

BAB II

SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK DAN KEANDALAN

2.1 Distribusi Tenaga Listrik

Tiga komponen utama sistem tenaga listrik adalah jaringan distribusi, transmisi, dan pembangkitan. Keluaran listrik dari generator disalurkan melalui sistem transmisi Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET), dengan kapasitas berkisar antara 150 kV hingga 500 kV. Kemudian, tegangan tersebut akan diturunkan kapasitasnya menjadi 20 kV menggunakan transformator step-down, dan jalur ini umumnya dikenal sebagai saluran jaringan distribusi tegangan menengah. Tenaga listrik kemudian diturunkan kembali menjadi tegangan 400/220 V, yang sering disebut sebagai tegangan rendah, dan dapat disalurkan langsung kepada konsumen (Sarimun, 2019).

2.1.1 Transmisi Tenaga Listrik

Proses pemindahan tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik (Power Plant) ke saluran distribusi Gardu Induk (Substation Distribution) sehingga dapat digunakan oleh pelanggan listrik disebut dengan transmisi tenaga listrik. Beberapa tegangan yang digunakan pada jaringan transmisi adalah sebagai berikut :

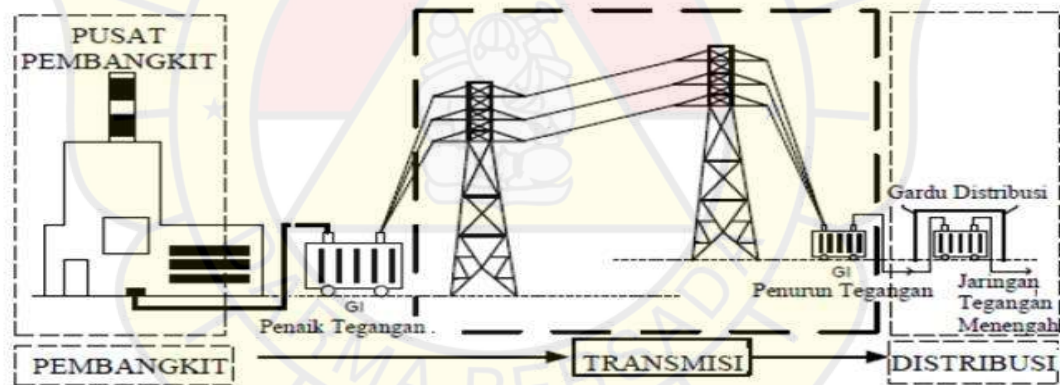
1. Tegangan transmisi: 220 kV, 400 kV, 500 kV, 750 kV, 765 kV, dan 800 kV. Di Indonesia, umumnya digunakan tegangan transmisi 150 kV dan 500 kV.
2. Tegangan sub-transmisi: 33 kV, 66 kV, 110 kV, dan 132 kV.

2.1.2 Sistem Distribusi

Sistem Distribusi merupakan bagian integral dari sistem tenaga listrik yang bertugas mengalirkan suplai listrik dari pembangkit ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan dari unit pembangkit umumnya memiliki tegangan antara 11 kV hingga 24 kV.

Gardu induk tegangan tinggi kemudian menggunakan transformator penaik tegangan (step-up) untuk meningkatkan tegangan hingga 500 kV sebelum disalurkan melalui saluran transmisi. Peningkatan tegangan hingga 500 kV bertujuan untuk mengurangi kerugian daya pada saluran transmisi.

Dalam hal ini, kehilangan daya sebanding dengan kuadrat arus yang diberikan. Kenaikan tegangan menyebabkan arus mengalir lebih lambat sehingga menurunkan rugi-rugi daya yang terjadi selama transmisi energi listrik.



[Gambar](#) 2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sumber : Syafar, 2019

Gambar 2.1 menjelaskan bahwa sistem distribusi tenaga listrik dimulai dari pusat pembangkit sebagai komponen inti, diikuti oleh saluran transmisi yang berfungsi sebagai penyalur bertegangan tinggi dari pembangkit. Selanjutnya, terdapat saluran distribusi primer dan sekunder yang terletak pada sisi primer transformator dari gardu induk dan sisi sekunder dari transformator distribusi. Sistem distribusi ini berakhir pada bagian utilisasi, yaitu instalasi pelanggan, dengan tegangan akhir 220/400 V.

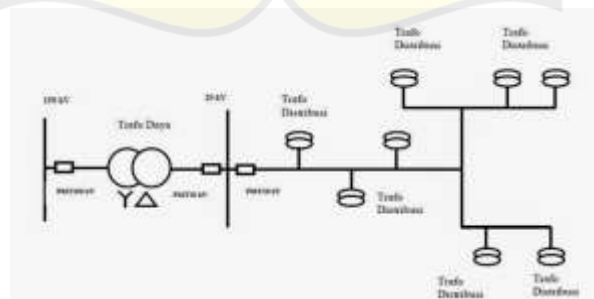
Dengan demikian, urutan ini mencakup perjalanan listrik dari pembangkit hingga ke instalasi pelanggan. Adapun menurut (Syufrijal & Monantun, 2014) Sistem penyaluran energi listrik merupakan subsistem dari sistem penyaluran energi listrik ke konsumen. Untuk menyediakan tenaga listrik kepada konsumen, sistem penyaluran tenaga listrik harus dilaksanakan dengan memperhatikan faktor ekonomi dan sosial.

2.2 Konfigurasi Jaringan Distribusi

Konfigurasi jaringan distribusi mencakup berbagai pola penyaluran energi listrik. Jenis-jenis konfigurasi jaringan distribusi melibatkan pola penyaluran berbeda, antara lain jaringan distribusi radial, loop, dan spindel.

2.2.1 Jaringan Distribusi Radial

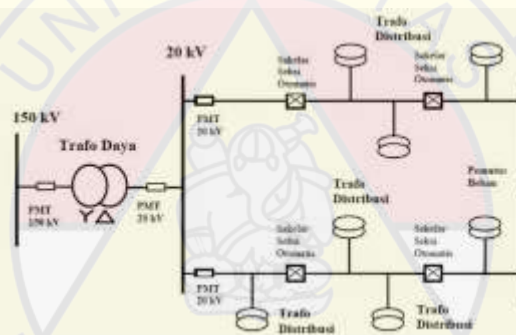
Jaringan distribusi radial merupakan jenis jaringan distribusi yang paling sederhana, dengan konfigurasi yang hanya bercabang secara radial dari sumber ke titik beban. Kelebihan dari jaringan distribusi ini terletak pada biaya investasi yang relatif rendah. Namun, kelemahan utamanya terletak pada ketidakmampuan untuk mendapatkan suplai energi listrik dari sumber tegangan lain ketika sumber utama tidak tersedia, yang dapat menyebabkan pemadaman (trip). Oleh karena itu, tidak ada backup dari sumber tegangan lainnya. Konfigurasi jaringan distribusi radial dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Jaringan Distribusi Radial
Sumber: Suhadi, 2008

2.2.2 Jaringan Distribusi *Loop/Ring*

Jaringan distribusi loop/ring merupakan konfigurasi jaringan distribusi di mana saluran-saluran terhubung membentuk lingkaran atau cincin. Dalam tipe jaringan ini, terdapat dua atau lebih penyulang sumber energi listrik. Jenis jaringan distribusi ini dianggap lebih unggul dibandingkan dengan jenis lainnya. Kelebihan utamanya terletak pada ketidakmampuan dari gangguan pada salah satu penyulang untuk menyebabkan pemadaman (trip), karena terdapat dua atau lebih saluran utama yang terhubung dari sumber pembangkitan. Hal ini memungkinkan beban tetap dapat dilayani dengan baik. Konfigurasi jaringan distribusi loop/ring dapat dilihat pada Gambar 2.3.



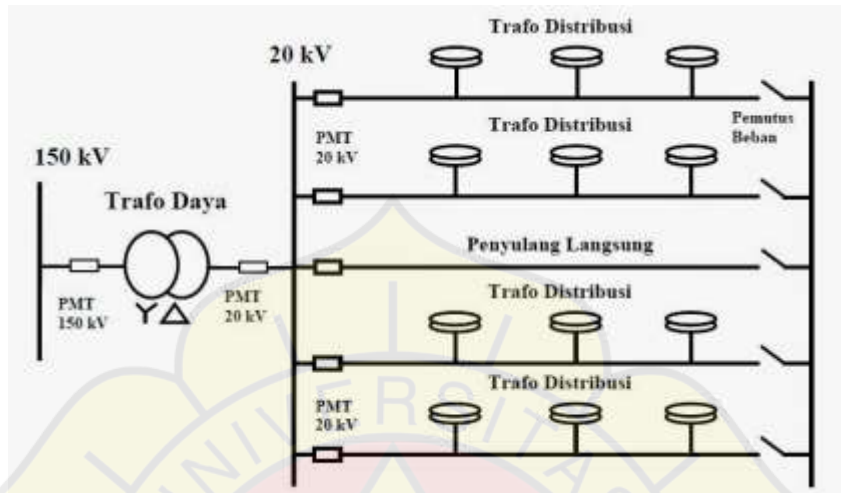
Gambar 2.3 Jaringan Distribusi Loop/Ring
Sumber : Suhadi, 2008

2.2.3 Jaringan Distribusi Spindel

Jaringan distribusi spindel merupakan suatu konsep di mana terdapat satu penyulang cadangan. Dalam tipe jaringan ini, terdapat dua penyulang, yaitu penyulang yang aktif atau beroperasi dan penyulang cadangan.

Prinsip kerja jaringan ini adalah ketika penyulang yang aktif mengalami gangguan, penyulang cadangan dapat diaktifkan untuk menggantikan penyulang yang bermasalah.

Setiap ujung penyulang terhubung ke gardu hubung atau gardu distribusi dalam konsep ini, jaringan ini biasa digunakan pada saluran kabel bawah tanah. Berikut merupakan skema jaringan tipe spindel pada gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Jaringan Distribusi Spindel
Sumber : Suhadi, 2008

2.3 Klasifikasi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Menurut Suswanto (2009), klasifikasi jaringan distribusi tenaga listrik dapat dibagi berdasarkan beberapa parameter, termasuk ukuran tegangan, ukuran arus listrik, dan sistem penyaluran. Penjelasan lebih lanjut dapat ditemukan di bawah ini.

2.3.1 Jaringan Distribusi Tegangan Menengah

Jaringan ini menghubungkan gardu induk atau gardu induk ke gardu distribusi melalui trafo daya dengan menggunakan Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) atau Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Standar tegangan untuk jaringan distribusi primer ini umumnya adalah 6 kV, 10 kV, dan 20 kV, sesuai dengan standar PLN.

2.3.2 Jaringan Distribusi Tegangan Rendah

Jaringan ini menggunakan saluran kabel tegangan rendah, yang umumnya berupa Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR) atau Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR), yang terhubung dari gardu distribusi ke pemakai atau konsumen. Standar tegangan untuk jaringan distribusi sekunder ini bervariasi, dengan nilai umum seperti 127/220 V untuk sistem lama, 220/380 V untuk sistem baru, dan 440/550 V untuk keperluan industri.

2.3.3 Jaringan Distribusi Arus Bolak – Balik (AC)

Jaringan ini menggunakan sistem kabel tiga fasa untuk menyalurkan energi listrik bertegangan menengah 20 kV dari gardu induk atau gardu induk ke konsumen pengguna. Pada sektor industri, sistem kabel tiga fasa dengan tegangan 400 V sering digunakan untuk menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi ke pelanggan konsumen. Sebaliknya, distribusi energi listrik ke konsumen perumahan dilakukan melalui sistem kabel satu fasa 220 V.

Kelebihan dari jaringan distribusi ini termasuk kemampuan untuk mengubah tegangan ke tingkat yang lebih tinggi atau lebih rendah, mampu menyalurkan tiga sampai empat jenis tegangan dalam satu jurusan menggunakan sistem tiga fasa, serta memberikan kemudahan dalam mengatasi kesulitan. Namun, terdapat beberapa kelemahan, antara lain kebutuhan akan tingkat isolasi yang tinggi, perlunya stabilitas tegangan karena sifat beban yang dapat berubah-ubah, dan potensi terjadinya arus pemuatan (charging current).

2.3.4 Jaringan Distribusi Arus Searah (DC)

Penggunaan jaringan distribusi ini melibatkan proses penyearahan arus AC menjadi arus DC menggunakan alat penyearah converter, dan untuk mengubah kembali arus DC menjadi arus AC digunakan alat inverter. Oleh karena itu, jaringan distribusi ini jarang digunakan oleh masyarakat umum.

Meskipun sebagian digunakan untuk keperluan tertentu, jaringan distribusi DC memiliki kelebihan, seperti penggunaan daya yang lebih tinggi karena faktor dayanya = 1, lebih ekonomis untuk jarak penyaluran, dan isolasinya yang lebih sederhana. Namun, kelemahan sistem distribusi ini terutama terjadi saat beban meningkat dan jarak penyalurannya semakin panjang, yang dapat mengakibatkan penurunan tegangan (drop voltage).

2.3.4 Penyaluran Udara

Saluran udara merupakan metode penyaluran tenaga listrik yang menggunakan kawat penghantar yang ditopang oleh tiang listrik. Saluran ini memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya meliputi fleksibilitas yang lebih baik untuk perluasan beban, pemasangan yang lebih mudah, dan kemampuan mendeteksi gangguan hubung singkat dengan mudah. Namun, saluran udara juga memiliki kelemahan, seperti rentan terhadap pengaruh cuaca buruk, kesulitan dalam pemasangan di wilayah dengan bangunan tinggi, serta masalah seperti efek kulit, induktansi, dan kapasitansi yang dapat menyebabkan penurunan tegangan yang lebih tinggi. Selain itu, biaya pemeliharaan juga cenderung lebih tinggi.

2.3.5 Penyaluran Bawah Tanah

Saluran ini merupakan sistem yang menggunakan kabel bawah tanah untuk mengalirkan listrik. Keunggulan saluran ini adalah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, tidak menghalangi pandangan sekitar, dan penurunan tegangan yang lebih rendah karena dapat mengabaikan masalah induktansi. Kerugian dari jalur ini adalah dibandingkan dengan jalur udara, memerlukan pengeluaran investasi yang relatif tinggi. Selain itu, mungkin sulit untuk mengidentifikasi sumber korsleting.

2.4 Kegagalan Operasi Sistem Distribusi

Kegagalan dalam suatu sistem tenaga listrik merujuk pada ketidaknormalan yang menghasilkan aliran atau bisa diartikan sebagai suatu kekurangan yang mengganggu aliran normal arus ke beban. Menurut Jane Radatz (2012), Kegagalan dicirikan sebagai keadaan fisik yang disebabkan oleh ketidakmampuan peralatan, bagian, atau elemen untuk bekerja sebagaimana mestinya.

Pada kenyataannya, sistem tenaga listrik sering kali mengalami berbagai gangguan yang dapat menyebabkan penyediaan energi listrik tidak dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Meskipun gangguan ini tidak diinginkan, mereka merupakan kenyataan yang tidak dapat dihindari.

Beberapa faktor yang mempengaruhi kegagalan dalam sistem distribusi listrik, seperti yang dikemukakan oleh Yunus & Gunawan (2021), dapat dirangkum sebagai berikut.

1. Pemadaman, terjadi ketika pelayanan kepada satu atau lebih konsumen terhenti akibat gangguan pada salah satu atau lebih komponen sistem distribusi.
2. *Outage*, Merupakan kondisi dimana suatu komponen tidak dapat berfungsi dengan baik karena beberapa peristiwa yang terkait dengan komponen tersebut. *Outage* ini tergantung pada konfigurasi sistem yang digunakan.
3. *Outage Duration*, merupakan periode waktu mulai dari komponen mengalami *outage* hingga dapat beroperasi kembali sesuai dengan fungsinya.
4. *Interruption Duration*, Merupakan waktu dari awal pemadaman hingga kembali menyala.
5. Gangguan internal, malfungsi sistem seperti korsleting, kerusakan utilitas, kegagalan isolasi, dan kerusakan pada sistem produksi. Gangguan Eksternal, Kegagalan yang terjadi akibat faktor alam atau di luar sistem, seperti petir, badai, pohon tumbang, dan sebagainya, yang menyebabkan padamnya aliran listrik pada saluran kabel.

6. Gangguan faktor manusia/*Human Error*, Gangguan yang disebabkan oleh kelalaian manusia, kurang teliti, atau tidak mengikuti standar prosedur yang telah ditetapkan.

2.5 Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem distribusi merujuk pada ketersediaan atau tingkat pelayanan penyediaan energi listrik dari sistem ke konsumen. Parameter keandalan dapat diukur melalui seberapa sering sistem mengalami pemadaman, berapa lama waktu yang terjadi selama pemadaman, dan seberapa cepat pemulihan yang dibutuhkan saat pemadaman terjadi (Rahmat et al., 2013). Berikut ini adalah tingkat keandalan layanan yang dibagi menjadi tiga kategori, yaitu:

1. *High Reliability System*, adalah sistem yang dapat diandalkan. Sistem ini akan memiliki kapasitas untuk menyuplai daya pada beban puncak dengan tegangan berbeda dalam kondisi rata-rata.
Pada saat terjadinya keadaan darurat ketika gangguan pada jaringan oleh karena itu sistem ini membutuhkan peralatan dan proteksi yang lebih untuk menghindari berbagai macam gangguan yang disebabkan oleh sistem tersebut.
2. *Medium Reliability System*, keandalan sistem menengah. Dalam beberapa kasus, sistem akan mendistribusikan listrik yang cukup dengan variasi voltase yang baik pada kebutuhan puncak. Jika terjadi pemadaman jaringan, sistem masih dapat mengelola sebagian beban, bahkan dalam skenario dengan permintaan maksimum. Oleh karena itu, dalam sistem ini dibutuhkan banyak sumber daya untuk memahami dan mengurangi gangguan-gangguan yang dimaksud.

3. *Low Reliability System*, keandalan sistem rendah. Dalam keadaan ini, sistem akan memiliki kapasitas untuk menyalurkan tegangan yang bervariasi dan stabil pada kebutuhan puncak. Sistem ini memiliki peralatan pelindung yang sangat minim karena tidak dapat menangani beban sama sekali jika terjadi gangguan sehingga memerlukan perbaikan terlebih dahulu.

2.6 Indeks Keandalan Dasar

Pada indeks keandalan dasar memiliki tiga parameter yang umumnya untuk penilaian suatu sistem distribusi radial, yaitu laju kegagalan (λ), waktu pemadaman rata-rata (μ), dan waktu pemadaman tahunan (U).

2.6.1 Angka kegagalan/Gangguan (*Failure Rate*)

Angka kegagalan atau laju kegagalan (λ) merupakan frekuensi di mana suatu sistem mengalami kegagalan. Laju kegagalan, dilambangkan dengan simbol λ (lambda), umumnya tergantung pada interval waktu tertentu selama sistem beroperasi. Dengan kata lain, angka kegagalan menyatakan seberapa sering kegagalan terjadi per satuan waktu, seperti kegagalan per jam atau per 100 jam, dan sebagainya (Short, 2004). Laju kegagalan dapat dirumuskan dalam persamaan 2.1 :

$$\lambda = \frac{f}{T} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

λ = angka kegagalan/gangguan konstan

f = jumlah gangguan

T = Waktu Pengamatan (bulan)

2.6.2 Waktu Perbaikan Rata – rata

Lamanya waktu yang diperlukan agar perangkat yang rusak dapat berfungsi kembali setelah diganti atau diperbaiki disebut durasi perbaikan. Tingkat perbaikan adalah rata-rata durasi perbaikan yang dinyatakan dalam jam. (Short, 2004). Dalam perhitungannya, durasi perbaikan rata-rata dapat dirumuskan dalam persamaan 2.2 :

$$\mu = \frac{\text{Lama Gangguan (Jam)}}{\text{Jumlah Gangguan}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

μ = durasi perbaikan

2.6.3 Waktu Pemadaman Rata – Rata

Rumus untuk menghitung durasi pemadaman rata-rata adalah dengan mengalikan angka kegagalan atau gangguan dengan durasi perbaikan rata-rata. Dalam perhitungannya, durasi pemadaman rata-rata dapat dirumuskan dengan persamaan 2.3:

$$U = \lambda \times \mu \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

λ = Angka Kegagalan/Gangguan

μ = Waktu Perbaikan Rata – Rata

2.7 Indeks Keandalan Sistem

1. SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*)

SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) adalah Durasi rata-rata gangguan yang dialami setiap pelanggan selama durasi tertentu. SAIDI dapat dirumuskan dalam persamaan 2.3 :

$$SAIDI = \frac{\Sigma(U_i \times N_i)}{\Sigma N} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

U_i = Durasi pemadaman per-hari (jam)

N_i = Jumlah Pelanggan padam

N = Total jumlah Pelanggan dalam satu periode (tahun)

2. SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*)

Jumlah rata-rata gangguan per klien selama periode waktu tertentu, seringkali satu tahun, diukur dengan Indeks Frekuensi Interupsi Rata-Rata Sistem, atau SAIFI. Jumlah total pemadaman selama jangka waktu tersebut dibagi dengan jumlah total pengguna yang dilayani sistem untuk menentukan SAIFI. Rumus untuk menghitung SAIFI dapat ditemukan dalam persamaan 2.4. (Short 2004)

$$SAIFI = \frac{\Sigma(\lambda_i \times N_i)}{\Sigma N} \dots\dots\dots(2.4)$$

Ket :

λ_i = Jumlah gangguan (kali/Bulan)

N_i = Jumlah Pelanggan padam

N = Total jumlah Pelanggan dalam satu periode