

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Jatuh Tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh Tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya Jatuh Tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan Jatuh Tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitasnya diperhitungkan karena nilanya cukup berarti.

Jatuh Tegangan juga didefinisikan sebagai selisih antara tegangan ujung pengirim dan tegangan ujung penerima pada suatu jaringan. Jatuh Tegangan disebabkan oleh hambatan dan arus. Pada Saluran bolak-balik besarnya tergantung dari impedansi dan admintasi saluran serta pada beban dan faktor daya.

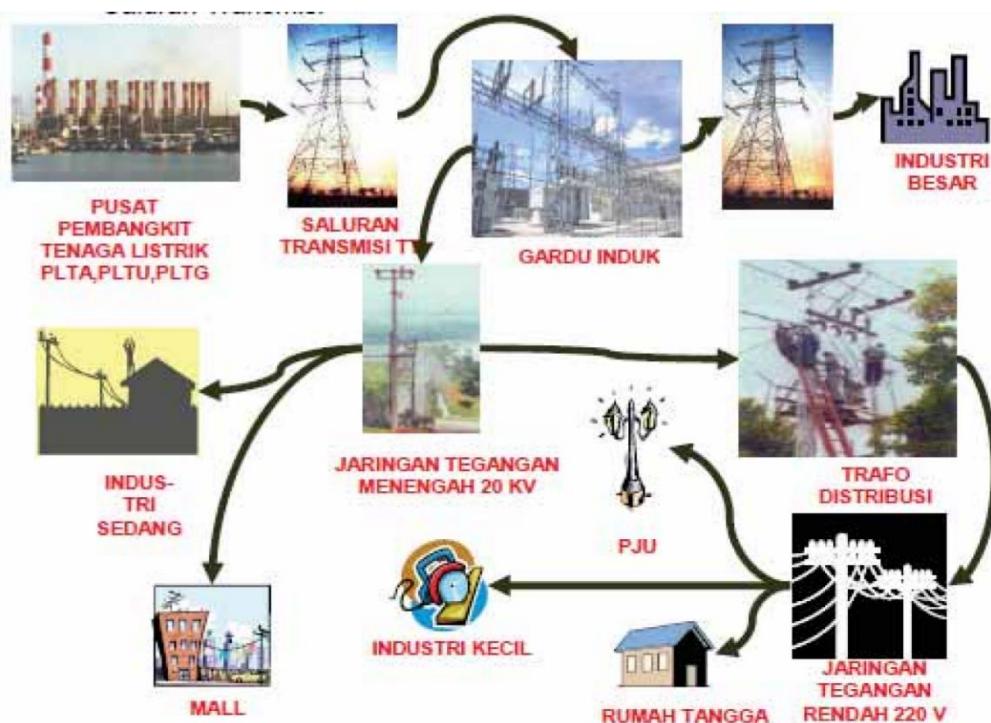
Studi Rekonfigurasi Jaringan pada penyulang Kelam di Gardu Induk Paya Geli. Penelitian ini menggunakan hasil simulasi aplikasi *Software*, dari hasil penelitiannya didapatkan bahwa tegangan pada jaringan meningkat dikarenakan hasil studi rekonfigurasi jaringan tersebut sehingga besarnya jatuh memenuhi SPLN No : 1 Tahun 1995 sebesar (+5% ; -10%) mengenai variasi tegangan.

Perlunya perhatian lebih akan masalah kualitas daya dan yang salah satunya mengenai Jatuh Tegangan (drop voltage) merupakan besar tegangan yang hilang di sepanjang konduktor. Hilangnya tegangan ini dapat disebabkan panjang saluran dan besarnya impedansi sepanjang saluran.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

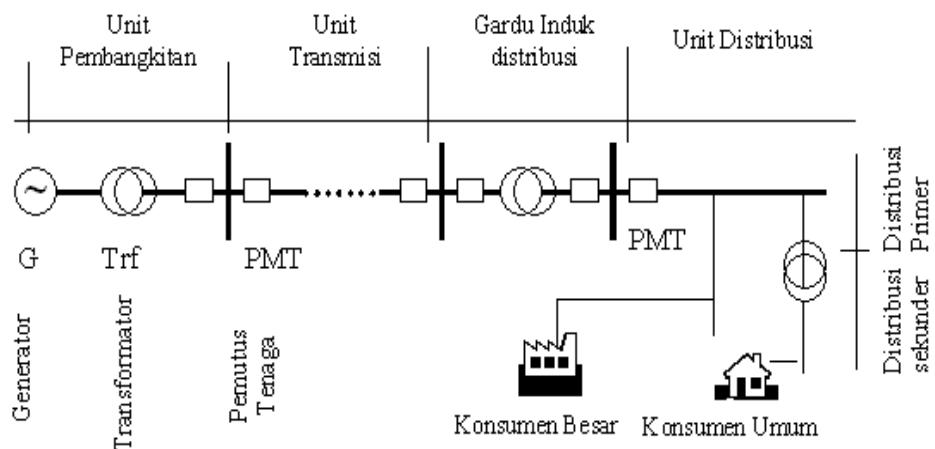
Sistem tenaga listrik dikatakan sebagai kumpulan/gabungan yang terdiri dari komponen-komponen atau ala-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban yang saling berhubungan dan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu sistem.



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

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 pelanggan tenaga listrik tersebar di segala penjuru tempat, dengan demikian maka penyampaian tenaga listrik dari tempat dibangkitkannya yang disebut pusat tenaga listrik sampai ke tempat pelanggan memerlukan

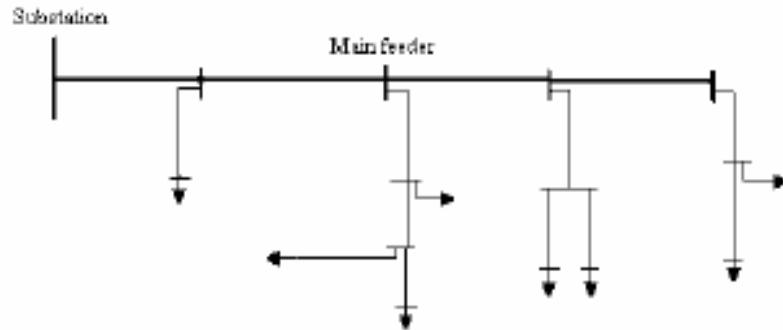
berbagai penanganan teknis. Dengan menggunakan Blok diagram sistem tenaga listrik dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.2 Blok Diagram Sistem Tenaga Listrik

2.2.2 Sistem Jaringan Distribusi Tenaga listrik

Jaringan transmisi dan jaringan distribusi pada sistem tenaga listrik berfungsi sebagai sarana untuk menyalurkan energi listrik yang dihasilkan dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Sistem jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi dua yaitu sistem jaringan distribusi primer dan sistem jaringan distribusi sekunder. Kedua sistem tersebut dibedakan berdasarkan tegangan kerjanya. Di Indonesia, pada instalasi PLN tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi primer adalah 20 kV, sedangkan tegangan kerja pada sistem jaringan distribusi sekunder adalah 220/380 V.



Gambar 2.3 Tripikal Jaringan Distribusi

2.2.2.1 Sistem 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 enam jenis jaringan yaitu system radial dan system tertutup (loop), ring, network spindle dan cluster.

2.2.2.2 Sistem 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 disebut sebagai jaringan tegangan rendah.

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial. Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut system tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/pemakai tenaga listrik dengan melalui peralatan-peralatan sebagai berikut: Papan pembagi pada trafo distribusi, Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder). Saluran Layanan Pelanggan (SLP)

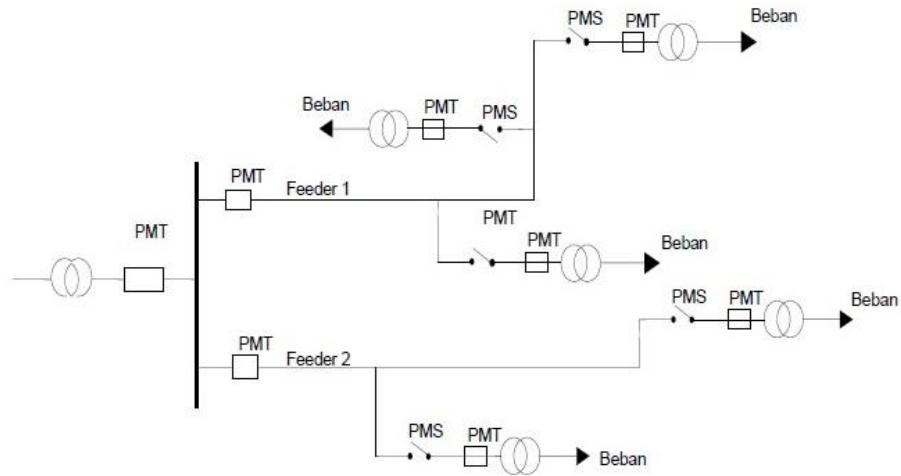
(ke konsumen/pemakai), Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan. Untuk distribusi sekunder terdapat bermacam-macam sistem tegangan distribusi sekunder menurut standar; (1) EEI: *Edison Electric Institut*, (2) NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*). Pada dasarnya tidak berbeda dengan system distribusi DC, factor utama yang perlu diperhatikan adalah besar tegangan yang diterima pada titik beban mendekati nilai nominal, sehingga peralatan/beban dapat dioperasikan secara optimal.

2.2.3 Konfigurasi Jaringan Tegangan Menengah

Ada beberapa jenis konfigurasi sistem distribusi dan setiap jenisnya mempunyai tingkat keandalan operasi yang berbeda. Berikut ini dijelaskan mengenai jenis konfigurasi sistem distribusi.

2.2.3.1 Sistem Jaringan Distribusi Radial

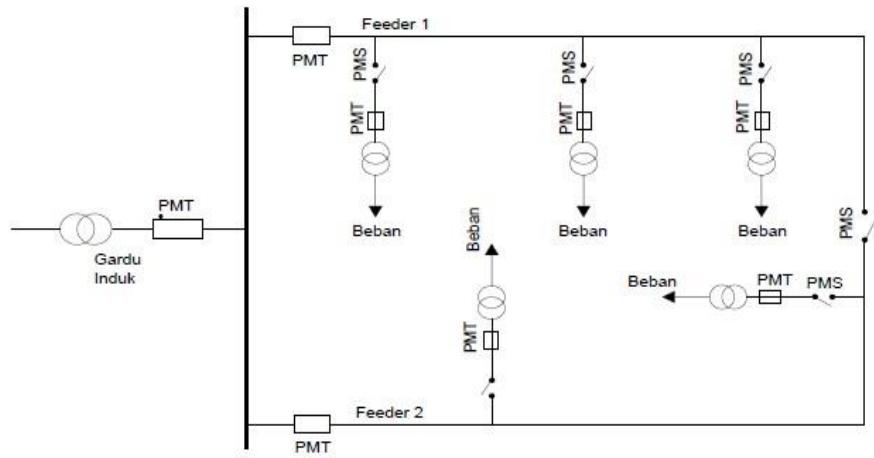
Gambar 2.4 menunjukkan jaringan distribusi tegangan menengah berupa konfigurasi radial. Konfigurasi radial merupakan interkoneksi antara gardu distribusi, dimana beberapa gardu distribusi yang terhubung seri suplai oleh sebuah busbar GI (Gardu Induk). Konfigurasi ini terdiri dari beberapa penyulang yang keluar dari GI dan sumber tegangannya hanya satu arah saja. Dalam penyulang tersebut terdapat gardu-gardu distribusi yang dilengkapi oleh trafo penurun tegangan menjadi tegangan rendah. Konfigurasi ini merupakan jenis konfigurasi yang paling sederhana dan mudah dalam pengoperasiannya. Tetapi konfigurasi ini memiliki kelemahan, sebab suplai pada gardu distribusi hanya diperoleh dari satu arah saja. Sehingga jika suplai dari GI mengalami gangguan, maka seluruh penyulang yang disuplai oleh GI tersebut akan mengalami padam.



Gambar 2.4 Jaringan Distribusi Radial

2.2.3.2 Jaringan Distribusi Konfigurasi Rangkaian Tertutup (Loop)

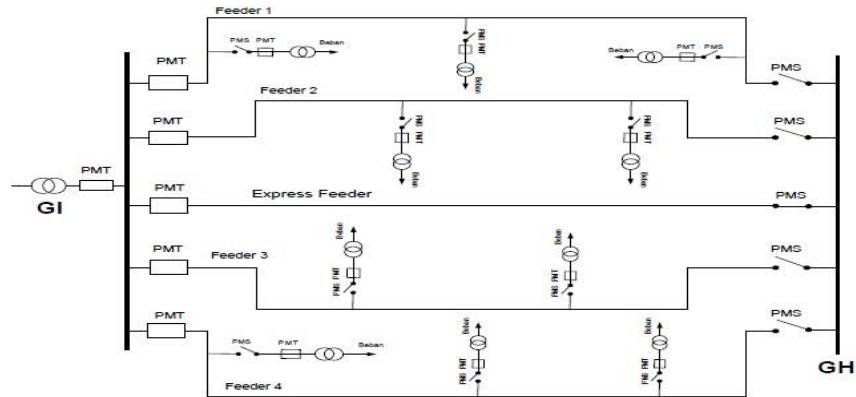
Konfigurasi Loop merupakan interkoneksi antar gardu distribusi yang membentuk suatu lingkaran tertutup (loop). Pada konfigurasi ini biasa terdapat lebih dari satu busbar GI, dan masing-masing penyulangnya membentuk suatu rangkaian tertutup dengan GI. Keuntungan dari konfigurasi loop ini adalah pasokan daya listrik dari GI lebih terjamin. Sebab jika salah satu GI mengalami gangguan maka penyulang akan tetap mendapatkan pasokan dari GI yang lain yang tidak mengalami gangguan. Dan GI yang mengalami gangguan dapat diperbaiki tanpa takut akan mengganggu suplai daya ke gardu distribusi. Gambar 2.5 adalah konfigurasi tipe loop.



Gambar 2.5 Jaringan Distribusi Konfigurasi loop

2.2.3.3 Jaringan Distribusi Spindel

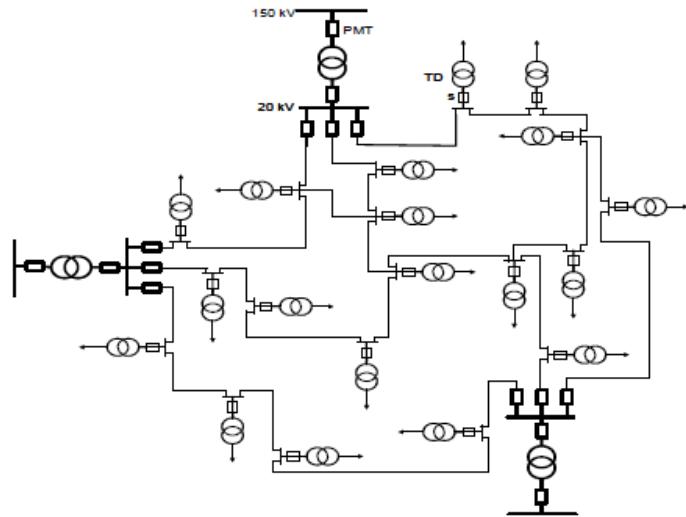
Konfigurasi spindel merupakan hubungan seri antara gardu distribusi yang kedua ujungnya dihubungkan oleh busbar GI (Gardu Induk) dan GH (Gardu Hubung). Yang menjadi ciri khas dari jaringan ini adalah adanya sebuah penyulang ekspres. Penyulang ekspres ini berfungsi sebagai penyulang cadangan yang akan menyuplai daya kebeban saat salah satu penyulang mengalami gangguan. Pada jaringan spindel ini terdapat beberapa penyulang yang disuplai oleh GI (Gardu Induk) dan berakhir pada suatu GH (Gardu hubung). Gambar 2.6 adalah jaringan distribusi konfigurasi spindel.



Gambar 2.6 Jaringan Distribusi Konfigurasi Spindel

2.2.3.4 Jaringan Distribusi Anyaman (Mesh/Grid)

Jaringan Distribusi Mesh/Grid ini merupakan kombinasi antara radial dan loop yang rangkaianya paling komplek. Pemasangan Jaringan Mesh/Grid yang rumit dan operasinya lebih mahal dan dimana kualitas pelayanan penyaluran energi listrik sangat diutamakan. Jaringan Distribusi Mesh/Grid umumnya dipakai pada jaringan tegangan rendah yang kepadatan bebannya cukup tinggi biasanya dipakai di daerah perkotaan. Jaringan Distribusi Mesh/Grid ini dapat disuplai dari dua sumber atau lebih, sehingga tingkat keandalanya terjamin. Apabila terjadi gangguan pada jaringan ini maka dapat diatasi dengan mengambil tegangan dari beberapa sumber yang masih beroperasi diatas dengan cara mengambil tegangan dari beberapa sumber tersedia.



Gambar 2.7 Jaringan Distribusi Konfigurasi Mesh/Grid

2.2.4 Jatuh Tegangan Pada Sistem Distribusi

Jatuh Tegangan secara umum adalah lebih rendahnya tegangan yang diterima pada beban dari nilai nominalnya. Jatuh Tegangan ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Jatuh Tegangan pada penghantar semakin besar jika arus di dalam penghantar semakin besar dan tahanan penghantar semakin besar pula.

Jatuh Tegangan merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada dibawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Atas dasar hal tersebut maka jatuh tegangan yang diijinkan untuk JTM 20kV sistem operasi radial yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya.

Sesuai dengan standar tegangan yang ditentukan oleh PLN (SPLN 1 : 1995), perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima 5%. Tegangan jatuh pada jaringan disebabkan adanya rugi tegangan akibat hambatan listrik (R) dan reaktansi (X). Jatuh tegangan phasor V_d pada suatu penghantar yang mempunyai impedansi (Z) dan membawa arus (I) dapat dijabarkan dengan rumus :

$$V_d = I \cdot Z \quad (2.1)$$

Dimana :

V_d = Jatuh tegangan (Volt)

I = Arus Beban (Ampere)

Z = Impedansi Saluran (Ohm)

Dalam pembahasan ini yang dimaksudkan dengan jatuh tegangan (ΔV) adalah selisih antara tegangan kirim (V_k) dengan tegangan terima (V_t), maka jatuh tegangan dapat didefinisikan adalah :

$$\Delta V = |V_k| - |V_t| \quad (2.2)$$

Dimana :

ΔV = Jatuh tegangan (Volt)

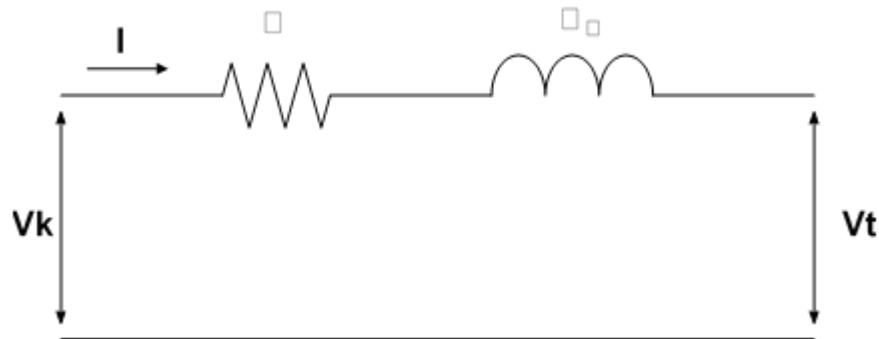
V_k = Nilai mutlak tegangan ujung kirim (Volt)

V_t = Nilai mutlak tegangan ujung terima (Volt)

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_t) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_k), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik.

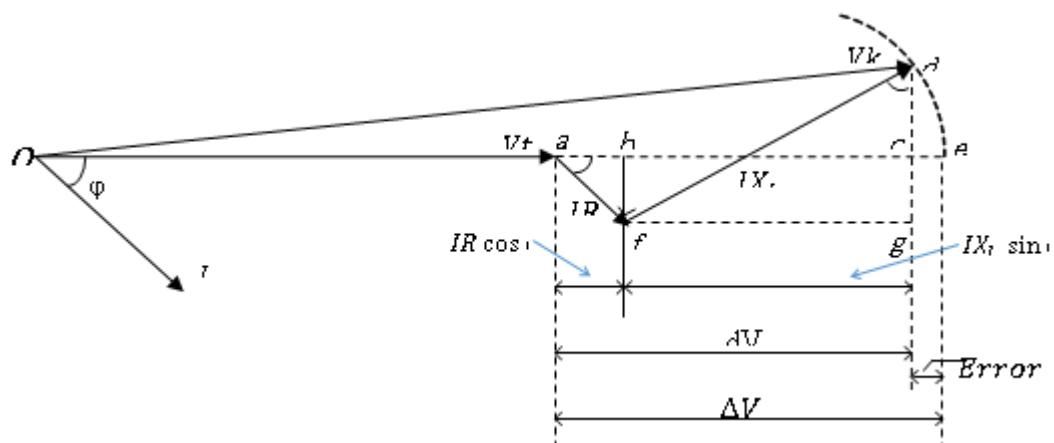
Untuk menghitung jatuh tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun faktor dayanya yang tidak sama dengan satu, maka berikut ini akan diuraikan cara perhitungannya. Dalam penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan faktor daya beban yang berbeda-beda.

Untuk saluran udara yang kapasitasnya dapat diabaikan, disebut "Saluran Pendek". Secara umum hal ini diterapkan pada sistem yang tegangannya sampai dengan 66kV dan panjangnya mencapai 50 miles (80,5 km). Oleh sebab itu rangkaian ekivalennya terdiri dari tahanan dan reaktansi yang tersambung seri seperti yang terlihat pada gambar 2.8



Gambar 2.8. Rangkaian ekivalen saluran distribusi jarak pendek

Untuk perhitungan jatuh tegangan dapat ditentukan berdasarkan diagram phasor pada gambar 2.9 :



Gambar 2.9. Diagram phasor saluran distribusi jarak pendek

Pada gambar 2.9 merupakan diagram phasor dari saluran distribusi jarak pendek yang ditunjukkan oleh gambar 2.8. dengan titik O sebagai titik pusat dari lingkaran dengan jari-jari $od = V_k$, kita buat lingkaran, sehingga memotong perpanjangan V_t pada titik e. Jadi $V_k = Oe = Oa + ac + ce$. Oleh karena $ce \ll V_k$; ce dapat diabaikan, sehingga $V_s \approx Oa + ac$. Selanjutnya, $Oa = V_t$; $ac = ab + bc$ dimana $ab = IR \cos \varphi$, dan $bc = IX_L \sin \varphi$; sehingga

$$ac = dV = IR \cos \varphi + IX_L \sin \varphi$$

Selanjutnya V_k dapat ditulis dalam bentuk :

$$V_k \approx V_t + dV$$

$$V_k \approx V_t + IR \cos \varphi + IX_L \sin \varphi$$

$$V_k - V_t \approx IR \cos \varphi + IX_L \sin \varphi$$

Sesuai dengan definisi diatas $\Delta V = |V_k| - |V_t|$, maka didapat :

$$\Delta V = I \times (R \cos \varphi + X_L \sin \varphi) \times L \quad (2.3)$$

Dimana :

I = Arus beban (Ampere)

R = Tahanan rangkaian (Ohm/km/fasa)

X_L = Reaktansi induktif rangkaian (Ohm/km/fasa)

L = Panjang Jaringan (km)

φ = Sudut faktor daya beban

Apabila Ujung pengiriman di ketahui maka :

$$V_t = V_k - \Delta V$$

$$= V_k - I \times (R \cos \varphi \times X_L \sin \varphi) \times L$$

Jatuh Tegangan dalam Persen :

$$\Delta V(\%) = \frac{I \times (R \cos \varphi \times X_L \sin \varphi) \times L}{V_k} \times 100 \% \quad (2.4)$$

Maka jatuh Tegangan dalam Persen :

$$\Delta V = \frac{V_k - V_t}{V_k} \times 100 \% \quad (2.5)$$

Panjang Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dapat didesain dengan mempertimbangkan jatuh tegangan (Drop Voltage) dan susut teknis jaringan. Jatuh tegangan adalah perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar. Maka pemilihan penghantar (penampang penghantar) untuk tegangan menengah harus diperhatikan. Berdasarkan SPLN 1: 1995 sebuah jaringan Tegangan Menengah dengan kriteria jatuh tegangan yang diizinkan untuk sistem radial di atas tanah tidak boleh lebih dari 5% dan kurang dari 10%

Jatuh tegangan pada sistem distribusi mencakup jatuh tegangan pada :

1. Penyulang Tegangan Menengah (JTM)
2. Transformator Distribusi
3. Penyulang Jaringan Tegangan Rendah (JTR)
4. Sambungan Rumah
5. Instalasi Rumah

Adapun penyebab Jatuh Tegangan adalah sebagai berikut :

1. Jauhnya jaringan, jauhnya jarak beban (trafo distribusi) dari Gardu Induk
2. Jenis penghantar atau konektor yang digunakan
3. Arus yang dihasilkan terlalu besar
4. Faktor daya beban ($\cos \varphi$)
5. Rendahnya tegangan yang disuplai dari Gardu Induk.

2.2.5 Rugi-Rugi Daya

Pada sistem distribusi yang menyangkut efisiensi tenaga listrik, semakin besar rugi-rugi dayanya maka semakin rendah efisiensinya. Dalam Proses Transmisi dan Distribusi tenaga listrik sering kali dialami rugi-rugi daya yang cukup besar yang diakibatkan oleh rugi-rugi pada saluran dan juga rugi-rugi pada trafo yang digunakan. Kedua jenis rugi-rugi daya tersebut memberikan pengaruh yang besar terhadap kualitas daya serta tegangan yang dikirimkan kesisi pelanggan. Nilai tegangan yang melebihin batas toleransi akan dapat menyebabkan tidak optimalnya kerja dari peralatan listrik dari sisi konsumen. Selain itu rugi-rugi daya yang besar akan menimbulkan kerugian finansial disisi perusahaan pengola listrik. Berikut adalah penjelasan mengenai rugi-rugi yang terjadi pada jaringan distribusi.

Pada sistem distribusi yang menyangkut efisiensi tenaga listrik, semakin besar rugi-rugi dayanya maka semakin rendah efisiensinya. Rugi-rugi daya pada saluran berkaitan jatuh tegangan pada sistem tenaga listrik serta nilai impedansi saluran, dimana dapat dinyatakan dengan rumus :

- Rugi-rugi daya aktif:

$$|I|^2 R \text{ atau } \frac{|\Delta V|^2}{R} \cos^2 \varphi = \frac{|\Delta V|^2}{Z} \cos \varphi \quad (2.6)$$

- Rugi-rugi daya reaktif :

$$|I|^2 X \text{ atau } \frac{|\Delta V|^2}{X} \sin^2 \varphi = \frac{|\Delta V|^2}{Z} \sin \varphi \quad (2.7)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}, \quad Z = R + jX \quad (2.8)$$

2.2.5.1 Rugi-rugi Saluran

Pemilihan jenis kabel yang digunakan pada jaringan distribusi merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan dari suatu sistem tenaga listrik. Jenis kabel dengan nilai resistansi yang kecil akan dapat memperkecil rugi-rugi daya. Besar rugi-rugi daya pada jaringan distribusi dapat dituliskan rumus sebagai berikut :

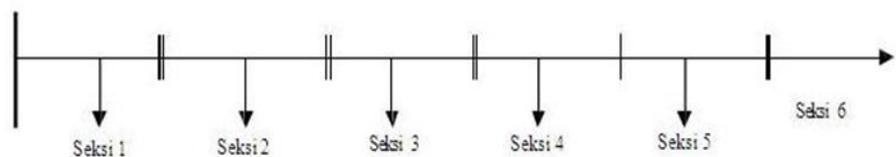
$$\text{Loss} = 3 \times I^2 R \quad (2.9)$$

Dimana Loss = Rugi-rugi pada saluran (Watt)

R = Resistansi saluran per fasa (Ohm)

I = Arus yang mengalir per fasa (Ampere)

Perhitungan susut daya penyulang berstruktur jaringan radial dapat dihitung dengan menjumlah susut dari masing-masing seksi. Misalnya seperti gambar berikut :



Gambar 2.10 Penyulang struktur radial

Nilai Resistansi dari suatu penghantar merupakan penyebab utama rugi-rugi daya yang terjadi pada jaringan distribusi. Nilai resistansi dari suatu penghantar dipengaruhi oleh beberapa parameter. Berikut adalah persamaan resistansi penghantar :

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.8)$$

Dimana: R = Resistansi Saluran (Ohm)

ρ = Resistivitas bahan penghantar (Ohm-meter)

l = Panjang penghantar (Meter)

A = Luas penampang (m^2)

Panjang dari suatu penghantar tergantung dari jarak distribusi ke pelanggan. Sehingga nilai tersebut tidak dapat diubah secara bebas. Sedangkan resistivitas bahan tergantung dari bahan penghantar yang digunakan. Parameter ini dapat diubah-ubah tergantung dari pemilihan bahan penghantar yang digunakan. Selain itu parameter yang dapat diubah-ubah secara bebas adalah luas penampang dari penghantar. Dimana semakin besar penampang penghantar akan mengurangi nilai resistansi saluran. Akan tetapi dalam pengubahan luas penampang penghantar harus memperhatikan faktor efisiensinya.

2.3 Dasar Pertimbangan Perbaikan Kualitas Tegangan Listrik

2.3.1 Membangun Gardu Sisipan

Metode perbaikan kualitas tegangan listrik dengan cara membangun gardu sisipan, pada dasarnya sama dengan memindahkan beban ke sumber yang baru. Dengan pembangunan gardu sisipan, maka kemampuan penyaluran arus akan lebih besar, sehingga susut tegangan dapat diperkecil.

Dalam sistem tenaga listrik banyak ditemukan kendala jaringan distribusi yang sangat panjang, yang dapat mengakibatkan tegangan pada ujung penerima mengalami penurunan yang cukup rendah dibawah standar. Hal ini dapat diatasi dengan jalan membangun gardu sisipan pada daerah dimana tegangan sudah dibawah standar pelayanan.

2.3.2 Rekonfigurasi Jaringan

Rekonfigurasi jaringan distribusi adalah proses merubah nilai arus maupun impedansi penyulang atau memindahkan suplai suatu titik beban trafo distribusi dari suatu penyulang ke penyulang yang lain. Memindahkan beban ke penyulang lain berarti mengurangi arus yang mengalir sehingga susut tegangan

akan menjadi lebih kecil. Tujuan utama pemindahan beban ini tidak merupakan perbaikan tegangan namun lebih diutamakan untuk peningkatan keandalan pertimbangan pembebahan transformator gardu induk atau pertimbangan karena adanya pertumbuhan beban.

Rekonfigurasi dapat merubah parameter-parameter saluran distribusi antara lain, seperti impedansi dan arus penyulang. Akibat perubahan kedua parameter tersebut, akan turut merubah rugi daya dan jatuh tegangan pada penyulang, keseimbangan arus phasa dan keseimbangan arus penyulang serta arus hubung singkat pada sisi ujung penyulang. Oleh sebab itu, proses rekonfigurasi suatu sistem distribusi harus mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, terutama rugi daya dan jatuh tegangan.

Rekonfigurasi jaringan distribusi dilakukan dengan mengubah status buka/tutup saklar pada jaringan distribusi. Rekonfigurasi jaringan listrik dapat digunakan untuk menjaga keseimbangan sistem dan mengurangi rugi-rugi saluran.

Dalam kondisi operasi normal, rekonfigurasi jaringan dilakukan karena dua alasan:

1. Mengurangi rugi-rugi daya pada sistem (*loss reduction*).
2. Mendapatkan pembebahan yang seimbang untuk mencegah pembebahan yang berlebih pada jaringan (*load balancing*).

Ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pemindahan pembebahan pada penyulang yaitu :

1. Arus beban

Pemindahan beban penyulang dilakukan dengan memindahkan sebagian beban penyulang yang berbeban besar ke penyulang yang berbeban kecil. Sehingga pembebanan pada masing-masing penyulang jadi rata dan mencegah terjadinya pembebanan lebih pada jaringan (penyulang).

2. Jatuh Tegangan

Pemindahan beban dapat mengubah jatuh tegangan pada penyulang karena berubahnya arus yang mengalir pada penyulang tersebut. Pemindahan beban dilakukan ke penyulang yang jatuh tegangannya belum terlalu besar atau belum mendekati sampai 5%. Sehingga saat dilakukannya pemindahan beban, maka penyulang yang menerima beban dari penyulang lain tersebut tidak terjadi tegangan jatuh yang melebihi 5%.

3. Jenis Beban

Pemindahan beban harus juga memperhatikan jenis beban, hal ini disebabkan jika pemindahan beban dilakukan ke penyulang yang jenis bebannya tidak sama. Faktor beban antara pemakaian industri dengan pemakaian rumah tangga berbeda. Sehingga jika digabungkan, akan mengurangi kualitas penyaluran energi listrik ke pelanggan.