



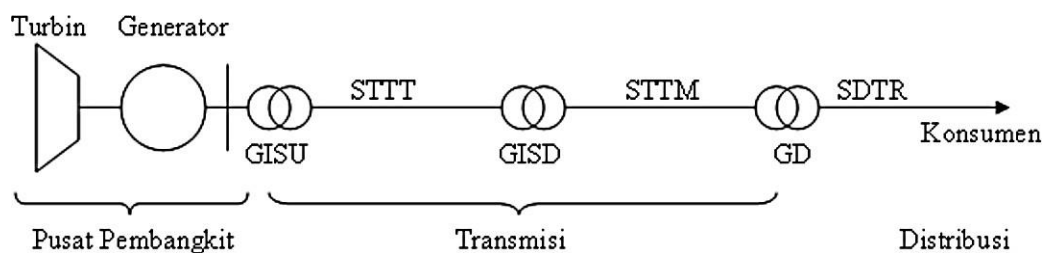
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik¹

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem yang berfungsi untuk membangkitkan, mentransmisikan dan mendistribusikan energi listrik dari pusat pembangkit sampai konsumen. Tiga komponen utama dari sistem tenaga listrik yaitu ; a) Pembangkit ; b) Transmisi ; c) Distribusi

Penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit sampai ke konsumen dapat digambarkan seperti gambar 2.1, pada gambar di bawah ini sudah mencakup ketiga unsur dari tiga komponen utama sistem tenaga listrik.



Gambar 2.1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

1.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik⁷

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. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah :

1. Pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan)

¹ Anonim. 2019. <https://mohamadhadhiwijaya.wordpress.com/2019/03/23/sistem-tenaga-listrik/>. Diakses pada tanggal 28 April 2022

⁷ Suhadi, dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 7.



2. Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154kV, 220kV atau 500kV 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 ($I^2 \cdot R$). 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 220/380Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

Sistem pendistribusian tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu sistem pendistribusian langsung dan sistem pendistribusian tak langsung.¹¹

1. Sistem Pendistribusian Langsung

Sistem pendistribusian langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan secara langsung dari Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, dan tidak melalui jaringan transmisi terlebih dahulu. Sistem pendistribusian langsung ini digunakan jika Pusat Pembangkit Tenaga Listrik berada tidak jauh dari pusat-pusat beban, biasanya terletak daerah pelayanan beban atau dipinggiran kota.

¹¹ Suswanto, Daman.2009. Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Edisi Pertama UNP. Hal 3-4.



2. Sistem Pendistribusian Tak Langsung

Sistem pendistribusian tak langsung merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan jika Pusat Pembangkit Tenaga Listrik jauh dari pusat-pusat beban, sehingga untuk penyaluran tenaga listrik memerlukan jaringan transmisi sebagai jaringan perantara sebelum dihubungkan dengan jaringan distribusi yang langsung menyalurkan tenaga listrik ke konsumen.

Sistem distribusi tenaga listrik terdiri dari beberapa bagian, yaitu :¹¹

1. Gardu Induk atau Pusat Pembangkit Tenaga Listrik

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

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.

¹¹ Suswanto, Daman.2009. Sistem Distribusi Tenaga Listrik. Edisi Pertama UNP. Hal 4-7.



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.

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.

1.3 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik⁷

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, dapat dilakukan pembagian serta pembatasan- pembatasan dalam system distribusi tenaga listrik, yaitu :

- Daerah I : Bagian pembangkitan (Generation)
- Daerah II : Bagian penyaluran (Transmission), bertegangan tinggi (HV, UHV, EHV)
- Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 atau 20kV)
- Daerah IV : 220/380 Volt (Instalasi bertegangan rendah)

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat. Dengan demikian ruang lingkup Jaringan Distribusi adalah :

⁷ Suhadi, dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 12-13.



A. SUTM

Terdiri dari tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan perengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.

B. SKTM

Terdiri dari kabel tanah, indoor dan outdoor termination, batu bata, pasir dan lain-lain.

C. Gardu trafo

Terdiri dari transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat trafo, LV panel, pipa-pipa pelindung, Arrester, kabel-kabel, transformer band, peralatan grounding, dan lain-lain.

D. SUTR dan SKTR

Terdiri dari perlengkapan/ material yang sama dengan perlengkapan/ material pada SUTM dan SKTM, yang membedakan hanya dimensinya.

1.4 Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik⁷

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

1.4.1 Menurut nilai tegangannya

a. Saluran distribusi Primer

Terletak pada sisi primer trafo distribusi, yaitu antara titik Sekunder trafo substation dengan titik primer trafo distribusi. Saluran ini bertegangan menengah 20kV.

b. Saluran Distribusi Sekunder

Terletak pada sisi sekunder trafo distribusi, yaitu antara titik sekunder dengan titik cabang menuju beban.

⁷ Suhadi, dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 14-26



1.4.2 Menurut bentuk tegangannya

- a. Saluran Distribusi DC (Direct Current) menggunakan sistem tegangan searah.
- b. Saluran Distribusi AC (Alternating Current) menggunakan sistem tegangan bolak-balik.

1.4.3 Menurut jenis/tipe konduktornya

- a. Saluran udara
Dipasang pada udara terbuka dengan bantuan support (tiang) dan perlengkapannya, dibedakan atas saluran kawat udara (tanpa isolasi) dan saluran kabel udara (dengan isolasi).
- b. Saluran Bawah Tanah
Dipasang di dalam tanah, dengan menggunakan kabel tanah (ground cable).
- c. Saluran Bawah Laut
Dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut (submarine cable) 2-2-4

1.4.4 Menurut susunan salurannya

- a. Saluran Konfigurasi horizontal
Bila saluran fasa terhadap fasa yang lain/terhadap netral, atau saluran positif terhadap negatif (pada sistem DC) membentuk garis horizontal.
- b. Saluran konfigurasi vertikal
Bila saluran-saluran tersebut membentuk garis vertical.
- c. Saluran konfigurasi Delta
Bila kedudukan saluran satu sama lain membentuk suatu segitiga (delta).

1.4.5 Menurut Susunan Rangkaiannya

- a. Primer
 - Jaringan distribusi radial
 - Jaringan distribusi ring (loop)
 - Jaringan distribusi hantaran penghubung (tie line)
 - Jaringan distribusi spindle
 - Sistem gugus atau kluster



- b. Sekunder
 - Jaringan distribusi radial

1.5 Jaringan pada Sistem Distribusi

Sistem distribusi di bedakan menjadi dua yaitu sistem distribusi primer dan sistem distribusi sekunder.

1.5.1 Sistem Distribusi Primer

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

Berdasarkan konfigurasinya, jaringan pada system distribusi tegangan menengah (primer 20 kV) dapat diklasifikasikan menjadi 2 macam yakni menurut bahan konduktor dan menurut susunan rangkaian.

A. Menurut bahan konduktornya

Bahan konduktor yang paling populer digunakan adalah tembaga (copper) dan aluminium. Tembaga mempunyai kelebihan dibandingkan dengan kawat penghantar aluminium karena konduktivitas dan kuat tariknya lebih tinggi. Tetapi kelemahannya ialah untuk besar tahanan yang sama, tembaga lebih berat dari aluminium dan juga lebih mahal. Oleh karena itulah kawat penghantar aluminium biasanya digunakan sebagai komponen utama suatu penghantar dengan bahan lain sebagai campurannya. Beberapa macam jenis konduktor dengan komponen utama aluminium, yaitu :

- a. AAC (All-Aluminium Conductor)
Kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium
- b. AAAC (All-Aluminium-Alloy Conductor)
Kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium



- c. AACCS (All-Aluminium-Alloy Conductor Steel)
Kawat penghantar yang terbuat dari campuran aluminium dengan pembungkus lapisan PVC ditengahnya ada kawat baja sebagai penguatnya
- d. ACSR (All Conductor, Steel-Reinforce)
Kawat penghantar aluminium berinti kawat baja
- e. ACAR (Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced)
Kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran

B. Menurut susunan rangkaiannya⁷

Menurut susunan rangkaian, jaringan distribusi primer dikelompokkan menjadi 5 model yaitu :

a. Jaringan Distribusi Radial

Bentuk Jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar.

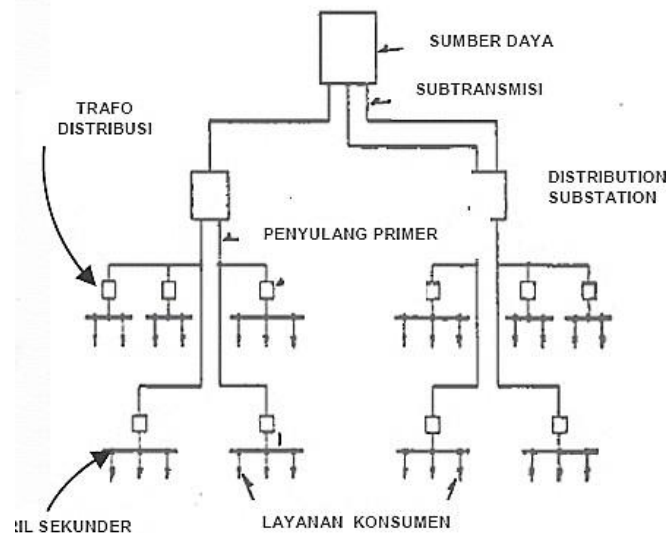
Oleh karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama. Maksudnya, saluran utama (dekat sumber) yang menanggung arus beban besar, ukuran penampangnya relatif besar, dan saluran cabang-cabangnya makin ke ujung dengan arus beban yang lebih kecil, ukurannya lebih kecil pula.

Kelebihan dari saluran ini adalah bentuknya sederhana dan biaya investasinya relatif murah, sedangkan kekurangannya ada pada kualitas

⁷ Suhadi, dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 17-24

pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi tegangan dan rugi daya yang terjadi pada saluran relatif besar dan juga kekurangan lainnya yaitu kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin, sebab antara titik sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila saluran tersebut mengalami gangguan, maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami "black out" secara total.

Untuk melokalisir gangguan, pada bentuk radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman berupa fuse, sectionaliser, recloser, atau alat pemutus beban lainnya, tetapi fungsinya hanya membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah/dibelakang titik gangguan, selama gangguan belum teratasi.



Gambar 2.2 Konfigurasi Jaringan Radial

b. Jaringan distribusi ring (loop)

Bila pada titik beban terdapat dua alternatif saluran berasal lebih dari satu sumber. Jaringan ini merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan "loop". Susunan rangkaian penyulang membentuk ring, yang memungkinkan titik beban dilayani dari dua arah penyulang, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin, serta kualitas dayanya menjadi lebih baik, karena rugi tegangan dan rugi daya pada saluran menjadi lebih kecil.



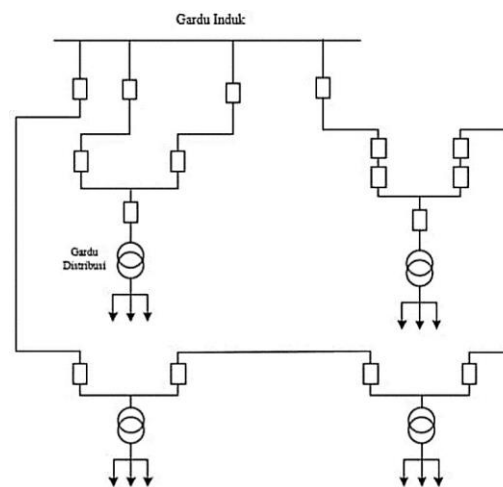
Bentuk loop ini ada 2 macam, yaitu :

- Bentuk open loop

Bila diperlengkapi dengan normally-open switch, dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka.

- Bentuk close loop

Bila diperlengkapi dengan normally-close switch, yang dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.

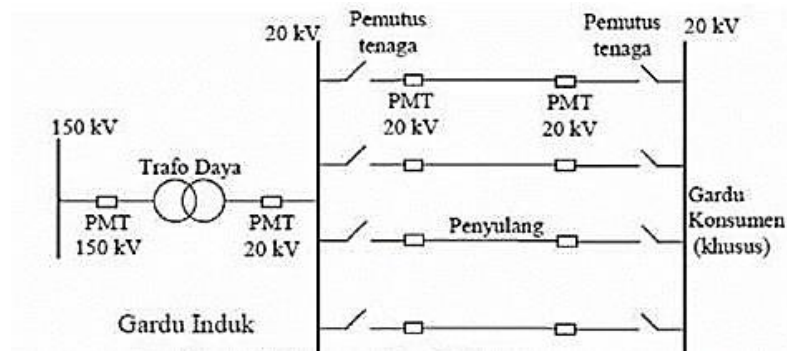


Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Loop

c. Jaringan hantaran penghubung (tie line)

Sistem distribusi tie line digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam (bandar udara, rumah sakit, dan lain-lain).

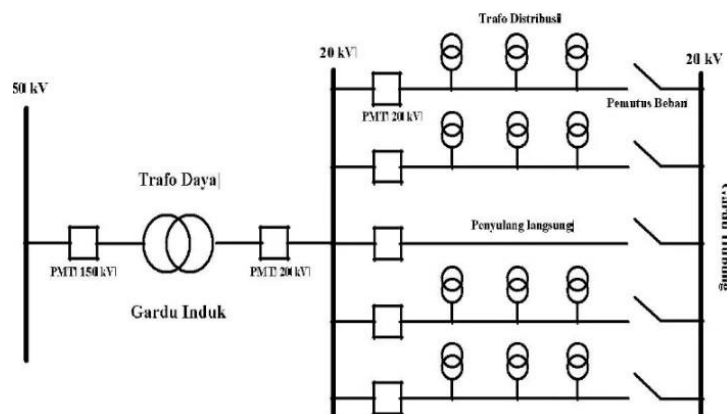
Pada sistem ini memiliki lebih banyak alternatif saluran/ penyulang, sehingga bila salah satu penyulang terganggu, dengan segera dapat digantikan oleh penyulang yang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin. Kelebihan jaringan ini adalah kontinuitas penyaluran daya paling terjamin, kualitas tegangannya baik, rugi daya pada saluran amat kecil, dibanding dengan bentuk lain, paling flexible (luwes) dalam mengikuti pertumbuhan dan perkembangan beban. Sedangkan kekurangannya yaitu sebelum pelaksanaannya, memerlukan koordinasi perencanaan yang teliti dan rumit, memerlukan biaya investasi yang besar (mahal), memerlukan tenaga-tenaga terampil dalam pengoperasiannya.



Gambar 2.4 Konfigurasi Jaringan Hantaran Penghubung

d. Jaringan distribusi spindle

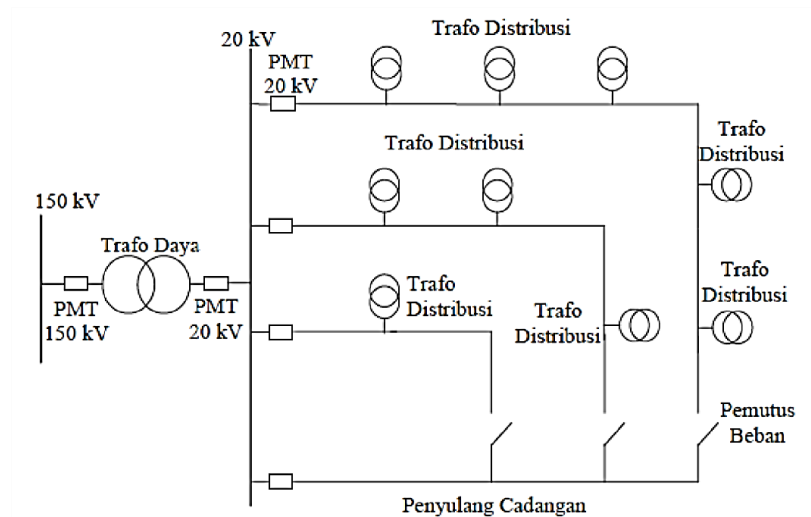
Bentuk spindle biasanya terdiri atas maksimum 6 penyulang dalam keadaan dibebani, dan satu penyulang dalam keadaan kerja tanpa beban. Saluran penyulang yang beroperasi dalam keadaan berbeban dinamakan "working feeder" atau saluran kerja, dan satu saluran yang dioperasikan tanpa beban dinamakan "express feeder". Fungsi "express feeder" dalam hal ini selain sebagai cadangan pada saat terjadi gangguan pada salah satu "working feeder", juga berfungsi untuk memperkecil terjadinya drop tegangan pada sistem distribusi bersangkutan pada keadaan operasi normal. Dalam keadaan normal "express feeder" dioperasikan tanpa beban.



Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Distribusi Spindle

e. Sistem gugus atau sistem kluster

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



Gambar 2.6 Konfigurasi Sistem Kluster

1.5.2 Sistem Distribusi Sekunder⁷

Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan adalah system radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini akan menghubungkan tegangan rendah kepada konsumen/ pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sebagai berikut :

1. Papan pembagi pada trafo distribusi
2. Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder)
3. Saluran layanan oelangan (SLP) ke konsumen/ pemakai
4. Alat pembatas dan pengukur daya (kWH Meter) serta fuse atau pengaman padapelanggan

⁷ Suhadi, dkk. 2008. Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Hal 26



1.6 Parameter Saluran Distribusi

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 jauh (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. Resistansi penghantar sangat penting dalam evaluasi efisiensi distribusi dan studi ekonomis.

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 analisis sistem tenaga.

1.6.1 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 :

$$R = \rho \frac{l}{A} \dots \dots \dots (2.1)^2$$

Dimana :

ρ = resistivitas penghantar (Ω)

l = panjang kawat penghantar (m)

A = luas penampang kabel penghantar (m^2)

Kenaikan resistansi karena pembentukan lilitan diperkirakan mencapai 1% untuk penghantar dengan tiga serat dan 2% untuk penghantar dengan lilitan konsentris. Jika suhu dilukiskan pada sumbu tegak dan resistansi pada sumbu

² Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, *Transmisi Daya Listrik*, (Yogyakarta: Andi, 2013). Hal. 63



mendatar maka titik pertemuan perpanjangan garis dengan sumbu suhu dimana resistansinya sama dengan α adalah suatu konstanta untuk bahan logam bersangkutan, maka tahanan searahnya dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \dots\dots\dots (2.2)^2$$

Dimana :

R_1 = resistansi penghantar pada suhu t_1 (temperatur sebelum operasi konduktor)

R_2 = resistansi penghantar pada suhu t_2 (temperatur operasi konduktor)

t_1 = temperatur awal (°C)

t_2 = temperatur akhir (°C)

T = konstanta yang ditentukan oleh grafik

Nilai-nilai konstanta T adalah sebagai berikut :

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

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

$T = 228$ untuk aluminium dengan konduktivitas 61%

1.6.2 Induktansi Saluran

Untuk menentukan besarnya induktansi saluran pada jaringan distribusi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4

$$L = \{ 0,5 + 4,6 \log \frac{D-r}{r} \} 10^{-7} \text{ H/m} \dots\dots\dots (2.3)^{14}$$

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 :

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \dots\dots\dots (2.4)^{14}$$

Dimana D_{12} D_{23} D_{31} menunjukkan jarak letak konduktor satu sama lain. Karakteristik penghantar dapat dicari dari buku penghantar atau literature pabrik pembuat yang menyediakan nilai induktansi dari suatu penghantar dalam satuan mH/km. Pabrik pembuat penghantar menyediakan karakteristik standard penghantar dengan ukuran penghantar.

² Cekmas Cekdin dan Taufik Barlian, *Transmisi Daya Listrik*, (Yogyakarta: Andi, 2013). Hal. 64

¹⁴ Zuhail. 1995. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta : Gramedia. Hal 152



Untuk menghitung nilai r penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi r^2 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots\dots\dots (2.6)$$

1.6.3 Reaktansi Saluran

Jika induktansi dalam satuan Henry dikalikan dengan $2 \cdot \pi \cdot F$ (frekuensi dalam satuan Hz), maka hasilnya dikenal sebagai reaktansi induktif yang diukur dalam satuan ohm. Jadi besarnya nilai satuan reaktansi induktif saluran :

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \dots\dots\dots (2.7)^6$$

Dimana :

X_L = Reaktansi induktif saluran

L = Induktansi saluran (H)

F = Frekuensi (Hz)

1.6.4 Impedansi Saluran

Impedansi Saluran Impedansi suatu saluran distribusi dapat kita tentukan dengan persamaan dasar sebagai berikut :

$$Z_L = \sqrt{R^2 + X_L^2} \dots\dots\dots (2.8)^3$$

Dimana :

Z_L = Impedansi Saluran

R = Resistansi Saluran

X_L = Reaktansi Induktif

⁶ Rizky B.Binilang,Hans Tumaliang,Fielman Lisi,"Studi Analisa Rugii Daya pada Saluran Distribusi Primer 20 Kv di Kota Tahuna",Volume 6 No 2,2017,Hal.71.(Diunduh dari laman <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/elekdankom/article/view/16938> pada 21 Juli 2022).

³ Hutaaruk, T.S. 1985 . Transimisi Daya Listrik. Jakarta P.T. Gelora Aksara. Hal 61.



1.6.5 Daya Listrik

Ada beberapa jenis daya listrik yang akan dibahas pada sub-bab ini, yaitu :

1. Daya Semu

Daya semu adalah daya yang melewati suatu saluran penghantar yang ada pada jaringan transmisi maupun jaringan distribusi. Dimana untuk daya semu ini dibentuk oleh besaran tegangan yang dikalikan dengan besaran arus.

Untuk 1 phasa yaitu :

$$S = V \times I \dots\dots\dots (2.8)$$

Untuk 3 phasa yaitu :

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

S = Daya semu (VA)

V = Tegangan yang ada (V)

I = Besar arus yang mengalir (A)

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 pembentuk dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

Untuk 1 phasa :

$$P = V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.10)$$

Untuk 3 phasa :

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

P = Daya aktif (watt)

V = Tegangan yang ada (V)

I = Besar arus yang mengalir (A)

$\cos \varphi$ = Faktor daya



3. Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang hilang atau selisih daya semu yang masuk pada saluran dengan daya aktif yang terpakai pada daya mekanis dan daya panas.

Untuk 1 phasa :

$$Q = V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.12)$$

Untuk 3 phasa :

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \varphi \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

P = Daya aktif (watt)

V = Tegangan yang ada (V)

I = Besar arus yang mengalir (A)

$\sin \varphi$ = Faktor daya

1.7 Drop Tegangan¹²

Panjang sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dapat didesain dengan mempertimbangkan rugi tegangan (Voltage Drop). Rugi tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Jatuh tegangan selalu terjadi pada jaringan, baik pada pelanggan maupun pada perusahaan listrik. Jatuh tegangan pada saluran transmisi adalah selisih antara tegangan pada sisi kirim (sending end) dan tegangan pada sisi terima (receiving end).

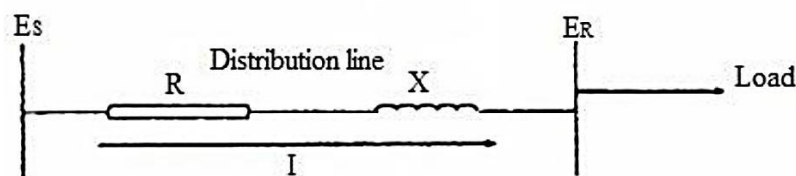
Dengan semakin besar pula perbedaan nilai tegangan yang ada pada sisi kirim dengan yang ada pada sisi terima, Apabila perbedaan nilai tegangan tersebut melebihi standar yang ditentukan, maka mutu penyaluran tersebut rendah. Di dalam saluran tranmisi persoalan tegangan sangat penting, baik dalam keadaan operasi maupun dalam perencanan sehingga harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik saluran. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk

¹² Syufrijal, Readysal Monantun, *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*, (Jakarta:Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan, 2014), Hal.54.

tegangan menengah harus diperhatikan. Berdasarkan dari standar SPLN 72: 1987, dimana drop tegangan untuk penyulang dengan konfigurasi radial adalah maksimal 5%. Besarnya rugi tegangan pada saluran transmisi tersebut, diukur pada titik yang paling jauh (ujung).

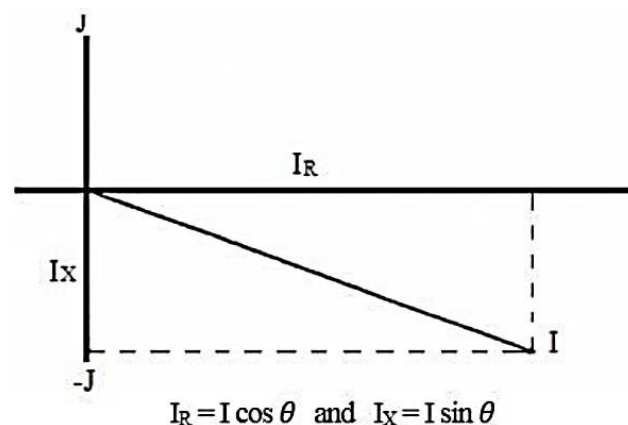
Jika karakteristik beban resistansi (R) dan reaktansi (X) dari saluran distribusi diketahui dan juga power factor ($\cos \phi$) beban diketahui maka dapat langsung dihitung Voltage Drop-nya.

Pada Gambar 2.7 terlihat bahwa beban pada saluran distribusi merupakan beban R (resistif) dan X (reaktif). Contoh beban ini adalah motor yang bersifat reaktif yang mengakibatkan arus lagging terhadap tegangan.



Gambar 2.7 Drop Voltage pada Saluran Distribusi

Penurunan tegangan sama dengan $E_S - E_R$. Jika diproyeksikan pada sumbu axis E_R dapat dilihat pada gambar bahwa penurunan tegangan hampir sama dengan $I R + I X$ dan komponen penurunan tegangan di luar fasa ($-j I X$ dan $j I R$) tidak mempengaruhi hasil totalnya. Untuk alasan ini, persamaan berikut ini berlaku untuk hampir seluruh penggunaan :



Gambar 2.8 Hubungan Fasa dengan Beban Induktif



Formula ini memberikan penurunan tegangan pada satu konduktor, line to netral. Satu fasa penurunan tegangan adalah 2 kali nilai persamaan di atas. Tiga fasa line to line penurunan tegangan adalah $\sqrt{3}$ kali dari nilai persamaan di atas. Dengan demikian persamaan untuk penurunan tegangan 3 fasa menjadi sebagai berikut :

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times l \times (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \dots\dots\dots(2.14)$$

Besar presentasi drop tegangan pada saluran transmisi dapat dihitung dengan :

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V} \times 100\% \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

ΔV = Rugi tegangan (Volt)

R = Resistansi saluran (Ω/km)

X = Reaktansi saluran (Ω/km)

I = Arus beban (A)

l = Panjang hantaran tegangan menengah (km)

Standart PLN 72 : 1987, dimana ditentukan bahwa drop tegangan untuk penyulang dengan bentuk konfigurasi radial maksimal 5% dari tegangan nominalnya. Salah satu penyebab adanya drop voltage sendiri adalah jauhnya sistem pentransmisian tenaga listrik ke pelanggan khusus yang jauh dari pusat - pusat konsumsi tenaga listrik atau Gardu Induk (G). Jarak pentransmisian bisa mencapai ratusan kms agar pelanggan dapat menikmati listrik walaupun menimbulkan drop tegangan ujung yang buruk. Titik drop tegangan yang buruk adalah titik dimana drop tegangannya dibawah standart PLN atau tegangan nya dibawah 18 kV dan tegangan yang baik berada pada range standart PLN antara 18 kV sampai dengan 21 kV yang dapat diukur tegangannya persection setiap penyulang.



1.8 ETAP 19.0.1⁴

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 didalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Analisa sistem tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

1. Analisa aliran daya
2. Analisa hubung singkat
3. Arc Flash Analysis
4. Starting motor
5. Koordinasi proteksi
6. Analisa kestabilan transien, dll.

Pada studi kali ini akan digunakan fitur *load flow* untuk mengetahui tegangan ujung dari sistem distribusi yang disimulasikan. Percobaan *load flow* atau aliran daya ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran daya yang berupa pengaruh dari variasi beban dan rugi-rugi transmisi pada aliran daya dan juga mempelajari adanya tegangan jatuh di sisi beban . Pada software ini dibutuhkan data penunjang seperti arus yang mengalir serta jenis dan panjang saluran yang digunakan. Dalam menganalisa tenaga listrik, dibutuhkan 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 distandardisasi untuk diagram

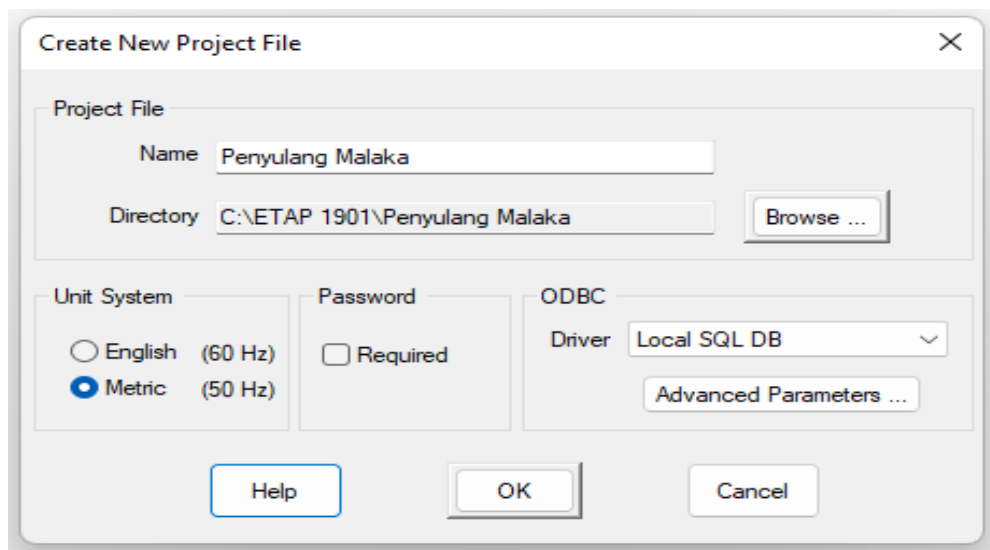
⁴ Multa, Lestanto, dkk. 2013. Modul Pelatihan Etap. Yogyakarta : Universitas Negeri Yogyakarta

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.

2.1.1 Prosedur Merangkai Simulasi Penyulang pada *Software* ETAP 19.0.1

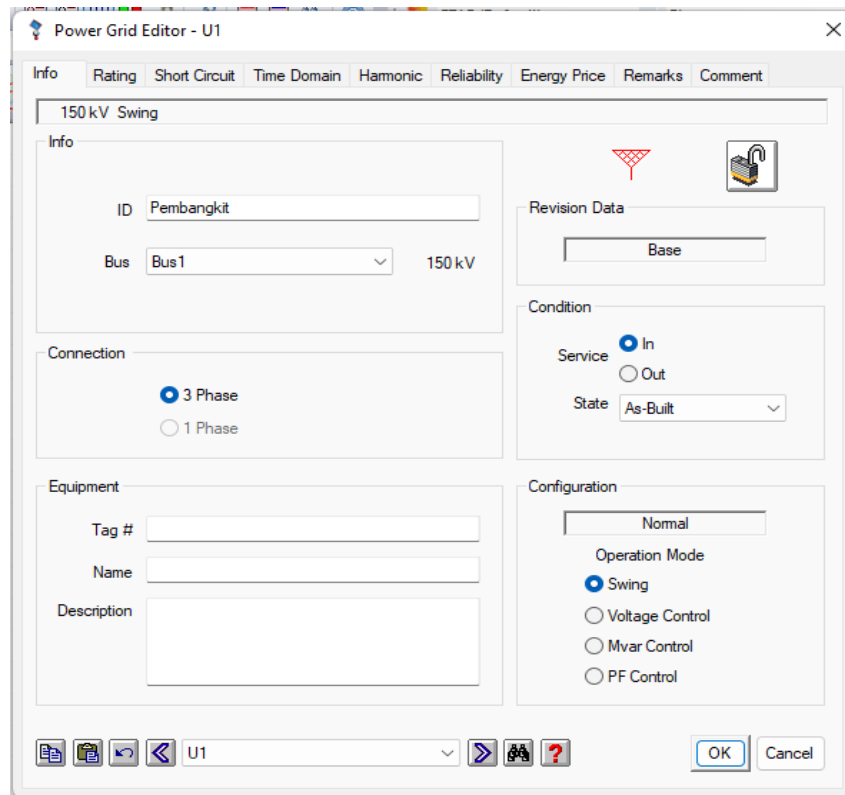
ETAP merupakan salah satu *software* aplikasi yang banyak digunakan untuk mensimulasikan system tenaga listrik. Adapun Langkah-langkah pengoperasian dari ETAP 19.0.1 adalah sebagai berikut :

1. Buka *software* ETAP 19.0.1 pada desktop
2. Kemudian klik *File* > *New Project*, buat nama dan tentukan lokasi penyimpanan *project*



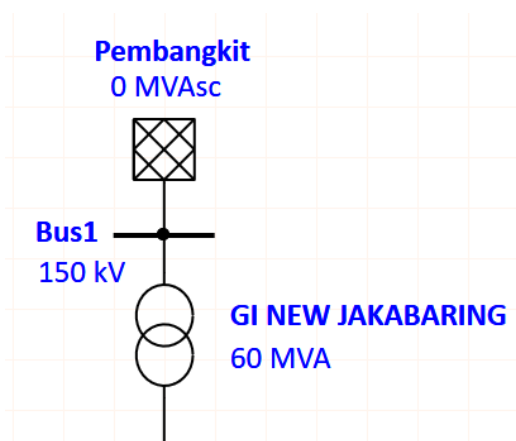
Gambar 2.9 Menubar Create New Project File

3. Klik *Power Grid* pada *AC Elements* pindahkan ke lembar kerja, buat ID dan Rating 150 kVA



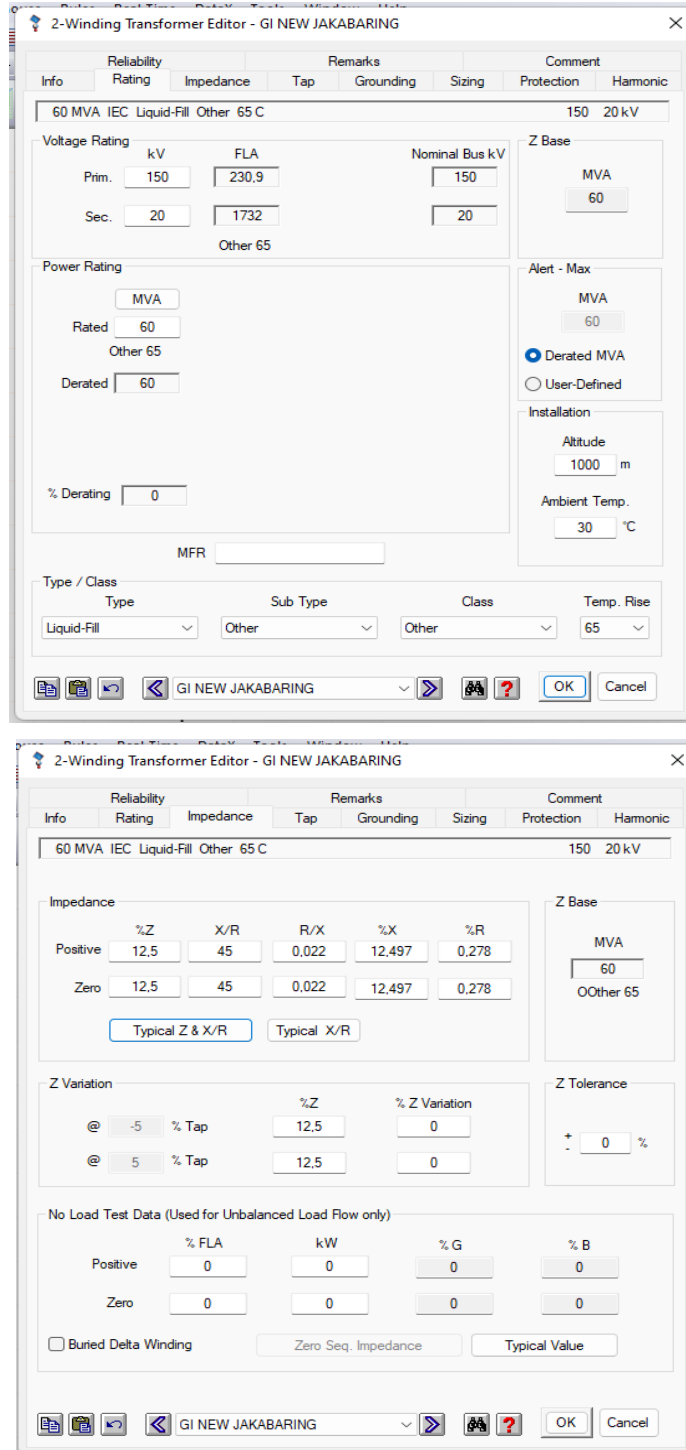
Gambar 2.10 Menubar *Power Grid Editor*

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 New Jakabaring, rating tegangan sekunder 20 kV, *rating* daya 60 MVA, tinggi pemasangan, impedansi setelah itu sambungkan ke busbar



2-Winding Transformer Editor - GI NEW JAKABARING

Reliability Remarks Comment

Info Rating Impedance Tap Grounding Sizing Protection Harmonic

60 MVA IEC Liquid-Fill Other 65 C 150 20 kV

Voltage Rating

	kV	FLA	Nominal Bus kV
Prim.	150	230,9	150
Sec.	20	1732	20

Other 65

Power Rating

MVA

Rated: 60

Other 65

Derated: 60

% Derating: 0

MFR: _____

Z Base

MVA: 60

Alert - Max

MVA: 60

Derated MVA

User-Defined

Installation

Altitude: 1000 m

Ambient Temp.: 30 °C

Type / Class

Type	Sub Type	Class	Temp. Rise
Liquid-Fill	Other	Other	65

GI NEW JAKABARING OK Cancel

2-Winding Transformer Editor - GI NEW JAKABARING

Reliability Remarks Comment

Info Rating Impedance Tap Grounding Sizing Protection Harmonic

60 MVA IEC Liquid-Fill Other 65 C 150 20 kV

Impedance

	%Z	X/R	R/X	%X	%R
Positive	12,5	45	0,022	12,497	0,278
Zero	12,5	45	0,022	12,497	0,278

Typical Z & X/R Typical X/R

Z Base

MVA: 60

Other 65

Z Variation

@	% Tap	%Z	% Z Variation
-5	% Tap	12,5	0
5	% Tap	12,5	0

Z Tolerance

+ 0 %

No Load Test Data (Used for Unbalanced Load Flow only)

	% FLA	kW	% G	% B
Positive	0	0	0	0
Zero	0	0	0	0

Buried Delta Winding Zero Seq. Impedance Typical Value

GI NEW JAKABARING OK Cancel

Gambar 2.12 Menubar Winding Transformer Editor

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

Cable Editor - SKTM 240 MM

Sizing - Phase	Sizing - GND/PE	Reliability	Routing	Remarks	Comment	
Info	Physical	Impedance	Configuration	Loading	Capacity	Protection
SPLN	Non-Mag.	50 Hz	Code : 240			
XLPE	100 %	20 kV	3/C AL	240	mm ²	

Info

ID SKTM 240 MM

From Bus2 20 kV

To Bus3 20 kV

Revision Data

Base

Equipment

Tag #

Name

Description

Condition

Service In Out

State As-Built

No. of Conductors / Phase

1

Length

Length 4700 m

Tolerance 0 %

Library

Library...

Link to Library

Connection

3 Phase 1 Phase

Cable Editor - SKTM 240 MM

Sizing - Phase	Sizing - GND/PE	Reliability	Routing	Remarks	Comment	
Info	Physical	Impedance	Configuration	Loading	Capacity	Protection
SPLN	Non-Mag.	50 Hz	Code : 240			
XLPE	100 %	20 kV	3/C AL	240	mm ²	

Option

Positive Seq. Library Calculated

Zero Seq. Library Calculated

Units

Ohms per 1000 m Ohms

Frequency

Project 50 Hz

Data 50 Hz

Impedance - Library

	R	X	L	Z	X/R	R/X	Y
Pos.	0,161	0,098	0,0003119	0,18848	0,609	1,643	0,0000943
Zero	0,483	0,245	0,0007799	0,54158	0,507	1,971	0

Calculated Impedance

	R	X	L	Z	X/R	R/X	Y
Pos.	0,15875	0,09476	0,0003016	0,18488	0,597	1,675	0,0000356
Zero	0,3068	2,00152	0,006371	2,0249	6,524	0,153	0,0000186

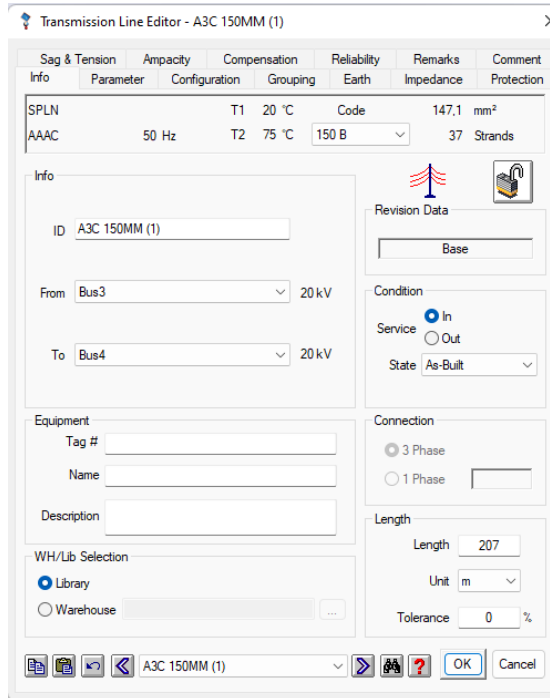
Cable Temperature

Base 90 °C Min. 75 °C Max. 75 °C

Impedance Calculation: DC resistance from the Physical page has been used.

Gambar 2.13 Menubar *Cable Editor*

7. Setelah itu sambungkan *Transmission Line* 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



Transmission Line Editor - A3C 150MM (1)

Sag & Tension	Ampacity	Compensation	Reliability	Remarks	Comment	
Info	Parameter	Configuration	Grouping	Earth	Impedance	Protection
SPLN		T1	20 °C	Code	147,1 mm ²	
AAAC	50 Hz	T2	75 °C	150 B	37 Strands	

Info

ID: A3C 150MM (1)

From: Bus3 (20 kV)

To: Bus4 (20 kV)

Equipment

Tag #: _____

Name: _____

Description: _____

WH/Lib Selection

Library

Warehouse

Revision Data

Base: _____

Condition

Service: In Out

State: As-Built

Connection

3 Phase

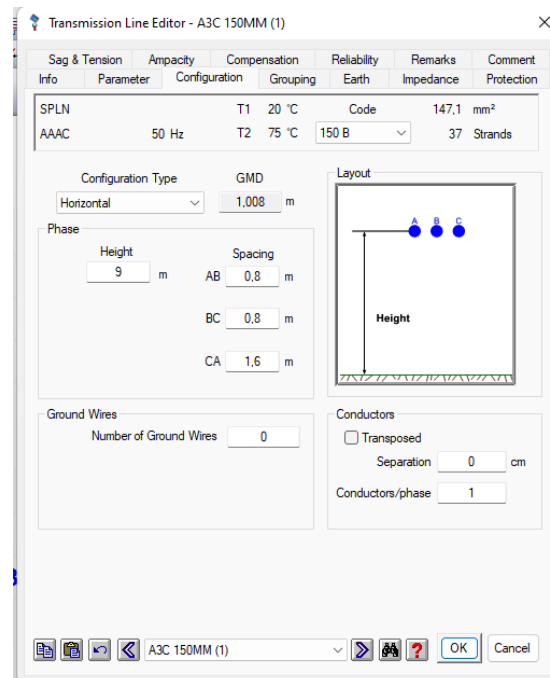
1 Phase

Length

Length: 207

Unit: m

Tolerance: 0 %



Transmission Line Editor - A3C 150MM (1)

Sag & Tension	Ampacity	Compensation	Reliability	Remarks	Comment	
Info	Parameter	Configuration	Grouping	Earth	Impedance	Protection
SPLN		T1	20 °C	Code	147,1 mm ²	
AAAC	50 Hz	T2	75 °C	150 B	37 Strands	

Configuration Type: Horizontal

GMD: 1,008 m

Phase

Height: 9 m

Spacing

AB: 0,8 m

BC: 0,8 m

CA: 1,6 m

Ground Wires

Number of Ground Wires: 0

Conductors

Transposed

Separation: 0 cm

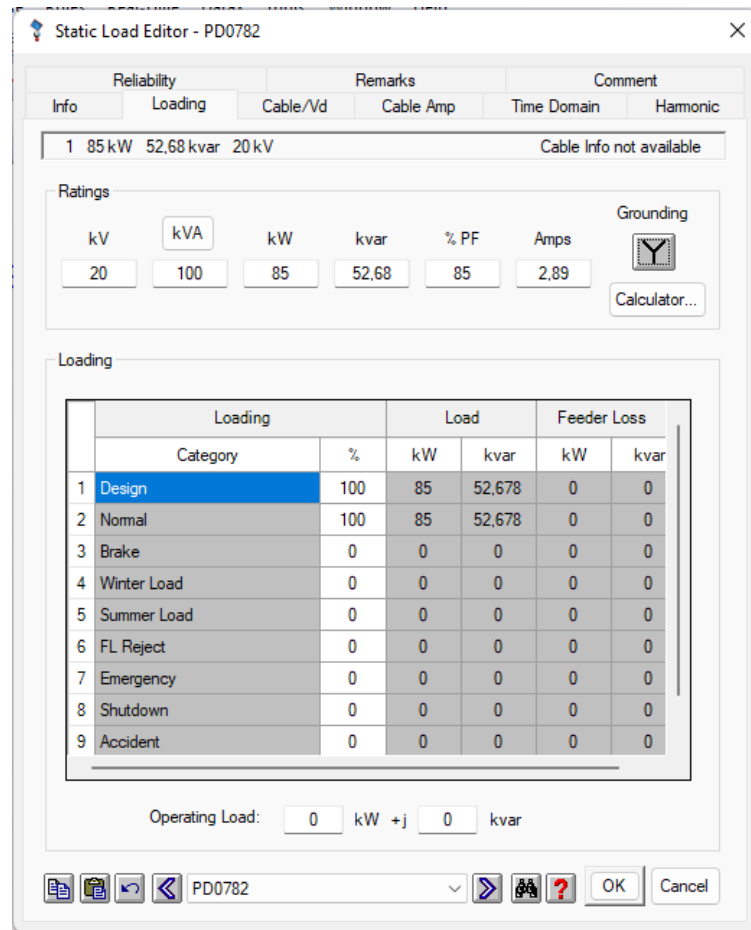
Conductors/phase: 1

Layout

Diagram showing three conductors labeled A, B, and C.

Gambar 2.14 Menubar Transmission Line Editor

9. Setelah itu sambungkan *Transmission Line* ke *cable*
10. Kemudian klik *Static Load* pada *AC Elements*, isi ID beban, beban yang digunakan, dan *power factor*



Gambar 2.15 Menubar *Static Load Editor*

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