguan peralatan proteksi dapat langsung berkerja memproteksi sistem. Beberapa contoh peralatan proteksi pada sistem distribusi adalah Recloser dan FCO.

- b. Ketelitian (*Sselectivity*), Selektifitas atau kecermatan sangat dibutuhkan dalam sistem pengaman. Selektifitas sangat diperlukan agar sistem pengaman tidak salah dalam mengambil keputusan saat terjadi gangguan.
- c. Keandalan (*Realibility*), Sistem pengaman berkerja saat terjadi gangguan dan dalam keadaan normal sistem pengaman tidak boleh berkerja. Untuk itu sistem pengaman harus memiliki keandalan agar sistem berkerja sebagaimana semestinya. Keandalan suatu sistem tergantung pada desain, pengerjaan dan perawatan.
- d. Kecepatan (*Speed*), Respon waktu sistem pengaman saat terjadi gangguan sangat diperlukan karena semakin cepat waktu respon suatu alat pengaman pada saat terjadi gangguan dapat memperkecil kerusakan yang ditimbulkan dan mempersempit daerah yang terjadi gangguan.

Pada sistem distirbusi terdapat berbagai peralatan proteksi. Peralatan-peralatan tersebut akan saling berkoordinasi untuk menjaga kehandalan jaringan dari bermacam-macam gangguan. Peralatan proteksi pada sistem distribusi terdiri dari:

- a. Pemutus Tenaga (PMT), Pemutus Tenaga (PMT) terletak pada Gardu Induk Distribusi. PMT berfungsi untuk memutus rangkaian listrik yang berhubungan antara sisi beban dan sumber yang berkerja secara otomatis dan manual. Memutuskan secara otomastis ketika mengamankan gangguan dan memutuskan secara manual saat perawatan atau perbaikan jaringan. PMT akan melindungi daerah pada Zona 1. Jadi saat terjadi gangguan pada Zona 1 pada jaringan tiga fase. PMT yang akan memutus jaringan listrik. PMT sebagai peralatan proteksi terakhir saat ada gangguan. Jika PMT trip maka satu penyulang tersebut akan padam. Dan hal tersebut sangat

dihindari oleh PLN. Untuk itu PLN selalu mefokuskan inspeksi di jaringan tiga fase khususnya di Zona 1.

- b. Recloser, Recloser atau pemutus balik otomatis adalah salah satu pengaman yang digunakan pada sistem distribusi. Recloser terdiri dari pemutus tenaga yang dilengkapi dengan kotak kontrol elektronik. Pada kotak kontrol diatur pengaturan Recloser. Kerja Recloser dijalankan secara otomatis guna mengamankan suatu sistem dari arus lebih yang diakibatkan adanya arus gangguan.

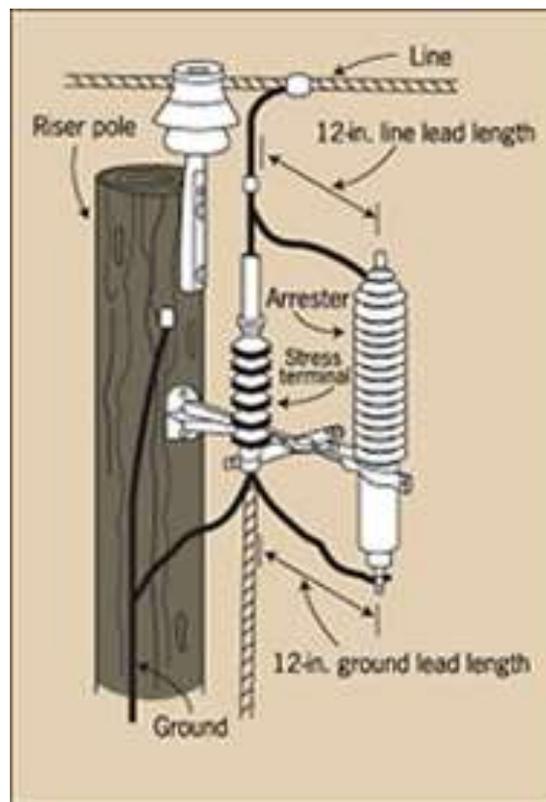


Gambar 2.11. Recloser K1-191

Selain sebagai pengaman Recloser digunakan juga sebagai pembatas daerah zona. Pembatas zona ini dimaksud agar jika terdapat gangguan disuatu daerah tertentu dan diperlukan pemadaman untuk perbaikan, daerah padam dapat diminimalisir.

- c. *Fuse Cut Out (FCO) / Pelebur*, FCO dipasang pada jaringan cabang atau pada transformator distribusi yang tidak berpengaman sendiri yang fungsinya untuk mengamankan cabang jaringan yang mengalami gangguan permanen dan transformator. Menurut cara kerja FCO terdapat dua jenis yaitu:

- 1) Pelebur jenis letupan (*current limiting fuse*), tipe FCO ini mempunyai tiga macam lagi, yaitu Tipe K (speed ratio 6-10), tipe H (speed ratio 10-12), Tipe T (tahan terhadap tegangan surja)
 - 2) Pelebur jenis pembatasan arus (*current limiting fuse*), pelebur yang berkerja dengan membatasi arus yang lewat ke suatu nilai yang cukup rendah dari nilai puncak arus perkiraannya.
- d. *Lightning Arrester (LA)*, *Lightning Arrester* diletakan pada jaringan distribusi bekerjanya menyalurkan muatan positif dari bumi yang disalurkan diudara untuk diumpankan agar disambar petir, sehingga tidak sampai ke bumi.



Gambar 2.12. *Lignting Arrester*

- e. *Ground Steel Wire (GSW)*, GSW merupakan suatu alat proteksi sistem distribusi yang berfungsi untuk meindungi konduktor fasa dari sambaran petir. Kabel GSW dipasang diatas konduktor fasa dengan sudut

perlindungan sekecil mungkin. Petir yang menyambar dianggap menyambar dari atas konduktor sehingga akan terkena GSW.



Gambar 2.13. Ground Steel Wire

- f. Relay Pada sistem distribusi relay ada dua macam relay. Yaitu relay arus lebih/*overcurrent relay* (OCR) dan relay gangguan fase-tanah/*Ground Fault Relay* (GFR). Dua relay OCR dan GFR ada pada Pemutus Tenaga (PMT) dan Pemutus Balik Otomatis (PBO).

2.2.5. Impedansi Jaringan

a. Reaktansi Sumber

Reaktansi sumber merupakan nilai reaktansi pada sisi 150 kV yang mencakup reaktansi sumber pembangkit. Reaktansi trafo tenaga di pusat listrik dan reaktansi transmisi. Selanjutnya untuk mengetahui reaktansi sumber pada sisi 20 kV, maka harus menghitung terlebih dahulu reaktansi sumber pada sisi 150 kV yang kemudian dikonversikan sisi 20 kV dengan menggunakan rumus.

$$X_{SC1} = \frac{kV_1^2}{MVA_{sc}} \quad (2.1)$$

Keterangan:

X_{SC1} = Reaktansi di sumber 150kV (Ω)

kV_1 = Tegangan sisi primer transformator (v)

MVA_{sc} = Daya hubung singkat di sumber 150kV (Ω)

Mengkonversi impedansi yang terletak pada sisi 150 kV ke sisi 20 kV dengan menggunakan rumus 2.2.

$$X_{SC2} = \frac{kV2^2}{kV1^2} X_{SC1} \quad (2.2)$$

Keterangan:

X_{SC1} = Reaktansi di sumber 150kV (Ω)

X_{SC2} = Reaktansi di sumber 20kV (Ω)

kV_1 = Tegangan sisi primer transformator (v)

kV_2 = Tegangan sisi sekunder transformator (v)

b. Reaktansi Transformator Tenaga

Reaktansi transformator tenaga digunakan untuk mencari reaktansi urutan positif dan negatif. Mencari reaktansi positif/negatif dan nol menggunakan rumus 2.3 dan 2.4.

$$X_{T1/T2} = \frac{kV1^2}{MVA} \%reaktansi \ transformator \quad (2.3)$$

Keterangan:

$X_{T1/T2}$ = Reaktansi urutan positif/negatif (Ω)

kV = Tegangan kerja (v)

MVA = Kapasitas daya trafo (MVA)

$\%reaktansitrafo$ = presentasi rektansi transformator (%)

Sedangkan untuk mencari reaktansi transformator urutan nol dapat dihitung menggunakan rumus 2.4. Pada nameplate transformator 1 GI Wonosari terdapat belitan Delta, maka reaktansi urutan nol sebagai berikut.

$$X_{T0} = 3 \times X_{T1/T2} \quad (2.4)$$

Keterangan:

X_{T0} = Reaktansi urutan nol (Ω)

$X_{T1/T2}$ = Reaktansi urutan positif/negatif (Ω)

c. Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang didapat dari rumus 2.4.

$$Z_{\text{penyulang}} = (R + jX)L \quad (2.5)$$

Keterangan:

$Z_{\text{penyulang}}$ = Impedansi penyulang (Ω)

R = resistansi penghantar (Ω)

jX = reaktansi penghantar (Ω)

L = panjang penghantar (kms)

Impedansi penyulang bergantung pada besar impedansi tiap kilometer panjang penyulang. Besar nilai ditentukan dari jenis kawat dan diameter kawat. Standar nilai impedansi untuk jenis kawat A2C dan A3C seperti tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tabel Impedansi Penampang

Penampang nominal (mm ²)	Jari-jari (mm)	Urut	GMR (mm)	Impedans urutan positif (Ω/km)	Impedans urutan nol (Ω/km)
16	2,2563	7	1,6380	2,0161+j0,4036	2,1641+j1,6911
25	2,8203	7	2,0475	1,2903+j0,3895	1,4384+j1,6770
35	3,3371	7	2,4227	0,9217+j0,3790	1,0693+j1,6665
50	3,9886	7	2,8957	0,6452+j0,3678	0,7932+j1,6553
70	4,7193	7	3,4262	0,4608+j0,3572	0,6088+j1,6447
95	5,4979	19	4,1674	0,3396+j0,3449	0,4876+j1,6324
120	6,1791	19	4,6837	0,2688+j0,3376	0,4168+j1,6251
150	6,9084	19	5,2365	0,2126+j0,3305	0,3631+j1,6180
185	7,6722	19	5,8155	0,1744+j0,3239	0,3224+j1,6114
240	8,7386	19	6,6238	0,1344+j0,3158	0,2824+j1,6033

(Sumber: SPLN 64:1985)

d. Impedansi Ekuivalen

Nilai impedansi ekuivalen urutan positif (Z_{1eq}) dan negative (Z_{2eq}) dinyatakan dalam rumus 2.5.

$$Z_{1eq/2eq} = Z_{SC2} + X_T + Z_{penyulang} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$Z_{1eq/2eq}$ = Impedansi penyulang urutan positif/negatif (Ω)

X_{SC2} = Reaktansi di sumber 20kV (Ω)

X_T = Reaktansi transformator (Ω)

$Z_{eq\ penyulang}$ = Impedansi ekuivalen penyulang (Ω)

Menggunakan tabel 2.1. dan data yang diperoleh, digunakan untuk menghitung Impedansi ekuivalen urutan nol (Z_{0eq}). Menghitung menggunakan rumus 2.7.

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

Keterangan :

Z_{0eq} = Impedansi ekuivalen urutan nol (Ω)

X_{T0} = Reaktansi transformator urutan nol (Ω)

R_n = Resistansi netral(Ω)

$Z_{0eq\ penyulang}$ = Impedansi ekuivalen penyulang (Ω)

2.2.6. Fuse Cut Out (FCO) dan Fuselink



Gambar 2.14. Fuse Cut Out (FCO)

Fuse adalah peralatan pemutus dengan meleburkan. Fuse disesuaikan dengan ukuran arusnya, bila arus melebihi nilai maksimum suatu fuse maka akan memutuskan dalam waktu tertentu. *Fuse Cut Out* (FCO) selain digunakan sebagai pengaman jaringan listrik, digunakan juga untuk pengaman Transformator. FCO berupa sehelai kawat yang memiliki kapasitas arus yang disebut *fuselink*. Saat pada jaringan distribusi terjadi sebuah gangguan di dekat transformator Arus gangguan akan melewati transformator. Saat arus gangguan melewati transformator pasti akan merusak bagian penting transformator. Oleh karena itu dipasang FCO pada transformator untuk mengamankan arus gangguan yang akan masuk ke transformator. Nilai *fuselink* FCO dapat dihitung dengan cara menghitung sesuai dengan kapasitas transformator yang ada pada jaringan.

Saat arus gangguan yang bernilai lebih besar dari arus maksimum yang dapat dilalui pada kawat. FCO akan berkerja. Jika arus gangguan melebihi arus

maksimum FCO, kawat akan melebur dan memutus. Sehingga arus gangguan tidak mencapai transformator dan transformator akan aman. FCO dipasang pada tegangan menengah 11.547 kV.

FCO merupakan peralatan proteksi terlemah dalam sistem distribusi. FCO hanya berupa sehelai kawat yang memiliki arus maksimal untuk dapat dilewati kawat. Jika arus melebihi arus maksimal maka kawat tersebut akan melebur. Faktor lumer yang rendah dan memiliki daya hantar (*conductivity*) yang tinggi merupakan dasar pemilihan kawat yang digunakan.

Faktor lumer dipengaruhi oleh suhu bahan tersebut. Bahan-bahan yang biasa digunakan untuk FCO adalah kawat perak, tembaga, seng, timbel, atau campuran dari beberapa bahan tersebut. Pada umumnya bahan kawat yang sering digunakann adalah jenis kawat logam perak karena logam perak memiliki titik lebur dan resistansi spesifik paling renddadh dari pada jenis kawat lain. Kawat tersebut dipasang pada sebuah tabung jenis porselin dan kawat tersebut dipasang pada jaringan sehingga arus mengalir melalui kawat.

Jika arus beban melebihi batas arus maksimum FCO maka, kawat akan melebur/memutus dalam tabung porselin. FCO akan jatuh menggantung pada FCO *holder*. Pemilihan pelebur sebagai pengaman saluran distribusi tegangan menengah harus didasarkan atas faktor-faktor seabgai berikut:

- a. Kemampuan pelebur terhadap arus beban maksimum yang terus menerus, yang mencakupi arus beban normal, beban lebih, harmonis tetap dan perkiraan cadangan untuk pertumbuhan beban yang akan datang
- b. Koordinasi yang sebaik-baiknya dengan alat pengaman yang lain (PMT, PBO, dan Pelebur), baik yang berada disisi hulu (sumber) maupun disisi hilir bebannya.
- c. Kemampuann pemutusan dari pelebur, khususnya bagi pelebur jenis letupan yang dipasang dekat GI/sumber daya.
- d. Batas ketahanan penghantar terhadap arus singkat.

Jadi pelebur yang dipilih haruslah sekaligus tahan terhadap arus beban, dapat dikoordinasikan secara baik dengan alat pengaman yang lain, mempunyai kemampuan pemutusan terhadap arus hubung singkat yang mungkin terjadi setempat dan dapat melindungi penghantar yang diamankan dari kerusakan akibat arus lebih. (SPLN 64:1985).

2.2.7. Perhitungan *Fuselink*

Untuk memproteksi bagian cabang salah satu pertimbangan dalam pemilihan arus pengenal *fuselink*. Arus pengenal berfungsi untuk menentukan besar arus beban maksimum yang dapat mengalir pada saluran cabang. Sehingga saat arus maksimum mengalir *fuselink* tidak melebur atau putus. Untuk menentukan rating arus pengenal *fuselink* yang tepat dapat memperhatikan hal-hal berikut ini:

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

Pemilihan *fuselink* yang baik untuk memproteksi daerah percabangan, pertama harus mengetahui arus pengenal (*Incrust current*) pada sisi primer atau sekunder. Arus pengenal dicari dengan menghitung jumlah Transformator dikali daya pengenal Transformator dibagi tegangan pengenal sisi primer atau sekunder. Dapat dihitung dengan rumus.

$$I_n = \frac{S}{v\sqrt{3}} A \quad (2.8)$$

Keterangan

I_n = arus pengenal (A)

S = beban total trafo (kVA)

v = tegangan kerja (kV)

Setelah mengetahui arus pengenal (*Incrust current*), maka dapat dicari besar *fuselink* yang tepat untuk memproteksi menggunakan rumus.

$$\text{Nilai fuselink} = 1,3 \times I_n \quad (2.9)$$

Selain mencari nilai *fuselink* secara manual, penggunaan *fuselink* yang tepat dapat membaca table data buku PLN. Penggunaan *fuselink* yang tepat tidak akan beroperasi (melebur) saat terjadi arus gangguan sesaat disebelah hilir penyulang.

Tabel 2.2. Arus Pengenal *Fuselink*

Trafo distribusi		Pelebur / tipe**) Arus pengenal (A)		Ratio pelebur I_{nom} pelebur
Daya Pengenal	Arus pengenal	Minimum	Maksimum	Inom trafo
Fasa tunggal, $\frac{20kV}{\sqrt{3}}$				
16	1,3856	2 H	2 H	1,44
25	2,1651	3,15 H	3,15 H	1,45
Fasa tiga, 20 kV				
50	1,4434	2 H	2 H	1,38
10	2,8867	5 H	6,3 K ; 6,3	1,73; 2,18
0	4,6188	6,3 H	T	1,36 ; 1,73
16	5,7735	6,3 H	8 K ; 8 T	1,091 ; 1,73
0	7,2169	8 T	10 K ; 10	1,10 ; 1,73
20	9,0933	10 T	T	1,09 ; 1,37
0	11,5470	12,5 T	12,5 K ;	1,08 ; 1,38
25	14,4337	16 T	12,5 T	1,10 ; 1,38

(Sumber: SPLN 64:1985)

2.2.8. Relay

Relay merupakan komponen inti dari recloser. Relay yang bertugas untuk memutuskan dan menghubungkan aliran listrik sesuai dengan setingan recloser. Rele/Relay terdapat dalam kotak kontrol elektronik recloser. Setingan recloser di atur pada kotak kontrol tersebut.

Prinsip kerja dari relay saat kondisi normal beban seimbang. I_r, I_s, I_t sama besar. Maka pada kawat netral tidak timbul arus dan relay hubung tanah tidak teraliri arus. Bila terjadi ketidak seimbangan arus atau terjadi gangguan hubung

singkat ke tanah, maka timbul arus urutan nol pada kawat netral. Maka relay hubung tanah akan bekerja.

Jaringan distribusi tegangan menengah terdapat dua jenis relay. Fungsi kedua relay tersebut berbeda-beda. Relay tersebut adalah:

a. *Overcurrent Relay/Relay Arus Lebih (OCR)*

Relay arus lebih akan berkerja saat terjadi arus yang berlebih atau lebih dari settingan awal. Relay akan berkerja ketika arus yang mengalir melebihi I_{set} (Nilai arus settingan awal). Terdapat beberapa macam karakteristik dari relay OCR, yaitu:

- 1) Rele Arus Lebih Sesaat (*instanneous relay*), Relay bekerja tanpa waktu tunda/*delay*, ketika arus yang mengalir melebihi nilai settingnya, relay akan bekerja dalam beberapa mili detik (10–20 ms). Relay arus lebih sesaat umumnya dikombinasikan dengan relay arus lebih dengan karakteristik lain atau tidak berkerja sendiri.
- 2) Relay Arus Lebih Tertentu (*defenite time relay*), Relay berkerja dengan memberikan perintah pada PMT (pemutus tenaga) di GI saat terjadi gangguan hubung singkat yang besarnya arus gangguan melampaui settingnya (I_{set}). Jangka waktu kerja relay mulai pick up sampai kerja relay diperpanjang dengan waktu tertentu tidak tergantung besarnya arus yang mengerjakan relay.
- 3) Relay Arus Waktu Terbalik (*inverse time*), Relay bekerja dengan waktu tunda/*delay* tergantung dari besarnya arus secara terbalik. Makin besar arus makin kecil waktu tunda/*delay*. Karakteristik relay arus waktu terbalik bermacam-macam, setiap pabrik dapat membuat karakteristik yang berbeda-beda. Karakteristik waktunya dibedakan dalam tiga kelompok yaitu standar *inverse*, *very inverse* dan *extreemely inverse*.

b. *Ground Fault Relay/Relay Gangguan ke Tanah (GFR)*

Relay yang berkerja untuk mengamankan sistem dari arus lebih yang diakibatkan adanya gangguan satu fasa ketanah. Jadi saat terjadi arus gangguan fase tunggal ke tanah, GFR akan berkerja untuk mengamankan jaringan.

2.2.9. Setting Relay

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa Relay terdapat dua jenis yang dipasang pada jaringan distribusi, yaitu *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR). *Setting* tiap relay hampir sama yaitu dengan mencari I_{set} primer, I_{set} sekunder, *Time Multiple Setting* (TMS).

a. Setting relay OCR dan GFR

Penggunaan setting relay OCR dan GFR pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga harus menghitung arus nominal transformator tenaga terlebih dahulu. Arus setting relay OCR dan GFR pada sisi primer dan sisi sekunder transformator tenaga dihitung dengan rumus.

$$I_{set}(prim) = 1.1 \times I_{nominal\ trafo} \quad (2.10)$$

Keterangan:

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

$$I_{nominal\ trafo} = \text{arus kerja nominal trafo (A)}$$

Nilai tersebut merupakan nilai setting arus primer, untuk mendapatkan nilai setting sekunder pada relay OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan rasio transformator arus (CT) yang terpasang pada transformator tenaga dengan rumus.

$$I_{set}(sek) = I_{set}(prim) \times \frac{1}{Ratio\ CT} \quad (2.11)$$

Keterangan:

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

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

$$Ratio\ CT = \text{perbandingan arus primer dengan arus sekunder}$$

b. Perhitungan TMS

Setelan *Time Multiple Setting* (TMS) menggunakan *Standard Invers* (SI). TMS dihitung mempergunakan rumus kurva waktu operasi, arus setting dan beras arus hubung singkat yang terjadi.

$$Tms = \frac{t_{op}[(\frac{I_{hs}}{I_{set}})^{0.02} - 1]}{0.14} \quad (2.12)$$

Keterangan:

Tms = *time multiple setting*

t_{op} = *waktu kerja (s)*

I_{hs} = *arus hubung singkat (A)*

I_{set} = *arus setting primer (A)*

2.2.9.4. Perhitungan Kerja Relay

Setelan waktu relai menggunakan *Standard Invers* (SI). Waktu kerja relay dihitung mempergunakan TMS, arus setting dan arus hubung singkat yang terjadi.

$$t_{op} = \frac{TMS \times 0.14}{(\frac{I_{hs}}{I_{set}})^{0.02} - 1} \quad (2.13)$$

Keterangan:

Tms = *time multiple setting*

t_{op} = *waktu kerja (s)*

I_{hs} = *arus hubung singkat (A)*

I_{set} = *arus setting primer (A)*

2.2.10. Koordinasi proteksi

Jaringan distribusi memiliki alat-alat proteksi jaringan guna untuk mengamankan jaringan dari gangguan-gangguan yang dapat membuat listrik menjadi padam. Jaringan yang sering terjadi gangguan ada di jaringan fasa

tunggal. Jaringan fasa tunggal memiliki alat proteksi di setiap percabangannya yaitu *Fuse Cut Out* (FCO).

FCO atau pelebur memiliki prinsip kerja meleburkan *fuselink* yang ada di batang FCO. Saat arus yang melewati FCO melebihi rating *fuselink* yang dipasang, maka *fuselink* akan melebur dan memutuskan aliran listrik. Akhirnya selongsong FCO akan menggantung. Akhirnya daerah aliran listrik setelah FCO tersebut akan padam. Penormalan jaringan dengan mengganti *fuselink* yang putus dengan yang baru dan selongsong FCO di pasang kembali.

Pemasangan *fuselink* harus tepat sesuai dengan arus maksimal arus beban yang lewat. Jika tidak maka saat terjadi gangguan arus gangguan akan langsung sampai ke Recloser. Jika gangguan yang terjadi adalah gangguan temporer maka Recloser akan berkerja *reclose* atau memutus sesuai dengan waktu *setting* kemudian akan menyala kembali secara otomatis. Dan jika gangguan tersebut merupakan gangguan permanen maka Recloser akan berkerja *trip*. Saat Recloser berkerja *trip*, maka daerah aliran listrik setelah Recloser akan padam. Penormalan jaringan yang dilakukan dengan cara mencari sumber gangguan dan mengganti bagian jaringan rusak jika diperlukan. Setelah itu Recloser dihidupkan kembali.

2.2.11. Analisis Menggunakan ETAP 12.6.

ETAP adalah kepanjangan dari *Electric Transient and Analysis Program*. ETAP merupakan suatu *software* (perangkat lunak) yang digunakan untuk sistem tenaga listrik. *Software* ETAP dapat bekerja dalam mensimulasikan tenaga listrik dengan keadaan *offline* dan keadaan *online* untuk pengelolaan data dan mengendalikan sistem secara *real – time*. ETAP dapat digunakan untuk menganalisis berbagai macam sistem ketenagaan listrik, seperti sistem pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi tenaga listrik, dan sistem distribusi tenaga listrik.

Pengaplikasian ETAP untuk menganalisis tenaga listrik, menggunakan diagram saluran tunggal (*single line diagram*) SLD. SLD merupakan notasi atau tanda yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa maupun

fasa tunggal. Notasi tersebut digunakan sebagai representasi umum saluran tiga fasa atau fasa tunggal yang terpisah. Hal tersebut untuk mempermudah pembacaan diagram maupun dalam Analisis rangkaian. Elemen elektrik pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar, konduktor dan lain-lain telah distandardisasi untuk diagram saluran tunggal (SLD).

Analisis tenaga listrik yang dapat dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP antara lain : Analisis Aliran Daya (*Load Flow Analysis*), Analisis Hubung Singkat (*Short Circuit Analysis*), Starting Motor, Analisis Arc Flash (*Arc Flash Analysis*), Analisis Harmonik Sistem Tenaga (*Harmonics Power System*), Analisis Kestabilan Transien (*Transient Stability Analysis*), serta *Protective Device Coordination*. Pada laporan ttugas akhir ini menggunakan dua pengujian yaitu *load flow analysis* dan *Star-Protective Device Coordination*.