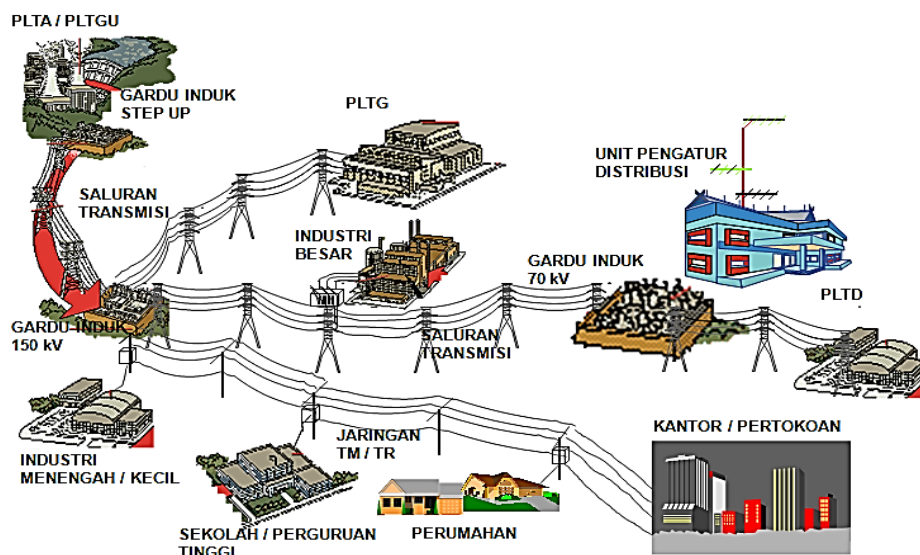


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Tenaga Listrik³

Dengan kemajuan zaman pada saat ini, bahwa listrik telah menjadi bagian yang sangat penting bagi umat manusia. Oleh karenanya tak berlebihan bahwa listrik bisa dikatakan sebagai salah satu kebutuhan utama bagi penunjang dan pemenuhan kebutuhan hidup umat manusia. Manfaat listrik telah dirasakan oleh masyarakat, baik pada kelompok perumahan, sosial, bisnis atau perdagangan, industri dan publik. Tenaga listrik sebagai bagian dari bentuk energi dan cabang produksi yang penting bagi negara dalam menunjang upaya memajukan dan mencerdaskan bangsa. Yang dimaksud dengan sistem tenaga listrik adalah sekumpulan pusat listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu dengan yang lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga merupakan sebuah kesatuan yang terinterkoneksi. Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: pusat pembangkit listrik, saluran transmisi, dan sistem distribusi. Berikut merupakan gambar mengenai penyaluran tenaga listrik dari pembangkit sampai tersalurkan kepada konsumen



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

³ Suhadi, Teknik Distribusi Tenaga Listrik, 2008, Hal 3

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

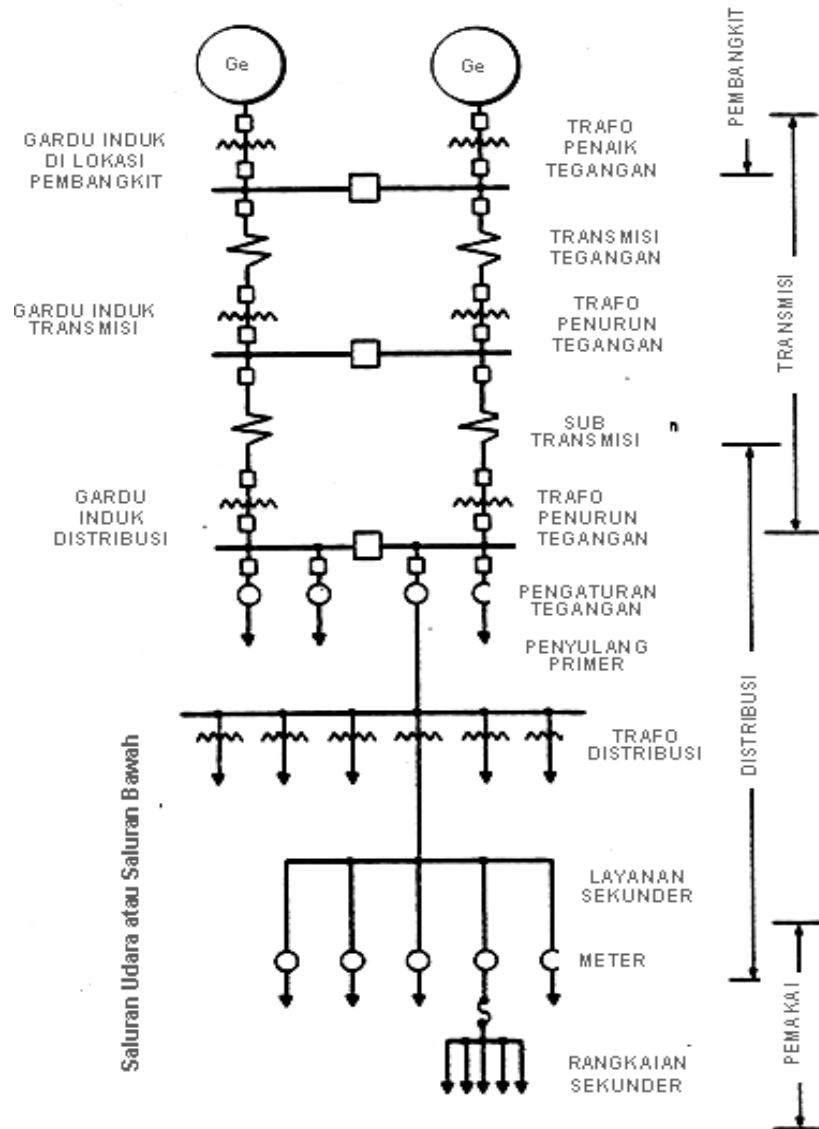
2.2. Sistem Distribusi Tenaga Listrik³

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah sebagai pembagi atau penyalur tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan sebagai 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 step up sehingga tegangan menjadi 70 kV, 150 kV dan lebih tinggi kemudian disalurkan melalui saluran transmisi.

Tujuan menaikkan tegangan adalah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi. 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 konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem

³ *Ibid*, Hal 11

distribusi merupakan bagian yang penting dalam sistem tenaga listrik secara keseluruhan. seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.2 Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik¹

Keterangan Gardu Induk :

PTL : Pembangkit Tenaga Listrik

TET : Tegangan Ekstra Tinggi

TM : Tegangan Menengah

TR : Tegangan Rendah

TT : Tegangan Tinggi

¹Abdul Kadir. Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik. Jakarta: UI Press 2000. Hal. 5

GD : Gardu Distribusi

GI : Tegangan Tinggi

Energi diterima pemakai dari tiang TR melalui konduktor atau kawat yang dinamakan saluran rendah (SR) dan berakhir pada alat pengukur listrik (KWH) yang sekaligus merupakan titik akhir pemilikan PLN.

2.3. Klasifikasi Saluran Distribusi Tenaga Listrik ⁴

Sistem jaringan distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan dari berbagai segi, antara lain adalah :

1. Berdasarkan ukuran tegangan
2. Berdasarkan ukuran arus
3. Berdasarkan sistem penyaluran
4. Berdasarkan bentuk jaringan

2.3.1. Berdasarkan Ukuran Tegangan

a. Saluran Distribusi Primer ⁹

Jaringan distribusi primer merupakan suatu jaringan yang letaknya sebelum gardu distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan menengah (misalnya 6 kV atau 20 kV).hantaran dapat berupa kabel dalam tanah atau saluran/kawat udara yang menghubungkan gardu induk (sekunder trafo) dengan gardu distribusi atau gardu hubung (sisi primer trafo didistribusi).

b. Saluran Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder merupakan suatu jaringan yang letaknya setelah gardu distribusi berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah (misalnya 220 V/380 V). Hantaran berupa kabel tanah atau kawat udara yang menghubungkan dari gardu distribusi (sisi sekunder trafo distribusi) ke tempat konsumen atau pemakai (misalnya industri atau rumah – rumah).. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada

⁴ Dr. Ramadoni Syahputra, Transmisi dan Dsistribusi Tenaga Listrik, Bab X Topologi Jaringan Distribusi Hal 130, Yogyakarta : 2018

⁹ Anonim, tabeldiameterkabel.wordpress.com/2017/12/05/jaringan-distribusi-listrik-tegangan-menengah/. Diakses pada tanggal 31 Februari 2022

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 Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai)
4. Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

2.3.2. Berdasarkan Ukuran Arus :

- a. Saluran Distribusi DC, saluran ini menggunakan sistem arus searah
- b. Saluran Distribusi AC, saluran ini menggunakan sistem arus bolak balik

2.3.3. Berdasarkan Sistem Penyaluran :

- a. Saluran Udara

Saluran ini terpasang pada udara terbuka dengan bantuan tiang dan perlengkapan lainnya yang dibedakan yaitu saluran kawat udara dengan konduktor telanjang (tanpa isolasi) dan saluran kabel udara dengan konduktor terisolasi

- b. Saluran Bawah Tanah

Saluran ini terpasang didalam tanah dengan menggunakan kabel bawah tanah

- c. Saluran Bawah Laut

Saluran ini dipasang di dasar laut dengan menggunakan kabel laut

2.3.4. Berdasarkan Bentuk Jaringan³

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk distribusi ke pusat – pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara maupun saluran bawah tanah sesuai dengan tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran ini terdapat macam – macam bentuk rangkaian jaringan distribusi primer sebagai berikut :

- 1) Jaringan Distribusi Radial

Bentuk jaringan ini merupakan bentuk paling sederhana dan paling banyak digunakan. Jaringan ini hanya mampu mengalirkan dalam satu arah aliran daya dan

³ *Ibid*, Hal 17

digunakan untuk melayani daerah dengan tingkat kerapatan beban yang rendah. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan kemudian dihubungkan dengan dicabang ke titik – titik beban yang dilayani.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya percabangan, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Oleh karena itu, kerapatan arus (beban) pada setiap saluran tidak sama, maka luas penampang konduktor pada jaringan tidak harus sama.

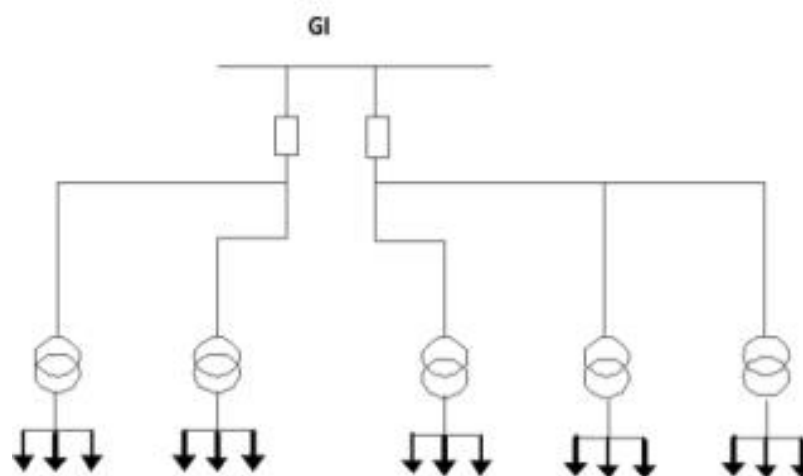
Keuntungan jaringan distribusi radial :

- Bentuknya sederhana
- Biaya relatif murah

Kerugian jaringan distribusi radial :

- Kualitas pelayanan dayanya relatif jelek, karena rugi daya dan rugi tegangan yang terjadi pada saluran relatif besar
- Kontinuitas pelayanan daya tidak terjamin sebab antara sumber dan titik beban hanya ada satu alternatif saluran sehingga bila terjadi gangguan maka seluruh rangkaian sesudah titik gangguan akan mengalami padam secara total

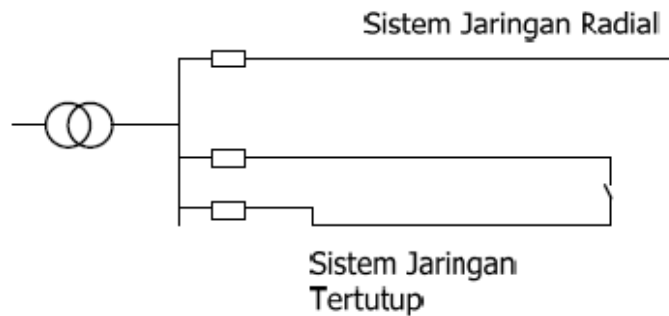
Untuk meminimalisir gangguan, bentuk radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman berupa fuse, recloser atau alat pemutus beban lainnya, tetapi hanya membatasi daerah yang mengalami pemadaman total yaitu daerah sesudah titik gangguan.



Gambar 2.3 Konfigurasi Jaringan Radial

2) Jaringan Distribusi Tertutup⁷

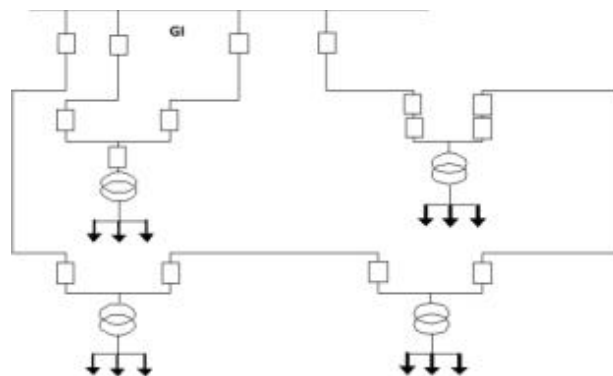
Jaringan bentuk tertutup yaitu jaringan yang mempunyai alternatif pasokan tenaga listrik jika terjadi gangguan. Sehingga bagian yang mengalami pemadaman (*black-out*) dapat dikurangi atau bahkan dihindari.



Gambar 2.4 Sistem Jaringan Tertutup

3) Jaringan Distribusi 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)

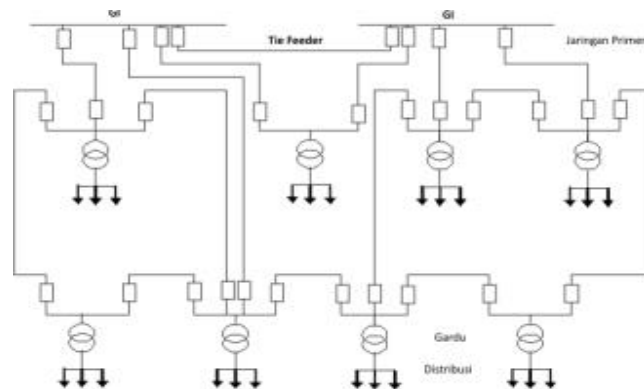


Gambar 2.5 Konfigurasi Jaringan Loop

⁷ Kriteria Desain Engineering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Edisi 1. Jakarta : PT PLN (Persero). 2010. Bab 4 Hal. 3

4) Jaringan Distribusi 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.



Gambar 2.6 Konfigurasi Jaringan Grid

Titik beban memiliki lebih banyak alternatif, sehingga bila salah satu penyulang terganggu, dengan segera dapat digantikan oleh penyulang yang lain. Dengan demikian kontinuitas penyaluran daya sangat terjamin.

Keunggulan :

- Kontinuitas penyaluran daya paling terjamin
- Kualitas tegangannya baik, rugi daya pada saluran amat kecil
- Lebih fleksibel daripada yang lain

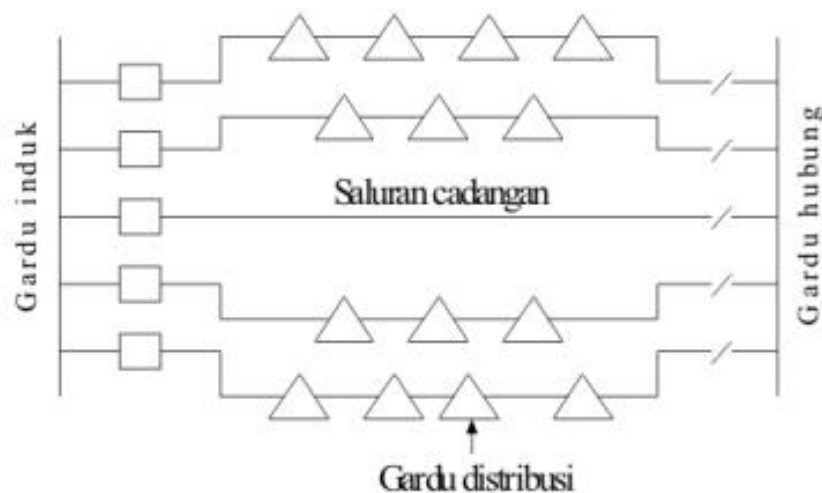
Kekurangan :

- Sebelum pelaksanaannya, memerlukan koordinasi perencanaan yang teliti dan rumit.
- Memerlukan biaya investasi yang besar (mahal)
- Memerlukan tenaga-tenaga terampil dalam pengoperasiannya.

Dengan spesifikasi tersebut, bentuk ini hanya layak untuk melayani daerah beban yang benar-benar memerlukan tingkat keandalan dan kontinuitas yang tinggi, antara lain: instalasi militer, pusat sarana komunikasi dan perhubungan, rumah sakit, dan sebagainya. Karena bentuk ini merupakan jaringan yang menghubungkan beberapa sumber, maka bentuk jaringan grid disebut juga jaringan interkoneksi

5) Jaringan Distribusi Spindle

Jaringan ini 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. 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.



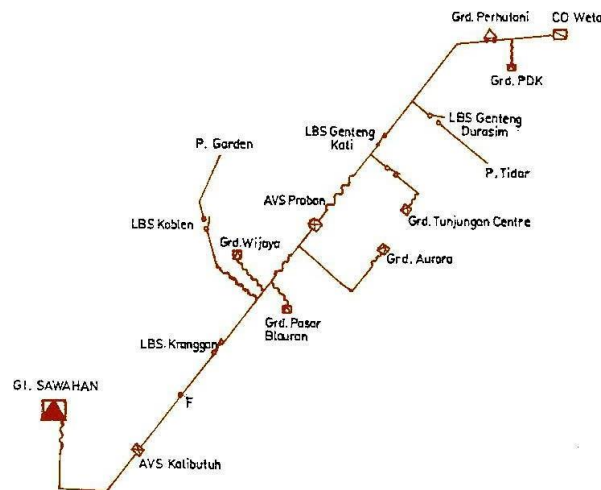
Gambar 2.7 Konfigurasi Jaringan Spindel

6) Jaringan Distribusi Radial Interkoneksi³

Saluran Radial Interkoneksi yaitu terdiri lebih dari satu saluran radial tunggal yang dilengkapi dengan LBS/AVS sebagai saklar interkoneksi. Masing-masing tipe saluran tersebut memiliki spesifikasi sendiri, dan agar lebih jelas akan dibicarakan lebih lanjut pada bagian lain. Pada dasarnya semua beban yang

³ *Ibid*, Hal 24

memerlukan tenaga listrik, menuntut kondisi pelayanan yang terbaik, misalnya dalam hal stabilitas tegangannya, sebab seperti telah dijelaskan, bila tegangan tidak nominal dan tidak stabil, maka alat listrik yang digunakan tidak dapat beroperasi secara normal, bahkan akan mengalami kerusakan. Tetapi dalam prakteknya, seberapa besar tingkat pelayanan terbaik dapat dipenuhi, masih memerlukan beberapa pertimbangan, mengingat beberapa alasan. Biasanya jaringan ini digunakan untuk daerah dengan kepadatan beban yang tinggi dan tidak menuntut keandalan yang terlalu tinggi serta terletak di daerah pinggiran kota, kampung, perumahan sedang.



Gambar 2.8 Jaringan Distribusi Radial Interkoneksi

Secara umum, baik buruknya sistem penyaluran dan distribusi tenaga listrik terutama adalah ditinjau dari hal-hal berikut ini:

1. Kontinuitas Pelayanan yang baik, tidak sering terjadi pemutusan, baik karena gangguan maupun karena hal-hal yang direncanakan. Biasanya, kontinuitas pelayanan terbaik diprioritaskan pada beban-beban yang dianggap vital dan sama sekali tidak dikehendaki mengalami pemadaman, misalnya: tempat militer, pusat pelayanan komunikasi, rumah sakit, dan sebagainya.
2. Kualitas Daya yang baik, antara lain meliputi:
 - Kapasitas daya yang memenuhi.
 - Tegangan yang selalu konstan dan nominal.
 - Frekuensi yang selalu konstan (untuk sistem AC).

Dengan catatan, tegangan nominal di sini dapat pula diartikan kerugian tegangan yang terjadi pada saluran relatif kecil sekali.

3. Perluasan dan penyebaran daerah beban yang dilayani seimbang khususnya untuk sistem tegangan AC 3 fasa, faktor keseimbangan beban pada masing-masing fasa perlu diperhatikan.
4. Fleksibel dalam pengembangan dan perluasan daerah beban. Perencanaan sistem distribusi yang baik, tidak hanya bertitik tolak pada kebutuhan beban sesaat, tetapi perlu diperhatikan pula secara teliti mengenai pengembangan beban yang harus dilayani, bukan saja dalam hal penambahan kapasitas dayanya, tetapi juga dalam hal perluasan daerah beban yang harus dilayani.
5. Kondisi dan Situasi Lingkungan. Faktor ini merupakan pertimbangan dalam perencanaan untuk menentukan sistem distribusi mana yang sesuai untuk lingkungan bersangkutan, misalnya tentang konduktornya, konfigurasi, tata letaknya, dan sebagainya.
6. Pertimbangan Ekonomis. Faktor ini menyangkut perhitungan untung rugi ditinjau dari segi ekonomis, baik secara komersil maupun dalam rangka penghematan anggaran yang tersedia.

2.4. 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.

2.4.1. Resistansi Saluran²

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 :

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

ρ = Resistivitas Penghantar

L = Panjang Kawat

A = Luas Penampang

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

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

Dimana :

R1 = resistansi penghantar pada suhu t1 (temperatur sebelum operasi konduktor)

R2 = resistansi penghantar pada suhu t2 (temperatur operasi konduktor)

t1 = temperatur awal (°C)

t2 = 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%

² William D. Stevenson, Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi ke – IV, Hal 56

2.4.2. Induktansi Saluran⁵

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

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

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 :

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

Induktansi dihitung dengan konsep *Geometric Means Radius* (GMR). 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. Untuk menghitung nilai luas penghantar menggunakan persamaan :

$$A = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \dots \dots \dots (2.5)$$

2.4.3. 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:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana :

X_L = Reaktansi induktif saluran

L. = Induktansi saluran (H)

f = Frekuensi (Hz)

2.4.4. Impedansi Saluran

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

⁵ Zuhail, Dasar Teknik Listrik dan Elektronika Daya, Hal 152

$$Z_L = \sqrt{R^2 + X_L^2} \cdot \theta \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

Z_L = Impedansi Saluran

R = Resistansi Saluran

X_L = Reaktansi Induktif

2.4.5. Daya Listrik⁸

Daya listrik adalah kemampuan suatu peralatan listrik yang digunakan untuk melakukan usaha akibat adanya perubahan kerja dan perubahan muatan listrik tiap satuan waktu. Besarnya daya listrik yang dilakukan oleh peralatan listrik dipengaruhi oleh keberadaan tegangan listrik, kuat arus listrik, dan hambatan listrik di dalam rangkaian listrik tertutup, serta keadaannya terhadap waktu. Ketiga besaran listrik tersebut menjadi penentu dari besarnya daya listrik yang diperlukan oleh peralatan listrik untuk bekerja secara optimal. Nilai daya listrik umumnya dicantumkan pada label peralatan listrik untuk menunjukkan besarnya energi yang dibutuhkan oleh perangkat listrik untuk dapat bekerja tiap satuan waktu. Ada beberapa jenis daya listrik, antara lain :

1. Daya Semu

Daya semu merupakan keseluruhan kapasitas daya yang belum terpakai. Kapasitas daya ini disediakan PLN dengan satuan VA (Volt Ampere). Pada persamaan segitiga daya bisa dilihat bahwa daya semu tidak terdapat $\cos \phi$.

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)

⁸ PT. PLN Persero Pusat Pendidikan dan Pelatihan, Teori Dasar Listrik Hal 13

2. Daya Aktif

Daya aktif adalah suatu daya yang sesungguhnya terpakai untuk melakukan kerja terhadap beban atau merupakan daya yang sesungguhnya dibutuhkan beban. Daya ini digunakan untuk mengubah suatu energi listrik menjadi bentuk energi lain. Satuan dari daya aktif adalah Watt dan daya aktif ini bisa terjadi pada beban induktif maupun beban resisti

Untuk 1 phasa :

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

Untuk 3 phasa :

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

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 adalah sebuah daya yang terserap untuk pembentukan medan magnet. Daya ini ditimbulkan oleh beban induktif seperti transformator, motor, dan lain lain. Beban induktif disebabkan oleh lilitan kawat atau kumparan yang digunakan untuk membangkitkan medan magnet agar peralatan listrik dapat bekerja dengan baik. Satuan dari Daya Reaktif ini adalah VAR (Volt Ampere Reaktif).

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

2.5. Rugi Daya Saluran Distribusi

Segitiga daya menurut teori listrik adalah arus bolak-balik dengan penjumlahan daya yang dilakukan secara vektoris, bentuk dari vektornya merupakan segitiga siku-siku. Sudut pada segitiga daya merupakan sudut pergeseran fasa, semakin besar sudut yang terbentuk maka nilai faktor daya ($\cos \phi$) semakin kecil, dengan terbentuknya sudut yang besar maka semakin besar nilai daya semu (S), dan daya reaktif (Q).

Adanya hubungan antara tegangan dan daya reaktif menyebabkan perubahan tegangan. Jatuh tegangan dalam penghantar sebanding dengan daya reaktif yang mengalir dalam penghantar tersebut. Berdasarkan SPLN No. 72 Tahun 1987 batas toleransi rugi daya yang terjadi adalah $\pm 5\%$. Besarnya rugi daya pada saluran 3 fasa dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \cdot LLF \cdot LDF \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

Ploss = Rugi daya pada saluran (MW)

PR = Besar daya yang diterima (MW)

Ps = Besar daya yang disalurkan (MW)

R = Tahanan jaringan (Q/Km)

L = Panjang jaringan (Km)

I = Besar kuat arus pada beban (A)

LDF = Load Density Factor (0,333)

LLF = Loss Load Factor

LLF merupakan koefisien yang diperhitungkan dalam menghitung susut sebagai perbandingan antara rugi-rugi daya rata-rata terhadap rugi daya beban puncak.

$$LLF = 0,3 LF + 0,7 (LF)^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

LF = Load Factor sistem region

2.6. Efisiensi Penyaluran

Efisiensi penyaluran adalah perbandingan antara daya nyata yang diterima dengan daya nyata yang disalurkan atau dengan kata lain perhitungan efisiensi ini

berguna untuk mengetahui seberapa persenkah energi listrik tersebut diterima setelah didalam penyalurannya terdapat rugi- rugi.

$$\eta = P_s / P_r \times 100 \% \dots\dots\dots (2.16)^3$$

Dimana :

P_r = Daya yang diterima

P_s = Daya yang disalurkan

2.7. Jatuh Tegangan Listrik⁷

Panjang sebuah jaringan tegangan menengah (JTM) dapat didesain dengan mempertimbangkan drop tegangan (*drop voltage*). Jatuh 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 distribusi adalah selisih antara tegangan pada sisi kirim (*sending end*) dan tegangan pada sisi terima (*receiving end*).

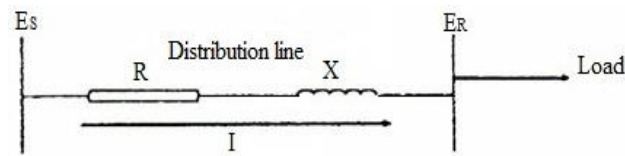
Dengan semakin besar pula perbedaan nilai tegangan yang ada pada sisi kirim dengan yang ada pada sisi terima, Apabila perbedaan nilai tegangan tersebut melebihi standar yang ditentukan, maka mutu penyaluran tersebut rendah. Di dalam saluran transmisi persoalan tegangan sangat penting, baik dalam keadaan operasi maupun dalam perencanaan sehingga harus selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik saluran. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan. Berdasarkan dari SPLN T6.001 Tahun 2013, dimana jatuh tegangan yang terjadi tidak boleh lebih besar dari $\pm 10 \%$ dari tegangan nominal sistem. 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 faktor daya ($\cos \phi$) beban diketahui maka dapat

⁷ Kriteria Desain Engineering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik. Edisi 1. Jakarta : PT PLN (Persero). 2010, Bab 2 Hal 1

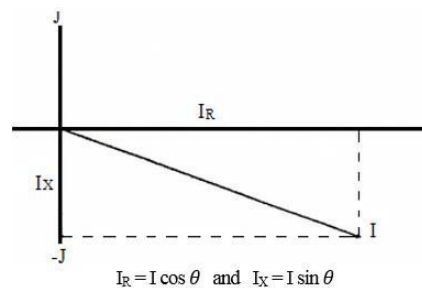
³ *Ibid*, Hal 128

langsung dihitung drop voltage - nya. Pada Gambar 2.15 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 2.9 Drop Voltage pada Saluran Distribusi.

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



Gambar 2.10 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:

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times l \times (R \cos \phi + X \sin \phi) \dots \dots \dots (2.17)$$

Besar presentasi drop tegangan pada saluran transmisi dapat dihitung dengan :

$$\% \Delta V = \Delta V / V \times 100\% \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana :

ΔV = Drop tegangan (Volt)

R = Resistansi saluran (Ω)

X = Reaktansi saluran (Ω)

I = Arus beban (A)

l = Panjang hantaran tegangan menengah (km)

Berdasarkan dari SPLN T6.001 Tahun 2013, dimana jatuh tegangan yang terjadi tidak boleh lebih besar dari $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem. 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.

2.8. ETAP 19.01⁶

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.

Pada studi kali ini akan digunakan fitur *load flow* untuk mengetahui tegangan ujung dari system distribusi yang disimulasikan. 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

⁶ Anton Firmansyah. Modul Pelatihan ETAP, (Palembang: Tidak Diterbitkan,2019). Hal 1

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 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.

2.8.1. Load Flow Analysis

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.

Aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik secara garis besar adalah suatu peristiwa daya yang mengalir berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari suatu sistem pembangkit (sisi pengirim) melalui suatu saluran atau jaringan transmisi hingga sampai ke sisi beban (sisi penerima). Pada kondisi ideal, maka daya yang diberikan oleh sisi pengirim akan sama dengan daya yang diterima beban. Namun pada kondisi real, daya yang dikirim sisi pengirim tidak akan sama dengan yang diterima beban. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa hal:

1. Impedansi di saluran transmisi.

Impedansi di saluran transmisi dapat terjadi karena berbagai hal dan sudah mencakup resultan antara hambatan resistif, induktif dan kapasitif. Hal ini yang menyebabkan rugi-rugi daya karena terkonversi atau terbuang menjadi energi lain dalam transfer energi.

2. Tipe beban yang tersambung jalur

Ada 3 tipe beban, yaitu resistif, induktif, dan kapasitif. Resultan antara besaran hambatan kapasitif dan induktif akan mempengaruhi P.F. sehingga mempengaruhi perbandingan antara besarnya daya yang ditransfer dengan yang diterima.

