

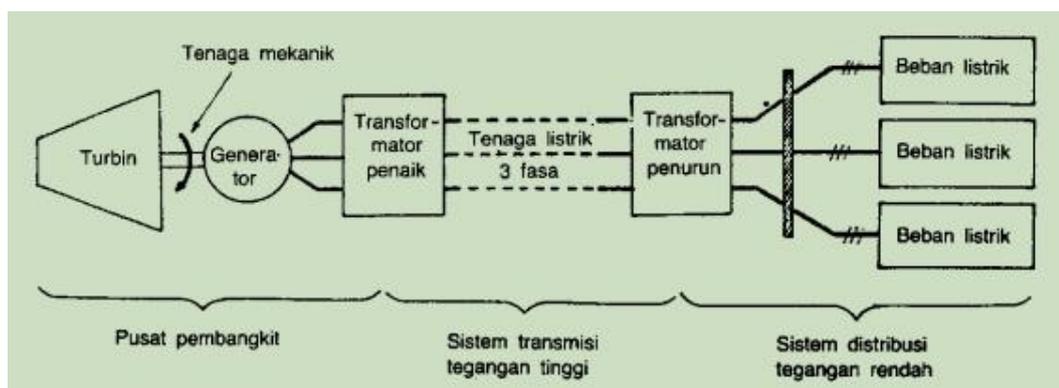
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik

Sistem jaringan tenaga listrik adalah penyaluran energi listrik dari pembangkit tenaga listrik (power station) hingga sampai kepada konsumen (pemakai) pada tingkat tegangan yang diperlukan. Sistem tenaga listrik ini terdiri dari unit pembangkit, unit transmisi dan unit distribusi.^[7]

Pada pusat pembangkit, sumber daya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi, dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanis yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Melalui transformator penaik tegangan (step-up transformator) energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban. Peningkatan tegangan dimaksudkan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah dan berarti mengurangi rugi panas (heat loss) I^2R yang menyertainya. Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan tersebut kembali diturunkan menjadi tegangan menengah, melalui transformator penurun tegangan (step-down transformator).



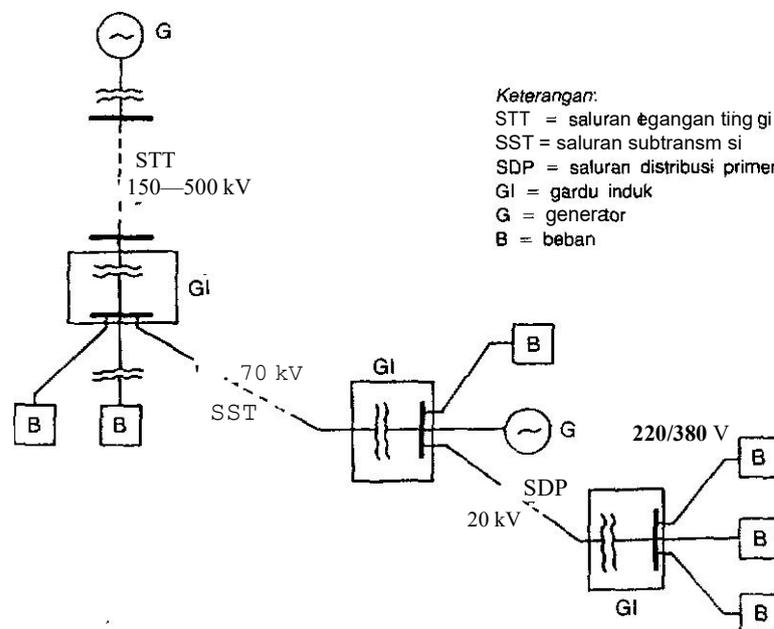
Gambar 2 1 Pola Sistem Tenaga Listrik.

Apabila saluran transmisi menyalurkan tenaga listrik bertegangan tinggi ke pusat-pusat beban dalam jumlah besar, maka saluran distribusi berfungsi membagikan tenaga listrik tersebut kepada pihak pemakai melalui saluran tegangan rendah. Generator sinkron di pusat pembangkit biasanya menghasilkan



tenaga listrik dengan tegangan antara 6—20 kV yang kemudian, dengan bantuan transformator, tegangan tersebut dinaikkan menjadi 150—500 kV. Saluran tegangan tinggi (STT) menyalurkan tenaga listrik menuju pusat penerima; di sini tegangan diturunkan menjadi tegangan subtransmisi 70 kV.

Pada gardu induk (GI), tenaga listrik yang diterima kemudian dilepaskan menuju trafo distribusi (TD) dalam bentuk tegangan menengah 20 kV. Melalui trafo distribusi yang tersebar di berbagai pusat- pusat beban, tegangan distribusi primer ini diturunkan menjadi tegangan rendah 220/380 V yang akhirnya diterima pihak pemakai.^[13]



Gambar 2.2 Sistem Distribusi Listrik.

2.2 Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi tenaga listrik adalah jaringan tenaga listrik yang memasok kelistrikan ke beban (pelanggan) mempergunakan tegangan menengah 20 kV dan tegangan rendah 220-380 V atau 231-400 V. Jaringan distribusi dengan tegangan menengah 20 kV disebut jaringan distribusi primer, dimana sumber kelistrikan nya diperoleh dari gardu induk atau Pusat listrik Tenaga Diesel. Jaringan distribusi dengan tegangan rendah 220/380 V atau 231-400 V disebut jaringan distribusi sekunder, dimana sumber kelistrikan nya diperoleh dari gardu distribusi (gardu beton, portal dan cantol).^[13]

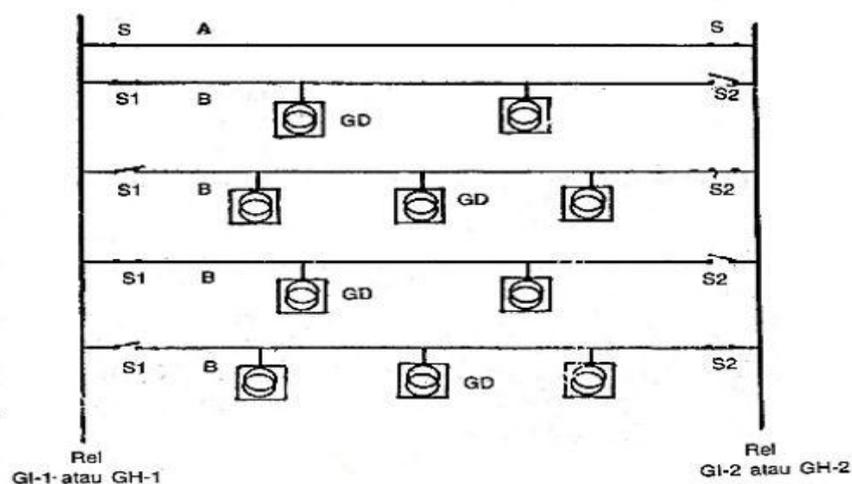


Adapun jenis distribusi primer yang digunakan adalah :

a. Sistem Spindel

Spindel ini menghubungkan rel dari satu GI (Gardu Induk) atau GH (Gardu hubung) dengan rel dari GI (Gardu Induk) atau GH (Gardu hubung) lain. Keistimewaannya adalah bahwa selain kabel-kabel, atau feeder, yang mengisi beberapa buah GD (Gardu distribusi), terdapat satu kabel yang tidak mendapat beban GD (Gardu distribusi). Kabel A ini selalu menghubungkan rel kedua GI (atau GH) itu. Sedangkan kabel- kabel B memperoleh pengisian dari salah satu GI (atau GH).

Bila mana salah satu kabel B atau salah satu GD (Gardu distribusi) terganggu, maka pengisian dapat dilakukan dengan sedemikian rupa, dari sisi I atau sisi II hingga dapat dihindari terjadinya suatu pemadaman, ataupun pemadaman terjadi secara minimal. Sistem ini memberikan keandalan operasi yang cukup tinggi dan investasi tambahan berupa kabel A yang relatif rendah. Apabila kabel A terganggu maka saklar S akan bekerja, dan sistem spindel ini sementara akan bekerja sebagai suatu sistem biasa.^[3]



Gambar 2.3 Sistem Spindel



2.3 Keandalan Sistem Distribusi ^[10]

Keandalan sistem penyaluran distribusi tenaga listrik tergantung pada model susunan saluran, pengaturan operasi dan pemeliharaan serta koordinasi peralatan pengaman. Tingkat keandalan kontinuitas penyaluran bagi konsumen tenaga listrik adalah beberapa lama padam yang terjadi dan berapa banyak waktu yang diperlukan untuk memulihkan penyaluran kembali tenaga listrik. Tingkat keandalan dalam pelayanan dapat dibedakan menjadi lima hal antara lain (SPLN 52-3, 1983:5):

Tingkat 1 : Dimungkinkan padam berjam-jam yaitu waktu yang diperlukan untuk mencari dan memperbaiki bagian yang rusak karena adanya gangguan.

Tingkat 2 : Padam beberapa jam yaitu waktu yang diperlukan untuk mengirim petugas ke lapangan, melokalisir gangguan dan melakukan manipulasi untuk dapat menghidupkan sementara dari arah atau saluran yang lain.

Tingkat 3 : Padam beberapa menit, manipulasi oleh petugas yang stand by di gardu atau dilakukan deteksi/pengukuran dan pelaksanaan manipulasi jarak jauh.

Tingkat 4 : Padam beberapa detik, pengaman dan manipulasi otomatis.

Tingkat 5 : Tanpa padam, dilengkapi instalasi cadangan terpisah dan otomatis.

Dengan Demikian dalam rangka menekan susut distribusi, Pengembangan jaringan distribusi baru harus mengacu pada SPLN 72 1987 yang menyatakan standar nilai maksimal susut saluran distribusi Jaringan Tegangan Menengah (JTM) yakni sebesar 2%.

Dengan kriteria susut distribusi:

$$\text{JTM} = 2,44 \%$$

$$\text{JTR} = 3,36 \%$$

$$\text{Trafo} = 1,40 \%$$

$$\text{SR} = 1,06 \%$$

Salah satu faktor yang mempengaruhi kualitas sistim kelistrikan adalah kondisi dari konstruksi pada jaringan distribusi tenaga listrik yang meliputi Jaringan Tegangan Menengah (JTM), Gardu Distribusi, Jaringan Tegangan Rendah (JTR) dan Sambungan Tenaga Listrik (Rumah / Pelayanan). Kualitas



sistem kelistrikan yang baik berdampak pada rendahnya susut distribusi.

2.4 Jenis-jenis Penghantar pada Jaringan ^[5]

Penghantar berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari pusat pembangkit atau gardu induk pada satu tempat ketempat lainnya. Karena dalam pendistribusian tenaga listrik akan terjadi rugi-rugi tegangan, besarnya rugi-rugi tergantung dari jenis penghantar, penampang penghantar dan panjang saluran yang digunakan. Untuk mengurangi rugi-rugi tegangan yang disebabkan oleh resistansi penghantar, perlu diperhatikan dalam pemilihan jenis penghantar sebagai penyaluran tenaga listrik.

Untuk pemilihan penghantar yang akan digunakan pada saluran transmisi maupun distribusi harus memperhatikan beberapa faktor antara lain:

1. Daya hantar dari penghantar
2. Besar/penampang penghantar
3. Resistansi penghantar per satuan panjang
4. Kuat tarik
5. Ekonomis

Bahan dasar yang digunakan untuk pembuatan penghantar adalah:

1. Tembaga
2. Aluminium
3. Campuran logam diatas dengan logam lain

Macam penghantar yang digunakan dalam sistem jaringan tegangan menengah antara lain:

- a. AAACS : *All Alluminium Alloy Conductor Shielded* yaitu penghantar AAAC yang berselubung polietilen ikat silang (XLPE). Penghantarnya berupa aluminium paduan yang dipilin bulat tidak dipadatkan. Isolasi kabel AAACS memiliki ketahanan isolasi sampai dengan 20 kV, sehingga penghantar jenis ini harus diperlakukan seperti halnya penghantar udara telanjang.
- b. AAAC : *All Alloy Alluminium Conductor* yaitu penghantar yang terbuat dari kawat-kawat aluminium yang dipilin, tidak berisolasi dan tidak berinti.
- c. NA2XSEYFGbY: Penghantar ini terbuat dari Aluminium yang berisolasi



XLPE, yang dilapisi pembungkus inti, dan diselubungi PVC. Dengan adanya pelindung kawat pita baja, kabel ini memungkinkan ditanam langsung ke dalam tanah tanpa pelindung tambahan.

- d. Cu : Penghantar yang terbuat dari tembaga ini berisolasi PVC dan XLPE .

2.5 Manuver Jaringan

Manuver atau memanipulasi jaringan distribusi adalah serangkaian kegiatan membuat modifikasi terhadap operasi normal dari jaringan akibat dari adanya gangguan atau pekerjaan jaringan yang membutuhkan pemadaman tenaga listrik, sehingga dapat mengurangi daerah pemadaman dan agar tetap tercapai kondisi penyaluran tenaga listrik yang semaksimal mungkin.

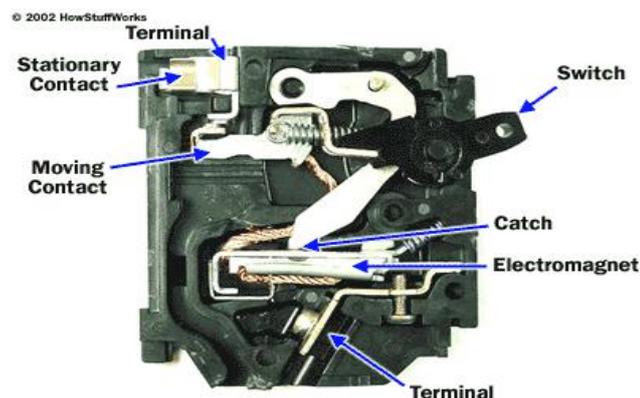
Kegiatan yang dilakukan dalam manuver jaringan antara lain:

- Memisahkan bagian-bagian jaringan yang semula terhubung dalam keadaan bertegangan ataupun tidak bertegangan dalam kondisi normalnya.
- Menghubungkan bagian-bagian jaringan yang semula terpisah dalam keadaan bertegangan ataupun tidak bertegangan dalam kondisi normalnya.

Tujuan dan manfaat dari manuver pasokan daya listrik adalah untuk mengurangi daerah pemadaman listrik pada saat terjadi gangguan atau pekerjaan jaringan.

2.6 Peralatan Pendukung Manuver ¹⁶⁾

a) Pemutus Tenaga (PMT)





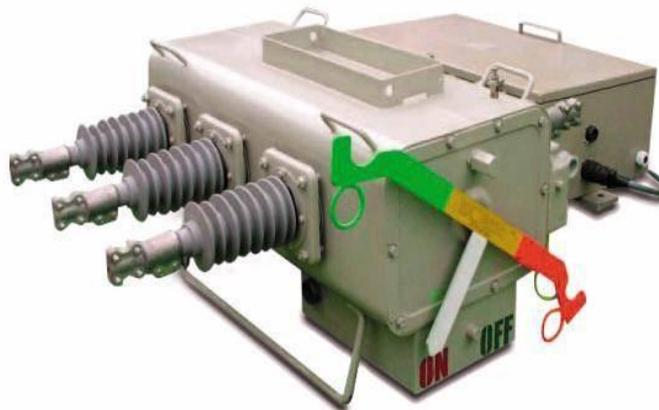
Gambar 2. 4 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) adalah suatu peralatan pemutus rangkaian listrik pada suatu sistem tenaga listrik, yang mampu untuk membuka dan menutup rangkaian listrik pada semua kondisi, termasuk arus hubung singkat, sesuai dengan ratingnya. Juga pada kondisi tegangan yang normal ataupun tidak normal. Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu PMT agar dapat melakukan hal-hal diatas, sebagai berikut :

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus-menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus tenaga itu sendiri.

PMT tegangan menengah ini biasanya dipasang pada Gardu Induk, pada kabel masuk ke busbar tegangan menengah (*Incoming Cubicle*) maupun pada setiap rel/busbar keluar (*Outgoing Cubicle*) yang menuju penyulang keluar dari Gardu Induk (yang menjadi kewenangan operator tegangan menengah adalah sisi *Incoming Cubicle*).

b) Load Break Switch (LBS)



Gambar 2. 5 Load Break Switch



Switch/Saklar pemutus beban (Load Break Switch, LBS) merupakan saklar atau pemutus arus tiga fase untuk penempatan di luar ruas pada tiang pancang, yang dikendalikan secara elektronik. Switch dengan penempatan di atas tiang pancang ini dioptimalkan melalui control jarak jauh dan skema otomatisasi. Sistem pengendalian elektroniknya ditempatkan pada sebuah kotak pengendali yang terbuat dari baja anti karat sehingga dapat digunakan dalam berbagai kondisi lingkungan.

c) Recloser



Gambar 2. 6 Recloser

Reclose artinya menutup kembali, dipergunakan untuk mengamankan peralatan listrik/jaringan SUTM bila terjadi gangguan hubung singkat temporer maupun permanen.

Gangguan temporer adalah gangguan yang waktunya singkat beberapa detik, antara lain :

1. Karena tiupan angin, terhubungnya konduktor satu dengan yang lainnya.
2. Karena petir.
3. Cabang-cabang pepohonan menyentuh konduktor karena tertiuap angin.
4. Binatang-binatang kecil melintasi konduktor bertegangan yang menyentuh permukaan grounding.

Penormalan recloser dapat dilakukan baik secara manual maupun



dengan sistem remote. Recloser juga berfungsi sebagai pembatas daerah yang padam akibat gangguan permanen atau dapat melokalisir daerah yang terganggu.

2.7 Resistansi Saluran^[12]

Resistansi adalah kemampuan tahanan pada suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang menyebabkan kerugian daya pada saluran transmisi maupun distribusi.

Resistansi efektif dari konduktor adalah :

$$R = \frac{\text{Power Loss dalam induktor}}{(I)^2} (\Omega) \dots \dots \dots (2.1)^{[12]}$$

Resistansi direct-current (R_{dc}) diberikan dengan formula :

$$R_{dc} = \frac{\rho \times l}{A} = (\Omega) \dots \dots \dots (2.2)^{[12]}$$

Dimana :

ρ = resistivity konduktor ($\Omega \cdot m$)

l = panjang konduktor (m)

A = *cross sectional area* (m^2)

T = konstanta yang ditentukan oleh grafik

Nilai resistivity konduktor pada temperature $20^\circ C$ adalah :

a. Untuk tembaga, $\rho = 10,66 \Omega \cdot \text{cmil/ft}$ atau $= 1,77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

b. Untuk aluminium, $\rho = 17 \Omega \cdot \text{cmil/ft}$ atau $= 2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

Konduktor pilin 3 strand menyebabkan kenaikan resistansi sebesar 1%.

Konduktor dengan strand terkonsentrasi menyebabkan kenaikan resistansi sebesar 2%.

Pengaruh kenaikan temperatur terhadap resistansi dapat ditentukan dari formula berikut ini :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \dots \dots \dots (2.3)^{[12]}$$

Dimana R_1 dan R_2 adalah resistansi masing-masing konduktor pada temeperatur t_1 dan t_2 dan T adalah sauatu konstanta yang nilainya sebagai berikut :

$T = 234,5$ untuk tembaga dengan konduktivitas 100%

$T = 241$ untuk tembaga dengan komduktivitas 97,3%



$T = 228$ untuk aluminium dengan konduktivitas 61%

2.8 Daya Listrik ^[2]

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Dalam sistem listrik AC atau arus bolak-balik ada tiga jenis daya yang dikenal, yaitu:

2.8.1 Daya Semu

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

$$\text{Untuk 1 fasa : } S = V \times I \dots\dots\dots (2.4) \text{ }^{[2]}$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } S = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I_L \dots\dots\dots (2.5) \text{ }^{[2]}$$

Dimana :

S = Daya semu (VA)

V_{L-L} = Tegangan antar saluran (Volt)

I_L = Arus saluran (Amper)

2.8.2 Daya Aktif

Daya aktif (daya nyata) merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya. Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

$$\text{Untuk 1 fasa : } P = V \times I \times \cos \emptyset \dots\dots\dots (2.6) \text{ }^{[2]}$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \emptyset \dots\dots\dots (2.7) \text{ }^{[2]}$$

Dimana :

V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Amper)

$\cos \emptyset$ = Faktor Daya (standar PLN 0,85)

2.8.3 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini adalah hasil kali



antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya.

$$\text{Untuk 1 fasa : } Q = V \times I \times \sin \emptyset \dots\dots\dots(2.8) \text{ }^{[2]}$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \dots\dots\dots(2.9) \text{ }^{[2]}$$

Dimana :

Q = Daya reaktif (VAR)

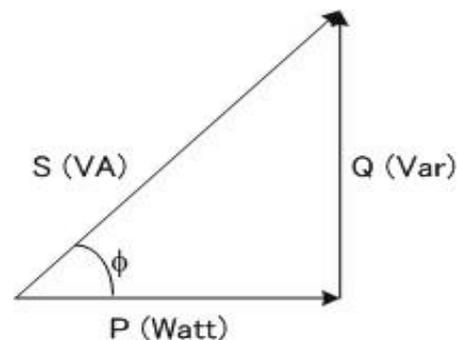
V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Amper)

$\sin \emptyset$ = Faktor Daya (tergantng nilai \emptyset)

2.8.4 Segitiga Daya

Dari bermacam daya diatas maka daya listrik digambarkan sebagai segitiga siku, yng secara vektoris adalah penjumlahan daya aktif dan reaktif dan sebagai resultannya adalah daya semu.



Gambar 2. 7 Segitiga daya

Sumber : Stevenson, William D. 1994.

2.9 Susut Daya ^[1]

Dalam suatu saluran distribusi tenaga listrik selalu diusahakan agar susut daya yang terjadi pada jaringan distribusi sekecil-kecilnya. Hal ini dimaksudkan agar daya yang disalurkan ke konsumen tidak terlampau berkurang. Tahanan yang terdapat pada saluran atau penghantar adalah salah satu penyebab kerugian pada jaringan. Disamping itu ada juga kehilangan daya yang dikarenakan adanya kebocoran isolator.

Dari penjelasan diatas, maka penjelasan diatas, maka besar susut daya pada saluran tiga fasa :

$$P_Z = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \dots\dots\dots(2.10) \text{ }^{[1]}$$



Jika besar susut daya sudah diperoleh maka besar daya yang diterima :

$$P_R = P - P_Z \dots\dots\dots(2.11) \text{ III}$$

Maka besar nilai persentasi (%) susut daya adalah :

$$\Delta P = \frac{P_{Total\ rugi}}{P} \times 100 \dots\dots\dots(2.12) \text{ III}$$

Dimana :

P = Susut daya (kw)

I = Arus yang mengalir (Ampere)

R = Resistansi saluran(ohm)

P_Z = Rugi daya pada saluran (MW)

P_R = Besar Daya yang Diterima (MW)

2.10 Software ETAP Power Station ^[4]

Dalam perancangan dan analisa sebuah sistem tenaga listrik, sebuah software aplikasi sangat dibutuhkan untuk merepresentasikan kondisi real sebelum sebuah sistem direalisasikan. ETAP (Electric Transient and Analysis Program) PowerStation merupakan salah satu software aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga Listrik Etap merupakan software yang digunakan untuk melakukan desain/perencanaan sistem kelistrikan yang ada di suatu Industri atau Wilayah. Software ini sangat bermanfaat untuk melakukan berbagai analisa yang sangat membantu untuk mempermudah pekerjaan.

ETAP mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, dan online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

- Analisa aliran daya
- Analisa hubung singkat
- Arc Flash Analysis
- Starting motor
- Koordinasi proteksi
- Analisa kestabilan transien, dll.



ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, ANSI dan IEC. Pada dasarnya perbedaan yang terjadi di antara kedua standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan, yang berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan ETAP pun berbeda.

Percobaan load flow atau aliran daya ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran daya yang berupa pengaruh dari variasi beban dan rugi-rugi transmisi pada aliran daya dan juga mempelajari adanya tegangan jatuh di sisi beban. Aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik secara garis besar adalah suatu peristiwa daya yang mengalir berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari suatu sistem pembangkit (sisi pengirim) melalui suatu saluran atau jaringan transmisi hingga sampai ke sisi beban (sisi penerima). Pada kondisi ideal, maka daya yang diberikan oleh sisi pengirim akan sama dengan daya yang diterima beban. Namun pada kondisi real, daya yang dikirim sisi pengirim tidak akan sama dengan yang diterima beban.

Urutan perhitungan menggunakan simulasi ETAP adalah :

- a. Menggambar single line diagram.
- b. Memasukkan nomor dan identitas dari peralatan tersebut (generator, busbar, transformator, penghantar dan beban).
- c. Memasukkan data beban, daya aktif (MW), daya reaktif (MVAR), daya semu (MVA), arus, tegangan, dan faktor daya ($\cos \phi$).
- d. Memasukkan besarnya nilai tegangan setiap bus.
- e. Memilih metode literasi perhitungan aliran daya.