

**Gambar 2.2** Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

## 2.2 Gardu Induk

Gardu induk adalah subsistem dari sistem transmisi tenaga atau bagian integral dari sistem transmisi. Distribusi (transmisi) merupakan subsistem dari sistem tenaga listrik. Artinya gardu induk merupakan subsistem dari sistem kelistrikan. Sebagai subsistem jaringan transmisi, gardu induk memegang peranan penting dalam pengoperasiannya yang tidak dapat dipisahkan dari keseluruhan sistem transmisi. Gardu Induk dibangun sebagai gardu konvensional yang sebagian besar komponennya berada di luar bangunan kecuali komponen kontrol, sistem proteksi dan kontrol serta komponen pendukung lainnya.. (Yusmartato et al., 2017)

### 2.2.1 Gardu Induk Berdasarkan Tegangan

gardu induk dapat dibedakan menjadi 2 macam berdasarkan tegangannya, yaitu: (Munandar A, Kuwahara, 2013) :

#### 1. Gardu Induk Transmisi

Yaitu gardu yang menerima listrik dari saluran transmisi listrik dan mendistribusikannya ke daerah beban (taman industri, daerah perkotaan, dll).

Gardu transmisi di PLN memiliki tegangan tinggi 150 kV dan tegangan tinggi 70 kV.

## 2. Gardu Induk Distribusi

Dimana gardu induk menerima listrik dari gardu transmisi dengan cara menurunkan tegangan melalui trafo ke tegangan menengah (20 KV, 12 KV atau 6 KV), kemudian menurunkan tegangan ke tegangan rendah (127/220V atau (220/380V)) berdasarkan permintaan.

### 2.2.2 Gardu Induk Berdasarkan Fungsinya

Berdasarkan fungsinya, gardu induk dapat dibedakan menjadi 5 macam yaitu: (Munandar A, Kuwahara, 2013)

#### 1. Gardu Induk Penaik Tegangan

Sebagai gardu induk yang beroperasi untuk menaikkan tegangan, yaitu tegangan generator dinaikkan oleh tegangan sistem. Gardu induk ini terletak di lokasi pembangkit listrik. Karena tegangan keluaran yang dihasilkan oleh pembangkit listrik kecil dan perlu didistribusikan dalam jarak jauh, agar efektif, tegangan dinaikkan menjadi tegangan super atau tegangan tinggi.

#### 2. Gardu Induk Penurun Tegangan

Sebagai gardu induk yang bertugas menangani tegangan rendah, dari tegangan tinggi ke tegangan rendah dan tegangan menengah, disebut juga dengan tegangan distribusi. Gardu induk terletak di kawasan pusat beban, karena di gardu inilah pelanggan (muatan) dilayani.

#### 3. Gardu Induk Pengatur Tegangan

Umumnya gardu induk jenis ini letaknya jauh dari pembangkit. Karena arus ditransmisikan sangat jauh, terjadi penurunan tegangan transmisi yang besar.

Jadi harus menaikkan voltase, seperti satu set kapasitor, agar voltase kembali normal.

#### 4. Gardu Induk Pengatur Beban

Digunakan untuk mengatur beban. Pada gardu induk ini dipasang beban penggerak, pada suatu saat menjadi generator, mesin berubah menjadi generator, pada titik tertentu generator menjadi mesin atau menjadi tenaga bantu beban, generator berubah menjadi mesin yang memompa air kembali ke kolam utama.

#### 5. Gardu Distribusi

Gardu induk mentransmisikan listrik dari tegangan sistem ke tegangan distribusi. Gardu induk ini terletak di dekat pusat beban.

### **2.3 Pengertian Jaringan Distribusi**

Sistem jaringan distribusi adalah suatu kesatuan yang membagi energi listrik dari gardu induk (pembangkit listrik) ke konsumen (pengguna) pada tingkat tegangan yang dibutuhkan. Jaringan distribusi terdiri dari dua bagian, bagian pertama adalah jaringan menengah/primer (JTM) 20 kV dan bagian kedua adalah jaringan rendah/sekunder (JTR) dengan tegangan 380/220 Volt, transformator distribusi ditempatkan diantara JTM dan JTR memiliki efek mengurangi tegangan. Maka fungsi distribusi daya adalah: (Ipa & Di, 2017)

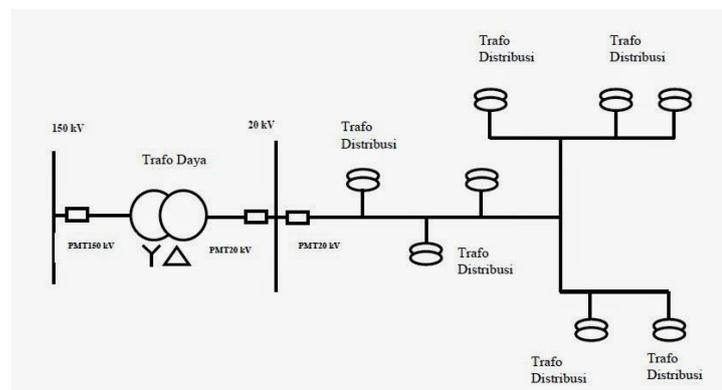
1. Membagikan tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan)
2. Merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan (Suhadi, Tri Wrahatnoto, 2008).

### 2.3.2 Sistem Distribusi Primer

Sistem distribusi primer digunakan untuk menyalurkan daya dari gardu distribusi ke pusat beban. Sistem ini dapat menggunakan saluran udara, saluran udara atau kawat tanah tergantung pada tingkat keandalan yang diinginkan dan kondisi serta situasi lingkungan. Saluran distribusi ini meluas ke area yang akan disuplai ke pusat beban. Tegangan yang digunakan adalah level 20 kV. Ada berbagai bentuk rangkaian jaringan distribusi utama, yaitu:

#### 1. Jaringan Distribusi Radial

Sistem distribusi pola radial merupakan sistem distribusi yang paling sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang mensuplai daya ke beberapa gardu distribusi radial.



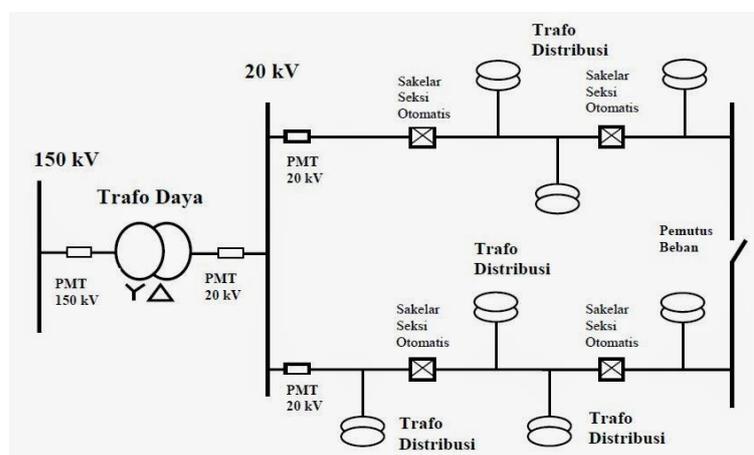
**Gambar 2.3** Konfigurasi Jaringan Radial

Keunggulan dari sistem ini adalah tidak rumit dan lebih murah dibandingkan sistem lainnya. Namun, keandalan sistem ini lebih rendah daripada sistem lain. Ketidakstabilan tersebut karena hanya ada satu jalur utama yang mensuplai daya ke gardu distribusi, sehingga jika jalur utama terganggu, seluruh stasiun juga akan berhenti bekerja. Kerugian lainnya adalah kualitas tegangan di

ujung gardu distribusi kurang baik, karena penurunan tegangan terbesar ada di ujung saluran. (David, 2011)

## 2. Jaringan Distribusi *Loop/Ring*

Jaringan distribusi cincin atau ring ini merupakan bentuk tertutup. Ketika tata letak rangkaian saluran membentuk cincin, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 dapat dilihat di bawah ini, berapa banyak beban yang didistribusikan dari dua arah saluran untuk memastikan kelangsungan saluran, karena kerugian daya dan tegangan turun lebih rendah.

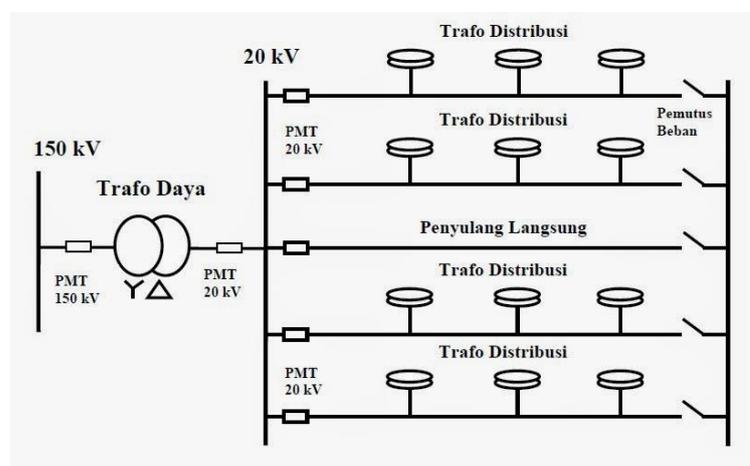


**Gambar 2.4** Konfigurasi Sistem *Loop*

Struktur jaringan ini merupakan kombinasi dari dua topologi jaringan radial, di mana pemutus sirkuit (PMT) dan pemisah (PMS) dipasang di ujung kedua jaringan. Dengan demikian, ketika terjadi gangguan, PMT dan PMS akan bertindak untuk mengisolasi gangguan, distribusi tenaga jenis ini lebih andal daripada jenis radial, tetapi biaya investasinya lebih tinggi. (Ii & Pustaka, 2002)

### 3. Jaringan Distribusi Spindel

Sistem pengiriman ini digunakan untuk pelanggan kritis yang tidak dapat dimatikan (Bandara, Rumah Sakit, dll). Sistem ini memiliki minimal dua saluran penyulang sekaligus dengan penambahan *Automatic Change Over Switch/Automatic Transfer Switch*, setiap saluran penyulang dihubungkan dengan gardu pelanggan khusus jika salah satu saluran listrik terganggu, aliran listrik akan terputus mati pasokan akan dialihkan ke penyulang lain.



**Gambar 2.5** Konfigurasi Sistem Spindel

#### 2.3.3 Sistem Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi sekunder merupakan jaringan distribusi tegangan rendah yang dimulai dari trafo distribusi sampai ke kWh meter konsumen. Tergantung pada lokasi jaringan, jaringan tegangan rendah dibagi menjadi dua yaitu: (Kawihing et al., 2013)

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR)
2. Saluran Kabel Tegangan Rendah (SKTR)

## **2.4 Tegangan Distribusi**

Tegangan untuk jaringan distribusi dapat dibagi menjadi beberapa jenis, antara lain: (Ipa & Di, 2017)

### **1. Tegangan Menengah (TM)**

Tegangan menengah adalah tegangan dengan rentang nilai dari 1 kV hingga 30 kV. Di Indonesia menggunakan tegangan rata-rata 20 kV. Tegangan menengah digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk ke gardu distribusi atau langsung ke pelanggan tegangan menengah.

### **2. Tegangan Rendah**

Tegangan rendah adalah tegangan dengan nilai kurang dari 1 kV yang digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke pelanggan dengan menggunakan tegangan rendah. Distribusi dilakukan dengan menggunakan sistem tiga fase, empat kabel yang dilengkapi dengan netral. Di Indonesia menggunakan tegangan rendah 380/220 V. Dengan 380 V sebagai tegangan fasa besar dan 220 volt sebagai tegangan fasa netral.

## **2.5 Transformator Distribusi**

Transformator distribusi adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah. Tujuan dari penggunaan transformator distribusi adalah untuk mengurangi tegangan utama dari sistem distribusi listrik menjadi tegangan untuk penggunaan konsumen.



**Gambar 2.6** Transformator Distribusi

Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator *step-down* 20kV/400V 3 fasa dan satu fasa, dan ada juga yang menggunakan 3 buah yang menggunakan 3 buah transformator satu fasa. Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380 V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada tegangan rendahnya dibuat diatas 380V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380V. (Kodoati et al., 2015)

## **2.6 Konstruksi Jaringan Tenaga Listrik Tegangan Menengah**

Pada pendistribusian tenaga listrik di suatu kawasan, sistem tegangan menengah dijadikan jaringan utama pendistribusian tenaga listrik ke pelanggan. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk menghindarkan rugi-rugi penyaluran (*losses*) dengan kualitas persyaratan tegangan yang harus dipenuhi oleh PT PLN Persero selaku pemegang Kuasa Usaha Utama sebagaimana diatur dalam UU ketenagalistrikan No 30 tahun 2009. Tegangan operasi dari jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia sendiri telah ditetapkan sebesar 20 kV. Jaringan tegangan menengah pada sistem distribusi di Indonesia dimulai dari terminal keluar (*out-going*) pemutus tenaga dari transformator penurun tegangan Gardu Induk atau transformator penaik tegangan pada pembangkit untuk sistem

distribusi skala kecil, hingga peralatan pemisah/proteksi sisi masuk (*in-coming*) transformator distribusi 20 kV-231/400V. Konstruksi jaringan tenaga listrik tegangan menengah dapat dikelompokkan menjadi tiga macam konstruksi sebagai berikut (PT. PLN Persero, 2010:3): (Mathematics, 2016)

### **2.6.1 Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM)**

Saluran udara tegangan menengah (SUTM) adalah sebagai konstruksi termurah untuk penyaluran tenaga listrik pada daya yang sama. Konstruksi ini terbanyak digunakan untuk konsumen jaringan tegangan menengah yang digunakan di Indonesia. Ciri utama jaringan ini adalah penggunaan penghantar telanjang yang ditopang dengan isolator pada tiang besi/beton.

Penghantar yang digunakan pada saluran udara tegangan menengah (SUTM) ini adalah konduktor dengan bahan utama tembaga (CU) atau aluminium (Al) yang dipilin bulat padat. Pilihan konduktor penghantar telanjang yang memenuhi pada dekade ini adalah AAAC atau AAC. Sebagai akibat tingginya harga tembaga dunia, saat ini belum memungkinkan penggunaan penghantar berbahan tembaga sebagai pilihan yang baik (PT. PLN Persero, 2010:3).

Penggunaan penghantar telanjang, dengan sendirinya harus diperhatikan sektor yang terkait dengan keselamatan ketenagalistrikan seperti jarak aman minimum. Jarak aman adalah jarak antara bagian aktif/netral dari jaringan terhadap benda-benda disekelilingnya baik secara mekanis atau elektromagnetis yang tidak memberikan pengaruh membahayakan.

Jarak aman minimal adalah 60 cm kecuali terhadap jaringan telekomunikasi. Jarak aman terhadap saluran telekomunikasi minimal 2,5 meter. Jarak aman terhadap benda-benda lainnya dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini:

**Tabel 2.1** Jarak Aman Saluran Udara Tegangan Menengah (PT PLN Persero, 2010:101)

No	Uraian	Jarak Aman
1	Terhadap permukaan jalan raya	$\geq 6$ meter
2	Balkon Rumah	$\geq 2,5$ meter
3	Atap rumah	$\geq 2$ meter
4	Dinding bangunan	$\geq 2,5$ meter
5	Antena TV/Radio, menara	$\geq 2,5$ meter
6	Pohon	$\geq 2,5$ meter
7	Lintasan kereta api	$\geq 2$ meter dari atap kereta
8	Under build TM-TM	$\geq 1$ meter
9	Under build TM-TR	$\geq 1$ meter

### 2.6.2 Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah (SKUTM)

Untuk lebih meningkatkan keamanan dan keandalan penyaluran tenaga listrik, penggunaan penghantar telanjang atau penghantar berisolasi setengah pada konstruksi jaringan saluran udara tegangan menengah 20 KV, dapat juga digantikan dengan konstruksi penghantar berisolasi penuh yang dipilin. Isolasi penghantar tiap fasa tidak perlu di lindungi dengan pelindung mekanis. Berat kabel pilin menjadi pertimbangan terhadap pemilihan kekuatan beban kerja tiang beton penopangnya (PT. PLN Persero, 2010:4). Saluran kabel udara tegangan menengah adalah saluran udara tegangan menengah yang menggunakan kabel sebagai sarana penghantar. Terdapat dua jenis kabel yang dipakai (PT. PLN Persero, 2010:15) :

- a. Kabel udara dengan ketahanan isolator 6 kV/half insulated-AAAC-S yang berukuran 150 mm<sup>2</sup> dan 70 mm<sup>2</sup> . Hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan AAAC-S ini adalah apabila melakukan penggantian AAAC

menjadi AAAC-S, mengingat beban massa jaringan bertambah 37 %. Perlu dipertimbangkan pemasangan penopang tiang/*guy wire* pada tiang-tiang sudut dan tiang akhir.

- b. Kabel udara dengan ketahanan isolator penuh / 24 kV/ fasa-fasa dari jenis NFA2XSEY-T, berukuran (3x150 Al+90 SE) dan (3x70 Al+70 SE). Mengingat berat massa kabel ini, kekuatan tiang untuk SKUTM memakai tiang 350 daN.

Ruang bebas (*right of way*) dan jarak aman (*safety clearance*) pada konstruksi SKUTM harus tetap memenuhi syarat keamanan lingkungan dan keandalan. Saluran Kabel Udara Tegangan Menengah yang menggunakan kabel *twisted*, jarak aman sekurang-kurangnya 60 cm, dan ruang bebas kabel tidak boleh bersentuhan dengan pohon/bangunan. Pada titik sambungan SKUTM kabel *twisted* dan SUTM AAAC, jarak aman sama dengan ketentuan pada SUTM AAAC.

### **2.6.3 Saluran Kabel Tanah Tegangan Menengah (SKTM)**

Konstruksi SKTM ini adalah konstruksi yang aman dan andal untuk mendistribusikan tenaga listrik tegangan menengah, tetapi relatif lebih mahal untuk penyaluran daya yang sama. Keadaan ini dimungkinkan dengan konstruksi isolasi penghantar per fasa dan pelindung mekanis yang dipersyaratkan. Pada rentang biaya yang diperlukan, konstruksi ditanam langsung adalah termurah bila dibandingkan dengan penggunaan konduit atau bahkan *tunneling* (terowongan beton).

Penggunaan saluran kabel bawah tanah tegangan menengah (SKTM) sebagai jaringan utama pendistribusian tenaga listrik adalah sebagai upaya utama peningkatan kualitas pendistribusian. Dibandingkan dengan SUTM, penggunaan SKTM akan memperkecil resiko kegagalan operasi akibat faktor eksternal/meningkatkan keamanan ketenagalistrikan (PT. PLN Persero, 2010:4).

## **2.7 Pengertian Daya**

Daya berarti energi per satuan waktu (Von Meier Alexander, 2006). Kapasitas adalah jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha dalam sistem kelistrikan. Satuan daya listrik biasanya Watt. Daya pada sistem tegangan bolak-balik (AC) dikenal ada tiga macam, yaitu daya aktif (aktual) (P) satuannya Watt (W), daya reaktif dengan lambang (Q) satuannya volt-ampere reaktif (VAR ) dan daya semu memiliki lambang (S) satuannya adalah volt-ampere (VA). (Suseno et al., 2006)

Kualitas daya mengacu pada berbagai fenomena elektromagnetik yang dicirikan oleh tegangan dan arus pada waktu dan tempat tertentu dalam sistem tenaga (Dugan and McGranaghan, 2003). Ada empat alasan isu kualitas daya listrik harus diperhatikan: (Pendidikan et al., 2020)

- a. Karakteristik beban saat ini lebih banyak yang bekerja berdasarkan pada kendali mikroprosesor dan peralatan elektronika daya yang sensitif terhadap gangguan-gangguan listrik.
- b. Adanya penekanan pada kenaikan efisiensi sistem tenaga listrik yang menyebabkan terjadinya pertumbuhan yang berlanjut dalam penerapan peralatan berefisiensi tinggi, penggerak motor yang dapat merubah kecepatan, dan kapasitor dalam memperbaiki faktor daya untuk menurunkan rugi-rugi.

- c. Meningkatnya tingkat kesadaran konsumen terhadap kualitas daya listrik, sehingga membuat konsumen berharap pengusaha listrik untuk memperbaiki kualitas daya yang disuplai.
- d. Banyak peralatan–peralatan yang terinterkoneksi pada jaringan. Dalam proses yang terintegrasi kegagalan suatu komponen dapat dengan mudah terjadi dan akan menimbulkan konsekuensi yang lebih besar.

Pada dasarnya daya listrik dibagi menjadi tiga yaitu:

#### 1. Daya Aktif

Daya aktif adalah daya rata-rata yang sesuai dengan daya aktual yang disalurkan atau dikonsumsi oleh beban (Von Meier Aleander, 2006). Beberapa contoh energi aktif adalah energi panas, energi mekanik, cahaya, dan energi aktif dalam satuan watt (W). Ini adalah persamaan daya aktif: (Suseno et al., 2006)

$$\text{Untuk 1 fasa: } P_{1\phi} = V_{LN} \cdot I_{1\phi} \cdot \text{Cos } \varphi \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Untuk 3 fasa: } P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_{3\phi} \cdot \text{Cos } \varphi \dots\dots\dots (2)$$

Dimana,

P	= Daya Aktif (Watt)
$V_{LN}$	= Tegangan (1 fasa) (Volt)
$V_{LL}$	= Tegangan Saluran (Volt)
$I_{1\phi}$	= Arus (1 fasa) (Amper)
$I_{3\phi}$	= Arus (3 fasa) (Amper)
$\text{Cos } \varphi$	= Faktor Daya

## 2. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah besarnya listrik yang dibutuhkan untuk membentuk medan magnet (Von Meier Alexander, 2006). Dari pembentukan medan magnet tersebut akan terbentuk fluks magnet. Contoh energi yang menghasilkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar, dan lain-lain. Daya reaktif memiliki satuan berupa volt-ampes reaktif (VAR). Ini adalah persamaan daya reaktif: (Suseno et al., 2006)

$$\text{Untuk 1 fasa: } Q_{1\phi} = V_{LN} \cdot I_{1\phi} \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Untuk 3 fasa: } Q_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_{3\phi} \cdot \sin \varphi \dots\dots\dots (4)$$

Dimana,

Q	= Daya Reaktif (VAR)
$V_{LN}$	= Tegangan (1 fasa) (Volt)
$V_{LL}$	= Tegangan Saluran (Volt)
$I_{1\phi}$	= Arus (1 fasa) (Amper)
$I_{3\phi}$	= Arus (3 fasa) (Amper)
$\sin \varphi$	= Besaran Vektor Daya

## 3. Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan dari perkalian tegangan dan arus dalam jaringan (Von Meier Alexander, 2006) atau daya yang merupakan hasil penjumlahan 8 daya aktif dan reaktif trigonometri. Daya semu adalah daya yang dipancarkan oleh sumber arus bolak-balik (AC) atau diserap oleh beban. Satuan daya semu adalah volt-ampere (VA). Ini adalah persamaan daya semu: (Suseno et al., 2006)

Untuk 1 fasa:  $S_{1\phi} = V_{LN} \cdot I_{1\phi}$  ..... (5)

Untuk 3 fasa:  $S_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{LL} \cdot I_{3\phi}$  ..... (6)

Dimana,

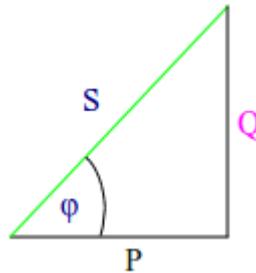
S = Daya Semu (VA)

$V_{LN}$  = Tegangan (1 fasa) (Volt)

$V_{LL}$  = Tegangan Saluran (Volt)

$I_{1\phi}$  = Arus (1 fasa) (Amper)

$I_{3\phi}$  = Arus (3 fasa) (Amper)



**Gambar 2.7** Segitiga Daya

Segitiga daya adalah segitiga yang menggambarkan hubungan matematis antara daya berdasarkan prinsip trigonometri. Maka berlaku hubungan: (Pendidikan et al., 2020)

$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  ..... (7)

$P = S \cdot \cos \phi$  ..... (8)

$Q = S \cdot \sin \phi$  ..... (9)

## 2.8 Faktor Daya

Faktor daya dapat dianggap sebagai besaran yang menunjukkan efisiensi jaringan dalam mendistribusikan energi yang dapat digunakan. Faktor daya dibatasi dari 0 sampai 1, semakin tinggi faktor daya (mendekati 1) berarti semakin jelas daya dapat digunakan dari jumlah daya yang sama. Berdasarkan SPLN 70-1 faktor daya  $\geq 0,85$ . Faktor daya dapat dinyatakan dengan rumus: (Ndikade et al., 2022)

$$\text{Faktor Daya} = \cos \varphi = \frac{P}{V.I} = \frac{V.I \cdot \cos \varphi}{V.I} = \frac{\text{Watt}}{\text{Volt Ampere}} \dots \dots \dots (10)$$

Dimana:

P = Daya Aktif

Dalam suatu sistem kelistrikan terdapat 3 jenis faktor daya, yaitu faktor daya *leading*, faktor daya *lagging* dan faktor daya *unity* yang ditentukan oleh jenis beban pada sistem.. (Razikin, n.d.)

### 1. Faktor Daya *Unity*

Faktor daya *unity* adalah keadaan di mana nilai  $\cos \varphi$  sama dengan satu dan beda potensial sefasa dengan arus listrik. Faktor daya *unity* akan terjadi jika jenis beban adalah resistif murni.

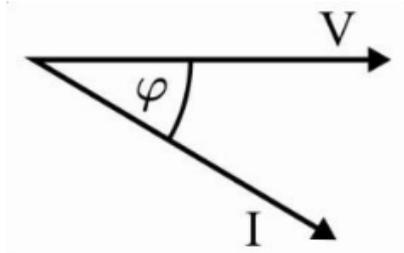


**Gambar 2.8** Arus sefasa dengan tegangan

### 2. Faktor Daya *Lagging*

Faktor daya terbelakang (*lagging*) merupakan keadaan faktor daya ketika memiliki kondisi sebagai berikut:

- a. Beban/ peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif.
- b. Arus (I) tertinggal dari tegangan (V), V mendahului I dengan sudut  $\varphi$

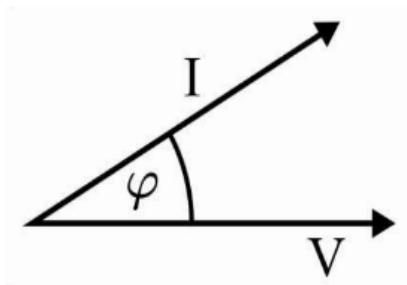


**Gambar 2.9** Arus tertinggal dari tegangan sebesar sudut  $\varphi$

### 3. Faktor Daya *Leading*

Faktor daya mendahului (*leading*) yaitu keadaan faktor daya ketika memiliki kondisi sebagai berikut:

- a. Beban/peralatan listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif.
- b. Arus mendahului tegangan, V tertinggal dari I dengan sudut  $\varphi$



**Gambar 2.10** Arus mendahului tegangan sebesar sudut  $\varphi$

## 2.9 Rugi-rugi Daya Pada Sistem Tenaga Listrik

Sistem distribusi yang memediasi saluran transmisi tegangan tinggi memiliki level tegangan yang lebih rendah, sehingga arus yang melalui saluran lebih tinggi, dan arus yang tinggi juga menyebabkan kerugian yang tinggi. Hal ini akan sangat mempengaruhi turunnya kapasitansi dan tegangan listrik pada titik busbar beban. Rugi daya yang terjadi pada saluran (konduktor) dapat dihitung menurut persamaan berikut:

$$P_{Losses} = I^2 \cdot R \dots\dots\dots (11)$$

Dimana,

- $P_{Losses}$  = Rugi-rugi daya (Watt)
- $I$  = Arus (Ampere)
- $R$  = Resistansi saluran (Ohm)

Rugi daya pada sistem catu daya tidak dapat dihilangkan, namun dapat diminimalkan. Ada rugi-rugi daya yang bersifat teknis dan ada rugi-rugi nonteknis. Kehilangan daya teknis terjadi sebagai kehilangan daya pada perangkat listrik, seperti motor listrik, transformator, dll. Kerugian daya teknis dapat dihitung dan diatur untuk diminimalkan. Sedangkan rugi daya non teknis dapat berupa pencurian listrik, tidak terbayarnya konsumen, salah perhitungan rugi daya, dan lain-lain. (Budiharjo, 2014)

Rugi-rugi pada tiga fasa dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut: (Listrik, 2021)

$$P_{3\phi} = 3 \cdot I_{3\phi}^2 \cdot R \cdot \ell \dots\dots\dots (12)$$

Dimana,

$P_{3\phi}$  = Rugi-rugi daya (3 fasa) (Watt)

$I_{3\phi}$  = Arus Saluran (3 fasa) (Ampere)

$R$  = Resistansi saluran (Ohm)

$\ell$  = Panjang penghantar (km)

## 2.10 Jatuh Tegangan

Drop tegangan adalah penurunan atau hilangnya nilai tegangan pada suatu penghantar dibandingkan dengan nilai tegangan normalnya, disebut juga dengan drop tegangan yaitu perbedaan antara tegangan dasar (sumber) dan tegangan terminal (beban) dari suatu instalasi listrik (Lily, 2015:5). Besarnya rugi tegangan atau drop tegangan yang terjadi pada suatu sistem kelistrikan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: (Suprianto, 2018)

### 1. Panjang Kabel Penghantar

Semakin panjang kabel penghantar yang digunakan maka semakin besar rugi tegangan atau voltage drop yang terjadi.

### 2. Besar Arus

Semakin besar arus yang mengalir melalui penghantar tersebut, semakin besar rugi tegangan atau jatuh tegangan yang terjadi.

### 3. Tahanan Jenis (Rho)

Semakin tinggi resistivitas bahan penghantar yang digunakan maka semakin besar jatuh atau drop tegangan yang terjadi. Kombinasi resistansi dan reaktansi disebut impedansi yang dinyatakan dalam satuan ohm. (Stevenson, 1994:89).

#### 4. Luas Penampang Penghantar

Semakin besar penampang konduktor yang digunakan, semakin rendah penurunan tegangan.

Rumus drop tegangan adalah sebagai berikut:

$$V_d = \frac{\ell \times I \times 2}{A \times \lambda}$$

Dimana,

$V_d$  = Drop Tegangan (Volt)

$\ell$  = Panjang Saluran (Meter)

$I$  = Arus (Ampere)

$A$  = Luas Penampang ( $mm^2$ )

$\lambda$  = Daya hantar jenis aluminium yaitu 32,7

### 2.11 Tap Transformator

Tap changer adalah alat perubahan perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik dari tegangan jaringan primer yang berubah ubah.

Tap *changer* yang dapat beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan berbeban disebut “*On Load Tap Changer (OLTC)*” dan dapat beroperasikan secara manual atau otomatis. Untuk memenuhi kualitas tegangan pelayanan suatu kebutuhan konsumen (PLN Distribusi) tegangan keluaran harus dapat di ubah sesuai keinginan. Untuk memenuhi hal tersebut, maka pada salah satu atau pada kedua sisi belitan transformator dibuat Tap (penyadap) untuk merubah perbandingan transformasi (rasio) trafo.

Tap changer dari transformator daya digunakan untuk mengatur tegangan keluaran transformator. Karena tegangan pada jaringan listrik tidak sama persis, untuk membuat transformator tidak bermasalah dalam posisi di grid yang bisa memberi nilai tegangan pengenalan, transformator pada lilitan tegangan tinggi menetapkan sejumlah keran dan akan disadap tombol tekan dengan membuka tentang grid yang terhubung. Dengan cara ini saklar dapat di hubungkan dengan gulungan transformator yang berbeda untuk mengubah rasio putaran gulungan tegangan tinggi dan rendah, sehingga dapat menyesuaikan tegangan keluaran pada transformator. (Syahputra et al., 2020)

Prinsip pengaturan tegangan sekunder berdasarkan perubahan jumlah belitan primer atau sekunder. (Harahap & Pakpahan, 2018)

$$E = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha$$

Dimana,

$E$  = GGL induksi (Volt)

$V_1$  = Tegangan primer

$V_2$  = Tegangan sekunder

$N_1$  = Belitan primer

$N_2$  = Belitan sekunder

$\alpha$  = Perbandingan transformator

Jika belitan primer berkurang tegangan per belitan akan bertambah, sehingga tegangan sekunder bertambah juga. Pengurangan belitan primer mempunyai pengaruh yang sama dengan penambahan belitan sekunder. Beberapa

faktor akan dijelaskan di bawah ini yang dapat dibuat jadi pertimbangan, saat memutuskan sisi yang mana yang akan di pasang tappingnya:

1. Transformator dengan rasio belitan yang besar, disadap pada sisi tegangan tinggi, karena pengendalian tegangan keluaran lebih halus atau dengan kata lain sadapan pada belitan sisi tegangan tinggi memungkinkan merubah tegangan keluar dalam step yang cukup luas.
2. Penempatan tapping pada sisi tegangan tinggi hanya akan menangani arus yang kecil, walaupun isolasi diperlukan lebih banyak.
3. Pemasangan tap pada sisi sekunder cukup sulit karena pada umumnya belitan tegangan rendah dililit setelah inti, dan belitan tegangan tinggi dililit setelah belitan tegangan rendah. Oleh karena itu membuat tapping pada belitan tegangan tinggi lebih mudah.

Beberapa point di atas dapat dijadikan sebuah pertimbangan dalam memutuskan disisi transformator sebelah mana yang akan dipasang tapping.

### **2.12 Aplikasi ETAP 12.6.0**

Penggunaan komputer digital dalam menyelesaikan persoalan sistem tenaga listrik saat ini sudah mengalami perkembangan yang sangat pesat. Berbagai macam perangkat lunak dikembangkan dan terus dievaluasi unjuk kerjanya. Salah satu program yang digunakan dalam analisis sistem tenaga listrik yang menampilkan simulasi secara GUI (*Graphical User Interface*) adalah program ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*).

Dalam sebuah sistem kelistrikan, banyak hal yang harus diperhatikan, diantaranya jaringan distribusinya (mulai dari suplai sampai beban). Pada sistem

tersebut daya yang dihasilkan sumber (PLN ataupun genset) tidak 100% persen terpakai pada beban. Hal ini disebabkan adanya impedansi pada saluran yang menyebabkan rugi-rugi daya berubah menjadi kalor, maupun tipe beban yang tersambung pada jalur (tipe resistif, induktif, maupun kapasitif). ETAP *Power Station* memungkinkan kita bekerja atau menganalisis banyak hal hanya dengan diagram satu garis, diantaranya menganalisis *load flow*, *short circuit*, *harmonic*, maupun pengaman pada motor. *Software* ini dirancang dengan tiga konsep utama. Yaitu: *virtual reality operation*, *total integration data*, dan *simplicity in data entry*. Dalam ETAP 12.6 ini terdapat beberapa standar baku seperti: standar yang digunakan plant (ANSI atau IEC), frekuensi, maupun jenis-jenis elemennya (elemen AC, instrument, maupun elemen DC). Terutama pada lingkungan industri dimana sistem tersebut harus jelas dari suplai sampai beban. Berbagai macam jenis gangguan, dan jenis-jenis pengamannya dan ETAP 12.6 merupakan *software* yang terbaik untuk menganalisa secara keseluruhan sebuah sistem. (Pandapotan, 2017).