

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik¹

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 6,3 kV sampai 23 kV dinaikkan tegangannya oleh Gardu Induk (GI) dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 150 kV, 275 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.

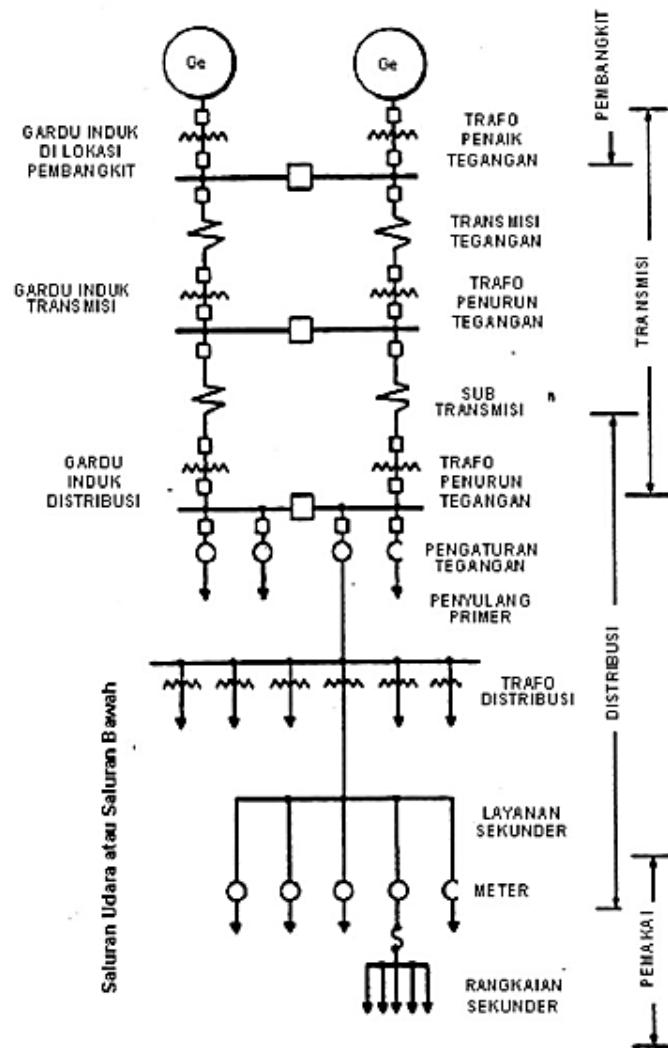
Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian 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 (HV,UHV,EHV) menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapan-perengkapannya, 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*

¹ Suhadi. dkk. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. 2008. Hal 11.

step-down. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda.



Gambar 2.1 Pengelompokan Tegangan Sistem Tenaga Listrik

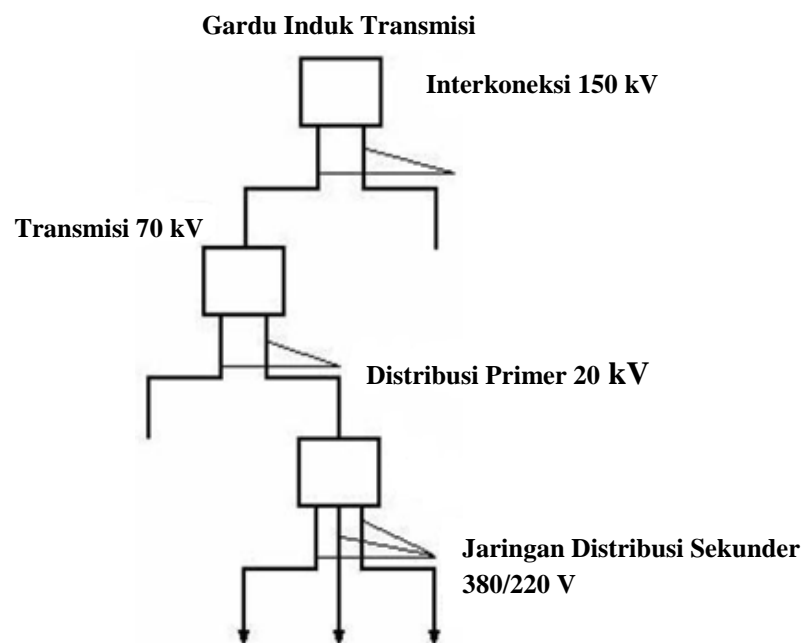
2.2 Jaringan Distribusi²

Jaringan distribusi terdiri atas dua bagian, yang pertama adalah jaringan tegangan menengah/primer (JTM), yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk subtransmisi ke gardu distribusi, jaringan distribusi primer menggunakan tiga kawat atau empat kawat untuk tiga fasa. Jaringan yang kedua adalah jaringan tegangan rendah (JTR), yang menyalurkan daya listrik

²Nurjanah, Triani. *Analisa Pengaruh Pemasangan Transformator Sisipan di Gardu I.1913 dan I.762 pada Penyulang Kresna PT PLN (Persero) Rayon Sukarami*. 2015. Hal 6.

dari gardu distribusi ke konsumen, dimana sebelumnya tegangan tersebut ditransformasikan oleh transformator distribusi dari 20 kV menjadi 380/220 Volt, jaringan ini dikenal pula dengan jaringan distribusi sekunder.

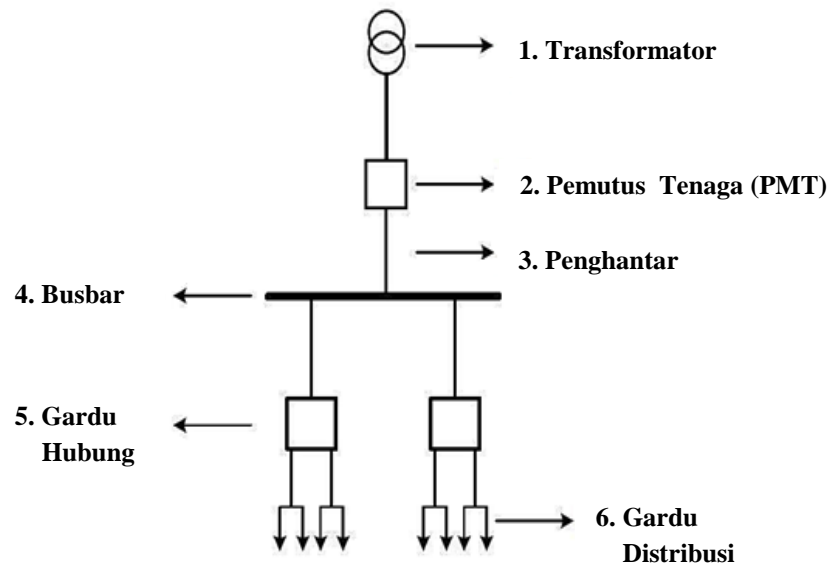
Jaringan distribusi sekunder terletak antara transformator distribusi dan sambungan pelayanan (beban) menggunakan penghantar udara terbuka atau kabel dengan sistem tiga fasa empat kawat (tiga kawat fasa dan satu kawat netral). Dapat kita lihat gambar dibawah proses penyediaan tenaga listrik bagi para konsumen.



Gambar 2.2 Diagram Sistem Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.2.1 Jaringan Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke 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 suplay tenaga listrik sampai ke pusat beban. Berikut adalah gambar bagian-bagian distribusi primer secara umum.



Gambar 2.3 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 yaitu pemutus daya
3. Penghantar, berfungsi sebagai penghubung daya
4. Busbar, berfungsi sebagai titik pertemuan / hubungan antara trafo daya dengan peralatan lainnya
5. Gardu hubung, berfungsi menyalurkan daya ke gardu-gardu distribusi tanpa mengubah tegangan.
6. Gardu distribusi, berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

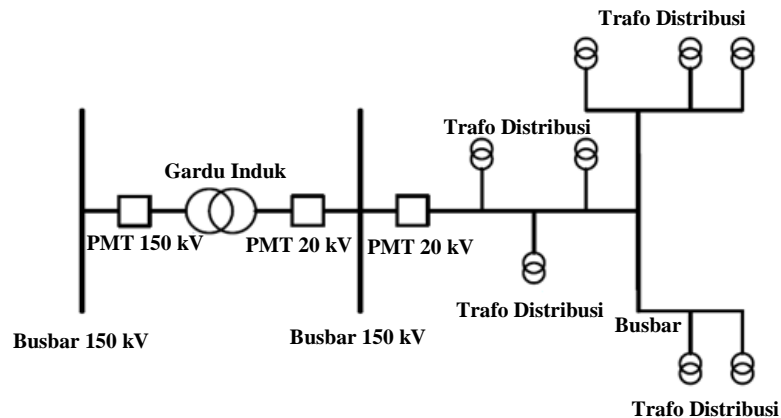
2.2.2 Jaringan Distribusi Primer Menurut Susunan Rangkaian³

Menurut susunan rangkaian, jaringan distribusi primer dikelompokkan menjadi 5 model, yaitu jaringan radial, jaringan hantaran penghubung, jaringan lingkaran, jaringan spindel dan sistem gugus atau kluster.

³ <https://electricdot.wordpress.com/2011/08/16/tipe-tipe-jaringan-distribusi-tegangan-menengah/>

1. Jaringan Radial

Sistem distribusi dengan pola radial ditunjukkan pada gambar 3.4 merupakan sistem jaringan distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem jaringan radial terdapat beberapa penyulang yang dapat menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial.

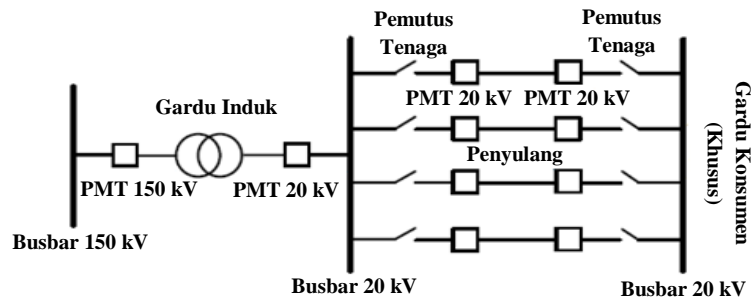


Gambar 2.4 Skema Saluran Sistem Radial

Keuntungan dari sistem jaringan ini yaitu sistem ini tidak rumit dan lebih murah dibandingkan dengan sistem yang lain. Sedangkan kerugiannya yaitu keandalan dari sistem jaringan radial lebih rendah dibanding dengan sistem lainnya. Kurangnya keandalan tersebut disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila terjadi gangguan pada jalur utama tersebut, maka seluruh gardu akan ikut padam. Selain itu, mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan pada ujung saluran terjadi jatuh tegangan yang besar.

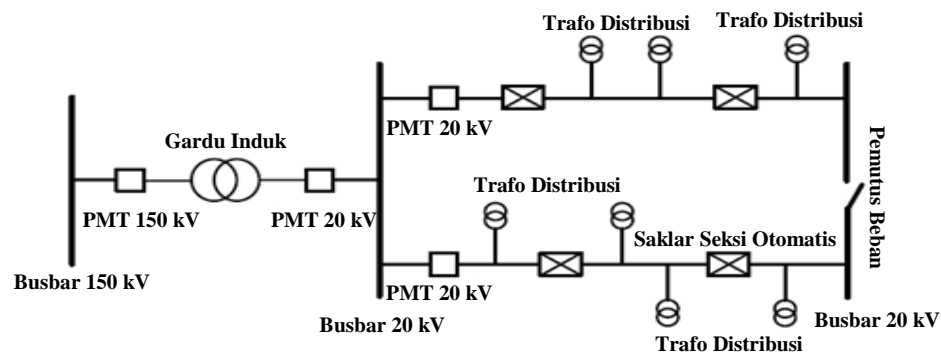
2. Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

Sistem distribusi jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*) ditunjukkan seperti gambar 3.5 digunakan untuk pelanggan *premium* atau pelanggan penting yang tidak boleh padam seperti Rumah Sakit, Bandar Udara, dan lain-lain. Sistem distribusi ini memiliki dua penyulang sekaligus dengan setiap penyulang langsung terkoneksi ke gardu pelanggan khusus. Sehingga apabila terjadi gangguan pada salah satu penyulang maka pasokan listrik akan di pindah ke penyulang lain.

Gambar 2.5 Skema Saluran *Tie Line*

3. Jaringan Loop

Sistem distribusi jaringan loop seperti ditunjukkan pada gambar 3.6 merupakan jaringan distribusi primer, gabungan dari dua tipe jaringan radial dimana ujung kedua jaringan dipasang PMT. Pada keadaan normal tipe ini bekerja secara radial dan pada saat terjadi gangguan PMT dapat dioperasikan sehingga gangguan dapat terlokalisir. Tipe ini lebih handal dalam penyaluran tenaga listrik dibandingkan tipe radial namun biaya investasinya lebih mahal.

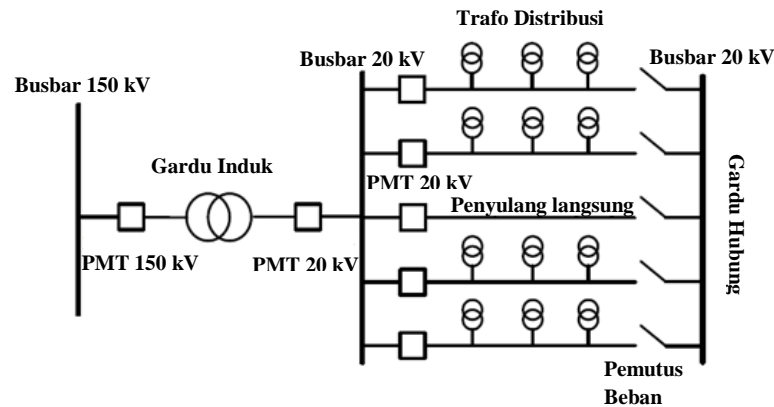


Gambar 2.6 Skema Saluran Sistem Loop

4. Jaringan Spindel

Sistem spindel seperti ditunjukkan pada gambar 3.7 merupakan kombinasi antara jaringan radial dengan jaringan rangkaian terbuka (*open loop*). Sistem jaringan spindle terdiri dari beberapa penyulang dengan sumber tegangan yang berasal dari gardu induk distribusi dan kemudian disalurkan pada sebuah gardu hubung. Pada sebuah spindle terdiri dari beberapa penyulang aktif sehingga apabila salah satu penyulang terganggu, maka dengan segera dapat digantikan

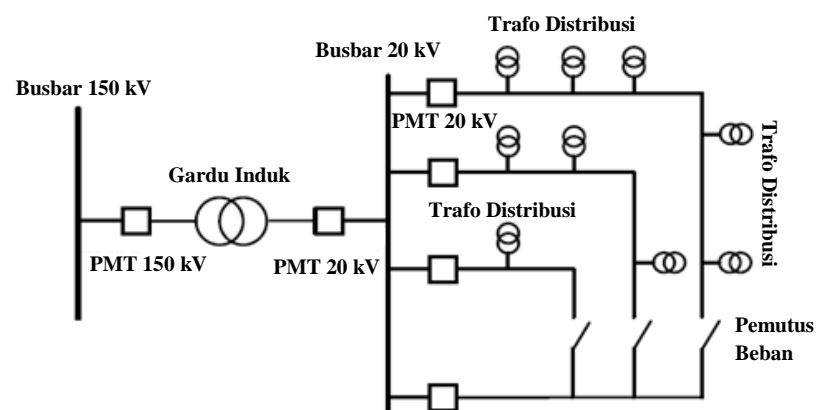
oleh penyulang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin. Pada bagian tengah penyulang dipasang gardu tengah yang berfungsi sebagai titik manufer ketika terjadi gangguan pada jaringan tersebut.



Gambar 2.7 Skema Saluran Sistem Spindel

5. Sistem Cluster

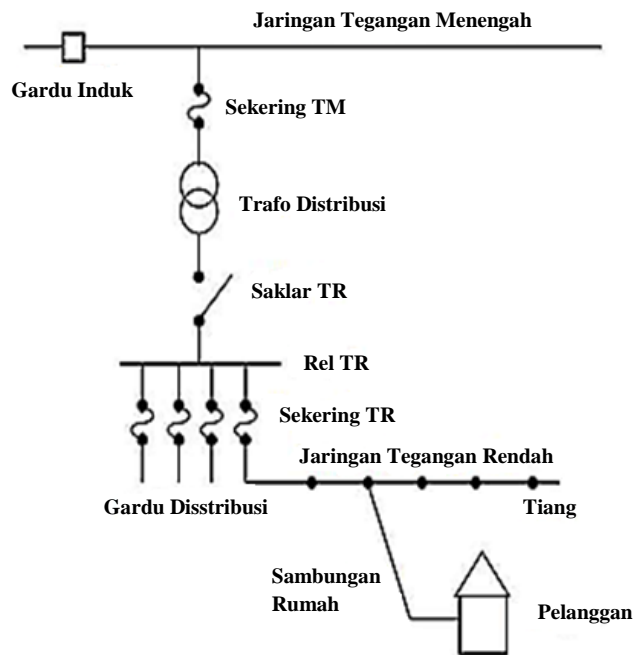
Sistem cluster seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8 memiliki kemiripan dengan sistem spindle. Akan tetapi pada sistem cluster tidak digunakan gardu hubung, sehingga express feeder dari gardu hubung ke tiap jaringan. Express feeder ini berguna sebagai titik manufer ketika terjadi gangguan pada salah satu bagian jaringan.



Gambar 2.8 Skema Saluran Sistem Cluster

2.2.3 Jaringan Sistem Distribusi Sekunder⁴

Sistem distribusi sekunder seperti pada gambar 3.9 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.



Gambar 2.9 Hubungan Tegangan Menengah ke Tegangan Rendah dari Konsumen

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di 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.

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini berfungsi menerima daya listrik dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan.

⁴Marsudi, Djiteng. *Pembangkit Energi Listrik*. 2005. Hal 6

Sistem penyaluran daya listrik pada Jaringan Tegangan Rendah dapat dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut :

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR.
2. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*). ukuran kabel LVTC adalah : $2 \times 10 \text{mm}^2$, $2 \times 16 \text{mm}^2$, $4 \times 25 \text{mm}^2$, $3 \times 35 \text{mm}^2$, $3 \times 50 \text{mm}^2$, $3 \times 70 \text{mm}^2$.

Menurut SPLN No.3 Tahun 1978, jaringan tegangan rendah adalah jaringan tegangan rendah yang mencakup seluruh bagian jaringan beserta perlengkapannya, dari sumber penyaluran tegangan rendah sampai dengan alat pembatas/pengukur. Sedangkan STR (Saluran Tegangan Rendah) ialah bagian JTR tidak termasuk sambungan pelayanan (bagian yang menghubungkan STR dengan alat pembatas/pengukur).⁵

2.3 Gardu Distribusi⁶

Gardu Distribusi tenaga listrik adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V).

Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemerintah daerah (Pemda) setempat. Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

1. Jenis Pemasangannya :
 - a. Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol
 - b. Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios

⁵ Suhardjo, dkk. *Pentanahan Jaring Tegang Rendah PLN dan Pentanahan Instalasi (SPLN 3:1978)*. 1978. Hal 1.

⁶ PT. PLN (Persero). *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. 2010. Hal 1.

2. Jenis Konstruksinya :

- a. Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)
- b. Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
- c. Gardu Kios

3. Jenis Penggunaannya :

- a. Gardu Pelanggan Umum
- b. Gardu Pelanggan Khusus

Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (*Remote Terminal Unit*). Untuk fasilitas ini lazimnya dilengkapi fasilitas DC Supply dari Trafo Distribusi pemakaian sendiri atau Trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesatuan.

2.3.1 Gardu Distribusi Sisipan

Gardu distribusi sisipan dimaksudkan untuk mengurangi beban pada gardu distribusi yang sudah ada sebelumnya dengan memindahkan beban ke gardu sisipan yang baru. Pemasangan gardu distribusi sisipan ini juga dapat mengurangi panjang saluran/ radius pelayanan dari gardu distribusi yang sudah terpasang sebelumnya, sehingga jatuh tegangan pada jaringan distribusi sekunder juga ikut berkurang. Pemasangan gardu distribusi sisipan pada tempat yang tepat juga berfungsi untuk meningkatkan kualitas tegangan di ujung jaringan distribusi. Sehingga rugi-rugi daya yang terjadi dapat ditekan.⁷

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 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

⁷ Lisma, dkk. *Perencanaan Pemasangan Gardu Sisip P117 Di PT PLN (Persero) Area Bangka* 2013. Hal 20.

suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan trafo.

2. Besarnya *drop* tegangan pada JTR

Menurut SPLN No. 72 tahun 1987 pasal 4 ayat 19 tentang pengaturan tegangan dan turun tegangan, bahwa jatuh tegangan yang diperbolehkan pada transformator distribusi dibolehkan 3% dari tegangan kerja. Turun tegangan pada STR dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja.

2.4 Transformator⁸

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

Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik kemungkinan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluannya, misalkan kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh.

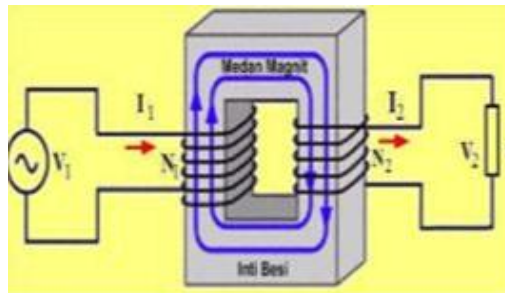
Dalam bidang teknik listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi :

1. Transformator daya, yaitu transformator yang 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

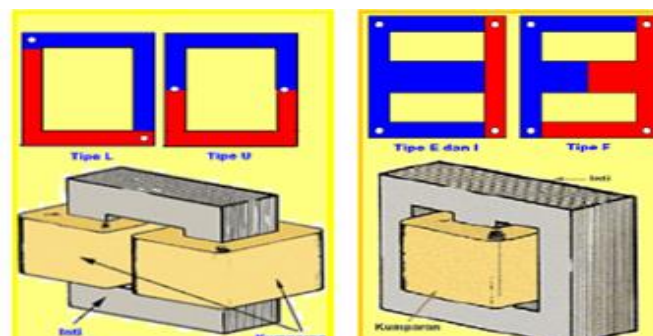
⁸Prih Sumardjati, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*. Hal 357

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 Fluks magnet transformator

Berdasarkan cara meililitkan kumparan pada inti, dikenal dua jenis transformator, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*).



(a)

(b)

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

Pada transformator tipe inti, 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, 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. 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.

2.4.1 Pembebanan Transformator⁹

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

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

Ket :

I = arus beban (A)

S = daya transformator (VA)

V = tegangan sisi sekunder transformator (V)

Menurut PT.PLN (Persero), transformator distribusi diusahakan agar tidak dibebani lebih dari 80 % atau dibawah 40 %. Jika melebihi atau kurang dari nilai tersebut transformator bisa dikatakan *overload* atau *underload*. Diusahakan agar trafo tidak dibebani keluar dari range tersebut. Bila beban trafo terlalu besar maka dilakukan penggantian trafo atau penyisipan trafo atau mutasi trafo. Rumus berikut dapat digunakan untuk melihat besar kapasitas transformator yang ada.

$$\text{kVA beban} = \frac{(I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{T-N})}{1000} \dots\dots\dots(2.2)$$

Ket :

I_R = Arus pada fasa R

I_S = Arus pada fasa S

I_T = Arus pada fasa T

V_{R-N} = Tegangan pada fasa R - Netral

⁹ Sri Budi Santoso. *Penyeimbangan Beban Gardu Distribusi Edisi I*. 2014. Hal 4

V_{S-N} = Tegangan pada fasa S – Netral

V_{T-N} = Tegangan pada fasa T – Netral

$$\text{Persentase beban Transformator (\%)} = \frac{kVA \text{ beban terukur}}{kVA \text{ Trafo}} \times 100 \% \dots (2.3)$$

2.5 Daya Listrik¹⁰

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

2.5.1 Daya Semu¹⁰

Daya semu merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

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

$$\text{Untuk 3 fasa : } S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Ampere)

2.5.2 Daya Aktif¹⁰

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.

$$\text{Untuk 1 fasa : } P = V \times I \times \text{Cos } \theta \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \text{Cos } \theta \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

P = Daya nyata (Watt)

V = Tegangan antar saluran (Volt)

¹⁰ Cekmas Cekdin, dkk. *Transmisi Daya Listrik*. 2013. Hal 36

I = Arus saluran (Ampere)

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

2.5.3 Daya Reaktif¹⁰

Daya reaktif merupakan hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya.

Untuk 1 fasa : $Q = V \times I \times \sin \theta$ (2.8)

Untuk 3 fasa : $Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \theta$ (2.9)

Dimana :

Q = Daya reaktif (VAR)

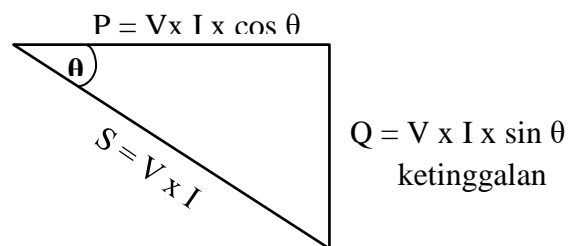
V = Tegangan antar saluran (Volt)

I = Arus saluran (Ampere)

$\sin \theta$ = Faktor daya (tergantung nilai θ)

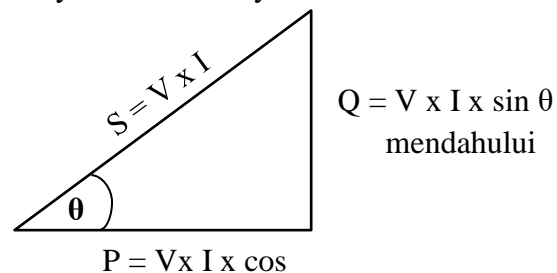
2.5.4 Segitiga Daya¹⁰

Segitiga daya adalah sketsa dari daya semu, daya reaktif dan daya aktif. Sketsa dari segitiga daya yang bersifat induktif ditunjukkan oleh gambar 2.12 dengan sudut antara daya semu dan daya aktif adalah θ .



Gambar 2.12 Segitiga daya yang bersifat Induktif

Sketsa dari segitiga daya yang bersifat kapasitif ditunjukkan oleh gambar 2.13 dengan sudut antara daya semu dan daya aktif adalah θ .



Gambar 2.13 Segitiga daya yang bersifat Kapasitif

2.5.5 Faktor Daya

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu.

Secara teoritis, jika seluruh beban daya yang dipasok oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya satu, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistem pendistribusian. Sehingga, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,5 maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA).

Faktor daya menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi. Perbaikan faktor daya ini menggunakan kapasitor.

Dalam sistem tenaga listrik dikenal 3 jenis faktor daya yaitu faktor daya unity, faktor daya terbelakang (*lagging*) dan faktor daya terdahulu (*leading*) yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem.

2.5.6 Resistansi Penghantar¹¹

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 menggunakan rumus persamaan berikut :

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

R = Resistansi (Ω)

l = Panjang kawat penghantar (m)

A = Luas penampang kawat (m^2)

ρ = Tahanan jenis (Ωm)

¹¹ Hutahuruk. *Transmisi Daya Listrik*.1996. Hal 6.

Tahanan penghantar mempunyai suhu maksimum yang telah distandarkan oleh pabrik pembuatnya (maksimum 30°C untuk Indonesia), perubahan suhu sebesar 1°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 dibawah ini. Perubahan nilai tahanan terhadap suhu, dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \dots\dots\dots 2.11)$$

Dimana T_0 = Temperatur pada penghantar aluminium (°C)

$$R_{t2} = R_{t1} \cdot \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \dots\dots\dots 2.12)^{12}$$

Dimana :

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

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

t_1 = suhu normal penghantar (°C)

t_2 = suhu yang ditentukan (°C)

T_0 = konstanta untuk penghantar tertentu

Nilai – nilai konstanta T_0 adalah sebagai berikut :

T_0 = 234,5 untuk tembaga 100% Cu

T_0 = 241 untuk tembaga 97% Cu

T_0 = 228 untuk aluminium 61% Al

2.5.7 Model Saluran Distribusi

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

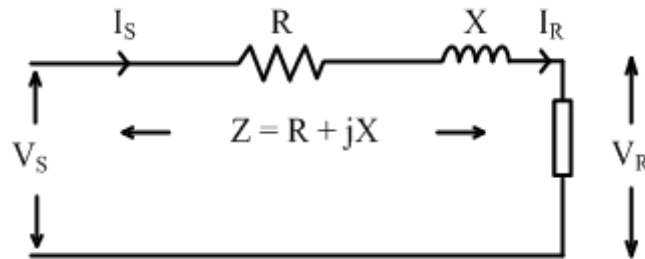
Model saluran distribusi digunakan untuk menghitung tegangan, arus dan aliran daya yang dipengaruhi oleh panjang saluran. Model saluran distribusi diperoleh dengan mengalikan impedansi saluran persatuan panjang dengan panjang saluran.

$$Z = (r + j\omega L) \dots\dots\dots (2.13)$$

¹¹ TS Hutahuruk. *Transmisi Daya Listrik*. 1996. Hal 7.

$$Z = R + jX \dots\dots\dots (2.14)$$

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 ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2.14 Rangkaian ekivalen saluran distribusi

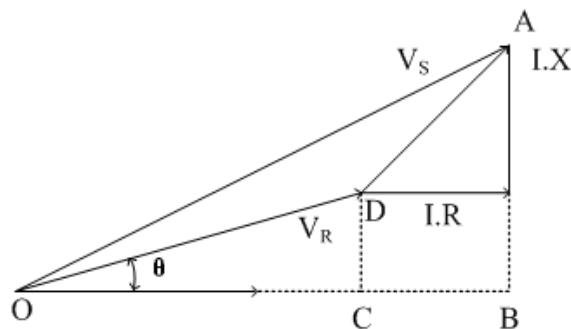
2.5.8 Jatuh Tegangan (*Drop Tegangan*)

Jatuh tegangan (drop voltage) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar.

Adapun penyebab jatuh tegangan (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 2.13 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 :

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \dots\dots\dots (2.15)$$

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

Pada gambar 2.13 dapat diperhatikan bahwa persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah :

$$V_s = V_r + I (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots (2.16)$$

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

$$V_s = V_r + I_z \text{ atau } V_s - V_r = I_z \dots\dots\dots (2.17)$$

Sehingga

$$\Delta V = I_z \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\Delta V = I (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots (2.19)^{12}$$

Maka untuk saluran distribusi pada saluran distribusi 3 phasa adalah :

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots (2.20)^{12}$$

Dimana :

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

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

$$\text{Tegangan pada sisi penerima } V_r = V_s - \Delta V \dots\dots\dots (2.21)$$

Drop tegangan dalam persentase :

$$\% \text{ V rugi} = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.22)$$

Keterangan :

ΔV = Drop tegangan (V)

sI = 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

X = Reaktansi saluran (Ω)

qf = power factor reaktif

¹² Wahyudi Sarimun. *Buku Saku Pelayanan Teknik*. 2014. Hal 25

2.5.9 Rugi Daya (*Power Losses*)

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.

Besar rugi daya satu fasa dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\Delta P = I^2 \times R \dots\dots\dots (2.23)^{12}$$

Keterangan :

ΔP = Rugi daya pada saluran (Watt)

I = Arus beban pada saluran (Ampere)

R = Resistansi saluran (Ohm)

Untuk rugi-rugi daya pada saluran tiga fasa dinyatakan dengan persamaan :

$$\Delta P = 3 \times I^2 \times R \dots\dots\dots (2.24)^{12}$$

$$\% \text{ Losses jaringan} = \frac{\text{Losses}}{\text{daya kirim}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.25)^{13}$$

2.6 ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*)

2.6.1 Pengertian ETAP¹⁴

Perangkat lunak 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.

Analisa tenaga listrik yang dilakukan ETAP antara lain :

1. Analisa aliran daya
2. Analisa hubung singkat
3. *Arc Flash Analysis*

¹³ Rati Novalina. *Analisis Perhitungan Losses Pada Jaringan Tegangan Rendah Dengan Perbaikan Pemasangan Pemasangan Kapasitor*. 2013. Hal 25.

¹⁴ Tim Lab Tenaga Listrik Teknik Elektro. *Modul Praktikum Sistem Tenaga Listrik*. Hal 2.

4. Analisa kestabilan transien, dll.

Dalam menganalisa tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (single line diagram) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah di standardisasi untuk diagram saluran tunggal. Elemen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan listrik, tetapi merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili.

2.6.2 Standar Simbol ETAP¹⁴

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. ANSI adalah Amerika yang berarti 60 Hz, dan IEC adalah Eropa yang berarti 50 Hz, yaitu sesuai dengan frekuensi yang dipakai di Indonesia.

2.6.3 Langkah Penggunaan ETAP¹⁵

Berikut beberapa prosedur yang digunakan dalam menjalankan ETAP *PowerStation* 12.6 yaitu :

1. Mempersiapkan *plant*

Persiapan yang perlu dilakukan dalam analisa atau desain dengan bantuan ETAP *PowerStation* 12.6.0 adalah :

1. *Single Line* Diagram
2. Data peralatan baik elektris maupun mekanis
3. *Library* untuk mempermudah editing data

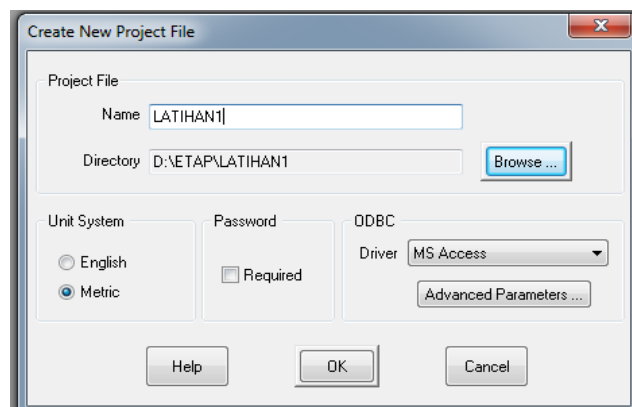
¹⁵ Anton Firmansyah. *Modul Pelatihan ETAP*. 2014. Hal 2.

Single Line Diagram tersebut membutuhkan data peralatan sesuai dengan data peralatan baik elektrik maupun mekanis yaitu sebagai berikut :

1. *Power Grid*
2. Generator
3. *Mode Voltage Control*
4. Bus
5. Transformator
6. *Circuit Breaker*
7. *Disconnect Switch*
8. *Lumped Load*
9. Motor Sinkron
10. Motor Induksi
11. *High Filter*
12. Capacitor
13. *Over Current Relay*
14. *Variable Frequency Drive (VFD)*
15. *Charger*

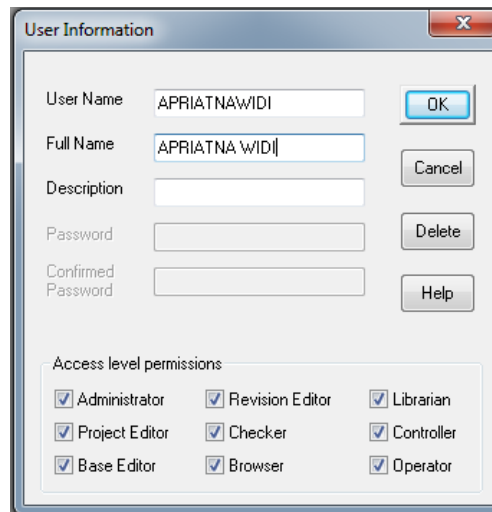
2. Membuat Proyek Baru

1. Klik tombol *New* atau klik menu *File* lalu akan muncul kotak dialog sebagai berikut :



Gambar 2.16 *Create New Project File*

2. Lalu ketik nama *file project*. Misalnya : LATIHAN1. Lalu klik Ok atau tekan *Enter*.
3. Akan muncul kotak dialog *User Information* yang berisi data pengguna *software*. Isikan nama anda dan deskripsi proyek anda. Lalu klik Ok atau tekan *Enter*.



Gambar 2.17 *User Information*

4. Anda telah membuat file proyek baru dan siap untuk menggambar *one-line* diagram di layar. Lalu buat *one-line* diagram.
3. Menggambar *Single Line* Diagram
 Menggambar *single line* diagram dilakukan dengan cara memilih simbol peralatan listrik pada menu bar disebelah kanan layar. Klik pada simbol, kemudian arahkan kursor pada media gambar. Untuk menempatkan peralatan pada media gambar, klik kursor pada media gambar.
 Untuk mempercepat proses penyusunan *single line* diagram, semua komponen dapat secara langsung diletakkan pada media gambar. Untuk mengetahui kontinuitas antar komponen dapat di-cek dengan *Continuity Check* pada menu bar utama. Pemakaian *Continuity Check* dapat diketahui hasilnya dengan melihat warna komponen/

branch. Warna hitam berarti telah terhubung, warna abu-abu berarti belum terhubung.

4. Editing Data Peralatan

1. *Bus*
2. *Generator*
3. *Cable*
4. *2-Winding Trafo*
5. *Induction Machine*
6. *Static Load*
7. *Circuit Breaker*
8. *Fuse*

Data peralatan yang diperlukan oleh ETAP *PowerStation* untuk analisa sangat detail sehingga kadang membuat beberapa pengguna kesulitan dalam memperoleh data tersebut. Untuk mempermudah memasukkan data, maka harus diidentifikasi terlebih dahulu keperluan data. Sebagai contoh, analisa hubung singkat membutuhkan data yang lebih kompleks daripada analisa aliran daya. Jadi tidak perlu memasukkan semua parameter yang diminta pada menu editor komponen oleh ETAP *PowerStation*.

5. Melakukan Studi/Analisa

Dengan ETAP *PowerStation* dapat dilakukan beberapa analisa pada sistem kelistrikan yang telah digambarkan dalam single line diagram.

Studi-studi tersebut adalah :


1. *Load Flow Analysis (LF)*
2. *Short Circuit Analysis (SC)*
3. *Motor Starting Analysis (MS)*
4. *Unbalanced Load Flow Analysis (ULF)*
5. *Transient Stability Analysis (TS)*
6. *Cable Ampacity Derating Analysis (CD)*

7. Power Plot Interface

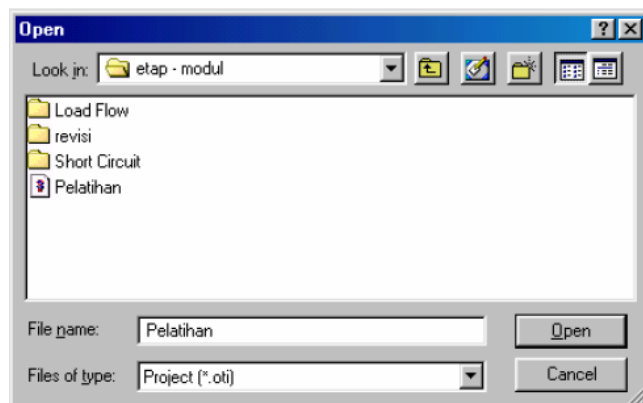
6. Menyimpan File *Project* (*Save Project*)

Masuk menu bar File, pilih *Save* atau click toolbar 

7. Membuka File Project (*Open Project*)

1. Masuk menu bar File, pilih *Open* File lalu tentukan direktori tempat menyimpan filenya (*browse*) atau click toolbar 

2. Pilih file yang dituju kemudian open.

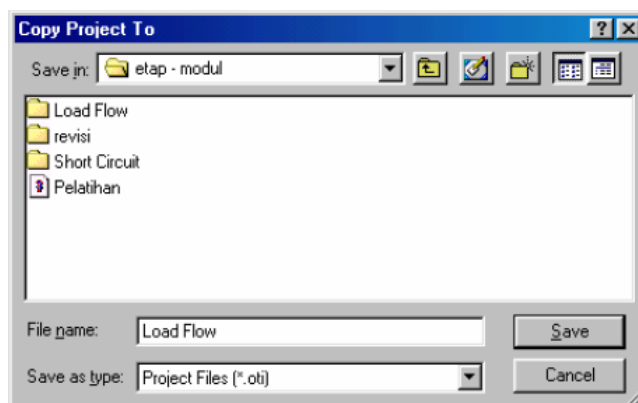


Gambar 2.18 Membuka File Project

8. Mengcopy / Menyalin File Project

1. Masuk menu bar File, pilih *Copy Project To* lalu tentukan direktori tempat menyimpan filenya (*browse*)

2. Beri nama File Project yang dicopy kemudian click *Save*



Gambar 2.19 Mengcopy / Menyalin File Project

9. Menutup Project (*Close Project*)

Klik menu File lalu klik *Close Project* atau klik toolbar Close 

10. Keluar dari Program (*Exit Program*)

Klik menu File lalu klik *Exit* untuk keluar dari program ETAP

2.7 Tang Ampere¹⁶

Disebut tang ampere (*clamp tester*) karena memiliki bentuk menyerupai tang. Tang ampere merupakan alat ukur kelistrikan yang dikhususkan untuk mengukur arus, tetapi dapat juga digunakan untuk mengukur tegangan dan hambatan. Tang ampere memiliki batasan ukur skala kelistrikan sebagai berikut :

- Mengukur arus listrik dari 0-300 ampere.
- Mengukur tegangan listrik dari 0-600 volt.
- Mengukur hambatan listrik dari 0-2.000 ohm.

Tang meter terdapat dua jenis, yaitu analog dan digital. Perbedaan keduanya terletak pada display ukur. Display tang ampere analog berupa jarum, sedangkan tang ampere digital berupa LCD (*liquid cristal device*). Penggunaan tang ampere digital lebih mudah dibandingkan tang ampere analog karena dilengkapi dengan pengukuran menggunakan jarum, seperti AVOMeter untuk mengukur tegangan dan hambatan.

¹⁶Nuri Hanafi. *Mencari & Memperbaiki Kerusakan Lemari Es*. 2007. Hal 27.