



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke konsumen.

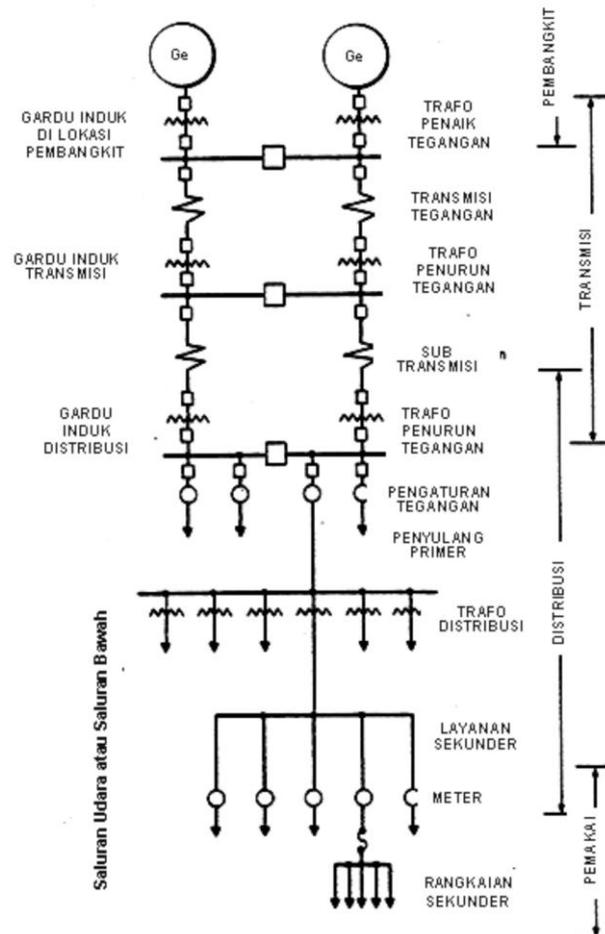
Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh Gardu Induk (GI) dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.

Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula.

Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380 Volt.

Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke pelanggan konsumen. Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan *transformator step-up*. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahal harganya perlengkapan-perlengkapannya, selain itu juga tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan *transformator step-down*. Dalam hal ini jelas

bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.



Gambar 2.1 Pengelompokan sistem distribusi tenaga listrik

2.2 Klasifikasi Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Secara umum, saluran tenaga listrik atau saluran distribusi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

2.2.1 Menurut jenis/tipe konduktornya

- Saluran udara, dipasang pada udara terbuka dengan bantuan tiang dan perlengkapannya, dibedakan atas:
 - Saluran kawat udara, bila konduktornya telanjang, tanpa isolasi pembungkus.
 - Saluran kabel udara, bila konduktornya terbungkus isolasi.

- b. Saluran bawah tanah, dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (*ground cable*).
- c. Saluran bawah laut, dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (*submarine cable*).

2.2.2 Menurut susunan rangkaiannya

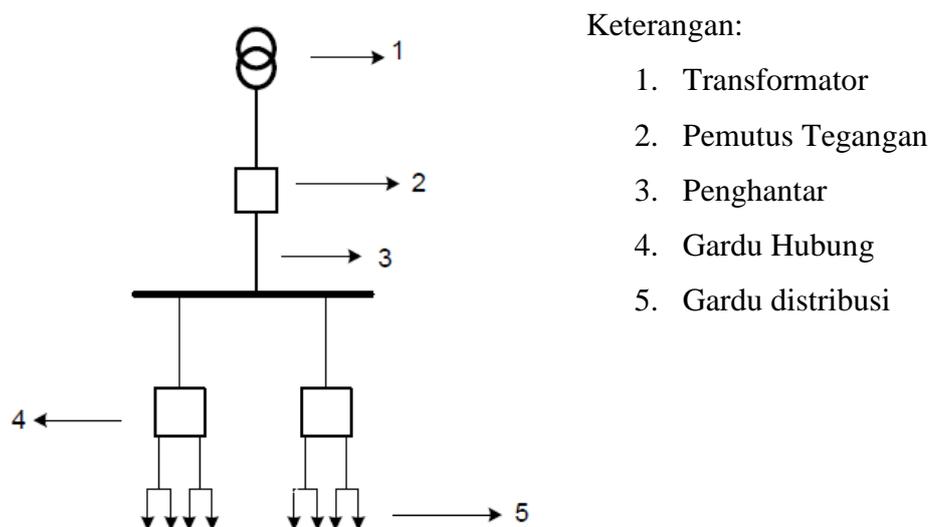
Dari uraian diatas telah disinggung bahwa sistem distribusi dibedakan menjadi dua yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder.

a. Jaringan distribusi primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik skunder *trafo substation* (GI) dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20 kV.

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat-pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, kabel udara, maupun kabel tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini direntangkan sepanjang daerah yang akan di suplai tenaga listrik sampai ke pusat beban. Terdapat bermacam-macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer.

Berikut adalah gambar bagian-bagian distribusi primer secara umum.



Gambar 2.2 Bagian – bagian sistem distribusi primer

Bagian-bagian sistem distribusi primer terdiri dari:

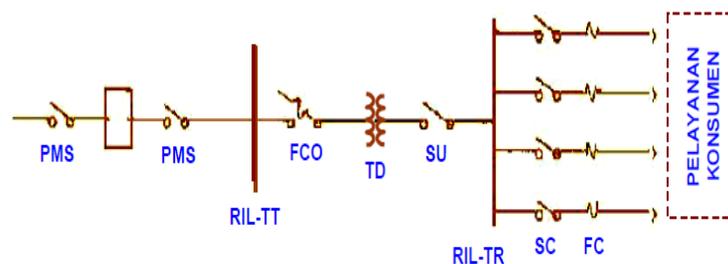
1. Transformator daya, berfungsi untuk menurunkan tegangan dari tegangan tinggi ke tegangan menengah atau sebaliknya.
2. Pemutus tenaga, berfungsi sebagai pengaman dan pemutus daya
3. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya
4. Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa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

b. Jaringan distribusi sekunder

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban yang ada pada konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sbb:

- a. Papan pembagi pada trafo distribusi
- b. Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder)
- c. Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai)
- d. Alat pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta *fuse* atau pengaman pada pelanggan

Komponen saluran distribusi sekunder seperti ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut ini:



Gambar 2.3 Komponen sistem distribusi sekunder

2.3 Konfigurasi Sistem Distribusi

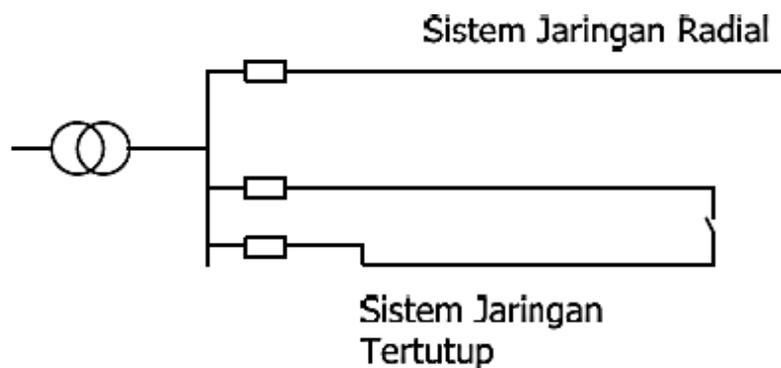
Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi, dimana konfigurasi ini bisa dikembangkan menjadi jaringan yang lain pada sistem distribusi primer maupun sistem distribusi sekunder. Dibawah ini merupakan jaringan yang dimaksud, yaitu:

a. Konfigurasi jaringan radial

Yaitu jaringan yang hanya mempunyai satu pasokan tenaga listrik, jika terjadi gangguan akan terjadi “*black-out*” atau padam pada bagian yang tidak dapat dipasok.

b. Konfigurasi jaringan bentuk tertutup

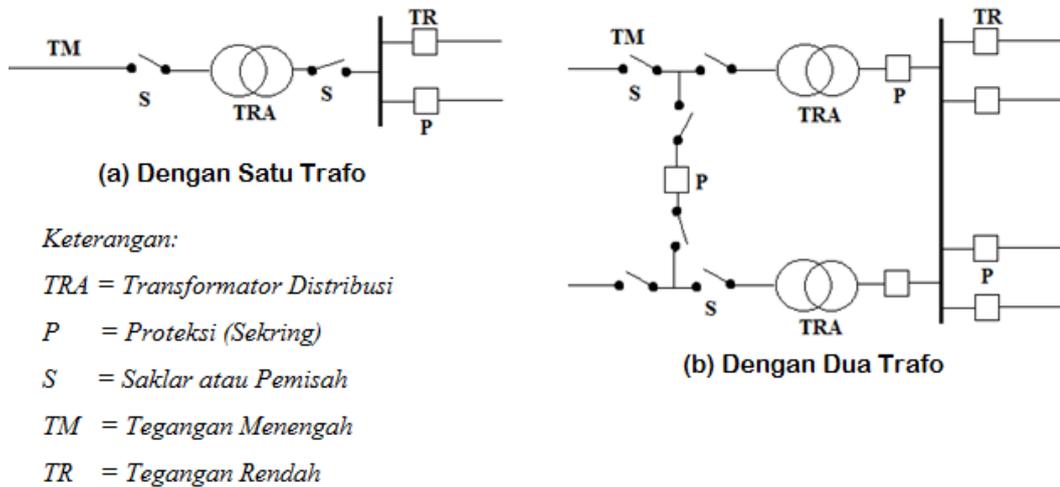
yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.



Gambar 2.4 Pola jaringan distribusi dasar

2.4 Gardu Distribusi

Sebuah gardu distribusi pada dasarnya merupakan tempat memasang transformator distribusi beserta perlengkapan. Sebagaimana diketahui, transformator distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah (di Indonesia 20 kV) menjadi tegangan rendah (di Indonesia 220/380 V) atau dapat dikatakan transformator distribusi merupakan suatu penghubung antara jaringan tegangan menengah dan tegangan rendah. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa di dalam sebuah gardu distribusi akan “masuk” saluran tegangan menengah, dan “keluar” saluran tegangan rendah.



Gambar 2.5 Skema gardu distribusi

Terbanyak gardu distribusi hanya berisi 1 transformator sebagaimana terlihat pada Gambar 2.5(a). Kabel tegangan menengah memasuki gardu dan melalui sebuah saklar atau pemisah dihubungkan pada transformator. Saklar atau pemisah pada sisi tegangan rendah sering tidak terpasang, dan langsung disambungkan pada proteksi yang berupa sekring.

Gardu distribusi yang lebih besar dapat berisi dua transformator sebagaimana terlihat pada Gambar 2.5(b) pada sisi tegangan menengah terdapat kabel “masuk” dan kabel “keluar”. Hal demikian diperlukan bila gardu tidak berada di ujung kabel, dan itu terjadi pada Gambar 2.5(a). Pemilihan lokasi gardu distribusi harus sedemikian hingga memiliki jarak jangkauan yang optimal.

2.4.1 Gardu distribusi tipe portal

Gardu tiang, yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya atau penyangganya terbuat dari tiang. Dalam hal ini trafo distribusi terletak di bagian atas tiang. Karena trafo distribusi terletak pada bagian atas tiang, maka gardu tiang hanya dapat melayani daya listrik terbatas, mengingat berat trafo yang relatif tinggi, sehingga tidak mungkin menempatkan trafo berkapasitas besar di bagian atas tiang (± 5 meter di atas tanah). Untuk gardu tiang dengan trafo satu fasa kapasitas yang ada maksimum 50 KVA, sedang gardu tiang dengan trafo tiga fasa

kapasitas maksimum 160 kVA (200 kVA). Trafo tiga fasa untuk gradu tiang ada dua macam, yaitu trafo 1x3fasa dan trafo 3x1fasa. Gambar 2.6 memperlihatkan sebuah gardu distribusi tiang tipe portal lengkap dengan perlengkapan proteksinya dan panel distribusi tegangan rendah yang terletak di bagian bawah tiang (tengah).

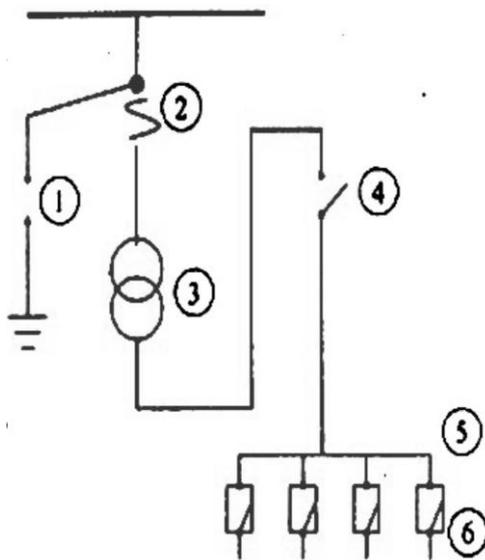
- Bangunan fisik gardu portal

Gardu portal adalah gardu listrik tipe terbuka (*outdoor*) yang memakai konstruksi tiang/menara kedudukan transformator minimal 3 meter diatas platform. Umumnya memakai tiang beton ukuran 2x500 daN.



Gambar 2.6 Gambar tiang portal beserta panel distribusi

Perlengkapan peralatan pada gardu distribusi tiang portal yaitu terdiri dari *Fuse Cut Out* (FCO), *Lighting Arrester* (LA), transformator distribusi, Satu lemari PHB tegangan rendah maksimal 4 jurusan, *NH Fuse* dan isolator tumpu atau gantung. Dibawah ini adalah bagan satu garis pada gardu distribusi tipe tiang portal.



Keterangan:

1. *Lighting Arrester* (LA)
2. *Fuse Cut Out* (FCO)
3. Transformator Distribusi
4. Sakelar beban tegangan rendah
5. PHB tegangan rendah
6. Sirkit keluar dengan NH Fuse

Gambar 2.7 Bagan satu garis gardu distribusi tipe tiang portal

2.4.2 Gardu distribusi tipe tiang cantol

Pada gardu distribusi tipe cantol, transformator yang terpasang adalah transformator dengan daya ≤ 100 kVA fase 3 atau fase 1. Transformator terpasang adalah jenis CSP (*Completely Self Protected Transformer*) yaitu peralatan switching dan proteksinya sudah terpasang lengkap dalam tangki transformator.



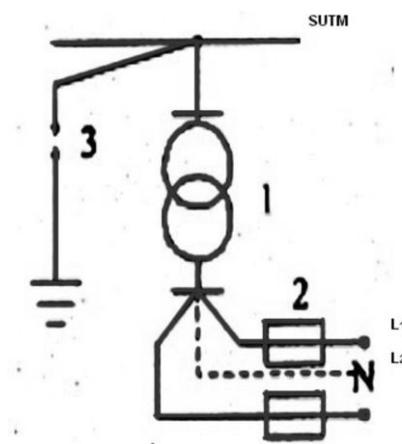
Gambar 2.8 Gardu distribusi tipe cantol

Perlengkapan perlindungan transformator tambahan LA (*Lightning Arrester*) dipasang terpisah dengan penghantar pembumiannya yang dihubungkan langsung dengan badan transformator. Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan

Rendah (PHB-TR) maksimum 2 jurusan dengan saklar pemisah pada sisi masuk dan pengaman lebur (type NH, NT) sebagai pengaman jurusan. Semua Bagian Konduktif Terbuka (BKT) dan Bagian Konduktif Ekstra (BKE) dihubungkan dengan pembumian sisi tegangan rendah.

- Bangunan fisik Gardu tipe Cantol

Gardu cantol adalah type gardu listrik dengan transformator yang dicantolkan pada tiang listrik besamya kekuatan tiang minimal 500 daN. Instalasi gardu dapat berupa, yaitu: 1 *Cut out fused, lighting arrester* dan panel PHB tegangan rendah dengan 2 jurusan atau transformator *Completely Self Protected (CSP - Transformer)*. Dibawah ini adalah bagan garis lurus gardu distribusi tipe tiang cantol.



Keterangan:

1. Transformator Distribusi
2. Sirkit Akhir 2 fasa
3. Lighting Arrester

Gambar 2.9 Bagan satu garis gardu distribusi tipe tiang cantol

2.4.3 Gardu distribusi sisipan

Gardu sisipan merupakan gardu tambahan yang dipasang oleh PT. PLN (Persero) untuk menanggulangi berbagai kerugian yang ditimbulkan oleh transformator pada gardu sebelumnya. Beberapa faktor yang dipertimbangkan oleh PT. PLN (Persero) untuk menambah trafo atau gardu sisipan adalah:

1. Trafo sebelumnya sudah *overload*

Overload terjadi karena beban yang terpasang pada trafo melebihi kapasitas maksimum ($\geq 90\%$ dari kapasitas) yang dapat dipikul trafo dimana arus beban melebihi arus beban penuh (*full load*) dari trafo. *Overload* akan menyebabkan

trafo menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan trafo.

2. Besarnya drop tegangan pada JTR

Menurut SPLN No. 74 tahun 1987, jatuh tegangan yang diperbolehkan sepanjang penghantar SR ialah 2%. Dengan catatan dalam hal ini SR diperhitungkan dari titik penyambungan pada STR. Khusus untuk penyambungan langsung dari papan bagi TR di gardu transformator jatuh tegangan diperkenankan maksimum 5%.

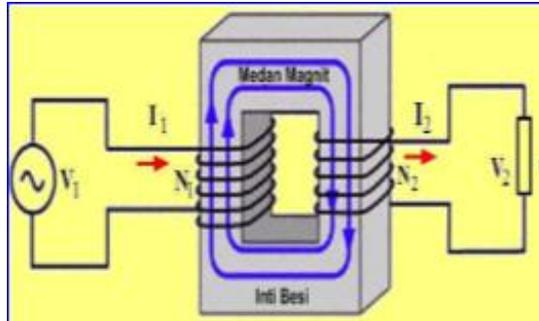
2.5 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya. Dalam bidang teknik listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya, yaitu transformator yang biasa digunakan untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi
2. Transformator distribusi, yaitu transformator yang biasa digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi
3. Transformator pengukuran, yaitu transformator yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan

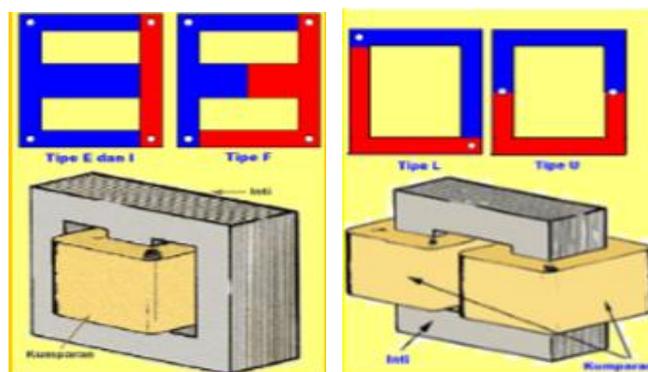
Secara konstruksinya transformator terdiri atas dua kumparan yaitu primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka fluks bolak-balik akan terjadi pada kumparan sisi primer, kemudian fluks tersebut akan mengalir pada inti transformator, dan selanjutnya fluks ini akan mengimbas pada kumparan yang ada pada sisi sekunder yang

mengakibatkan timbulnya fluks magnet di sisi sekunder, sehingga pada sisi sekunder akan timbul tegangan.



Gambar 2.10 Gambar fluks magnet transformator

Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua jenis transformator, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). Pada transformator tipe inti (Gambar 2.11(a)), kumparan mengelilingi inti, dan pada umumnya inti transformator L atau U. Peletakkan kumparan pada inti diatur secara berhimpitan antara kumparan primer dengan sekunder. Dengan pertimbangan kompleksitas cara isolasi tegangan pada kumparan, biasanya sisi kumparan tinggi diletakkan di sebelah luar sedangkan pada transformator tipe cangkang (Gambar 2.11(b)) kumparan dikelilingi oleh inti, dan pada umumnya intinya berbentuk huruf E dan huruf I, atau huruf F. Untuk membentuk sebuah transformator tipe Inti maupun Cangkang, inti dari transformator yang berbentuk huruf tersebut disusun secara berlapis-lapis (laminasi), jadi bukan berupa besi pejal.



(a)

(b)

Gambar 2.11 (a) Transformator tipe inti dan (b) Tipe cangkang

Tujuan utama penyusunan inti secara berlapis ini adalah untuk mengurangi kerugian energi akibat “*Eddy Current*” (arus pusar), dengan cara laminasi seperti ini maka ukuran jerat induksi yang berakibat terjadinya rugi energi di dalam inti bisa dikurangi. Proses penyusunan inti transformator biasanya dilakukan setelah proses pembuatan lilitan kumparan transformator pada rangka (koker) selesai dilakukan.

2.5.1 Perhitungan persentase pembebanan transformator

Untuk menghitung arus beban penuh (*full load*) dapat menggunakan rumus:

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.1)$$

Dimana:

I_{FL} = arus beban penuh (A)

S = daya transformator (kVA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (V)

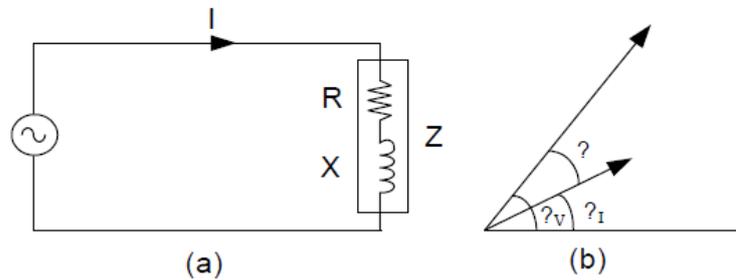
Sedangkan untuk menghitung pembebanan transformator dapat menggunakan rumus dibawah ini:

$$\text{KVA beban} = (I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{S-N}) \quad (2.2)$$

$$\% \text{ Beban Trafo} = \frac{\text{KVA Beban}}{\text{KVA Trafo}} \times 100 \% \quad (2.3)$$

2.6 Daya Listrik

Apabila suatu sumber listrik arus bolak-balik (AC) diterapkan pada komponen impedansi kompleks $Z = R + jX$ dimana $X = 2\pi \cdot fL$ seperti ditampilkan pada gambar 2.12 (a), menghasilkan fasor tegangan $V = |V| \angle \theta$ dan fasor arus $I = |I| \angle \theta$, dalam nilai efektif (rms) seperti digambarkan pada gambar 2.12 (b).



Gambar 2.12 Tegangan AC yang diterapkan pada beban dan diagram fasor.

(a) Rangkaian R dan X, (b) Diagram Vektor I dan V

Ungkapan daya pada rangkaian diatas adalah perkalian tegangan dan arus VI^* yang menghasilkan,

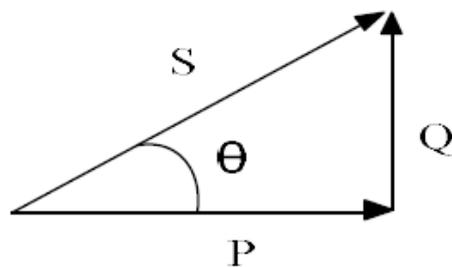
$$VI^* = |V||I|\angle \theta_v - \theta_i$$

$$VI^* = |V||I|\angle \theta$$

$$VI^* = |V||I|\cos \theta + j|V||I|\sin \theta \quad (2.4)$$

Persamaan diatas menentukan kuantitas daya kompleks dimana bagian realnya merupakan daya nyata P dan bagian imajineranya merupakan daya reaktif Q sedangkan θ merupakan sudut daya.

Menurut Smith (1992) konsep daya kompleks memberikan pendekatan lain untuk pemecahan persoalan rangkaian arus AC. Perhitungan yang mengikuti kaidah aljabar kompleks, teknik vektor dan metode grafik dapat diterapkan seperti ditunjukkan pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Segitiga daya kompleks

Selanjutnya daya kompleks ditandai dengan S dan diberikan melalui,

$$S = VI^* \quad (2.5)$$

$$S = P + jQ \quad (2.6)$$



Magnitude dari S,

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.8)$$

Persamaan diatas merupakan daya terlihat (*apperent power*), satuannya dalam Volt-Ampere dan satuan besarnya dalam kVA atau MVA. Daya terlihat memberikan indikasi langsung dari energi listrik dan digunakan sebagai suatu rating satuan perangkat daya. Dari uraian diatas maka daya listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga macam, yakni daya semu, daya aktif (nyata) dan daya reaktif.

2.7 Resistansi penghantar

Resistansi adalah tahanan suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang menyebabkan kerugian daya. Maka besarnya resistansi pada jaringan listrik dapat dicari dengan rumus persamaan berikut:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.5)$$

Dimana:

R = Resistansi (Ω),

l = Panjang kawat penghantar (m),

A = Luas penampang kawat (m^2),

P = Tahanan jenis (Ωm).

Tahanan penghantar mempunyai suhu maksimum yang telah distandarkan oleh pabrik pembuatnya, perubahan suhu sebesar $1^\circ C$ dapat menaikkan tahanan penghantar. Perubahan tahanan nilai tahanan ini disebut koefisien temperatur dari tahanan yang diberi simbol α , nilai α dapat dilihat pada tabel di bawah ini. Perubahan nilai tahanan terhadap suhu, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$R_{t_2} = R_{t_1} [1 + \alpha_{t_1} (t_2 - t_1)] \quad (2.6)$$

Dimana T_0 = Temperatur pada penghantar aluminium ($^\circ C$)

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{T_0+t_2}{T_0+t_1} \quad (2.7)$$

Dimana:

R_{t2} = resistansi pada suhu t_2 (Ω/km)

R_{t1} = resistansi pada suhu t_1 (Ω/km)

α_{t1} = koefisien temperatur dari tahanan pada suhu

0,03931 untuk Cu pada suhu 12345°C

0,03931 untuk Al pada suhu 12345°C

t_1 = suhu normal penghantar ($^{\circ}\text{C}$)

t_2 = suhu yang ditentukan ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = konstanta untuk penghantar tertentu :

- 234,5 untuk tembaga 100% Cu
- 241,0 untuk tembaga 97% Cu
- 228 untuk aluminium 61 % Al

2.8 Model Saluran Distribusi

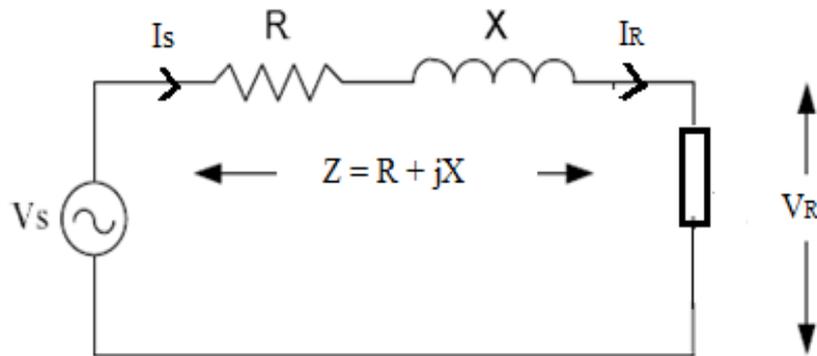
Saluran distribusi digambarkan melalui suatu model ekuivalen dengan mengambil parameter rangkaian pada suatu basis per fasa. Tegangan terminal digambarkan dari satu saluran ke saluran netral, arus dari satu fasa saluran sehingga sistem distribusi tiga fasa berkurang menjadi ekuivalen sistem distribusi fasa tunggal.

Menurut Steverson (1995) model saluran distribusi digunakan untuk menghitung tegangan arus dan aliran daya yang dipengaruhi oleh panjang saluran. Model saluran distribusi diperoleh dengan mengalihkan impedansi saluran per satuan panjang dengan panjang saluran.

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{r} + \mathbf{j}\omega\mathbf{L})\mathbf{l} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + \mathbf{jX} \quad (2.9)$$

Dimana R dan X merupakan resistansi dan induktansi perfasa per satuan panjang, dan l merupakan panjang saluran. Model saluran distribusi pada suatu basis per fasa seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.14 Rangkaian ekivalen saluran distribusi

Oleh karena arus rangkaian saluran distribusi merupakan hubungan seri maka arus ujung pengirim dan ujung penerima adalah sama.

$$I_S = I_R \quad (2.10)$$

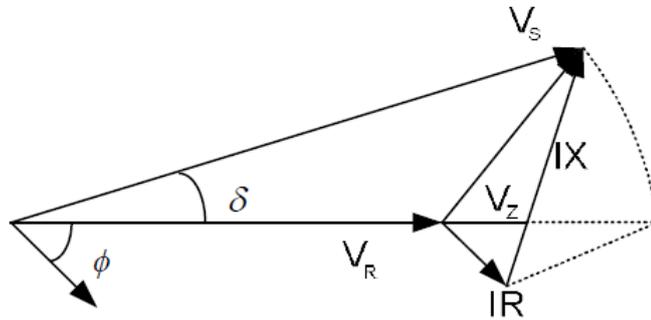
2.9 Drop tegangan

Drop tegangan (*drop voltage*) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Drop tegangan di trafo distribusi di sisi sekunder pada saat beban maksimum dibolehkan sebesar 3 % dari tegangan kerja (sesuai SPLN 72 : 1987).

Adapun penyebab drop tegangan adalah:

1. Panjang jaringan, jauhnya jaringan dari trafo
2. Rendahnya tegangan yang diberikan dari trafo distribusi
3. Jenis penghantar yang digunakan
4. Sambungan penghantar atau konektor yang tidak baik
5. Arus yang dihasilkan terlalu besar

Berdasarkan rangkaian ekivalen saluran pada gambar (2.14) dan uraian persamaan dapat digambarkan diagram fasor arus dan tegangan seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.15 Diagram fasor saluran distribusi

Besarnya drop tegangan yang terjadi pada saluran tersebut dapat dirumuskan:

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \quad (2.11)$$

Untuk mendapatkan susut tegangan seperti diagram fasor diatas dengan mengasumsikan bahwa V_s dan V_r berhimpitan.

Pada gambar 2.15 dapat diperhatikan bahwa persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah:

$$V_s = V_R + I (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (2.12)$$

Karena faktor $I (R \cos \theta + X \sin \theta)$ sama dengan I_z , maka persamaan menjadi:

$$V_s = V_R + I_z \text{ atau } V_s - V_r = I_z \quad (2.13)$$

Sehingga, $\Delta V = I_z$

$$\Delta V_{1\phi} = I (R \cos \theta + X \sin \theta) \quad (2.14)$$

Maka untuk saluran distribusi pada saluran distribusi 3 phasa adalah:

$$\Delta V_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot \Delta V_{1\phi} \quad (2.15)$$

Dimana:

$\cos \theta = 0,85$ (standar PLN)

$\sin \theta = \text{Arc cos } \theta = 0,53$



Tegangan pada sisi penerima

$$V_R = V_S - \Delta V \quad (2.16)$$

Drop tegangan dalam persentase:

$$\% V \text{ rugi} = \frac{\Delta V}{V_S} \times 100 \% \quad (2.17)$$

Keterangan:

ΔV = drop tegangan (V)

I = Arus saluran (A)

V_S = Tegangan awal (V)

I_R = Komponen arus aktif

V_r = Tegangan akhir (V)

I_X = Komponen arus reaktif

R = Resistansi saluran (Ω)

pf = power factor (faktor daya)

X = Reaktansi saluran (Ω)

qf = power factor reaktif

2.10 Rugi daya

Berdasarkan gambar 2.14, rugi daya saluran timbul karena adanya komponen resistansi dan reaktansi saluran dalam bentuk rugi daya aktif dan reaktif. Rugi daya aktif yang timbul pada komponen resistansi saluran distribusi akan terdisipasi dalam bentuk energi. Sedangkan rugi daya reaktif akan dikembalikan ke sistem dalam bentuk medan magnet atau medan listrik.

Rugi daya yang dapat dicari menggunakan rumus:

$$P_{\text{loss}} = 3 \times I^2 \times R \quad (2.18)$$

Dimana:

P_{loss} = Rugi daya (kW)

I = Arus yang mengalir (Ampere)

R = Resistansi saluran (ohm)

2.11 Jaringan Tegangan Rendah

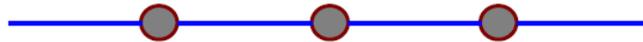
Sistem Distribusi Tenaga Listrik untuk Tegangan Rendah yang dikembangkan adalah sistem tegangan 220/380 Volt menggunakan penghantar *Twisted Cable* (TC).

Dalam desain Jaringan Tegangan Rendah (JTR) beberapa kriteria yang dipertimbangkan yaitu *tegangan jatuh*, *susut jaringan*, *kepadatan beban*, dan *keandalan pasokan tenaga listrik*.

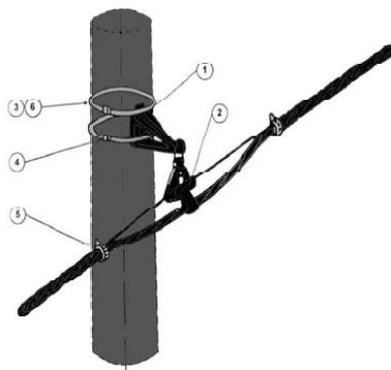
2.11.1 Jenis konstruksi saluran udara tegangan rendah (SUTR)

a. Konstruksi Tiang Penyangga (TR-1)

Pada jaringan tegangan rendah yang lurus atau dengan sudut belok maksimum 15 derajat, dipakai konstruksi tiang penyangga atau penggantung kabel.



Gambar 2.16 *Single Line* TR-1



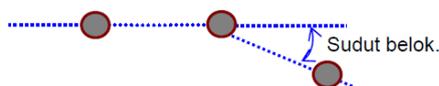
Keterangan:

- 1) *Suspension Clam Bracket*
- 2) *Suspension Clamp*
- 3) *Stainless Steel Strip 0,75 Meter*
- 4) *Stopping Buckle*
- 5) *Plastic Strap*
- 6) *Protektip Plastic Strap 0,5 Meter*

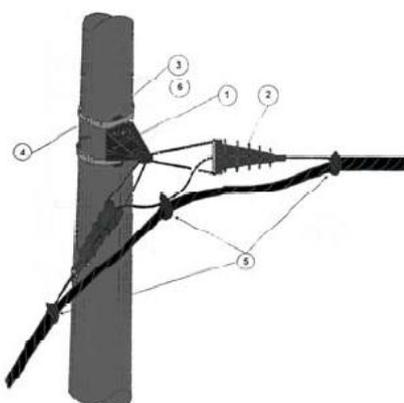
Gambar 2.17 Konstruksi tiang penyangga TR-1

b. Konstruksi Tiang Sudut (TR-2)

Jaringan dengan sudut belok lebih besar dari 15 derajat sampai dengan 90 derajat, dipakai konstruksi TR-2 ini.



Gambar 2.18 *Single Line* TR-2



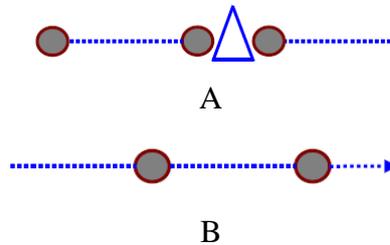
Keterangan:

- 1) *Tension Bracket*
- 2) *Strain Clamp*
- 3) *Stainless Steel Strip 0,75 Meter*
- 4) *Stopping Buckle*
- 5) *Plastic Strap*
- 6) *Protektip Plastic Strap 0,5 Meter*

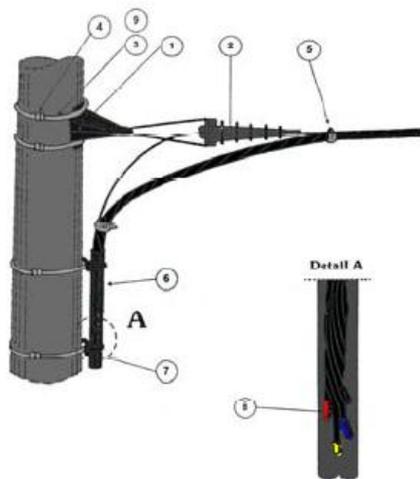
Gambar 2.19 Konstruksi tiang sudut TR-2

c. Konstruksi Tiang Awal/Akhir (TR-3)

Pada awal jaringan yaitu tempat dipasangnya trafo distribusi, dipakai konstruksi TR-3. Begitu juga Pada ujung jaringan dipasang konstruksi TR-3



Gambar 2.20 Single Line TR-3 di awal (A) / akhir (B)



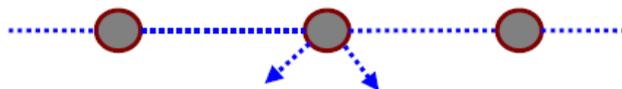
Keterangan:

1. Tension Bracket
2. Strain Clamp
3. Stainless Steel Strip 0,75 Meter
4. Stopping Buckle
5. Plastic Strap
6. PVC 2" – 50 Cm
7. Link
8. Dead end tubes
9. Protektip Plastic Strap 0,5 Meter

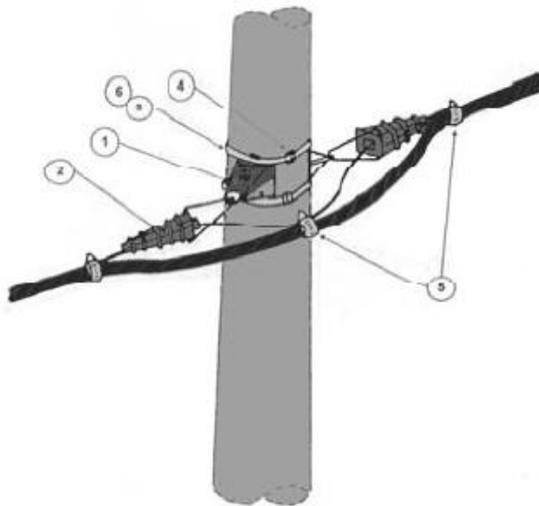
Gambar 2.21 Konstruksi tiang awal/akhir (TR3)

d. Konstruksi Tiang Penegang (TR-5)

Secara umum pada setiap 5 gawang panjang jaringan lurus diperlukan konstruksi penegang, yang dikenal sebagai konstruksi TR-5.



Gambar 2.22 Single line TR-5



Keterangan:

1. *Tension Bracket*
2. *Strain Clamp*
3. *Stainless Steel Strip 0,75 Meter*
4. *Stopping Buckle*
5. *Plastic Strap*
6. *Protektip Plastic Strap 0,50 Meter*

Gambar 2.23 Konstruksi tiang penegang TR-5

2.11.2 Kabel twisted saluran udara tegangan rendah

Konfigurasi jaringan secara umum adalah radial, hanya pada kasus khusus dipergunakan sistem tertutup (*loop*). Saluran udara tegangan rendah memakai penghantar jenis kabel pilin / *twisted cable* (NFA2X) dengan penampang berukuran luas penampang 35 mm², 50 mm² dan 70 mm² serta penghantar tak berisolasi *All Aluminium Conductor* (AAC), *All Aluminium Alloy Conductor* (AAAC) dengan penampang 25 mm², 35 mm² dan 50 mm².

Kabel udara yang dipergunakan pada JTR merupakan kabel berinti tunggal dengan bentuk konduktor dipilin bulat, instalasi kabel ini sedemikian rupa sehingga hantaran kabel membentuk kabel pilin dimana beberapa kabel berinti tunggal saling dililitkan sehingga saling membentuk suatu kelompok kabel yang disebut dengan *twisted cable*.

Kabel pilin dipasang pada tiang saluran distribusi sekunder dengan peralatannya kira – kira 20 cm dibawah puncak tiang dengan kabel netral sebagai penyangganya, sehingga dengan demikian beban kabel pilin dipikul oleh kabel netral tersebut. Kabel pilin yang digunakan pada proyek kelistrikan terdiri atas enam buah kabel berinti tunggal dengan perincian sebagai berikut:

1. Kabel utama, terdiri atas tiga kabel fasa dan satu kabel netral
2. Dua kabel lainnya untuk hantaran lampu penerangan jalan

Terdapat 2 jenis konstruksi jaringan distribusi Tegangan Rendah sesuai dengan sistemnya.

1. Konfigurasi fasa 3 menggunakan kabel Pilin (*twisted cable*) dengan 3 penghantar fasa + 1 netral.
2. Konfigurasi fasa 2 menggunakan kabel Pilin (*twisted cable*) dengan 2 penghantar fasa + 1 netral atau penghantar BC atau AAAC.

Kedua sistem tersebut berdiri pada tiang sendiri atau di bawah Saluran Udara Tegangan Menengah (*underbuilt*). Radius pelayanan jaringan lebih kurang 300 meter dan tingkat tegangan pelayanan dibatasi + 5 % dan – 10 %.

2.12 Electric Transient and Analysis Program (ETAP) 11.0.0

ETAP 11.0.0 adalah suatu *software* analisis yang *comprehensive* untuk mendesain dan mensimulasikan suatu sistem rangkaian tenaga. Analisis yang ditawarkan oleh ETAP yang digunakan oleh penulis adalah drop tegangan, dan losses jaringan. ETAP juga bisa memberikan *warning* terhadap bus – bus yang *under voltage* dan *over voltage* sehingga pengguna bisa mengetahui bus mana yang tidak beroperasi optimal. Untuk menganalisa suatu rangkaian diperlukan data rangkaian yang lengkap dan akurat sehingga hasil perhitungan ETAP bisa dipertanggungjawabkan.

ETAP mengintegrasikan data–data rangkaian tenaga listrik seperti kapasitas pembangkit, panjang jaringan, resistansi jaringan per km, kapasitas busbar, ranting trafo, impedansi urutan nol, positif, dan negatif suatu peralatan listrik seperti trafo, generator dan penghantar.

ETAP memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan diagram satu garis grafis dan sistem kabel bawah tanah *raceway*. Program ini telah dirancang berdasarkan tiga konsep kunci:

1. *Virtual reality operasi*

Program operasi menyerupai sistem operasi listrik nyata sedekat mungkin. Sebagai contoh, ketika membuka atau menutup sebuah pemutus sirkuit, tempat elemen dari layanan, atau mengubah status operasi dari motor, unsur *de-energized* dan sub-sistem yang ditunjukkan pada diagram satu garis berwarna abu-abu.



ETAP menggabungkan konsep-konsep baru untuk menentukan perangkat pelindung koordinasi langsung dari diagram satu garis.

2. Integrasi total data

ETAP menggabungkan listrik, atribut logis, mekanik, dan fisik dari elemen sistem dalam *database* yang sama. Misalnya, kabel tidak hanya berisi data yang mewakili sifat listrik dan dimensi fisik, tapi juga informasi yang menunjukkan *raceways* melalui yang disalurkan.

Dengan demikian, data untuk kabel tunggal dapat digunakan untuk analisis aliran daya atau sirkuit pendek (yang membutuhkan listrik dan parameter koneksi) serta kabel *ampacity derating* perhitungan (yang memerlukan rute fisik data). Integrasi ini menyediakan konsistensi data di seluruh sistem dan menghilangkan *multiple entry* data untuk unsur yang sama.

3. Kesederhanaan di data entri

ETAP melacak data rinci untuk setiap alat listrik. Editor data dapat mempercepat proses entri data dengan meminta data minimum untuk studi tertentu. Untuk mencapai hal ini, kita telah terstruktur editor properti dengan cara yang paling logis untuk memasukkan data untuk berbagai jenis analisis atau desain. ETAP diagram satu garis mendukung sejumlah fitur untuk membantu dalam membangun jaringan dari berbagai kompleksitas. Misalnya, setiap elemen secara individu dapat memiliki berbagai orientasi, ukuran, dan simbol-simbol *display* (IEC atau ANSI). Diagram satu garis juga memungkinkan untuk menempatkan beberapa alat pelindung antara sirkuit cabang dan bus.

ETAP menyediakan berbagai pilihan untuk menampilkan atau melihat sistem listrik. Pandangan ini disebut presentasi. Lokasi, ukuran, orientasi, dan simbol setiap unsur dapat berbeda di masing-masing presentasi. Selain itu, alat pelindung dan *relay* dapat ditampilkan (terlihat) atau disembunyikan (tidak terlihat) untuk presentasi tertentu. Misalnya, satu presentasi dapat menggunakan tampilan *relay* di mana semua perangkat pelindung ditampilkan. presentasi lain mungkin menunjukkan diagram satu garis dengan beberapa pemutus sirkuit ditampilkan dan sisanya tersembunyi (tata letak paling cocok untuk hasil aliran beban).