

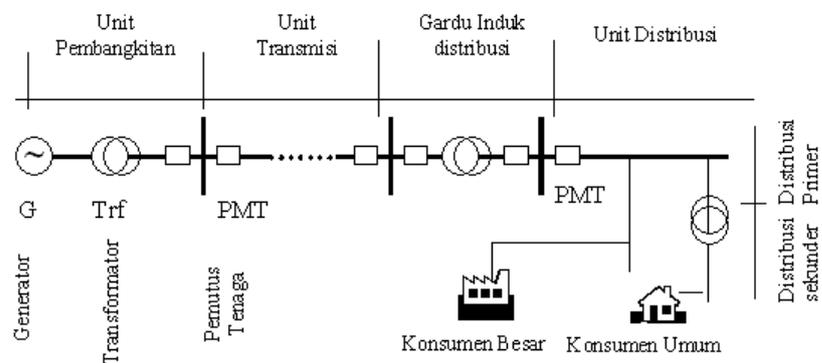
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Tenaga Listrik<sup>1</sup>

Sistem Tenaga Listrik merupakan suatu rangkaian saling terhubung yang terdiri sejumlah komponen atau peralatan listrik mulai dari membangkitkan dan mendistribusikan Energi Listrik sampai ke titik beban ( Pengguna / Konsumen ). Suatu Sistem Tenaga Listrik terdapat komponen-komponen atau alat-alat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi dan beban yang saling berhubungan dan merupakan satu kesatuan sehingga membentuk suatu sistem.

Dalam sistem ketenagalistrikan sering timbul persoalan teknis, dimana tenaga listrik dibangkitkan pada Pusat Pembangkit yang umumnya pada tempat-tempat tertentu yang jauh dari lokasi pelanggan, Sehingga perlu Sistem Jaringan Transmisi dan Distribusi yang cukup panjang untuk menjangkau lokasi pelanggan. Penyaluran tenaga listrik dari tempat dibangkitkan disebut Pusat Pembangkit Tenaga Listrik dan sangat lazim disebut Pusat Pembangkit Tenaga Air atau ( Diesel – Gas – Uap – Gas Uap – Panas Bumi – Nuklir ) dan lain lain. Para Ahli dan Teknisi kelistrikan mengilustrasikan wujud sistem Tenaga Listrik kedalam bentuk Blok Diagram yang digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

(Sumber : PT PLN Pusat Pendidikan dan Pelatihan)

<sup>1</sup> PT PLN Pusat Pendidikan dan Pelatihan, Sistem Distribusi Tenaga Listrik, PT PLN (Persero), Hal.1

Pusat pembangkit tenaga listrik adalah sebagai tempat produksi energi listrik. Terdapat dua jenis pembangkit tenaga listrik berdasarkan sumber energinya, yaitu pembangkit listrik energi fosil dan pembangkit listrik energi terbarukan. Pusat pembangkit listrik energi fosil terdiri dari beberapa jenis yang terdiri dari, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Pada pembangkit listrik energi terbarukan juga terdiri dari beberapa jenis yaitu, Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa/Biogas (PLTBm), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Pada sistem tenaga listrik saluran transmisi, terdapat saluran yang akan mentransmisikan energi listrik dari pembangkit ke gardu induk dengan jarak yang jauh menggunakan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) dan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT).

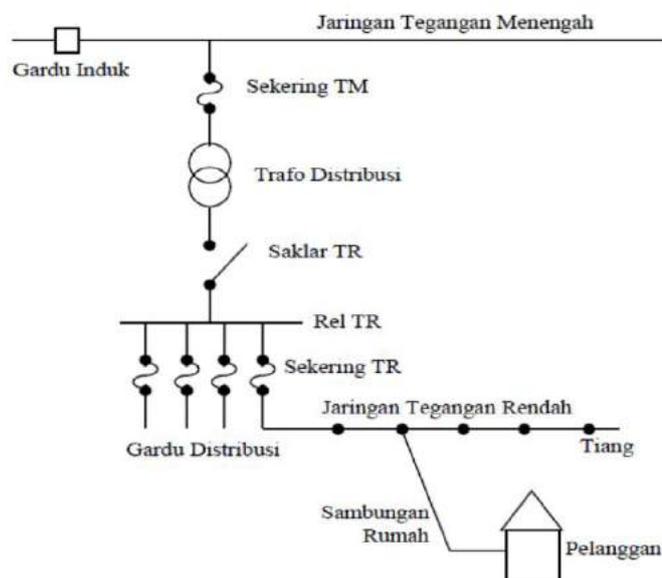
Pembangkit biasanya menghasilkan tegangan 6kV hingga 24kV. Lalu menggunakan trafo *step-up*, tegangan pada gardu induk akan dinaikkan menjadi 70kV hingga 150kV pada tegangan tinggi. Sedangkan untuk tegangan ekstra tinggi, tegangan akan dinaikkan menjadi 500kV. Dalam penyalurannya ke gardu induk berikutnya, energi listrik akan diturunkan tegangannya menggunakan trafo *step down* menjadi 20kV yang kemudian bisa langsung digunakan oleh industri skala menengah. Selain bisa digunakan secara langsung, tegangan 20kV juga akan disalurkan. Energi tenaga listrik disalurkan melalui penyulang-penyulang yang terdapat pada gardu distribusi. Fungsi gardu distribusi untuk menurunkan tegangan distribusi primer menjadi tegangan rendah atau tegangan distribusi sekunder sebesar 220/380 V.

## **2.2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Sistem distribusi tenaga listrik adalah sarana dari sistem tenaga listrik di dalam menyalurkan energi listrik ke konsumen. Dalam menyalurkan tenaga listrik ke konsumen dari pusat beban, suatu sistem distribusi tenaga listrik harus

disesuaikan dengan kondisi setempat dengan memperhatikan faktor beban, perkembangan dimasa mendatang, kendala, serta ekonomisnya.<sup>2</sup>

Sistem distribusi tenaga listrik merupakan salah satu bagian dari suatu sistem tenaga listrik yang dimulai dari PMT incoming di Gardu Induk sampai dengan Alat Penghitung dan Pembatas (APP) di instalasi konsumen yang berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari Gardu Induk sebagai pusat beban ke pelanggan-pelanggan secara langsung atau melalui gardu-gardu distribusi (gardu trafo) dengan mutu yang memadai sesuai standar pelayanan yang berlaku, dengan demikian sistem distribusi ini menjadi suatu sistem tersendiri karena unit distribusi ini memiliki komponen peralatan yang saling berkaitan dalam operasinya untuk menyalurkan tenaga listrik. Dimana sistem adalah perangkat unsur-unsur yang saling ketergantungan yang disusun untuk mencapai suatu tujuan tertentu dengan fungsi yang ditetapkan. Berikut adalah skema pendistribusian yang menggambarkan mengenai hubungan antara Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR) :



Gambar 2. 2 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

(Sumber : Suhadi, 2008)

<sup>2</sup> Ibnu Hajar dan Muhammad Hasbi Pratama, Analisa Nilai Saidi Saifi sebagai Indeks Keandalan Penyediaan Tenaga Listrik pada Penyulang Cahaya PT PLN Area Ciputat, Jurnal Ilmiah, Vol.10 No.1, Juni 2018, Hal.72



Jaringan distribusi tenaga listrik dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

### **2.2.1 Jaringan Distribusi Primer<sup>3</sup>**

Jaringan distribusi primer atau dikenal juga sebagai jaringan distribusi tegangan menengah (JTM) 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 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. Pada proses pendistribusian listrik tegangan menengah, kawat penghantar dapat berupa kabel dalam tanah atau saluran/kawat udara yang menghubungkan gardu induk (sekunder trafo) dengan gardu distribusi atau gardu hubung yang merupakan sisi primer dari trafo distribusi.

### **2.2.2 Jaringan Distribusi Sekunder<sup>4</sup>**

Jaringan distribusi sekunder atau sering disebut jaringan distribusi tegangan rendah (JTR), merupakan jaringan yang letaknya setelah gardu distribusi, yang berfungsi menyalurkan tenaga listrik bertegangan rendah sebesar : 220 V/380 V. Jaringan Distribusi Sekunder ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Kawat penghantarnya berupa kabel tanah atau kawat udara yang menghubungkan dari gardu distribusi yang merupakan sisi sekunder trafo distribusi ke konsumen/ pelanggan atau pemakai seperti : industri dan atau rumah. Sistem penyaluran daya listrik pada JTR, terdiri dari Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) dan Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR). Jenis penghantar SUTR yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa

---

<sup>3</sup> Daman Suswanto, Sistem Distribusi Tenaga Listrik, Edisi 1, 2009, Hal.5

<sup>4</sup> Ramadoni Syaputra, Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik, Yogyakarta, 2017, Hal. 130

isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR. Sedangkan untuk penghantar SKUTR adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*).

### **2.3 Konfigurasi Sistem Saluran Distribusi<sup>5</sup>**

Pola konfigurasi jaringan pada distribusi primer terdiri dari 5 tipe yaitu sistem radial, sistem loop, sistem spindel, sistem spot network dan sistem interkoneksi.

#### **2.3.1 Sistem Radial**

Sistem jaringan radial pada distribusi tenaga listrik paling banyak digunakan dan paling sederhana dibandingkan dengan tipe jaringan yang lain. Tenaga listrik yang disalurkan secara radial melalui gardu induk ke konsumen-konsumen dilakukan secara terpisah satu sama lainnya. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu dan dicabang-cabangkan ke titik-titik beban yang dilayani. Sistem radial terdiri atas fider (feeders) atau penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial. Konfigurasi jaringan sistem radial terbagi atas 2 (dua) bagian yaitu sistem radial terbuka dan sistem radial paralel.

##### **a. Sistem Radial Terbuka**

Sistem radial terbuka ini paling tidak dapat diandalkan, karena penyaluran tenaga listrik hanya dilakukan dengan menggunakan satu saluran saja. Jaringan model ini sewaktu mendapat gangguan akan menghentikan penyaluran tenaga listrik cukup lama sebelum gangguan tersebut diperbaiki kembali. Oleh sebab itu kontinuitas pelayanan pada sistem radial terbuka ini kurang bisa diandalkan. Selain itu makin panjang jarak saluran dari gardu induk ke konsumen, kondisi tegangan makin tidak bisa diandalkan, justru bertambah buruk karena rugi-rugi tegangan akan lebih besar. Berarti kapasitas pelayanan untuk sistem radial terbuka ini sangat terbatas.

Kelebihan sistem radial terbuka:

- 1) Konstruksinya lebih sederhana

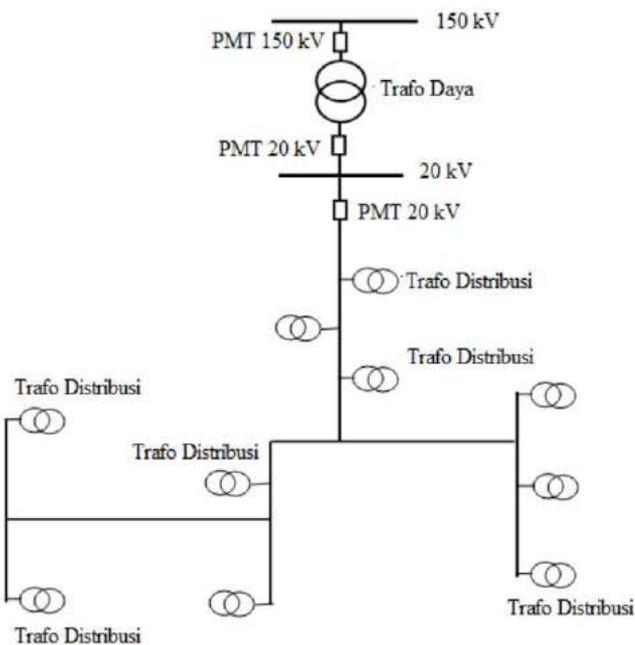
---

<sup>5</sup> Ibid, Hal. 29

- 2) Material yang digunakan lebih sedikit, sehingga lebih murah
- 3) Sistem pemeliharaannya lebih murah
- 4) Untuk penyaluran jarak pendek akan lebih murah

Kelemahan sistem radial terbuka:

- 1) Keandalan sistem ini lebih rendah
- 2) Faktor penggunaan konduktor 100 %
- 3) Makin panjang jaringan (dari gardu induk atau gardu hubung) kondisi tegangan tidak dapat diandalkan
- 4) Rugi-rugi tegangan lebih besar
- 5) Kapasitas pelayanan terbatas
- 6) Bila terjadi gangguan penyaluran daya terhenti.



Gambar 2. 3 Konfigurasi Jaringan Sistem Radial Radial Terbuka

(Sumber : Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010)

#### b. Sistem Radial Paralel

Untuk memperbaiki kekurangan dari sistem radial terbuka diatas maka dipakai konfigurasi sistem radial paralel, yang menyalurkan tenaga listrik

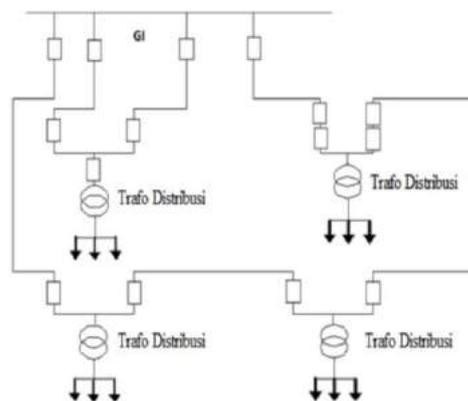
melalui dua saluran yang diparalelkan. Pada sistem ini titik beban dilayani oleh dua saluran, sehingga bila salah satu saluran mengalami gangguan, maka saluran yang satu lagi dapat menggantikan, dengan demikian pemadaman tak perlu terjadi. Kontinuitas pelayanan sistem radial paralel ini lebih terjamin dan kapasitas pelayanan bisa lebih besar dan sanggup melayani beban puncak (peak load) dalam batas yang diinginkan. Kedua saluran dapat dikerjakan untuk melayani titik beban bersama-sama. Biasanya titik beban hanya dilayani oleh salah satu saluran saja. Hal ini dilakukan untuk menjaga kontinuitas pelayanan pada konsumen.

Kelebihan sistem radial paralel:

- 1) Kontinuitas pelayanan lebih terjamin, karena menggunakan dua sumber
- 2) Kapasitas pelayanan lebih baik dan dapat melayani beban maksimum
- 3) Kedua saluran dapat melayani titik beban secara bersama
- 4) Bila salah satu saluran mengalami gangguan, maka saluran yang satu lagi dapat menggantikannya, sehingga pemadaman tak perlu terjadi.
- 5) Dapat menyalurkan daya listrik melalui dua saluran yang diparalelkan

Kelemahan sistem radial paralel:

- 1) Peralatan yang digunakan lebih banyak terutama peralatan proteksi
- 2) Biaya pembangunan lebih mahal.

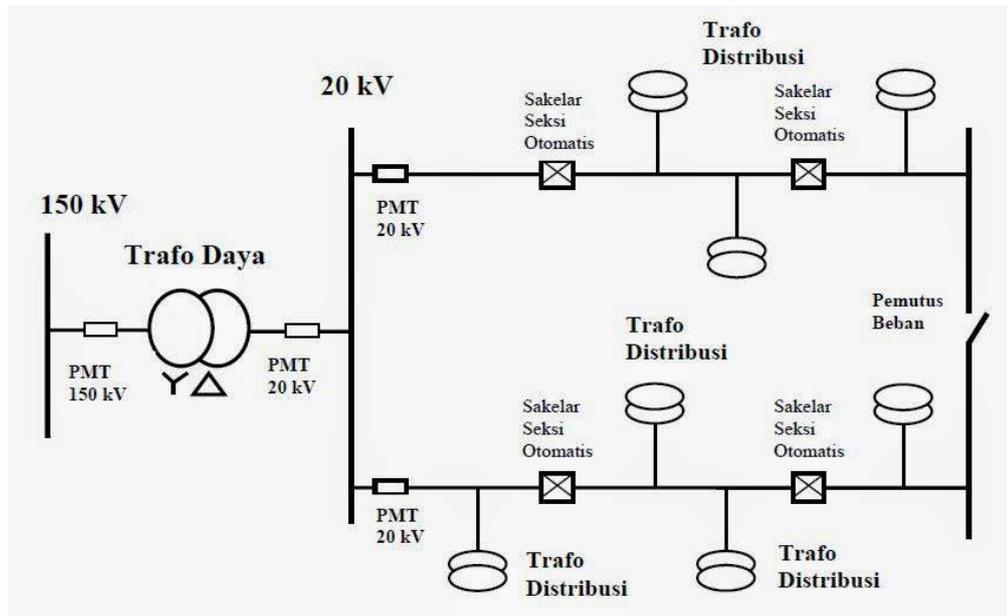


Gambar 2. 4 Konfigurasi Sistem Jaringan Radial Paralel

(Sumber : Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010)

### 2.3.2 Sistem Loop

Konfigurasi Sistem jaringan loop merupakan bentuk tertutup, disebut juga bentuk jaringan ring. Susunan rangkaian saluran membentuk ring yang memungkinkan titik beban terlayani dari dua arah saluran, sehingga kontinuitas pelayanan lebih terjamin serta kualitas dayanya menjadi lebih baik.



Gambar 2. 5 Konfigurasi Sistem Loop

(Sumber : Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010)

Struktur jaringan loop merupakan gabungan dari dua buah struktur jaringan radial, dimana pada ujung dari dua buah jaringan dipasang sebuah pemutus (PMT) atau pemisah (PMS). Pada saat terjadi gangguan, atau setelah gangguan dapat diisolir, maka pemutus atau pemisah ditutup sehingga aliran daya listrik ke bagian yang tidak terkena gangguan tidak terhenti. Pada umumnya penghantar dari struktur ini mempunyai struktur yang sama, ukuran konduktor tersebut dipilih sehingga dapat menyalurkan seluruh daya listrik beban struktur loop, yang merupakan jumlah daya listrik beban dari kedua struktur radial. Jaringan distribusi loop mempunyai kualitas dan kontinuitas pelayanan daya yang lebih baik, tetapi biaya investasi lebih mahal dan cocok digunakan pada daerah yang padat dan memerlukan keandalan tinggi.

#### Kelebihan sistem loop:

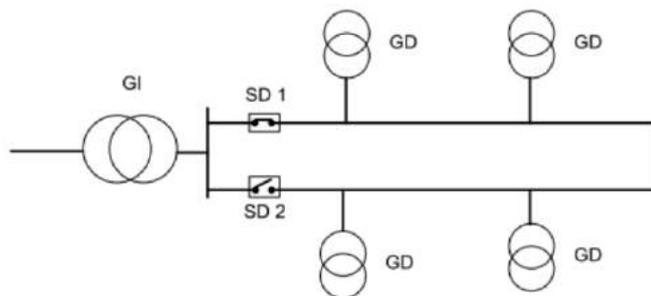
- 1) Dapat menyalurkan daya listrik melalui satu atau dua saluran feeder yang saling berhubungan
- 2) Menguntungkan dari segi ekonomis
- 3) Bila terjadi gangguan pada saluran maka saluran yang lain dapat menggantikan untuk menyalurkan daya listrik
- 4) Kontinuitas penyaluran daya listrik lebih terjamin
- 5) Bila digunakan dua sumber pembangkit, kapasitas tegangan lebih baik dan regulasi tegangan cenderung kecil
- 6) Dalam kondisi normal, pemutus beban dalam keadaan terbuka
- 7) Biaya konstruksi lebih murah
- 8) Faktor penggunaan konduktor lebih rendah, yaitu 50 %
- 9) Keandalan relatif lebih baik

#### Kelemahan sistem loop:

- 1) Keterandalan sistem ini lebih rendah
- 2) Jatuh tegangan makin besar
- 3) Bila beban yang dilayani bertambah, maka kapasitas pelayanan akan lebih jelek

Bentuk sistem jaringan distribusi loop ini ada 2 macam yaitu :

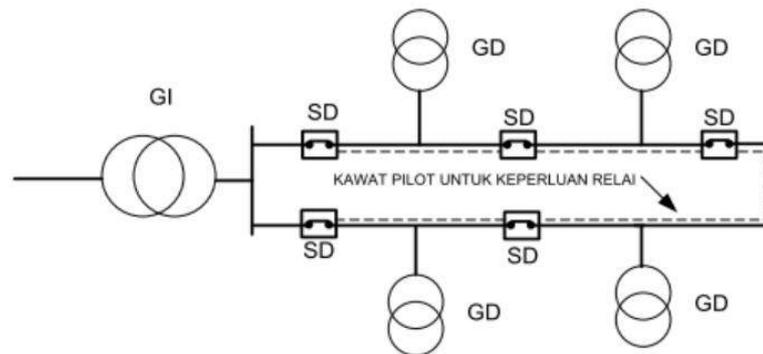
- 1) Bentuk open loop, dilengkapi dengan normally open switch yang terletak pada salah satu bagian gardu distribusi dan dalam keadaan normal rangkaian selalu terbuka



Gambar 2. 6 Rangkaian Open Loop

(Sumber : Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010)

- 2) Bentuk close loop, dilengkapi dengan normally close switch yang terletak pada salah satu bagian diantara gardu distribusi dan dalam keadaan normal rangkaian selalu tertutup.



Gambar 2. 7 Rangkaian Close Loop

(Sumber : Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010)

### 2.3.3 Sistem Spindel

Jaringan distribusi spindel merupakan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) yang penerapannya cocok di kota-kota besar. Sistem jaringan spindel 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, sedangkan 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.

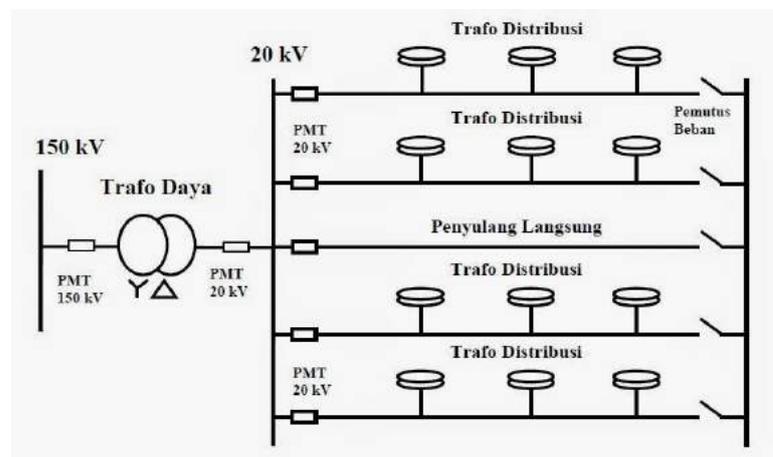
Adapun operasi sistem jaringan spindel adalah sebagai berikut:

- 1) Dalam keadaan normal semua saluran digardu hubung (GH) terbuka sehingga semua SKTM beroperasi radial.

- 2) Dalam keadaan normal saluran ekspres tidak dibebani dan dihubungkan dengan rel di gardu hubung dan digunakan sebagai pemasok cadangan dari gardu hubung.
- 3) Bila salah satu seksi dari SKTM mengalami gangguan, maka saklar beban di kedua ujung seksi yang terganggu dibuka. Kemudian sisi gardu induk (GI) mendapat suplai dari GI, dan gardu hubung mendapat supply dari gardu hubung melalui saluran ekspres.

Sistem jaringan distribusi spindel sangat cocok untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan antara lain:

- 1) Peningkatan keandalan / kontinuitas pelayanan sistem.
- 2) Menurunkan atau menekan rugi – rugi akibat gangguan.
- 3) Sangat baik untuk men-supply daerah beban yang memiliki kerapatan beban yang cukup tinggi.
- 4) Perluasan jaringan mudah dilakukan



Gambar 2. 8 Konfigurasi Sistem Spindle

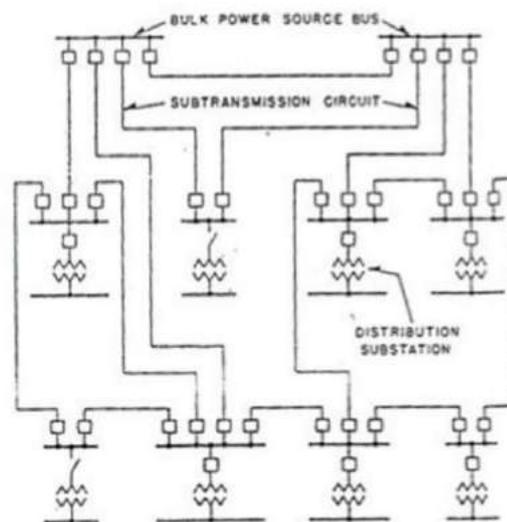
(Sumber : <http://tentanglistrikkita.blogspot.com/2014/05/sistem-tenaga-listrik-distribusi.html>)

### 2.3.4 Sistem Spot Network

Sistem Spot network merupakan sistem penyaluran tenaga listrik yang dilakukan secara terus-menerus oleh dua atau lebih feeder pada gardu - gardu induk dari beberapa pusat pembangkit tenaga listrik yang bekerja secara paralel. Sistem ini merupakan pengembangan dari sistem-sistem yang terdahulu dan

merupakan sistem yang paling baik serta dapat diandalkan, mengingat sistem ini dilayani oleh dua atau lebih sumber tenaga listrik. Selain itu jumlah cabang lebih banyak dari jumlah titik feeder

Sistem spot network dapat digunakan pada daerah-daerah yang memiliki kepadatan tinggi dan mempunyai kapasitas dan kontinuitas pelayanan yang sangat baik. Gangguan yang terjadi pada salah satu saluran tidak akan mengganggu kontinuitas pelayanan. Sebab semua titik beban terhubung paralel dengan beberapa sumber tenaga listrik.



Gambar 2. 9 Konfigurasi Sistem Spot Network

(Sumber : Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010)

Kelebihan sistem spot network:

- 1) Penyaluran tenaga listrik dapat dilakukan secara terus-menerus (selama 24 jam) dengan menggunakan dua atau lebih feeder.
- 2) Merupakan pengembangan dari sistem-sistem yang terdahulu.
- 3) Tingkat keterandalannya lebih tinggi
- 4) Jumlah cabang lebih banyak dari jumlah titik feeder
- 5) Dapat digunakan pada daerah-daerah yang memiliki tingkat kepadatan yang tinggi.
- 6) Memiliki kapasitas dan kontinuitas pelayanan sangat baik

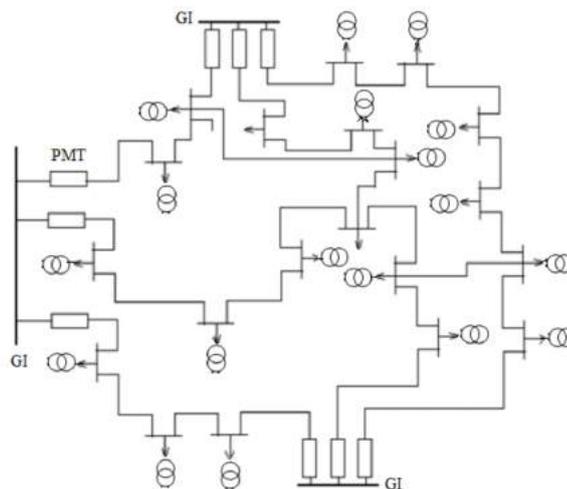
- 7) Gangguan yang terjadi pada salah satu saluran tidak akan mengganggu kontinuitas pelayanan.

Kelemahan sistem spot network:

- 1) Biaya konstruksi dan pembangunan lebih tinggi
- 2) Setting alat proteksi lebih sukar

### 2.3.5 Sistem Interkoneksi

Sistem interkoneksi ini merupakan perkembangan dari sistem spot network. Sistem ini menyalurkan tenaga listrik dari beberapa pusat pembangkit tenaga listrik yang dikehendaki bekerja secara paralel. Sehingga penyaluran tenaga listrik dapat berlangsung terus menerus (tak terputus), walaupun daerah kepadatan beban cukup tinggi dan luas. Hanya saja sistem ini memerlukan biaya yang cukup mahal dan perencanaan yang cukup matang. Untuk perkembangan dikemudian hari, sistem interkoneksi ini sangat baik, bisa diandalkan dan merupakan sistem yang mempunyai kualitas yang cukup tinggi.



Gambar 2. 10 Konfigurasi Sistem Interkoneksi

(Sumber : Jaringan Distribusi Tenaga Listrik, 2010)

Pada sistem interkoneksi ini apabila salah satu pusat pembangkit tenaga listrik mengalami kerusakan, maka penyaluran tenaga listrik dapat dialihkan ke pusat pembangkit lain. Untuk pusat pembangkit yang mempunyai kapasitas kecil dapat dipergunakan sebagai pembantu dari pusat pembangkit utama (yang

mempunyai kapasitas tenaga listrik yang besar). Apabila beban normal sehari-hari dapat diberikan oleh pusat pembangkit tenaga listrik tersebut, sehingga ongkos pembangkitan dapat diperkecil. Pada sistem interkoneksi ini pusat pembangkit tenaga listrik bekerja bergantian secara teratur sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Sehingga tidak ada pusat pembangkit yang bekerja terus-menerus. Cara ini akan dapat memperpanjang umur pusat pembangkit dan dapat menjaga kestabilan sistem pembangkitan.

Kelebihan sistem interkoneksi:

- 1) Merupakan pengembangan sistem spot network
- 2) Dapat menyalurkan tenaga listrik dari beberapa pusat pembangkit tenaga listrik.
- 3) Penyaluran tenaga listrik dapat berlangsung terus-menerus (tanpa putus), walaupun daerah kepadatan beban cukup tinggi dan luas.
- 4) Memiliki keterandalan dan kualitas sistem yang tinggi.
- 5) Apabila salah satu pembangkit mengalami kerusakan, maka penyaluran tenaga listrik dapat dialihkan ke pusat pembangkit lainnya.
- 6) Bagi pusat pembangkit yang memiliki kapasitas lebih kecil, dapat dipergunakan sebagai cadangan atau pembantu bagi pusat pembangkit utama (yang memiliki kapasitas tenaga listrik yang lebih besar).
- 7) Ongkos pembangkitan dapat diperkecil.
- 8) Sistem ini dapat bekerja secara bergantian sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan.
- 9) Dapat memperpanjang umur pusat pembangkit.
- 10) Dapat menjaga kestabilan sistem pembangkitan.
- 11) Keterandalannya lebih baik.
- 12) Dapat di capai penghematan di dalam investasi.

Kelemahan sistem interkoneksi:

- 1) Memerlukan biaya yang cukup mahal.
- 2) Memerlukan perencanaan yang lebih matang.

- 3) Saat terjadi gangguan hubung singkat pada penghantar jaringan, maka semua pusat pembangkit akan bergabung di dalam sistem dan akan ikut menyumbang arus hubung singkat ke tempat gangguan tersebut.
- 4) Jika terjadi unit-unit mesin pada pusat pembangkit terganggu, maka akan mengakibatkan jatuhnya sebagian atau seluruh sistem.
- 5) Perlu menjaga keseimbangan antara produksi dengan pemakaian.
- 6) Merepotkan saat terjadi gangguan petir.

#### 2.4 Jenis Penghantar pada Saluran Distribusi Tegangan Menengah

Pada saluran distribusi tegangan menengah, penyaluran tenaga listrik menggunakan tiga jenis saluran yaitu Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM), Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM) dan Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM). Ketiga jenis saluran pada tegangan menengah memerlukan penghantar sebagai penyalur sistem tenaga listrik.

Dalam proses distribusi tenaga listrik, penghantar memiliki fungsi yang sangat krusial karena menentukan jumlah dan kualitas dari tenaga listrik yang disalurkan tersebut. Terdapat bermacam – macam bahan yang biasa digunakan sebagai bahan penghantar, seperti aluminium dan tembaga. Namun, dalam aplikasinya, penghantar yang terbuat dari aluminium lebih sering digunakan karena lebih murah dan lebih ringan daripada tembaga dengan besar resistansi yang tidak jauh berbeda. Berikut adalah beberapa jenis penghantar pada sistem distribusi tenaga listrik :<sup>6</sup>

- a) AAC (*All Aluminium Conductors*) yaitu seluruh bagian inti kabel terbuat dari aluminium.
- b) AAAC (*All Aluminium Alloyconductors*) yaitu seluruh bagian inti kabel terbuat dari campuran aluminium.
- c) AAAC-S (*All Aluminium Alloy Conductor Shielded*) merupakan suatu penghantar AAAC yg berselubung polietilen ikat silang (XLPE). Penghantar pada kabel tembaga jenis AAACS berupa aluminium paduan

---

<sup>6</sup> T.S. Hutaaruk, *Transmisi Daya Listrik*, (Jakarta: Penerbit Erlangga, 1996).



yang dipilin bulat tidak dipadatkan. Isolasi kabel ini memiliki ketahanan isolasi, hingga 6 kV.

- d) ACSR (*Aluminium Conductor, Steel-Reinforced*) yaitu terbuat dari aluminium yang diperkuat dengan baja
- e) ACAR (*Aluminium Conductor, Alloy-Reinforced*) yaitu terbuat dari aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.
- f) BCC (*Bare Cooper Conductor*) yaitu kawat penghantar tembaga yang mempunyai bentuk padat dan berurat banyak dengan ukuran 6 – 500mm<sup>2</sup>.
- g) Kabel Tanah *Single Core*, yaitu jenis kabel dengan inti tunggal yang terbuat dari tembaga (N2XSY.....Y) atau aluminium (NA2XSY.....Y) dengan pelapis konduktor berupa campuran semikonduktif, isolasi PVC, pelindung metal berupa pita tembaga yang saling berimpit, dibungkus dengan pita spiral *polyester* yang saling berimpit dan mempunyai selubung luar PVC. Tegangan maksimum kabel ini antara 7,2 - 3,6 kV.
- h) Kabel Tanah *Three Core*, yaitu jenis kabel dengan inti 3 terbuat dari tembaga (N2XSY & N2XSEY) atau aluminium (NA2XSY & NA2XSEY), isolasi XLPE, pelindung isolasi campuran semikonduktif, pelindung metal berupa pita tembaga yang saling berimpit, pelindung bagian dalam PVC yang dilapisi baja galvanis bundar dan pita dengan selubung luar PVC. Tegangan maksimum kabel ini adalah antara 7,2 - 3,6 kV.

## 2.5 Parameter Listrik Saluran Distribusi

Saluran distribusi listrik memiliki empat parameter yang dapat mempengaruhi kemampuannya sebagai bagian dalam sistem tenaga. Adapun empat parameter tersebut terdiri dari resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi. Parameter-parameter ini dijadikan sebagai bahan pertimbangan utama dalam perencanaan saluran distribusi. Tetapi karena saluran distribusi memiliki panjang saluran yang lebih kecil dari 80 km dan tegangan yang digunakan juga lebih kecil dari 69 kV, maka akan menghasilkan kapasitansi dan konduktansi yang sangat kecil. Sehingga kedua parameter tersebut dapat diabaikan nilainya.

### 2.5.1 Impedansi Saluran

Pada jaringan distribusi impedansi dihitung per jarak dengan satuan kilometer (ohm/km) yang besarnya berdasarkan luas penampang kabel yang dipakai pada jaringan tersebut.

$$Z = R + jX_L (\Omega/\text{km}) \quad (2.1)$$

Dimana :

R = resistansi saluran

$X_L$  = reaktansi induktif

### 2.5.2 Resistansi Saluran<sup>7</sup>

Resistansi saluran adalah nilai tahanan pada saluran berdasarkan penghantar yang digunakan baik pada saluran transmisi maupun saluran distribusi. Nilai tahanan penghantar ini dapat mempengaruhi besarnya kerugian daya. Nilai tahanan suatu penghantar dapat ditentukan dari persamaan :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

Dimana :

$\rho$  = 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 nol adalah suatu konstanta untuk bahan logam bersangkutan, maka tahanan searahnya dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \quad (2.3)$$

---

<sup>7</sup> Willian D. Stevenson, Analisis Sistem Tenaga Listrik, Edisi Keempat, 1994, Hal. 39

Dimana :

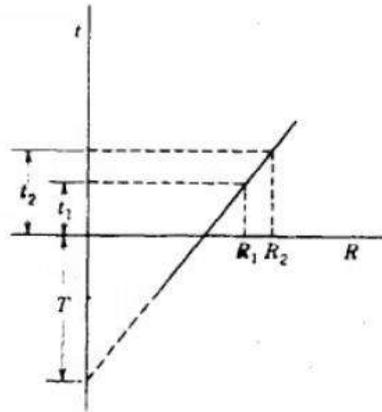
$R_1$  = resistansi penghantar pada suhu  $t_1$  (temperatur sebelum operasi konduktor)

$R_2$  = 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.



Gambar 2. 11 Resistansi Suatu Penghantar Logam sebagai Fungsi Suhu

(Sumber : Willian D. Stevenson, Analisis Sistem Tenaga Listrik, Edisi Keempat, 1994, Hal. 56)

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%

### 2.5.3 Induktansi Saluran<sup>8</sup>

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

$$L = \left\{ 0,5 + 4,6 \log \frac{D-r}{r} \right\} \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.4)$$

Dimana  $D$  adalah jarak antara konduktor dan  $r$  adalah radius masing-

<sup>8</sup> Zuhail, Dasar Teknik Listrik dan Elektronika Daya, 1995, Hal. 152.

masing konduktor tersebut. Bila letak konduktor tidak simetris, maka  $D$  pada persamaan diatas perlu diganti dengan :

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \quad (2.5)$$

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 :

$$A = \pi r^2$$

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

#### 2.5.4 Reaktansi Induktif Saluran<sup>9</sup>

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:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.7)$$

Dimana :

$X_L$  = Reaktansi induktif saluran

$L$  = Induktansi saluran ( H)

$f$  = Frekuensi ( Hz)

#### 2.6 Daya Listrik

Daya listrik merupakan energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Pada sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah yang digunakan untuk melakukan kerja atau usaha. Daya memiliki satuan Watt, dimana merupakan perkalian dari Tegangan (volt) dan arus (ampere). Daya dinyatakan dalam  $P$ , tegangan dinyatakan dalam  $V$  dan arus dinyatakan dalam  $I$ .

---

<sup>9</sup> B.I Theraja, Worked Examples in Electrical Technology, Techouse, 1983, Hal. 261.

### 2.6.1 Daya Aktif

Daya aktif (Active Power) adalah daya yang dipakai untuk melakukan energi sebenarnya. Satuan daya aktif adalah watt. Adapun persamaan daya aktif adalah sebagai berikut :

Untuk satu phasa

$$(P) = V.I. \cos \varphi \quad (2.8)$$

Untuk tiga phasa

$$(P) = \sqrt{3} \cdot V. I. \cos \varphi \quad (2.9)$$

Daya ini digunakan secara umum oleh konsumen dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

### 2.6.2 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor dan lain-lain. Satuan daya reaktif adalah Var. Adapun persamaan daya reaktif sebagai berikut:

Untuk satu phasa

$$Q = V. I. \sin \varphi \quad (2.10)$$

Untuk tiga phasa

$$Q = \sqrt{3} \cdot V. I. \sin \varphi \quad (2.11)$$

### 2.6.3 Daya Semu

Daya Semu (Apparent Power) adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan. Satuan daya semu adalah VA. Adapun persamaan dalam daya aktif sebagai berikut :

Untuk satu phasa

$$S = V \cdot I \quad (2.12)$$

Untuk tiga phasa

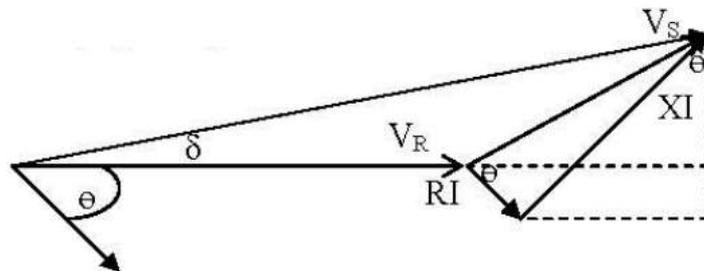
$$S = \sqrt{3} \cdot V. I \quad (2.13)$$

## 2.7 Jatuh Tegangan<sup>10</sup>

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar atau bisa dikatakan bahwa adanya perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima. Jatuh tegangan pada suatu saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Jika ada arus yang mengalir melalui saluran distribusi maka akan terjadi penurunan tegangan sepanjang saluran. Dengan demikian tegangan pada pusat beban tidak sama dengan tegangan pengiriman. Penurunan tegangan terdiri dari dua komponen yaitu:

- 1)  $I \cdot R$  , yaitu rugi tegangan akibat tahanan saluran
- 2)  $I \cdot X$  , yaitu rugi tegangan akibat reaktansi induktif saluran

Diagram fasor arus dan tegangan pada saluran distribusi yang bersifat resistif dan induktif adalah sebagai berikut.



Gambar 2. 12 Diagram Fasor Arus dan Tegangan Saluran Distribusi

(Sumber : Analisa Tegangan Jatuh pada Jaringan Distribusi 20 kV PT.PLN Area Rantau Prapat Rayon Aek Kota Batu, 2018)

Untuk menentukan nilai jatuh tegangan 3 phasa dapat menggunakan persamaan berikut:

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

Sedangkan besar persentase drop tegangan pada saluran transmisi dapat dihitung dengan :

$$\% \Delta V = \Delta V / V \times 100\% \quad (2.15)$$

<sup>10</sup> William D. Stevenson, Op.Cit, Hal. 28.

Dimana:

$\Delta V$  = Drop tegangan (Volt)

R = Resistansi saluran ( $\Omega$ )

X = Reaktansi saluran ( $\Omega$ )

I = Arus beban (A)

l = Panjang hantaran tegangan menengah (km)

Berdasarkan SPLN T6.001: 2013 mengenai Tegangan Standar PLN dapat dikatakan bahwa maka sebuah jaringan tegangan menengah harus memenuhi kriteria jatuh tegangan (*drop voltage*) yang ditetapkan yaitu  $\pm 10\%$  terhadap tegangan nominal.

## 2.8 Rugi Daya Saluran Distribusi<sup>11</sup>

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). Faktor daya ( $\cos \phi$ ) merupakan perbandingan antara besar daya aktif dengan daya semu. Adanya beban induktif atau beban kapasitif menyebabkan pergeseran fasa faktor daya. Daya reaktif merupakan daya yang hilang, atau daya rugi-rugi sehingga semakin besar sudutnya atau semakin kecil faktor dayanya maka rugi ruginya semakin besar.

$$\text{Pf}(\cos) \phi = \frac{P \text{ (Watt)}}{S \text{ (VA)}} \quad (2.16)$$

Beban yang ada pada sistem bervariasi serta beban yang dipakai besarnya berubah-ubah sepanjang waktu. Jika beban meningkat maka tegangan diujung penerimaan menurun dan sebaliknya bila beban berkurang maka tegangan diujung penerimaan naik. Adanya impedansi seri penghantar saluran dan rugi daya merupakan faktor lain yang ikut mempengaruhi perubahan tegangan sistem. Maka dari itu pada umumnya konsumen yang letaknya dekat dari titik pelayanan akan

---

<sup>11</sup>Ahmad Rifqi Hadiyanto, Monitoring Sistem Per Penyulang, PT PLN (Persero), Telaah Staf, 2006, Hal. 9.

menerima tegangan lebih besar, namun tegangan yang diterima konsumen yang letaknya jauh dengan pusat pelayanan pada umumnya akan menerima tegangan relatif lebih rendah. Adanya hubungan antara tegangan dan daya reaktif menyebabkan perubahan tegangan. Jatuh tegangan dalam penghantar sebanding dengan daya reaktif yang mengalir dalam penghantar tersebut. Besarnya rugi daya pada saluran 3 fasa dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot L \cdot LLF \cdot LDF \quad (2.17)$$

Dimana :

- $\Delta P$  = Rugi daya pada saluran ( MW)
- $R$  = Tahanan jaringan (  $\Omega$ /Km)
- $L$  = Panjang jaringan (Km)
- $I$  = Besar kuat arus pada beban (A)
- $LLF$  = *Loss Load Factor*
- $LDF$  = *Load Density Factor* (0,333)

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

$$LLF = 0,3 LF + 0,7 (LF)^2 \quad (2.18)$$

Dimana :

$LF$  = *Load Factor* sistem region

Faktor beban (*Load Factor*) merupakan perbandingan dari nilai kebutuhan rata-rata dengan nilai kebutuhan maksimum, merupakan satuan desimal.

Ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$L_f = \frac{I_{rata-rata}}{I_{puncak}} \quad (2.19)$$

## 2.9 Electric Transient and Analysis Program (ETAP19.0.1)<sup>12</sup>

ETAP PowerStation adalah *software* untuk power system yang bekerja berdasarkan plant (project). Setiap plant harus menyediakan modelling peralatan

---

<sup>12</sup> Anton Firmansyah, Modul Pelatihan ETAP, Palembang, 2019, Hal. 1.

dan alat - alat pendukung yang berhubungan dengan analisa yang akan dilakukan. Misalnya generator, data motor, data kabel dll. Sebuah plant terdiri dari subsistem kelistrikan yang membutuhkan sekumpulan komponen elektrik yang khusus dan saling berhubungan. Dalam *PowerStation*, setiap plant harus menyediakan data base untuk keperluan itu.

ETAP *PowerStation* dapat melakukan penggambaran single line diagram secara grafis dan mengadakan beberapa analisa/studi yakni:

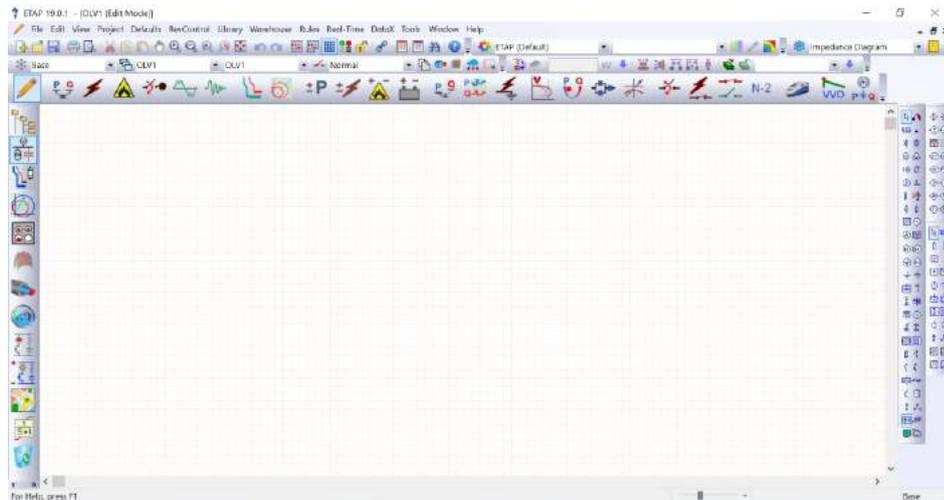
- a. *Load Flow Analysis*
- b. *Unbalanced Load Flow Analysis*
- c. *Short Circuit Analysis*
- d. *Motor Acceleration Analysis*
- e. *Harmonic Analysis*
- f. *Transient Analysis*

ETAP *PowerStation* juga menyediakan fasilitas *Library* yang akan mempermudah desain suatu sistem kelistrikan. *Library* ini dapat diedit atau dapat ditambahkan dengan informasi peralatan bila perlu. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam bekerja dengan ETAP *PowerStation* adalah :

1. *One Line Diagram*, menunjukkan hubungan antar komponen/peralatan listrik sehingga membentuk suatu sistem kelistrikan.
2. *Library*, informasi mengenai semua peralatan yang akan dipakai dalam sistem kelistrikan. Data elektrik maupun mekanis dari peralatan yang detail/lengkap dapat mempermudah dan memperbaiki hasil simulasi/analisa.
3. Standar yang dipakai, biasanya mengacu pada standar IEC atau ANSI, frekuensi sistem dan metode – metode yang dipakai
4. *Study Case*, berisikan parameter – parameter yang berhubungan dengan metode studi yang akan dilakukan dan format hasil analisa.

Persiapan yang perlu dilakukan dalam analisa / desain dengan bantuan ETAP *PowerStation* adalah :

1. *Single Line Diagram*
2. Data peralatan baik elektrik maupun mekanis
3. *Library* untuk mempermudah editing data



Gambar 2. 13 Tampilan New Project ETAP19.0.1

(Sumber : Dokumen Pribadi)



Gambar 2. 14 Menu Bar pada ETAP19.0.1

(Sumber : Dokumen Pribadi)