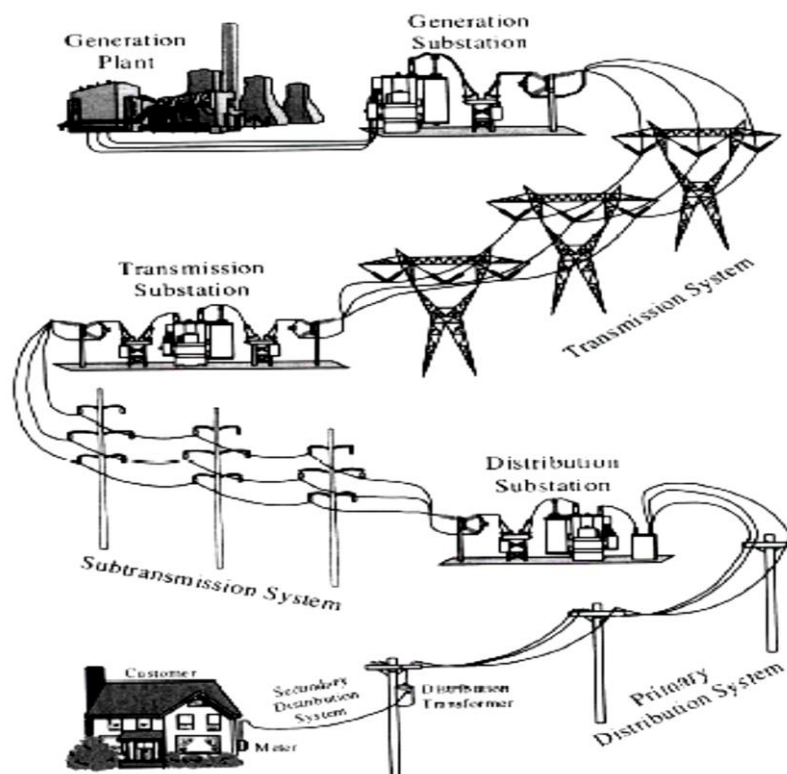


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

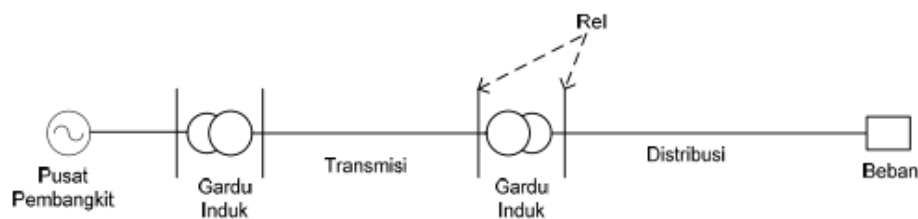
Sistem tenaga listrik merupakan rangkaian instalasi tenaga listrik yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi dan jaringan distribusi yang dioperasikan secara serentak dalam rangka penyediaan tenaga listrik. Pada gambar 2.1 dibawah ini dapat dilihat, bahwa tenaga listrik yang dihasilkan dan dikirimkan ke konsumen melalui Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, Gardu Induk, Saluran Transmisi, Gardu Induk, Saluran Distribusi, dan kemudian ke beban (konsumen tenaga listrik).



Gambar 2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik¹

Sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik ke konsumen (beban) merupakan hal penting untuk dipelajari. Mengingat penyaluran tenaga listrik prosesnya melalui beberapa tahap, yaitu dari pembangkit tenaga listrik penghasil energi listrik, disalurkan ke jaringan transmisi (SUTET) langsung ke gardu induk. Dari gardu induk tenaga listrik disalurkan ke jaringan distribusi primer (SUTM), dan melalui gardu distribusi langsung ke jaringan distribusi sekunder (SUTR), tenaga listrik dialirkan ke konsumen. Dengan demikian sistem distribusi tenaga listrik berfungsi membagikan tenaga listrik kepada pihak pemakai melalui jaringan tegangan rendah (SUTR), sedangkan suatu saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban dalam daya yang besar (melalui jaringan distribusi).

Sistem pembangkit (generation plant) terdiri dari satu atau lebih unit pembangkit yang akan mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dan harus mampu menghasilkan daya listrik yang cukup sesuai kebutuhan konsumen. Sistem transmisi berfungsi mentransfer energi listrik dari unit-unit pembangkitan di berbagai lokasi dengan jarak yang jauh ke sistem distribusi, sedangkan sistem distribusi berfungsi untuk menghantarkan energi listrik ke konsumen, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini.¹



Gambar 2.2 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik¹

2.2 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi

¹ Subwanto, Daman. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Edisi Pertama. Universitas Negeri Padang. Hal 1–7

elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh. Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum Ampere dan hukum Faraday yaitu arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak-balik maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah. Akibatnya pada sisi primer terjadi induksi. Sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer yang jumlahnya berubah-ubah pula. Maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan.²

2.3 Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator

2.3.1 Pengertian Tentang Beban Tidak Seimbang

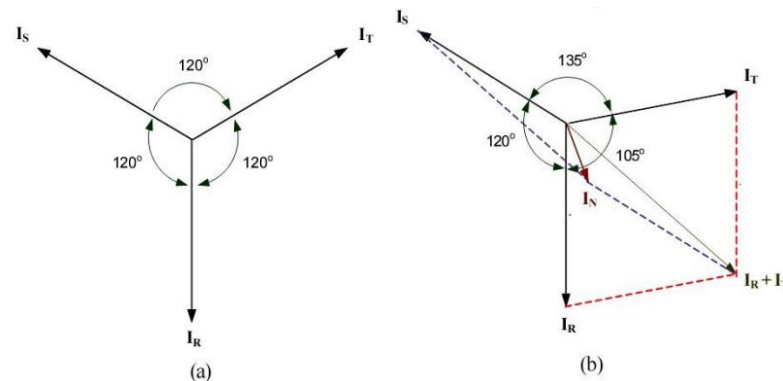
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana:

- a. Ketiga vektor arus / tegangan sama besar
- b. Ketiga vektor saling membentuk sudut 120° satu sama lain

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3 yaitu:

- a. Ketiga vektor sama besar tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain
- b. Ketiga vektor tidak sama besar tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain
- c. Ketiga vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain

² Zuhail. 1991. *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: ITB. Hal 15



Gambar 2.3 Vektor Diagram Arus³

Gambar 2.3 (a) menunjukkan vektor diagram arus dalam keadaan seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral (I_N). Sedangkan pada gambar 2.3 (b) menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Di sini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya (I_R , I_S , I_T) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral (I_N) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.³

2.3.2 Perhitungan Arus Beban Penuh Transformator

Daya transformator distribusi bila ditinjau dari sisi tegangan primer dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sisi primer trafo (kV)

I : arus jala-jala (A)

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

³ <https://electricdot.wordpress.com/2012/10/15/pengaruh-ketidakseimbangan-pembebanan-pada-trafo-distribusi/> (diakses pada 16 Mei 2015)

$$I_{fl} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

I_{fl} : arus beban penuh (A)

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sisi sekunder trafo (kV)

2.3.3 Losses (rugi-rugi) Akibat Adanya Arus Netral Pada Penghantar Netral Trafo

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, S dan T) mengalirlah arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan losses (rugi-rugi). Losses pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

P_N : losses pada penghantar netral trafo (watt)

I_N : arus yang mengalir pada netral trafo (A)

R_N : tahanan penghantar netral trafo (Ω)

2.3.4 Losses Akibat Arus Netral yang Mengalir ke Tanah

Losses yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (*ground*) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

P_G : losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

I_G : arus netral yang mengalir ke tanah (A)

R_G : tahanan pembumian netral trafo (Ω)⁴

⁴ <http://pakdheekris.blogspot.com/2011/01/transformator.html> (diakses pada 16 Mei 2015)

2.3.5 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I_{\text{rata-rata}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh dengan :

$$I_R = a \cdot I_{\text{rata-rata}} \quad \text{maka: } a = \frac{I_R}{I_{\text{rata-rata}}}$$

$$I_S = b \cdot I_{\text{rata-rata}} \quad b = \frac{I_S}{I_{\text{rata-rata}}}$$

$$I_T = c \cdot I_{\text{rata-rata}} \quad c = \frac{I_T}{I_{\text{rata-rata}}}$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan beban (dalam %) adalah :

$$= \frac{\{|a-1| + |b-1| + |c-1|\}}{3} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.6)$$

Berdasarkan Prosedur Test Pengukuran unjuk kerja Transformator distribusi yang dilakukan oleh PLN, standar ketidakseimbangan beban yang diizinkan adalah maksimum sebesar 25%. Sedangkan menurut standard IEC ketidakseimbangan beban yang diijinkan adalah 5%.⁵

2.4 Karakteristik Beban Tenaga Listrik

Secara umum beban yang dilayani oleh sistem distribusi elektrik ini dibagi dalam beberapa sektor yaitu sektor perumahan, sektor industri, sektor komersial dan sektor usaha. Masing-masing sektor beban tersebut mempunyai karakteristik-karakteristik yang berbeda, sebab hal ini berkaitan dengan pola konsumsi energi pada masing-masing konsumen di sektor tersebut. Karakteristik beban yang banyak disebut dengan pola pembebanan pada sektor perumahan ditujukan oleh adanya fluktuasi konsumsi energi elektrik yang cukup besar. Hal ini disebabkan konsumsi energi elektrik tersebut dominan pada malam hari. Sedang pada sektor industri fluktuasi konsumsi energi sepanjang hari akan hampir sama, sehingga perbandingan beban puncak terhadap beban rata-rata hampir mendekati satu.

⁵ eltek.polinema.ac.id/public/upload/file/Paper2_Sulistyowati.pdf dan [https://www.academia.edu/8262652/studi tentang pengukuran parameter trafo distribusi dengan menggunakan emt electrical measurement and data transmit](https://www.academia.edu/8262652/studi_tentang_pengukuran_parameter_trafo_distribusi_dengan_menggunakan_emt_electrical_measurement_and_data_transmit) (diakses pada 2 Juli 2015)

Beban pada sektor komersial dan usaha mempunyai karakteristik yang hampir sama, hanya pada sektor komersial akan mempunyai beban puncak yang lebih tinggi pada malam hari.

Berdasarkan jenis konsumen energi listrik, secara garis besar ragam beban dapat diklasifikasikan ke dalam:

1. Beban rumah tangga, pada umumnya beban rumah tangga berupa lampu untuk penerangan, alat rumah tangga, seperti kipas angin, pemanas air, lemari es, penyejuk udara, mixer, oven, motor pompa air dan sebagainya. Beban rumah tangga biasanya memuncak pada malam hari.
2. Beban komersial, pada umumnya terdiri atas penerangan untuk reklame, kipas angin, penyejuk udara dan alat – alat listrik lainnya yang diperlukan untuk restoran. Beban hotel juga diklasifikasikan sebagai beban komersial (bisnis) begitu juga perkantoran. Beban ini secara drastis naik di siang hari untuk beban perkantoran dan pertokoan dan menurun di waktu sore.
3. Beban industri dibedakan dalam skala kecil dan skala besar. Untuk skala kecil banyak beroperasi di siang hari sedangkan industri besar sekarang ini banyak yang beroperasi sampai 24 jam.
4. Beban fasilitas umum.⁶

2.5 Struktur Jaringan Distribusi

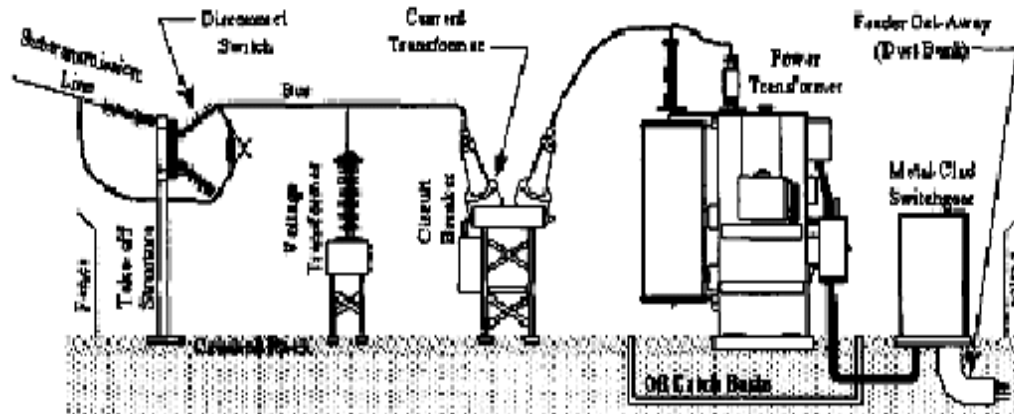
Struktur jaringan distribusi terbagi atas beberapa bagian, sebagai berikut:

1. Gardu Induk

Pada bagian ini jika sistem pendistribusian tenaga listrik dilakukan secara langsung, maka bagian pertama dari sistem distribusi tenaga listrik adalah Pusat Pembangkit Tenaga Listrik. Biasanya Pusat Pembangkit Tenaga Listrik terletak di pinggiran kota dan pada umumnya berupa Pusat Pembangkit Tenaga Diesel (PLTD). Untuk menyalurkan tenaga listrik ke pusat-pusat beban (konsumen) dilakukan dengan jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder. Jika sistem pendistribusian tenaga listrik dilakukan secara tak langsung, maka bagian

⁶ Subwanto, Daman. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Edisi Pertama. Universitas Negeri Padang. Hal 185

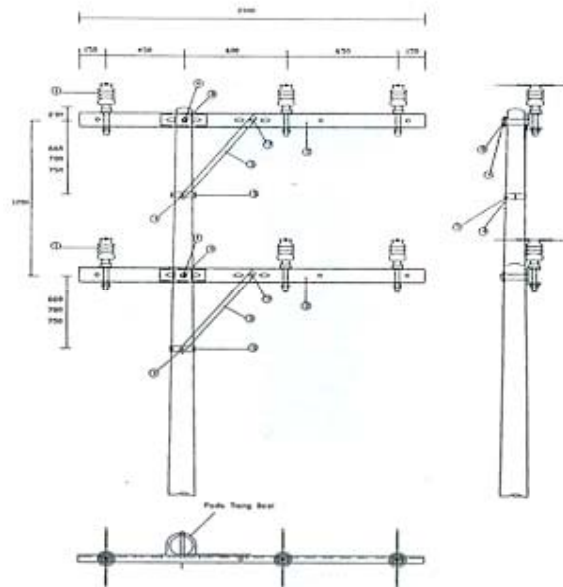
pertama dari sistem pendistribusian tenaga listrik adalah Gardu Induk yang berfungsi menurunkan tegangan dari jaringan transmisi dan menyalurkan tenaga listrik melalui jaringan distribusi primer.



Gambar 2.4 Gardu Induk⁷

2. Jaringan Distribusi Primer

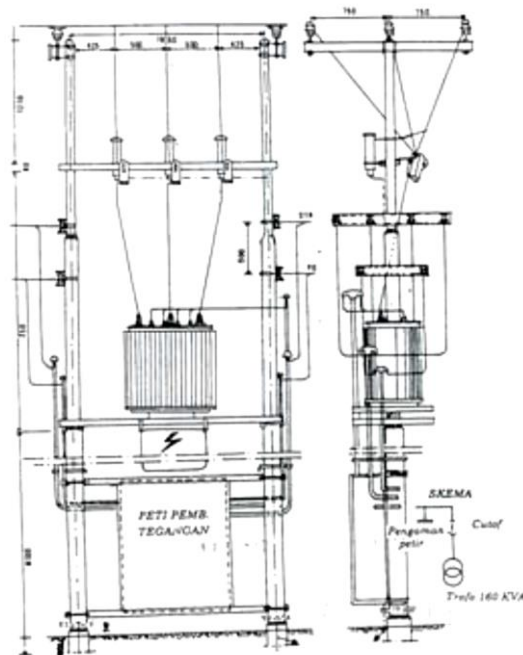
Jaringan distribusi primer merupakan awal penyaluran tenaga listrik dari Pusat Pembangkit Tenaga Listrik ke konsumen untuk sistem pendistribusian langsung. Sedangkan untuk sistem pendistribusian tak langsung merupakan tahap berikutnya dari jaringan transmisi dalam upaya menyalurkan tenaga listrik ke konsumen. Jaringan distribusi primer atau jaringan distribusi tegangan tinggi (JDTT) memiliki tegangan sistem sebesar 20 kV. Untuk wilayah kota tegangan diatas 20 kV tidak diperkenankan, mengingat pada tegangan 30 kV akan terjadi gejala-gejala korona yang dapat mengganggu frekuensi radio, TV, telekomunikasi, dan telepon.

Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Primer 20 kV⁷

Sifat pelayanan sistem distribusi sangat luas dan kompleks, karena konsumen yang harus dilayani mempunyai lokasi dan karakteristik yang berbeda. Sistem distribusi harus dapat melayani konsumen yang terkonsentrasi di kota, pinggiran kota dan konsumen di daerah terpencil. Sedangkan dari karakteristiknya ada konsumen perumahan dan konsumen dunia industri. Sistem konstruksi saluran distribusi terdiri dari saluran udara dan saluran bawah tanah. Pemilihan konstruksi tersebut didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut: alasan teknis yaitu berupa persyaratan teknis, alasan ekonomis, alasan estetika dan alasan pelayanan yaitu kontinuitas pelayanan sesuai jenis konsumen.

3. Gardu Pembagi/Gardu Distribusi

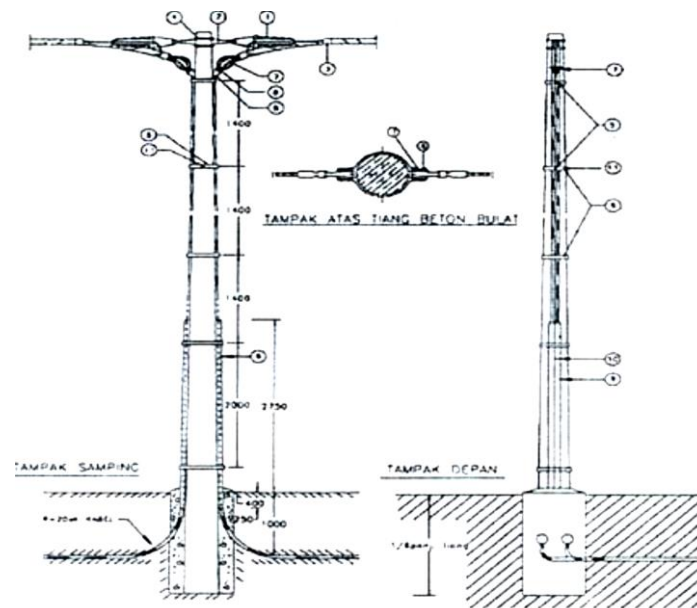
Berfungsi merubah tegangan listrik dari jaringan distribusi primer menjadi tegangan terpakai yang digunakan untuk konsumen dan disebut sebagai jaringan distribusi sekunder. Kapasitas transformator yang digunakan pada Gardu Pembagi ini tergantung pada jumlah beban yang akan dilayani dan luas daerah pelayanan beban. Bisa berupa transformator satu fasa dan bisa juga berupa transformator tiga fasa.

Gambar 2.6 Gardu Distribusi Jenis Tiang⁷

4. Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder atau jaringan distribusi tegangan rendah (JDTR) merupakan jaringan tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan konsumen. Oleh karena itu besarnya tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini 130/230 V dan 130/400 V untuk sistem lama, atau 230/400 V untuk sistem baru. Tegangan 130 V dan 230 V merupakan tegangan antara fasa dengan netral, sedangkan tegangan 400 V merupakan tegangan fasa dengan fasa.⁷

⁷ Subwanto, Daman. 2009. *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Edisi Pertama. Universitas Negeri Padang. Hal 4–7

Gambar 2.7 Jaringan Distribusi Sekunder 220 V⁷

2.6 Konfigurasi Sistem Distribusi

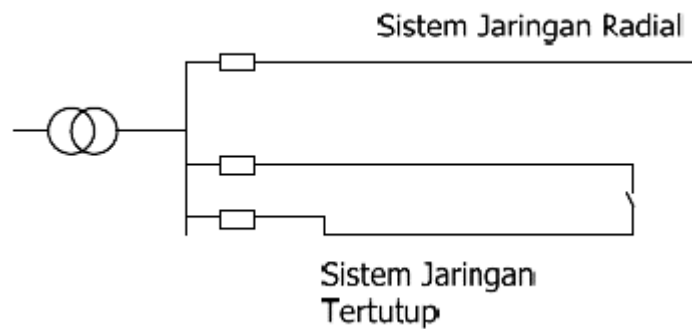
Secara umum konfigurasi suatu jaringan tenaga listrik hanya mempunyai 2 konsep konfigurasi :

1. 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.

2. Jaringan bentuk tertutup

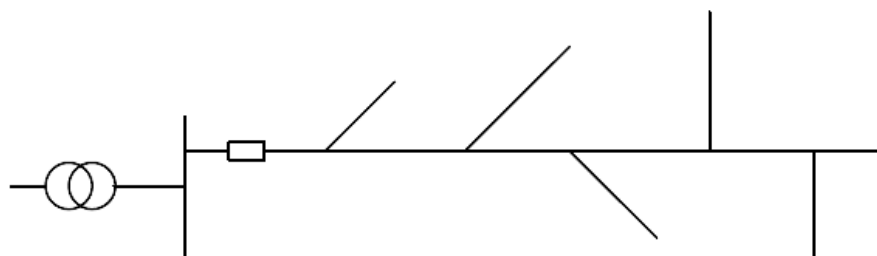
Yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.

Gambar 2.8 Pola Jaringan Distribusi Dasar⁸

Berdasarkan kedua pola dasar tersebut, dibuat konfigurasi-konfigurasi jaringan sesuai dengan maksud perencanaannya sebagai berikut :

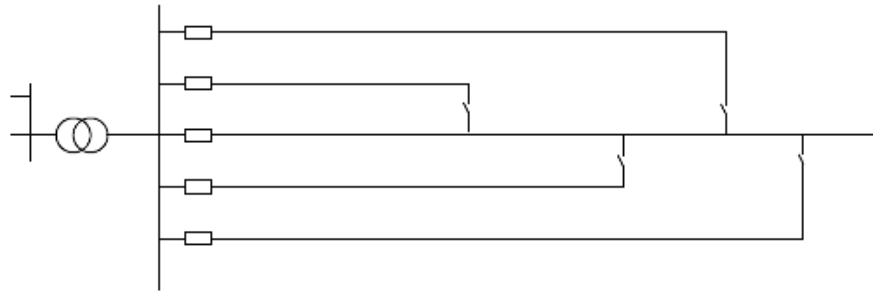
a. Konfigurasi Tulang Ikan (*Fish-Bone*)

Konfigurasi fishbone ini adalah tipikal konfigurasi dari saluran udara Tegangan Menengah beroperasi radial. Pengurangan luas pemadaman dilakukan dengan mengisolasi bagian yang terkena gangguan dengan memakai pemisah [*Pole Top Switch (PTS)*, *Air Break Switch (ABSW)*] dengan koordinasi relai atau dengan system SCADA. Pemutus balik otomatis PBO (*Automatic Recloser*) dipasang pada saluran utama dan saklar seksi otomatis SSO (*Automatic Sectionalizer*) pada pencabangan.

Gambar 2.9 Konfigurasi Tulang Ikan (*Fishbone*)⁸

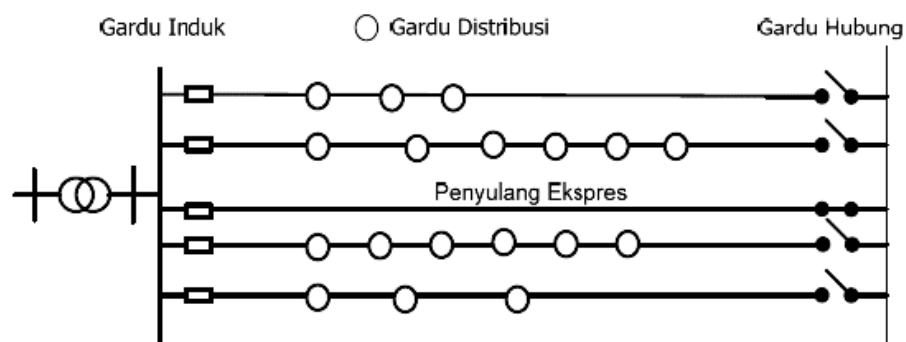
b. Konfigurasi Kluster (*Cluster / Leap Frog*)

Konfigurasi saluran udara Tegangan Menengah yang sudah bertipikal sistem tertutup, namun beroperasi radial (*Radial Open Loop*). Saluran bagian tengah merupakan penyulang cadangan dengan luas penampang penghantar besar.

Gambar 2.10 Konfigurasi Kluster (*Leap Frog*)⁸

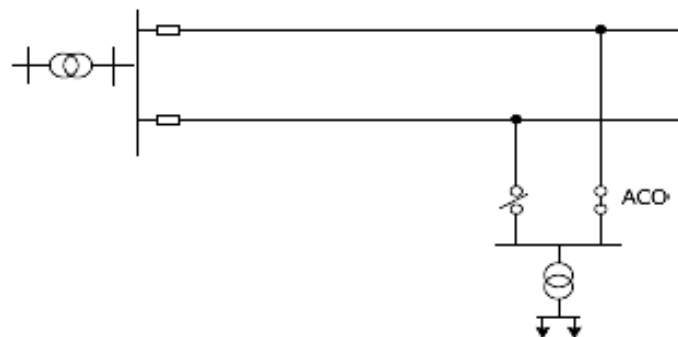
c. Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)

Konfigurasi spindel umumnya dipakai pada saluran kabel bawah tanah. Pada konfigurasi ini dikenal 2 jenis penyulang yaitu penyulang cadangan (*standby* atau *express feeder*) dan penyulang operasi (*working feeder*). Penyulang cadangan tidak dibebani dan berfungsi sebagai back-up supply jika terjadi gangguan pada penyulang operasi. Untuk konfigurasi 2 penyulang, maka faktor pembebanan hanya 50%. Berdasarkan konsep *Spindel* jumlah penyulang pada 1 spindel adalah 6 penyulang operasi dan 1 penyulang cadangan sehingga faktor pembebanan konfigurasi spindel penuh adalah 85 %. Ujung-ujung penyulang berakhir pada gardu yang disebut Gardu Hubung dengan kondisi penyulang operasi “NO” (*Normally Open*), kecuali penyulang cadangan dengan kondisi “NC” (*Normally Close*).

Gambar 2.11 Konfigurasi Spindel (*Spindle Configuration*)⁸

d. Konfigurasi *Fork*

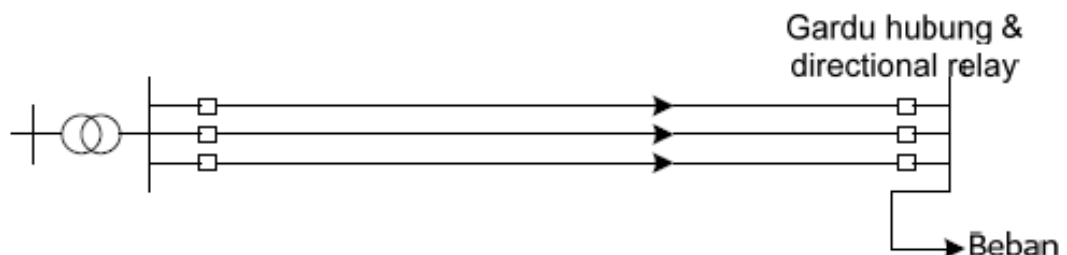
Konfigurasi ini memungkinkan 1 (satu) Gardu Distribusi dipasok dari 2 penyulang berbeda dengan selang waktu pemadaman sangat singkat (*Short Break Time*). Jika penyulang operasi mengalami gangguan, dapat dipasok dari penyulang cadangan secara efektif dalam waktu sangat singkat dengan menggunakan fasilitas *Automatic Change Over Switch* (ACOS). Pencabangan dapat dilakukan dengan sadapan *Tee- Off* (TO) dari Saluran Udara atau dari Saluran Kabel tanah melalui Gardu Distribusi.



Gambar 2.12 Konfigurasi Fork⁸

e. Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)

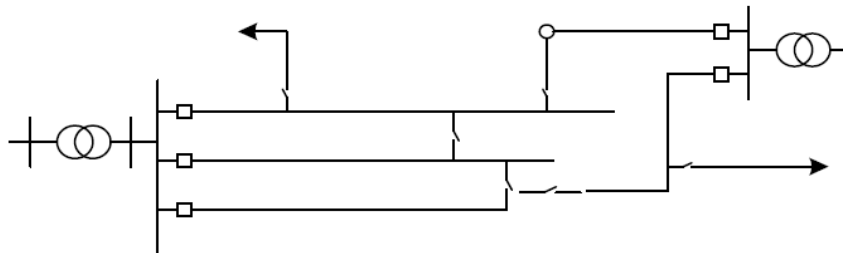
Konfigurasi yang terdiri sejumlah penyulang beroperasi paralel dari sumber atau Gardu Induk yang berakhir pada Gardu Distribusi. Konfigurasi ini dipakai jika beban pelanggan melebihi kemampuan hantar arus penghantar. Salah satu penyulang berfungsi sebagai penyulang cadangan, guna mempertahankan kontinuitas penyaluran. Sistem harus dilengkapi dengan rele arah (*Directional Relay*) pada Gardu Hilir (Gardu Hubung).



Gambar 2.13 Konfigurasi Spotload (*Parallel Spot Configuration*)⁸

f. Konfigurasi Jala-Jala (*Grid, Mesh*)

Konfigurasi jala-jala, memungkinkan pasokan tenaga listrik dari berbagai arah ke titik beban. Rumit dalam proses pengoperasian, umumnya dipakai pada daerah padat beban tinggi dan pelanggan-pelanggan pemakaian khusus.



Gambar 2.14 Konfigurasi Jala-jala (*Grid, Mesh*)⁸

g. Konfigurasi lain-lain

Selain dari model konfigurasi jaringan yang umum dikenal sebagaimana diatas, terdapat beberapa model struktur jaringan yang dapat dipergunakan sebagai alternatif model model struktur jaringan.⁸

2.7 Rugi-Rugi Pada Saluran Distribusi

Sistem distribusi sebagai perantara saluran transmisi tegangan tinggi memiliki tingkat tegangan yang lebih rendah, sehingga arus yang mengalir melalui saluran lebih tinggi, arus yang tinggi menyebabkan rugi-rugi yang tinggi pula. Dengan demikian maka hal ini akan sangat berpengaruh terhadap penurunan kapasitas daya saluran dan tegangan pada titik bus beban. Rugi-rugi daya yang terjadi pada saluran (penghantar) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P = I^2 \cdot R \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

P : rugi-rugi daya (watt)

I : arus beban (ampere)

R : resistansi saluran (ohm)

⁸ Tim Penulis. 2010. *Buku 1: Kriteria Desain Enjiniring Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. Edisi 1. PT PLN (Persero). Jakarta. Hal 55–58

Rugi daya dalam sebuah sistem tenaga listrik tidak dapat dihilangkan tetapi dapat diperkecil. Ada rugi daya yang bersifat teknis dan ada yang berupa non teknis. Rugi daya yang bersifat teknis berupa hilang daya pada peralatan listrik, seperti motor listrik, transformator dan sebagainya. Rugi daya teknis dapat dihitung dan dapat diatur untuk diperkecil. Sedangkan rugi daya non-teknis bisa berupa pencurian listrik, konsumen yang tidak membayar, kesalahan dalam perhitungan rugi daya dan sebagainya.

2.8 Drop Tegangan

Panjang sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dapat didesain dengan mempertimbangkan drop tegangan (*Drop Voltage*). Drop tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Apabila perbedaan nilai tegangan tersebut melebihi standar yang ditentukan, maka mutu penyaluran tersebut rendah. Di dalam saluran tenaga listrik persoalan tegangan sangat penting, baik dalam keadaan operasi maupun dalam perencanaan sehingga harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik saluran. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan.

Berdasarkan dari standar SPLN No.1 tahun 1978, dimana ditentukan bahwa variasi tegangan pelayanan, sebagian akibat jatuh tegangan, karena adanya perubahan beban, maksimum +5% dan minimum -10% dari tegangan nominalnya. Besarnya rugi tegangan pada saluran tersebut, diukur pada titik yang paling jauh (ujung).

Drop tegangan pada saluran adalah:

$$\Delta V = I (R \cos \phi + X \sin \phi) l \dots\dots\dots(2.8)$$

Besar persentase drop tegangan pada saluran distribusi primer dapat dihitung dengan :

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

ΔV : drop tegangan (V)

$\% \Delta V$: drop tegangan dalam %

I : arus beban (A)

R : resistansi saluran (Ω)

X : reaktansi saluran (Ω)

$\cos \phi$: faktor daya beban

l : panjang penghantar (meter)

V : tegangan kerja (V)

Dari persamaan terlihat bahwa nilai drop tegangan ditentukan oleh beberapa factor, yaitu daya aktif (P), resistansi dan reaktansi saluran (R dan X) serta daya reaktif (Q). Pengaturan daya aktif erat kaitannya dengan pengaturan frekuensi sistem. Sedangkan pengaturan daya reaktif akan mempengaruhi nilai tegangan. Oleh karena itu dengan melakukan pengaturan nilai daya reaktif kita dapat mengatur nilai tegangan.⁹

2.9 Studi Aliran Daya

2.9.1 Umum

Studi aliran daya ialah penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya, dan faktor daya atau daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan listrik pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan terjadi di masa yang akan datang. Studi aliran beban sangat penting dalam perencanaan pengembangan suatu sistem untuk masa yang akan datang, karena pengoperasian yang baik dari sistem tersebut banyak bergantung pada diketahuinya efek interkoneksi dengan sistem tenaga yang lain, beban yang baru, stasiun pembangkit baru, serta saluran transmisi baru, sebelum semuanya itu dipasang.

Sebelum komputer digital besar dikembangkan, studi aliran daya dilakukan pada papan hitung a.c. yang memberikan model berfasa tunggal dalam

⁹ <http://electra-motion.blogspot.com/2011/03/tes-awal.html> (diakses pada 23 Mei 2015)

skala kecil dari sistem yang sebenarnya, yaitu dengan saling menghubungkan beberapa elemen rangkaian dan sumber tegangan. Pekerjaan melaksanakan hubungan, pengaturannya, serta pembacaan data-data yang didapat sangat melelahkan dan memerlukan banyak waktu. Pada masa kini komputer digital dapat dengan cepat memberikan jawaban atas studi aliran daya untuk sistem yang kompleks sekalipun. Misalnya, suatu program komputer dapat dengan mudah menangani lebih dari 1500 buah rel, 2500 saluran transmisi, 500 buah transformator dengan perubahan sadapan dalam keadaan dibebani, dan 25 buah transformator penggesar-fasa. Hasil-hasil yang lengkap dicetak cepat dan ekonomis.

Pada perencana sistem melibatkan dirinya dalam studi sistem tenaga yang akan ada dan diperlukan pada masa 10 tahun atau 20 tahun yang akan datang. Untuk membangun sebuah pusat tenaga nuklir yang baru misalnya, sejak dimulainya perencanaan hingga dialirkannya tenaga lewat saluran transmisi, orang dapat saja memerlukan waktu lebih dari 10 tahun. Suatu perusahaan pembangkit tenaga jauh-jauh sebelum memulai usahanya sudah harus mengetahui masalah-masalah yang berhubungan dengan lokasi pusat itu dan cara pengaturan saluran-saluran transmisi yang sebaik-baiknya untuk menyampaikan tenaga yang dihasilkan ke pusat-pusat beban yang memerlukannya, yang mungkin sekali belum ada pada saat perencanaan sudah harus dibuat.

Betapa pentingnya studi aliran daya dalam merencanakan perluasan sistem tenaga dan dalam menentukan operasi terbaik untuk sistem yang telah ada. Keterangan utama yang diperoleh dari suatu studi aliran daya adalah besar tegangan dan sudut fasa tegangan pada setiap rel, daya nyata dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran.¹⁰

2.9.2 Metode Perhitungan Aliran Daya Pada Software ETAP

Ada beberapa metode yang bisa digunakan untuk menghitung aliran daya, antara lain:

¹⁰ Stevenson, William D, JR. 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Edisi Keempat. Erlangga. Jakarta. Hal 6

1. Accelerated Gauss-Seidel Method

- Hanya butuh sedikit nilai masukan, tetapi lambat dalam kecepatan perhitungan.

$$[P + jQ] = [V^T][Y^*_{BUS}][V^*]$$

2. Newton Raphson Method

- Cepat dalam perhitungan tetapi membutuhkan banyak nilai masukan dan parameter.
- First Order Derivative digunakan untuk mempercepat perhitungan.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

3. Fast Decoupled Method

- Dua set persamaan iterasi, antara sudut tegangan, daya reaktif dengan magnitude tegangan.
- Cepat dalam perhitungan namun kurang presisi.
- Baik untuk sistem radial dan sistem dengan jalur panjang

$$\begin{aligned} [\Delta P] &= [J_1][\Delta \delta] \\ [\Delta Q] &= [J_4][\Delta V]^{11} \end{aligned}$$

2.10 ETAP (Electric Transient and Analysis Program)

ETAP (Electric Transient and Analysis Program) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, 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. ETAP ini awalnya dibuat dan dikembangkan untuk meningkatkan kualitas keamanan fasilitas nuklir di Amerika Serikat yang selanjutnya dikembangkan menjadi sistem monitor manajemen

¹¹ <http://hanool.blogspot.com/2013/09/pengenalan-etap.html> (diakses pada 23 Mei 2015)

energi secara real time, simulasi, kontrol, dan optimasi sistem tenaga listrik. ETAP dapat digunakan untuk membuat proyek sistem tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (one line diagram) dan jalur sistem pentanahan untuk berbagai bentuk analisis, antara lain: aliran daya, hubung singkat, starting motor, transient stability, koordinasi relay proteksi dan sistem harmonisasi. Proyek sistem tenaga listrik memiliki masing-masing elemen rangkaian yang dapat diedit langsung dari diagram satu garis dan atau jalur sistem pentanahan. Untuk kemudahan hasil perhitungan analisis dapat ditampilkan pada diagram satu garis.

ETAP *PowerStation* memungkinkan anda untuk bekerja secara langsung dengan tampilan gambar single line diagram/diagram satu garis. Program ini dirancang sesuai dengan tiga konsep utama:

1. Virtual Reality Operasi

Sistem operational yang ada pada program sangat mirip dengan sistem operasi pada kondisi realnya. Misalnya, ketika anda membuka atau menutup sebuah sirkuit breaker, menempatkan suatu elemen pada sistem, dan mengubah status operasi suatu motor.

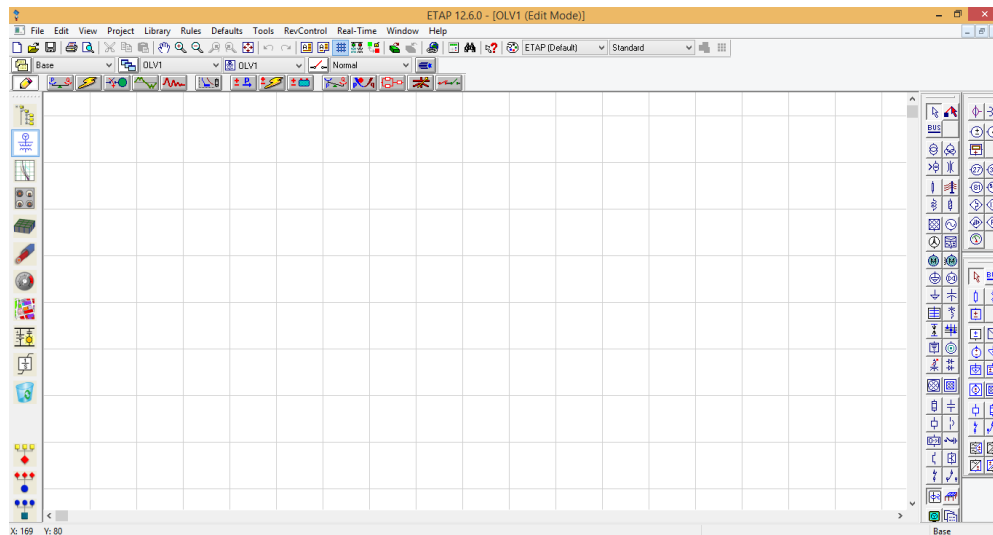
2. Total Integration Data

ETAP *PowerStation* menggabungkan informasi sistem elektrikal, sistem logika, sistem mekanik, dan data fisik dari suatu elemen yang dimasukkan dalam sistem database yang sama. Misalnya, untuk elemen sebuah kabel, tidak hanya berisikan data kelistrikan dan tentang dimensi fisiknya, tapi juga memberikan informasi melalui raceways yang di lewati oleh kabel tersebut. Dengan demikian, data untuk satu kabel dapat digunakan untuk dalam menganalisa aliran beban (load flow analysis) dan analisa hubung singkat (short-circuit analysis) yang membutuhkan parameter listrik dan parameter koneksi serta perhitungan ampacity derating suatu kabel.

3. Simplicity In Data Entry

ETAP *PowerStation* memiliki data yang detail untuk setiap elemen yang digunakan. Dengan menggunakan editor data, dapat mempercepat proses memasukkan data suatu elemen. Data-data yang ada pada program ini telah di

masukkan sesuai dengan data-data yang ada di lapangan untuk berbagai jenis analisa atau desain.



Gambar 2.15 Gambar Kerja Editor pada ETAP 12.6

ETAP *PowerStation* dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni load flow (aliran daya), unbalanced load flow (aliran beban tidak seimbang) short circuit (hubung singkat), motor starting, harmonisa, transient stability, protective device coordination, cable derating, dll.

ETAP *PowerStation* juga menyediakan fasilitas Library yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. Library ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP *PowerStation* adalah:

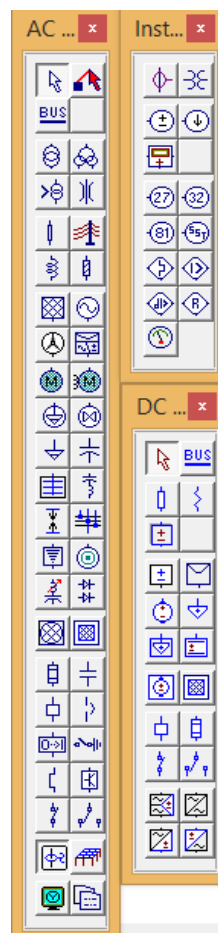
1. One Line Diagram, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
2. Library, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektrik maupun mekanis dari peralatan yang detail dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
3. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode-metode yang dipakai.

4. Study Case, berisikan parameter-parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

2.11 Elemen-elemen Sistem Tenaga Listrik Pada ETAP

Suatu sistem tenaga terdiri atas sub-sub bagian, salah satunya adalah aliran daya dan hubung singkat. Untuk membuat simulasi aliran daya dan hubung singkat, maka data-data yang dibutuhkan untuk menjalankan program simulasi antara lain:

1. Data Generator
2. Data Transformator
3. Data Kawat Penghantar
4. Data Beban
5. Data Bus



Gambar 2.16 Elemen-elemen yang Ada di ETAP 12.6

Program analisis ketidakseimbangan aliran daya pada software ETAP dapat menghitung tegangan pada tiap-tiap cabang, aliran arus pada sistem tenaga listrik, dan aliran daya yang mengalir pada sistem tenaga listrik. Metode perhitungan ketidakseimbangan aliran daya pada software ETAP menggunakan metode *Current Injection*.



Gambar 2.17 Toolbar Unbalanced Load Flow di ETAP 12.6

Gambar dari kiri ke kanan menunjukkan toolbar aliran daya, yaitu:

1. Run Unbalanced Load Flow adalah icon toolbar aliran daya yang menghasilkan atau menampilkan hasil perhitungan aliran daya sistem distribusi tenaga listrik dalam diagram satu garis.
2. Fault Insertion Open Phase A adalah icon untuk membuat beban tak seimbang.
3. Display Option adalah bagian tombol untuk menampilkan hasil aliran daya.
4. Alert View adalah icon untuk menampilkan batas kritis dan marginal dari hasil keluaran aliran daya sistem distribusi tenaga listrik.
5. Report Manager adalah icon untuk menampilkan hasil aliran daya dalam bentuk report yang dapat dicetak.¹²

¹² <http://energi08pnup.blogspot.com/2012/08/tentang-etap-electric-transient-and.html> (diakses pada 23 Mei 2015)