

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik²

Menurut jenisnya, arus terbagi menjadi dua, yaitu arus bolak-balik (AC atau *alternating current*) dan arus searah (DC atau *direct current*). Di dalam sistem AC, untuk menaik-turunkan tegangan mudah dilakukan dengan menggunakan transformator. Itulah sebabnya saluran transmisi di dunia sebagian besar adalah AC. Dalam sistem AC ada sistem satu fasa dan tiga fasa. Sistem tiga fasa mempunyai kelebihan daripada satu fasa, karena :

1. Daya yang disalurkan lebih besar,
2. Harga sesaatnya (*instantaneous value*) konstan,
3. Magnet putarnya mudah diadakan.

Berhubung dengan keuntungan-keuntungannya, hampir seluruh penyaluran tenaga listrik didunia ini dilakukan dengan arus bolak-balik. Namun demikian sejak beberapa tahun terakhir ini penyaluran arus searah mulai dikembangkan di beberapa bagian dunia. Penyaluran sistem DC mempunyai keuntungan karena isolasinya yang lebih sederhana, daya guna (efisiensi) yang tinggi karena faktor dayanya serta tidak adanya masalah stabilitas sehingga dimungkinkan penyaluran jarak jauh. Namun sisi ekonomisnya masih harus diperhitungkan. Penyaluran tenaga listrik dengan sistem DC dianggap ekonomis bila jarak saluran udara lebih jauh dari 640 Km atau saluran bawah tanah lebih panjang dari 50 Km.

2.2 Tegangan Transmisi¹

Untuk daya yang sama, maka daya guna penyaluran naik oleh karena hilang daya transmisi turun, apabila tegangan transmisi ditinggikan. Namun, peninggian tegangan transmisi berarti juga penaikan isolasi dan biaya perlatan dan gardu induk.

² Cekmas, Cekdin & Taufik Barlian. 2013. *Transmisi Daya Listrik*. Yogyakarta : ANDI. Hlm. 4.

¹ A.Arismunandar dan S.Kuwahara. 2004. *Teknik Tenaga Listrik Jilid II*. Jakarta : PT. Pradnya Paramita. Hlm. 2.

Oleh karena itu, pemilihan tegangan transmisi dilakukan dengan memperhitungkan daya yang disalurkan, jumlah rangkaian, jarak penyaluran, keandalan (*reability*), biaya peralatan untuk tegangan tertentu, serta tegangan-tegangan yang sekarang ada dan yang direncanakan. Kecuali penentuan tegangan harus juga dilihat dari segi standarisasi peralatan yang ada. Penentuan tegangan merupakan bagian dari perancangan sistem secara keseluruhan.

Di Jepang, tegangan kawat antara dua fasa (*line-to-line*) pada saluran transmisi distandarisasikan sebagai berikut :

Tegangan Nominal (kV) : 11-22-33-(66,77)-110-(154,187)-(200,275)-
500

Tegangan Kerja Maksimum (kV) : 11,5-23-34,5-69-80.5-115-161-195,5-230-
287,5-525

Di sesuatu daerah tertentu, hanya dipakai salah satu dari dua tegangan dalam tanda kurung. Di negara-negara lain juga dipakai tegangan-tegangan nominal 132 kV, 330 kV, 380 kV, 440 kV, dan 700 kV.

Meskipun tidak jelas menyebutkan keperluannya sebagai tegangan transmisi, di Indonesia, Pemerintah telah menyeragamkan deretan tegangan tinggi sebagai berikut:

Tegangan Nominal (kV) : (30)-66-110-(150)-220-380-500

Tegangan Kerja Maksimum (kV) : (36)-72,5-123-(170)-245-420-525

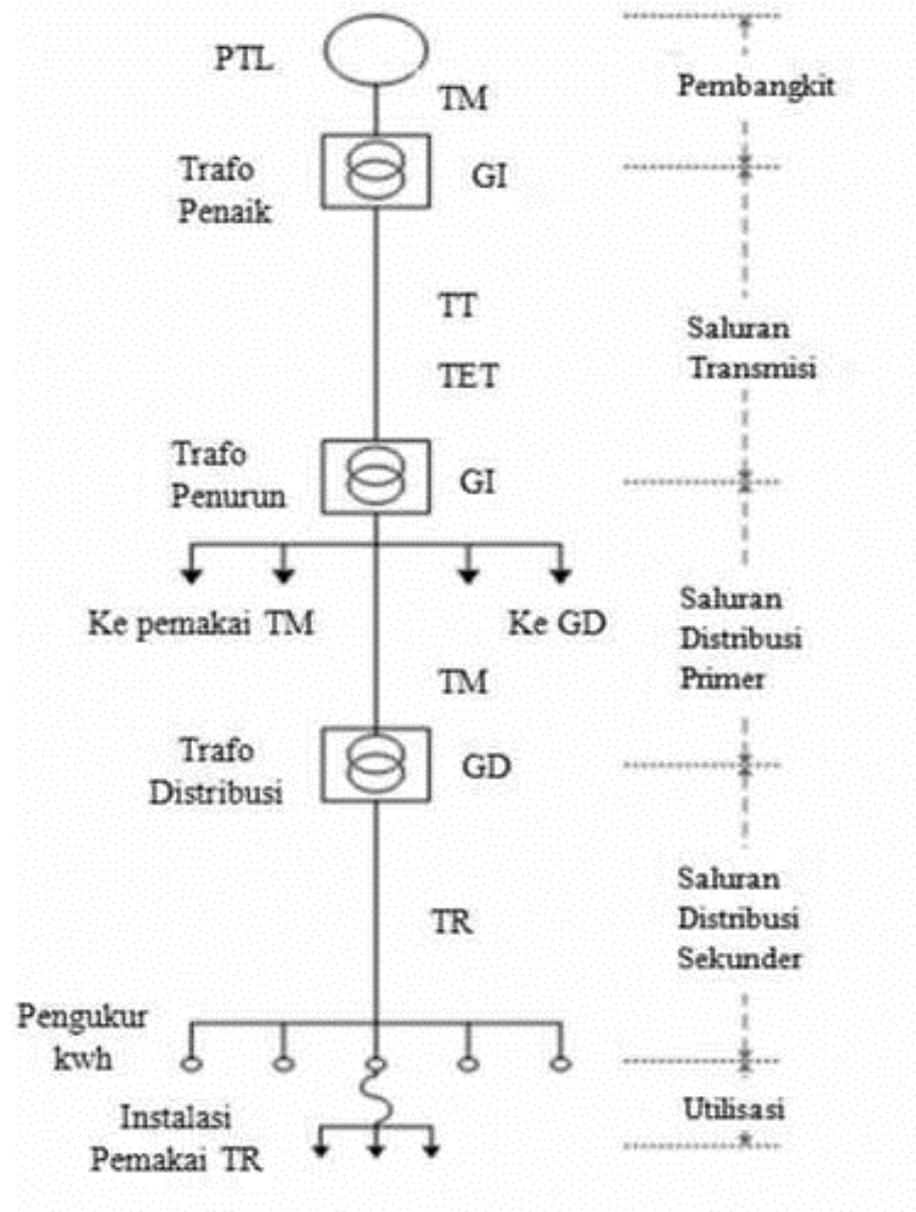
Tegangan nominal 20 kV hanya diperkenalkan untuk daerah asuhan dimana tegangan distribusi primer 20 kV tidak dipergunakan. Tegangan nominal 150 kV tidak dianjurkan dan hanya diperkenalkan berdasarkan hasil studi khusus. Penentuan deretan tegangan di atas disesuaikan dengan rekomendasi *International Electrotechnical Commission*.

2.3 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 dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk menggunakan transformator *step-up* 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. 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 menggunakan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi yang kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi menurunkan tegangannya menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220V/380V. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen.⁶

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh digunakan tegangan setinggi mungkin dengan menggunakan trafo *step-up*. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain berbahaya bagi lingkungan dan mahalnnya harga perlengkapan-perlengkapannya, selain itu menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban, daerah pusat beban, tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo *step-down*. Dalam hal ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

⁶ Suhadi,dkk.2008. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*, Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hlm. 11.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik.³

Keterangan :

PTL	: Pembangkit Tenaga Listrik	GI	: Gardu Induk
TT	: Tegangan Tinggi	TET	: Tegangan Ekstra Tinggi
TM	: Tegangan Menengah	GD	: Gardu Distribusi

³ Abdul Kadir. 2000. *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*, Jakarta : Prakarsa. Hlm. 5.

TR : Tegangan Rendah

2.4 Distribusi Tenaga Listrik dari pembangkit hingga konsumen.

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.

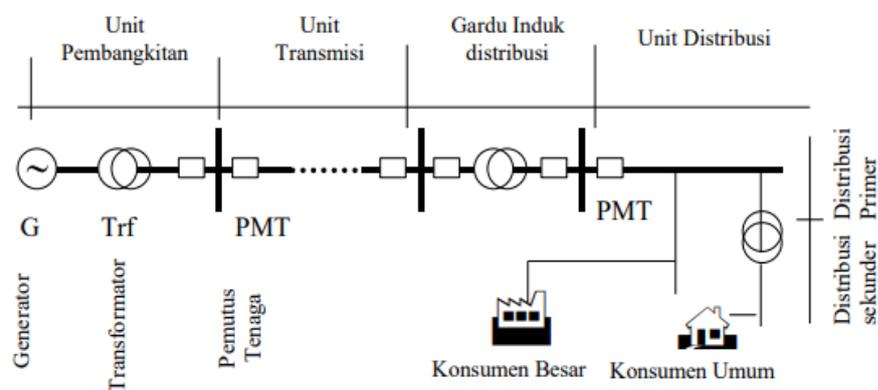
Melalui beberapa urutan yaitu sebagai berikut:

- a. Pusat tenaga listrik/Pembangkit
Yaitu tempat mesin-mesin pembangkit listrik berada.
- b. Gardu induk penaik tegangan
Merupakan tempat dimana tegangan dari generator dinaikan menjadi level tegangan transmisi.
- c. Saluran tegangan extra tinggi
Menyalurkan tenaga listrik dari pusat tenaga sampai ke pusat-pusat beban atau konsumen
- d. Gardu induk penurun tegangan
Tempat dimana level tegangan tinggi diturunkan menjadi level tagangan rendah atau tegangan distribusi.
- e. Gardu induk
Tempat dimana tenaga listrik dari gardu induk penurun tegagan yang disalurkan melalui kabel tanah atau pun saluran udara di bagi-bagi dari salurkan ke gardu-gadu distribusi
- f. Hantaran distribusi primer/ Jaringan tegangan menengah
Jaringan listrik tegangan menengah dengan sistem kabel tanah ataupun saluran udara yang menghubungkan gardu distribusi dengan gardu distribusi yang lain, atau gardu induk ke gardu distribusi
- g. Gardu Distribusi
Tempat di mana terdapat transformator penurun tegangan menengah menjadi tegangan rendah.

h. Hantaran Distribusi Sekunder/ Jaringan Tegangan Rendah (SKTM/JTR).

Jaringan listrik bertegangan rendah berupa kabel tanah atau saluran udara yang menghubungkan Gardu Distribusi dengan konsumen.

Didalam dunia kelistrikan sering timbul persoalan persoalan teknis, dimana tenaga listrik pada umumnya dibangkitkan pada tempat-tempat tertentu yang jauh dari kumpulan pelanggan, sedangkan pemakai tenaga listrik atau pelanggan tenaga listrik tersebar disegala penjuru tempat, Dengan demikian maka penyampaian tenaga listrik dari tempat dibangkitkannya yang disebut pusat tenaga listrik sampai ke tempat pelanggan memerlukan berbagai penanganan teknis. Dengan menggunakan blok diagram sistem tenaga listrik dapat digambarkan sebagai berikut⁹ :



Gambar 2.2 Blok diagram sistem tenaga listrik

Tenaga listrik dibangkitkan di pusat-pusat tenaga listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTD kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (*step up transformer*) yang ada di pusat listrik.

⁹ PT.PLN (Persero) Jasa Pendidikan dan Pelatihan, *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*. Hlm. 2.

2.5 Pembagian Jaringan Distribusi

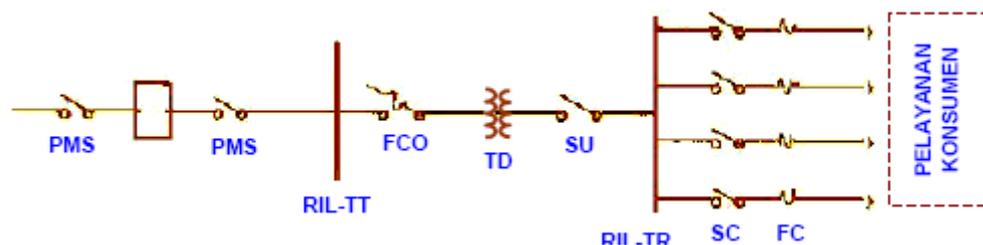
Untuk jaringan distribusi pada umumnya terdiri dari dua bagian yang paling utama, yaitu sebagai berikut :

a. Jaringan distribusi primer

Jaringan distribusi primer yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk sub transmisi ke gardu distribusi. Jaringan ini merupakan jaringan tegangan menengah atau jaringan tegangan primer. Biasanya, jaringan ini menggunakan 6 (enam) jenis jaringan yaitu sistem radial dan sistem tertutup atau *loop*, *ring*, *network spindle* dan *cluster*.

b. Jaringan distribusi sekunder

Jaringan ini menggunakan tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan distribusi primer, terdapat pula pertimbangan perihal keadaan pelayanan dan regulasi tegangan, distribusi sekunder yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Jaringan ini sering jaringan tegangan rendah.



Gambar 2.3 Bagian- Bagian Jaringan Distribusi

Keterangan :

PMS = Pemisah Sendiri

TD = Trafo Distribusi

PMT = Pemutus Tenaga

FCO = *Fuse Cut Out*

SU = Saklar Utama

SC = Saklar Cabang

FC = Fuse Cabang

2.6 Klasifikasi Jaringan Distribusi Tegangan Menengah

Sistem distribusi tenaga listrik didefinisikan sebagai bagian dari sistem tenaga listrik yang menghubungkan gardu induk/ pusat pembangkit listrik dengan konsumen. Sedangkan jaringan distribusi adalah sarana dari sistem distribusi tenaga listrik di dalam menyalurkan energi ke konsumen. Dalam menyalurkan tenaga listrik ke pusat beban, suatu sistem distribusi harus disesuaikan dengan kondisi setempat dengan memperhatikan faktor beban, lokasi beban, perkembangan dimasa mendatang, keandalan serta nilai ekonomisnya.

2.6.1 Berdasarkan Tegangan Pengenal

Berdasarkan tegangan pengenalnya sistem jaringan distribusi dibedakan menjadi dua macam, yaitu :

- a. Sistem jaringan tegangan primer atau Jaringan Tegangan Menengah (JTM), yaitu berupa Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) atau Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Jaringan ini menghubungkan sisi sekunder trafo daya di Gardu Induk menuju ke Gardu Distribusi, besartegangan yang disalurkan adalah 6 kV, 12 kV atau 20 kV.
- b. Jaringan tegangan distribusi sekunder atau Jaringan Tegangan Rendah (JTR), salurannya bisa berupa SKTM atau SUTM yang menghubungkan Gardu Distribusi/sisi sekunder trafo distribusi ke konsumen. Tegangan sistem yang digunakan adalah 220 Volt dan 380 Volt.

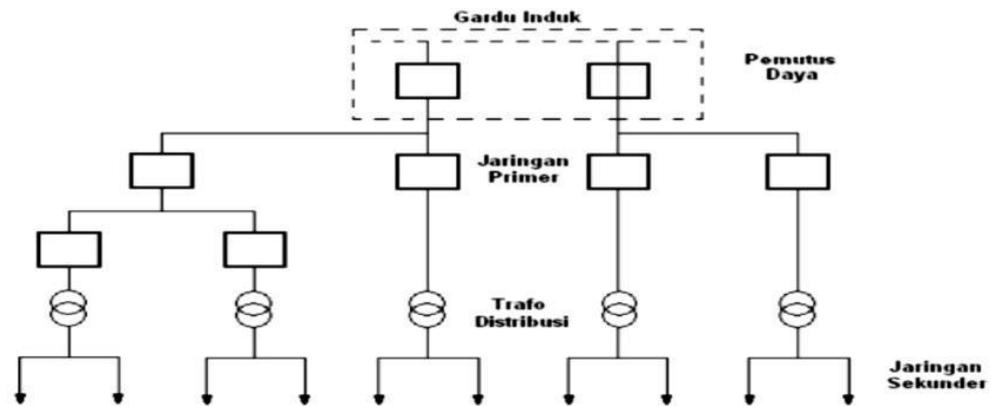
2.6.2 Berdasarkan Konfigurasi Jaringan Primer

Konfigurasi jaringan distribusi primer pada suatu sistem jaringan distribusi sangat menentukan mutu pelayanan yang akan diperoleh khususnya mengenai kontinuitas pelayanannya. Adapun jenis jaringan primer yang biasa digunakan adalah:

- a. Jaringan Distribusi Pola Radial.

Pola radial adalah jaringan yang setiap saluran primernya hanya mampu menyalurkan daya dalam satu arah aliran daya. Jaringan ini biasa dipakai untuk

melayani daerah dengan tingkat kerapatan beban yang rendah. Keuntungannya ada pada kesederhanaan dari segi teknis dan biaya investasi yang rendah. Adapun kerugiannya apabila terjadi gangguan dekat dengan sumber, maka semua beban saluran tersebut akan ikut padam sampai gangguan tersebut dapat diatasi.

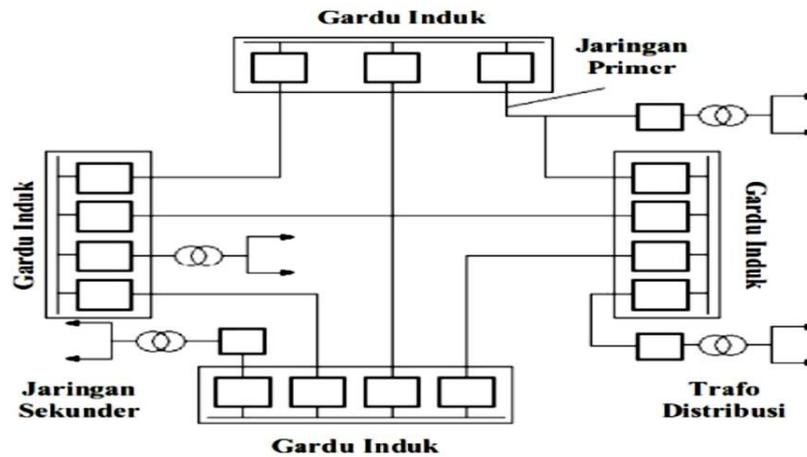


Gambar 2.4 Pola Jaringan Distribusi Radial

b. Jaringan Distribusi Pola *Loop*

Jaringan pola loop adalah jaringan yang dimulai dari suatu titik pada rel daya yang berkeliling di daerah beban kemudian kembali ke titik rel daya semula. Pola ini ditandai pula dengan adanya dua sumber pengisian yaitu sumber utama dan sebuah sumber cadangan. Jika salah satu sumber pengisian (saluran utama) mengalami gangguan, akan dapat digantikan oleh sumber pengisian yang lain (saluran cadangan). Jaringan dengan pola ini biasa dipakai pada sistem distribusi yang melayani beban dengan kebutuhan kontinuitas pelayanan yang baik (lebih baik dari pola radial).

c. Jaringan Distribusi Pola *Grid*

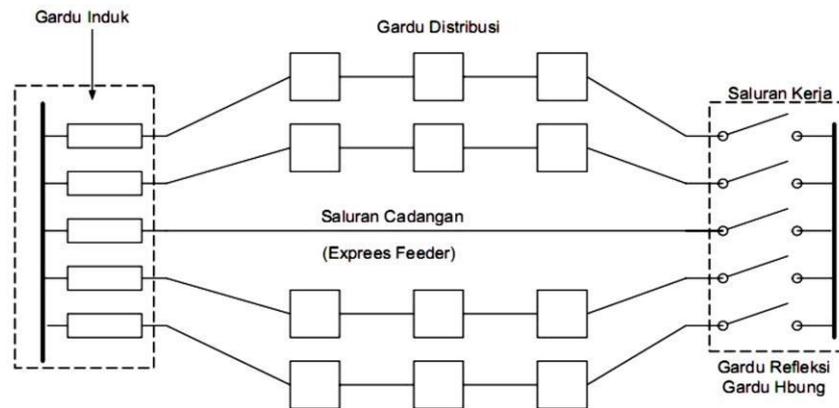


Gambar 2.5 Pola Jaringan Grid

Pola jaringan ini mempunyai beberapa rel daya dan antara rel-rel tersebut dihubungkan oleh saluran penghubung yang disebut *tie feeder*. Dengan demikian setiap gardu distribusi dapat menerima atau mengirim daya dari atau ke rel lain.

d. Jaringan Distribusi Pola Spindel

Jaringan primer pola *spindel* merupakan pengembangan dari pola radial dan *loop* terpisah. Beberapa saluran yang keluar dari gardu induk diarahkan menuju suatu tempat yang disebut gardu hubung (GH), kemudian antara GI dan GH tersebut dihubungkan dengan satu saluran yang disebut *express feeder*. Sistem gardu distribusi ini terdapat disepanjang saluran kerja dan terhubung secara seri. Saluran kerja yang masuk ke gardu dihubungkan oleh saklar pemisah, sedangkan saluran yang keluar dari gardu dihubungkan oleh sebuah saklar beban. Jadi sistem ini dalam keadaan normal bekerja secara radial dan dalam keadaan darurat bekerja secara *loop* melalui saluran cadangan dan GH. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sistem Jaringan Spindel

Keuntungan pola jaringan ini adalah sederhana dalam hal teknis pengoperasiannya seperti pola radial, kontinuitas pelayanan lebih baik dari pada pola radial maupun *loop*, pengecekan beban masing-masing saluran lebih mudah dibandingkan dengan pola *grid*, penentuan bagian jaringan yang terganggu akan lebih mudah dibandingkan dengan pola *grid*, baik untuk dipakai di daerah perkotaan dengan kerapatan beban yang tinggi.

2.7 Kawat Penghantar⁴

Jenis kawat penghantar yang digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%), aluminium dengan konduktivitas 97,5% (Cu 97,5%) atau aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambing sebagai berikut :

a. AAC

All-Aluminium Conductor, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya dibuat dari aluminium.

b. AAAC

All-Aluminium-Alloy Conductor, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

⁴ Budiono Mismail. 1983. *Analisa Sistem Tenaga*. Malang : Universitas Brawijaya. Hlm. 54

c. ACSR

Aluminium Conductor, Steel-Reinforced, yaitu kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.

d. ACAR

Aluminium Conductor, Alloy Reinforced, yaitu kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Kawat penghantar tembaga mempunyai kelebihan disbanding kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Kelemahannya, untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal. Oleh karena itu kawat penghantar aluminium telah menggantikan kedudukan kawat tembaga.

2.8 Daya Listrik ⁵

Pengertian daya listrik adalah perkalian antara tegangan yang diberikan dengan hasil arus yang mengalir. Daya dikatakan positif, ketika arus yang mengalir bernilai positif artinya arus mengalir dari sumber tegangan menuju rangkaian (transfer energi dari sumber ke rangkaian). Sedangkan, daya dikatakan negatif, ketika arus yang mengalir bernilai negatif artinya arus mengalir dari rangkaian menuju sumber tegangan (transfer energi dari rangkaian ke sumber).

2.8.1 Daya semu

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

Untuk 1 phasa yaitu:

$$S = V.I \dots\dots\dots(2.1)^{12}$$

Untuk 3 phasa yaitu:

$$S = P2 + Q2 = 3V_L I_L \dots\dots\dots(2.2)$$

⁵ Ramdhani, Mohamad. 2005. *Rangkaian Listrik*. Bandung : Sekolah Tinggi Teknologi Telkom

¹² *Ibid.*, Hlm. 185.

Dimana

S = Daya semu (VA)

P = Daya aktif (Watt)

Q = Daya reaktif (VAr)

V = Tegangan Fasa-Netral (Volt)

VL = Tegangan *Line-Line* (Volt)

I/IL = Arus Yang Mengalir Pada Penghantar (Ampere)

2.8.2 Daya aktif

Daya aktif atau disebut juga dengan daya nyata adalah daya yang dipakai untuk menggerakkan berbagai macam peralatan mekanik. Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

Untuk 1 phasa:

$$P = V.I.\cos\theta \dots\dots\dots(2.3)^{13}$$

Untuk 3 phasa :

$$P = \sqrt{3}V_{LL} \cos\theta p \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

P = Daya Nyata (Watt)

V = Tegangan Fasa-Netral (Volt)

VL = Tegangan Linc-Line (Volt)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (Amper)

Cos θ p= Faktor Daya (standar PLN 0,85)

2.8.3 Daya Reaktif

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

¹³ *Ibid*, Hlm. 184.

Untuk 1 phasa :

$$Q = V.I.\sin\theta \dots\dots\dots(2.5)^{14}$$

Untuk 3 phasa:

$$Q = 3V_{LL} \sin\theta_p \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

Q = Daya reaktif (VAr)

V = Tegangan Fasa-Netral (Volt)

VL = Tegangan *Line-Line* (Volt)

I = Arus (Ampere)

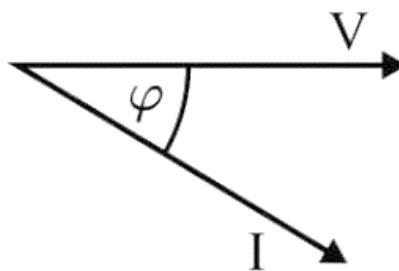
Sin θ_p = Faktor Daya (tergantung nilai θ)

2.9 Faktor Daya

Faktor Daya adalah perbandingan antara daya nyata dalam satuan watt dan daya reaktif dalam satuan Volt Ampere Reaktif (VAR) dari daya yang disalurkan oleh pusat-pusat pembangkit ke beban. Nilai faktor daya ini mempengaruhi jumlah arus yang mengalir pada saluran untuk suatu beban yang sama. Faktor daya salah satunya disebabkan oleh penggunaan peralatan pada pelanggan yang menyimpang dari syarat-syarat penyambungan yang telah ditetapkan, dapat mengakibatkan pengaruh balik terhadap saluran, antara lain faktor daya yang rendah dan ketidakseimbangan beban. Rendahnya faktor daya disebabkan karena melebarinya sudut fasa antara arus dan tegangan. Faktor daya yang terlalu rendah mengakibatkan rugi yang sangat besar pada saluran. Pergeseran sudut fasa antara arus dan tegangan ditentukan oleh sifat impedansi beban (resistif, induktif, kapasitif) yang dihubungkan dengan sumber arus bolak balik tersebut. Apabila beban mempunyai impedansi yang bersifat resistif, maka arus dan tegangan sefasa atau besarnya pergeseran sudut fasa sama dengan nol. Dengan demikian faktor daya sama dengan satu (*unity power factor*).

¹⁴ *Ibid.*, Hlm. 184.

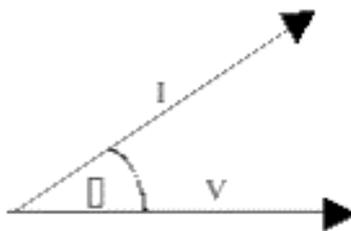
Impedansi beban bersifat induktif, vektor arus (I) terbelakang dari vektor tegangan (V), kondisi tersebut disebut faktor daya tertinggal (*lagging power factor*), seperti ditunjukkan dalam gambar, sedangkan untuk impedansi beban yang bersifat kapasitas, vektor arus (I) mendahului vektor tegangan (V) keadaan tersebut dinamakan faktor daya mendahului (*leading power factor*) seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.7



Gambar 2.7 Faktor daya tertinggal

Rumus faktor daya tertinggal yaitu :

$$\text{Faktor Daya (Power Factor)} = \frac{P}{S} = \frac{V \times I \times \sin\theta}{V \times I} = \sin\theta \dots\dots\dots(2.7)$$



Gambar 2.8 Faktor daya mendahului

Rumus faktor daya mendahului yaitu :

$$\text{Faktor Daya (Power Factor)} = \frac{P}{S} = \frac{V \times I \times \cos\theta}{V \times I} = \cos\theta \dots\dots\dots(2.8)$$

2.10 Drop Tegangan

Panjang sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dapat didesain dengan mempertimbangkan *drop* tegangan (*Drop Voltage*). *Drop* tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. *Drop* tegangan pada saluran tenaga listrik umumnya berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban, serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besar *drop* tegangan dapat dinyatakan dalam persen maupun dalam satuan volt. Berdasarkan SPLN No.72:1987, *drop* tegangan atau jatuh tegangan yang diperbolehkan untuk sistem distribusi tegangan menengah adalah sebesar 5%. Dalam suatu sistem distribusi, *drop* tegangan yang terjadi harus diupayakan sekecil-kecilnya agar tidak merugikan konsumen.

Dengan semakin besar pula perbedaan nilai tegangan yang ada pada sisi kirim dengan yang ada pada sisi terima. Apabila perbedaan nilai tegangan tersebut melebihi standar yang ditentukan, maka mutu penyaluran tersebut rendah. Di dalam saluran transmisi persoalan tegangan sangat penting, baik dalam keadaan operasi maupun dalam perencanaan sehingga harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik saluran. Maka pemilihan penghantar untuk tegangan menengah harus diperhatikan. Berdasarkan dari standar SPLN 1 : 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 transmisi tersebut, diukur pada titik yang paling jauh (ujung).

Besarnya *drop* tegangan yang terjadi pada saluran tersebut dapat dirumuskan:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} \times I \times l \times (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{1000} \dots\dots\dots(2.9)$$

Atau

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \dots\dots\dots(2.10)^8$$

⁸ Haris. 2016. "Analisa Jatuh Tegangan dan Rugi-rugi Daya pada Penyulang Arwana menggunakan ETAP" Palembang: Politeknik Negeri Sriwijaya.

Dimana

$$V_r = \frac{\sqrt{3} \rho L I \cos \phi}{A} \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan:

V_r = Tegangan Jatuh (*Drop Voltage*)

ρ = Tahanan Jenis (Rho)

L = Panjang kabel penghantar

I = Besar Arus

$\cos \phi$ = Faktor Daya

A = Luas Penampang

Berdasarkan penjelasan, maka besar persentase *drop* tegangan pada saluran tiga fasa dapat ditentukan dengan.

$$\% V \text{ rugi} = \frac{\Delta V}{V_s} \times 100\% \dots\dots\dots(2.12)$$

Sedangkan untuk besarnya susut tegangan untuk jaringan dalam volt dapat dihitung menggunakan persamaan;

$$\Delta V(1\Phi) = (I.R \cos \phi + I.X \sin \phi) \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\Delta V(3\Phi) = \sqrt{3}(I.R \cos \phi + I.X \sin \phi) \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan:

ΔV = *Drop* tegangan (V)

I = Arus saluran (A)

V_s = Tegangan awal (V)

$\cos \phi$ = *power factor*

V_r = Tegangan akhir (V)

$\sin \phi$ = sudut reaktif

R = Resistansi saluran (Ω)

X = Reaktansi saluran (Ω)

Sesuai SPLN, dimana ditentukan bahwa variasi tegangan pelayanan, sebagian akibat jatuh tegangan (*drop voltage*), karena adanya perubahan beban, maksimum +5% dan minimum -10% dari tegangan nominalnya. Salah satu penyebab adanya

drop voltage sendiri adalah jauhnya sistem pentransmision tenaga listrik ke pelanggan khusus yang jauh dari pusat-pusat konsumsi tenaga listrik atau Gardu Induk (GI).⁷

2.11 Parameter Saluran

Seluruh saluran yang menggunakan penghantar dari suatu sistem tenaga listrik memiliki sifat-sifat listrik sebagai parameter saluran, seperti resistansi, induktansi, kapasitansi, dan konduktansi. Oleh karena saluran distribusi memiliki saluran yang tidak begitu panjang (kurang dari 80 Km) dan menggunakan tegangan tidak lebih besar dari 69 kV, maka kapasitansi dan konduktansi sangat kecil dan dapat diabaikan. Resistansi yang timbul pada saluran dihasilkan dari jenis penghantar yang memiliki tahanan jenis dan besar resistansi pada penghantar tergantung dari jenis material, luas penampang dan panjang saluran. Induktansi timbul dari efek medan magnet di sekitar penghantar jika pada penghantar terdapat arus yang mengalir. Parameter ini penting untuk pengembangan model saluran distribusi yang digunakan dalam analisa sistem tenaga.

2.12 Resistansi saluran

Resistansi adalah tahanan pada suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang dapat menyebabkan kerugian daya. Nilai tahanan suatu penghantar dapat ditentukan dari persamaan:

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots\dots\dots(2.15)^{15}$$

Dimana:

ρ = Tahanan jenis penghantar ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

l = Panjang saluran (m)

A = Luas penampang penghantar (mm^2)

Kenaikan resistansi karena pembentukan lilitan diperkirakan mencapai 1% untuk penghantar dengan tiga serat dan 2% untuk penghantar dengan lilitan

⁷ Firman, Rachmat Wahyudy, "Analisa drop tegangan menengah 20KV pada penyulang pagentenan di PT.PLN distribusi Jawa Timur area Pemekasan", Tugas Akhir PPNS 2013, Hal 20.

¹⁵ Cekmas, *Op.cit.*, Hlm. 63.

konsentris. Jika suhu dilukiskan pada sumbu tegak dan resistansi pada sumbu mendatar maka titik pertemuan perpanjangan garis dengan sumbu suhu dimana resistansinya sama dengan nol adalah suatu konstanta untuk bahan logam bersangkutan, maka tahanan searahnya dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\frac{R_{t2} - T_0 + t_2}{R_{t1} - T_0 + t_1} \dots \dots \dots (2.16)^{16}$$

Dimana:

R_{t2} = Resistansi penghantar pada suhu t₁ (temperatur sebelum operasi konduktor)

R_{t1} = Resistansi penghantar pada suhu t₂ (temperatur operasi konduktor)

t₁ = Temperatur awal (°C)

t₂ = Temperatur akhir (°C)

T₀ = Konstanta yang ditentukan oleh grafik.

Nilai-nilai konstanta T₀ adalah sebagai berikut:

T₀ = 234,5 untuk tembaga dengan konduktivitas 100 %

T₀ = 241 untuk tembaga dengan konduktivitas 97,3%

T₀ = 228 untuk aluminium dengan konduktivitas 61 %

2.13 Reaktansi saluran

Untuk menentukan besarnya induktansi saluran pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$L = (0,5 + 4,6 \log \frac{D-r}{r} \times 10^{-7}) H/m \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana D adalah jarak antara konduktor dan r adalah radius masing-masing konduktor tersebut. Bila letak konduktor tidak simetris, maka D pada persamaan diatas perlu diganti dengan:

$$D = \sqrt{D_{12} D_{23} D_{31}} \dots \dots \dots (2.18)$$

Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi r^2 \dots \dots \dots (2.19)$$

¹⁶ Cekmas, *Op.Cit.*, Hlm. 64.

$$r = \frac{\sqrt{A}}{\pi} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dari persamaan maka dapat dicari nilai reaktansi induktif saluran dengan menggunakan persamaan 2.21 di bawah ini:

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana:

X_L = Reaktansi induktif saluran (Ω/km)

2π = Sudut arus bolak balik.

F = Frekuensi sistem (50 Hz)

L = Induktansi dari konduktor (H/km)

2.14 ETAP (Electrical Transient Analysis Program)

ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*) adalah suatu software analisis yang *comprehensive* untuk mendesain dan mensimulasikan suatu sistem rangkaian tenaga. Analisis yang ditawarkan oleh ETAP (*Electrical Transient Analysis Program*) yang digunakan oleh penulis adalah *drop* tegangan, *power factor*, dan *losses* jaringan. ETAP juga bisa memberikan peringatan 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.¹¹

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 penghantar¹⁰. 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:

¹¹ Sugiarto, Bambang. 2010. *Evaluasi Rugi Daya dan Tegangan Jatuh di Peryulang Jati Dengan Menggunakan ETAP Power Station*

¹⁰ Rahman, Arif. 2009. *Analisa Rugi-Rugi daya Listrik pada Sistem Distribusi Primer di Gardu Induk Bukit Siguntang Palembang dengan Bantuan Software ETAP. Hal.16*

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 mementkan prangkat 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 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).

2.15 Kemampuan Program¹⁷

ETAP menyediakan kemampuan program berikut:

1. Elemen

Bus	: tidak terbatas
Terminal beban (Load)	: tidak terbatas
Cabang	: tidak terbatas
Alat / Kabel Feeder	: tidak terbatas
Transformator dengan Pengaturan Tekan	: tidak terbatas
Motor, Beban, MOV, Kapasitor, Filter, All	: tidak terbatas
Penggabungan Komposit Jaringan	: tidak terbatas
Penggabungan Komposit Motor	: tidak terbatas

2. Presentasi / Konfigurasi / Revisi Data

Diagram satu garis	: tidak terbatas
Sistem Pentanahan Raceway	: tidak terbatas
Diagram System Kontrol	: tidak terbatas
Diagram Jaringan Tanah	: tidak terbatas
Alur Karakteristik Waktu Arus	: tidak terbatas
Penyajian Geografis (antar-muka GIS)	: tidak terbatas
Konfigurasi Status	: tidak terbatas
Revisi Data (Data Base & Revisi)	: tidak terbatas

3. Kategori Beban

Setiap Motor, MOV, Beban, dan lain-lain.	: 10
--	------

4. Kategori Generasi

¹⁷ Haris, *Op.Cit.*

Tiap Generator dan Power Grid	: 10
5. Short-Circuit Program (AC & DC)	
Bus terganggu	: tidak terbatas
6. Motor Starting Program	
Menjalankan Motor Secara Serentak	: tidak terbatas
Kategori Starting	: tidak terbatas
Waktu menjalankan Program	: tidak terbatas
7. Program Stabilitas Transien	
Model dinamis Mesin	: tidak terbatas
Kegiatan Waktu	: tidak terbatas
8. Sistem DC	
Kategori Tugas Cycle	: 5
9. Libraries	
Headers dan Merekam	: tidak terbatas

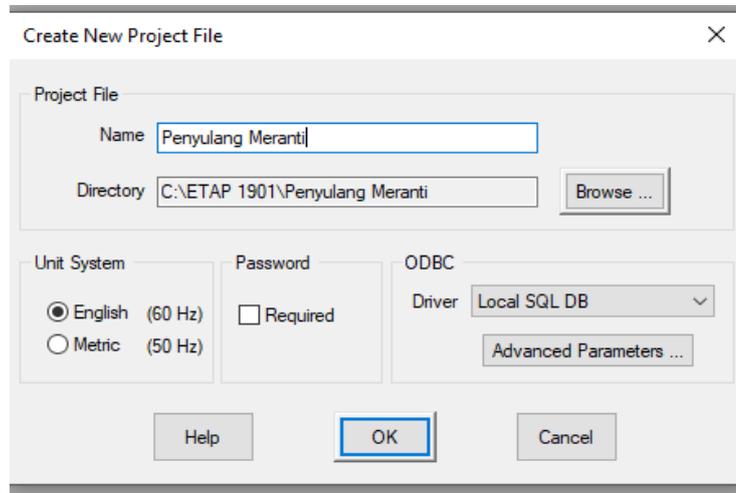
*nomor maksimum dari pemakaian bus sampai perhitungan adalah bergantung pada Lisensi. Contohnya : 100, 500, 2.000, atau 20.000 bus.

2.16 Prosedur Merangkai Simulasi Penyulang pada *Software* ETAP 19.0.1

ETAP *Power Station* merupakan salah satu *software* aplikasi yang banyak digunakan untuk mensimulasikan sistem tenaga listrik. Adapun langkah-langkah pengoperasian dari ETAP 19.0.1 adalah sebagai berikut :

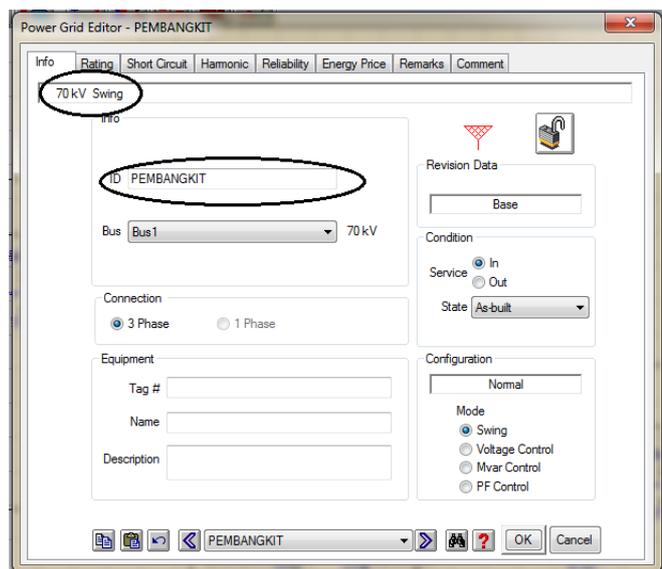
1. Buka *software* ETAP 19.0.1 pada dekstop

2. Kemudian klik *File > New Project*, buat nama dan tentukan lokasi penyimpanan *project*



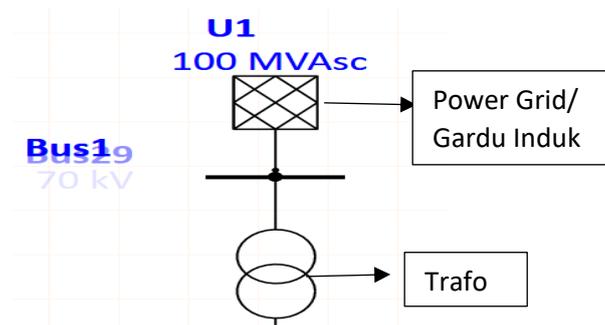
Gambar 2.9 Menubar *Create New Project File*

3. Klik *Power Grid* pada *AC Elements* pindahkan ke lembar kerja, buat ID dan *Rating 70 kVA*



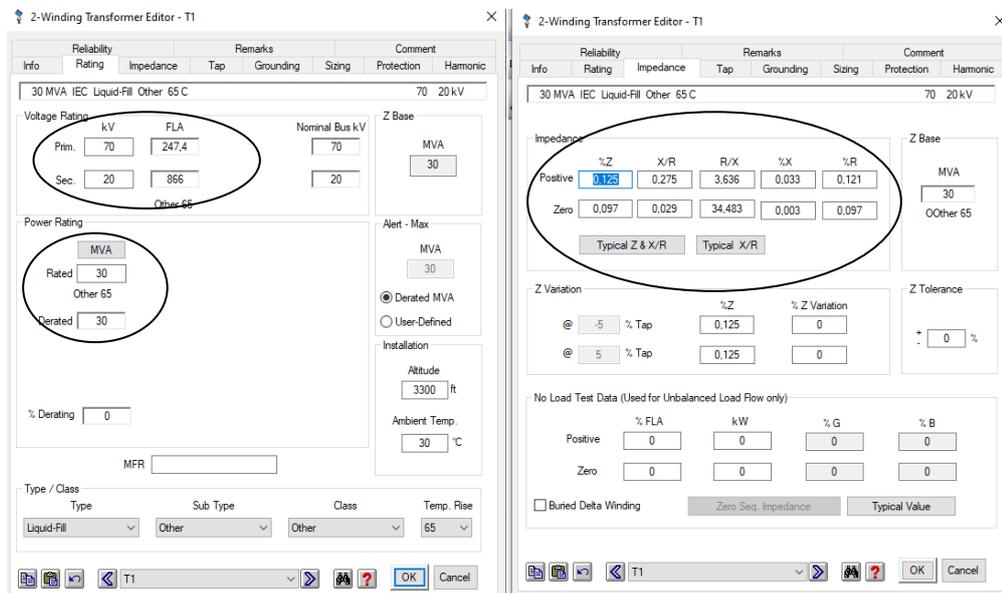
Gambar 2.10 Menubar *Power Grid Editor*

4. Setelah itu klik bus dan sambungkan *Power Grid* ke Bus

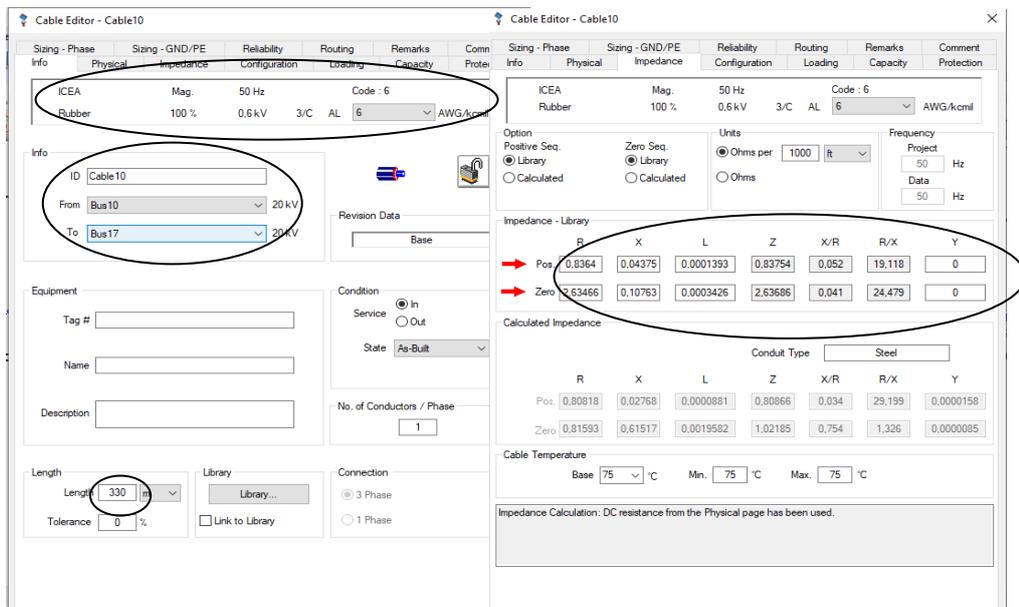


Gambar 2.11 Power Grid

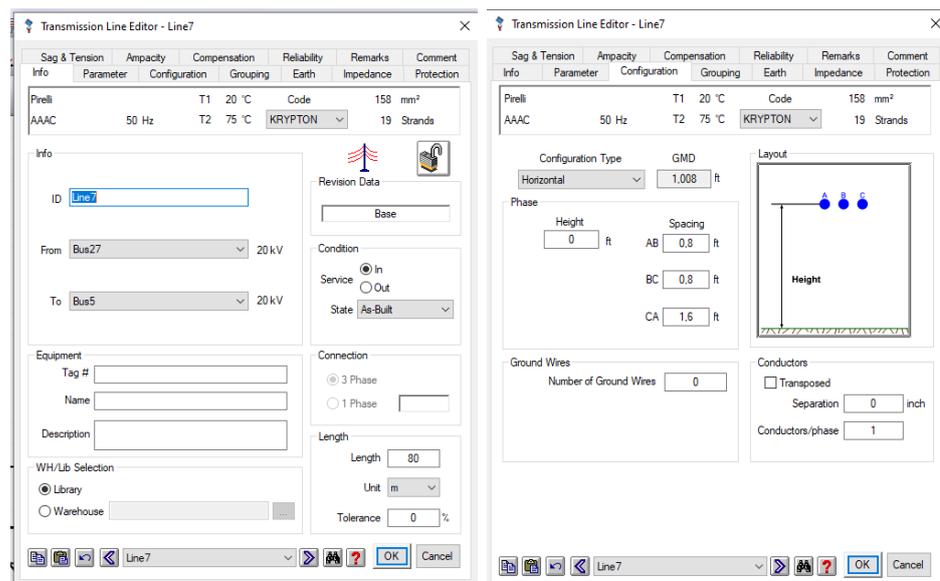
5. Klik *Winding Transformer* sambungkan primer ke busbar, *setting* trafo dengan ID GI Bungaran, rating tegangan sekunder 20 kV, *rating* daya 30 MVA, tinggi pemasangan, impedansi setelah itu sambungkan ke busbar.

Gambar 2.12 Menubar *Winding Transformer Editor*

6. Klik *cable* pada *AC Elements*, isi panjang, pilih jenis kabel, dan nilai impedansinya

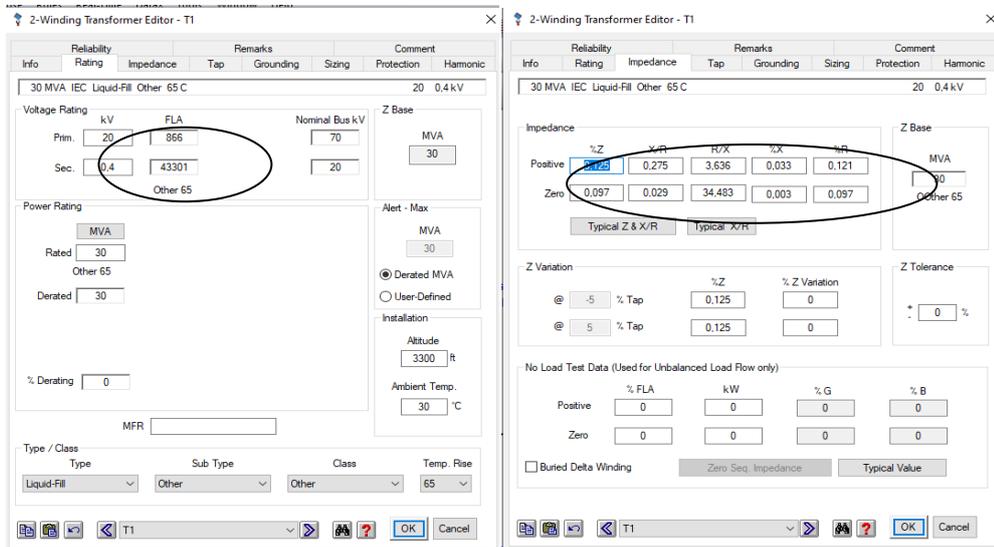
Gambar 2.13 Menubar *Cable Editor*

7. Setelah itu sambungkan *cable* ke bus
8. Kemudian klik *Transmission Line* pada *AC Elements*, isi ID kawat, tentukan jenis dan diameter kawat, jarak antar kawat, tinggi tiang, dan impedansinya

Gambar 2.14 Menubar *Transmission Line Editor*

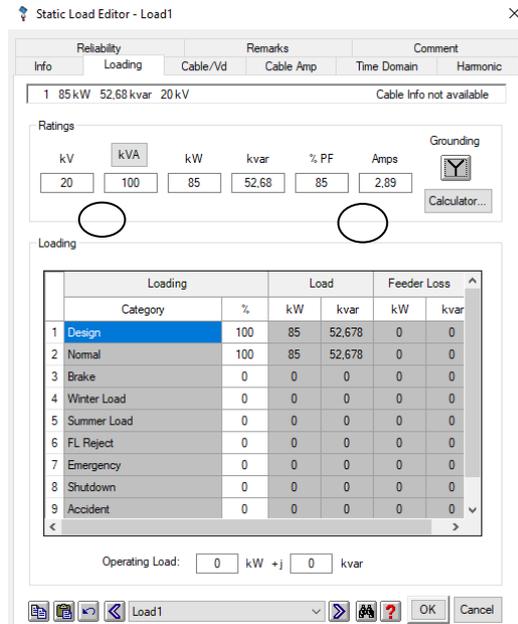
9. Setelah itu sambungkan *Transmission Line* ke *cable*

10. Klik *Winding Transformer* sambungkan primer ke *Transmission Line*, setting trafo dengan ID sesuai nama trafo, rating tegangan sekunder 0,4 kV, tinggi pemasangan trafo, dan impedansinya



Gambar 2.15 Menubar *Winding Transformer Editor*

11. Kemudian klik *Static Load* pada *AC Elements*, isi ID beban, beban yang digunakan, dan *power factor*



Gambar 2.16 Menubar *Static Load Editor*

12. Kemudian sambungkan *Static Load* ke *Winding Transformer*
13. Lakukan proses ini sesuai dengan banyaknya trafo dan beban pada *Single Line Diagram* penyulang
14. Setelah semua selesai simulasikan dengan mengklik *Run Load Flow*