

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1

Deskripsi Sistem Tenaga Listrik⁵ 1

Sekalipun tidak terdapat suatu sistem tenaga listrik yang “tipikal”, namun pada umumnya dapat dikembalikan batasan pada suatu sistem yang lengkap mengandung empat unsur.

Pertama, adanya suatu unsur pembangkit tenaga listrik. Tegangan yang dihasilkan oleh pusat tenaga listrik itu biasanya merupakan tegangan menengah (TM). Kedua, suatu sistem transmisi, lengkap dengan gardu induk. Karena jaraknya yang biasanya jauh, maka diperlukan penggunaan tegangan tinggi (TT), atau tegangan ekstra tinggi (TET). Ketiga, adanya saluran distribusi, yang biasanya terdiri atas saluran distribusi primer dengan tegangan menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan tegangan rendah (TR). Keempat, adanya unsur pemakaian atau utilisasi, yang terdiri atas instalasi pemakaian tenaga listrik. Instalasi rumah tangga biasanya memakai tegangan rendah, sedangkan pemakai besar seperti industri mempergunakan tegangan menengah ataupun tegangan tinggi. Gambar 2.1. memperlihatkan skema suatu sistem tenaga listrik. Perlu dikemukakan bahwa suatu sistem dapat terdiri atas beberapa subsistem yang saling berhubungan, atau yang biasa disebut sebagai sistem interkoneksi. Kiranya jelas bahwa arah mengalirnya energi listrik berawal dari Pusat Tenaga Listrik melalui saluran-saluran transmisi dan distribusi dan sampai pada instalasi pemakai yang merupakan unsur utilisasi.

⁵ Kadir, Abdul. 2000. *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Hlm 3

1

Politeknik Negeri Sriwijaya



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Keterangan:

PTL : Pembangkit Tenaga Listrik

GI : Gardu Induk

TT : Tegangan Tinggi

TET : Tegangan Ekstra Tinggi

TM : Tegangan Menengah

GD : Gardu Distribusi

TR : Tegangan Rendah

2.1.1 Pembangkit Tenaga Listrik²

Pembangkit Tenaga Listrik adalah salah satu bagian dari sistem tenaga listrik, pada Pembangkit Tenaga Listrik terdapat peralatan elektrikal, mekanikal, dan bangunan kerja. Terdapat juga komponen-komponen utama pembangkitan yaitu generator, turbin yang berfungsi untuk mengkonversi energi (potensi) mekanik menjadi energi (potensi) listrik. Ada beberapa jenis pembangkit tenaga listrik yakni :

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU)

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

2.1.2 Saluran Transmisi⁸

Saluran Transmisi merupakan media yang digunakan untuk mentransmisikan tenaga listrik dari Generator Station/ Pembangkit Listrik sampai distribution station hingga sampai pada konsumen pengguna listrik. Tenaga listrik di transmisikan oleh suatu bahan konduktor yang mengalirkan tipe Saluran Transmisi Listrik.

Berdasarkan sistem transmisi dan kapasitas tegangan yang disalurkan terdiri:

1. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV-500kV
2. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV-150kV
3. Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT) 30kV-150kV

Jaringan Pada Sistem Distribusi Primer^{2 3}

Jaringan Pada Sistem Distribusi tegangan menengah (Primer 20kV) dapat dikelompokkan menjadi lima model, yaitu Jaringan Radial, Jaringan hantaran penghubung (*Tie Line*), Jaringan Lingkaran (Loop), Jaringan Spindel dan Sistem

¹ Ansyori, Insya. 2013. *Pembangkit Tenaga Listrik*.

⁸ PT.PLN (Persero) P3B Jawa Bali. 2011. *SUTT/SUTET*.

² Ardiansyah, A. 2010. *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*.

Gugus atau Kluster.

Sistem Radial

Merupakan jaringan sistem distribusi primer yang sederhana dan ekonomis. Pada sistem ini terdapat beberapa penyulang yang menyuplai beberapa gardu distribusi secara radial.

Gambar 2.2 Skema Saluran Sistem Radial

Namun keandalan sistem ini lebih rendah dibanding sistem lainnya. Kurangnya keandalan disebabkan karena hanya terdapat satu jalur utama yang menyuplai gardu distribusi, sehingga apabila jalur utama tersebut mengalami gangguan, maka seluruh gardu akan ikut padam. Kerugian lain yaitu mutu tegangan pada gardu distribusi yang paling ujung kurang baik, hal ini dikarenakan jatuh tegangan terbesar ada di ujung saluran.

Jaringan Hantaran Penghubung (*Tie Line*)

Sistem distribusi Tie Line seperti Gambar 2.3 digunakan untuk pelanggan penting yang tidak boleh padam (Bandar Udara, Rumah Sakit, dan lain-lain.)

Gambar 2.3 Skema Saluran Tie Line

Sistem Loop

Tipe ini merupakan jaringan distribusi primer, gabungan dari dua tipe jaringan radial dimana ujung kedua jaringan dipasang PMT. Pada keadaan normal tipe ini bekerja secara radial dan pada saat terjadi gangguan PMT dapat dioperasikan sehingga gangguan dapat terlokalisir. Tipe ini lebih handal dalam penyaluran tenaga listrik dibandingkan tipe radial namun biaya investasi lebih mahal.

Gambar 2.4 Skema Saluran Sistem Loop

Sistem Spindel

Sistem spindle menggunakan express feeder pada bagian tengah yang langsung terhubung dari gardu induk ke gardu hubung, sehingga sistem ini tergolong sistem yang handal. dalam pembangunannya, sistem ini sudah

memperhitungkan perkembangan beban atau penambahan jumlah konsumen sampai beberapa tahun ke depan, sehingga dapat digunakan dalam waktu yang cukup lama, hanya saja investasi pembangunannya juga lebih besar. proteksinya masih sederhana, mirip dengan sistem loop. pada bagian tengah penyulang biasanya dipasang gardu tengah yang berfungsi sebagai titik manufer ketika terjadi gangguan pada jaringan tersebut.

Gambar 2.5 Skema Saluran Sistem Spindel

Sistem Cluster

Sistem ini mirip dengan sistem spindle. bedanya pada sistem cluster tidak digunakan gardu hubung atau gardu switching, sehingga express feeder dari gardu hubung ke tiap jaringan. express feeder ini dapat berguna sebagai titik manufer ketika terjadi gangguan pada salah satu bagian jaringan.

Gambar 2.6 Skema Saluran Sistem Cluster

2.1.4. Sistem Distribusi Sekunder (Jaringan Tegangan Rendah 380/220V)

Sistem distribusi sekunder seperti pada Gambar 2.6 merupakan salah satu bagian dalam sistem distribusi, yaitu mulai dari gardu trafo sampai pada pemakai akhir atau konsumen.

Gambar 2.7 Hubungan tegangan menengah ke tegangan rendah dan konsumen

Melihat letaknya, sistem distribusi ini merupakan bagian yang langsung berhubungan dengan konsumen, jadi sistem ini berfungsi menerima daya listrik

dari sumber daya (trafo distribusi), juga akan mengirimkan serta mendistribusikan daya tersebut ke konsumen. mengingat bagian ini berhubungan langsung dengan konsumen, maka kualitas listrik selayaknya harus sangat diperhatikan.

Sistem penyaluran daya listrik pada Jaringan Tegangan Rendah dapat dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut :

1. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel telanjang (tanpa isolasi) seperti kabel AAAC, kabel ACSR.

2. Saluran Kabel Udara Tegangan Rendah (SKUTR) Jenis penghantar yang dipakai adalah kabel berisolasi seperti kabel LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*). ukuran kabel LVTC adalah : $2 \times 10 \text{mm}^2$, $2 \times 16 \text{mm}^2$, $4 \times 25 \text{mm}^2$, $3 \times 35 \text{mm}^2$, $3 \times 50 \text{mm}^2$, $3 \times 70 \text{mm}^2$.

Penyambungan JTR menurut SPLN No.74 tahun 1987 yaitu “sambungan JTR adalah sambungan rumah (SR) penghantar di bawah tanah atau di atas tanah termasuk peralatannya mulai dari titik penyambungan tiang JTR sampai alat pembatas dan pengukur (APP)”.

2.2 Gardu Distribusi

2.2.1 Deskripsi Umum Gardu Distribusi⁷ 4

Pengertian umum Gardu Distribusi tenaga listrik yang paling dikenal adalah suatu bangunan gardu listrik berisi atau terdiri dari instalasi Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Menengah (PHB-TM), Transformator Distribusi (TD) dan Perlengkapan Hubung Bagi Tegangan Rendah (PHB-TR) untuk memasok kebutuhan tenaga listrik bagi para pelanggan baik dengan Tegangan Menengah (TM 20 kV) maupun Tegangan Rendah (TR 220/380V).

Konstruksi Gardu distribusi dirancang berdasarkan optimalisasi biaya terhadap maksud dan tujuan penggunaannya yang kadang kala harus disesuaikan dengan peraturan Pemerintah daerah (Pemda) setempat.

Secara garis besar gardu distribusi dibedakan atas :

a. Jenis pemasangannya :

Gardu pasangan luar : Gardu Portal, Gardu Cantol

Gardu pasangan dalam : Gardu Beton, Gardu Kios

b. Jenis Konstruksinya :

⁷ PT.PLN (Persero). 2010. *Buku 4 Standar Konstruksi Gardu Distribusi dan Gardu Hubung Tenaga Listrik*. Hlm.1

Politeknik Negeri Sriwijaya

- a) Gardu Beton (bangunan sipil : batu, beton)
- b) Gardu Tiang : Gardu Portal dan Gardu Cantol
- c) Gardu Kios
- c. Jenis Penggunaannya :
 - a) Gardu Pelanggan Umum
 - b) Gardu Pelanggan Khusus

Khusus pengertian Gardu Hubung adalah gardu yang ditujukan untuk memudahkan manuver pembebanan dari satu penyulang ke penyulang lain yang dapat dilengkapi/tidak dilengkapi RTU (*Remote Terminal Unit*). Untuk fasilitas ini lazimnya dilengkapi fasilitas DC Supply dari Trafo Distribusi pemakaian sendiri atau Trafo distribusi untuk umum yang diletakkan dalam satu kesatuan.

2.2.2 Gardu Distribusi Sisipan¹⁰

Gardu sisipan merupakan gardu tambahan yang dipasang oleh PT.PLN untuk menanggulangi berbagai kerugian yang ditimbulkan oleh transformator pada gardu sebelumnya. Beberapa faktor yang dipertimbangkan oleh PT.PLN untuk menambah trafo atau gardu sisipan adalah :

Trafo sebelumnya sudah overload^{18 5}

Overload terjadi karena beban yang terpasang pada trafo melebihi kapasitas maksimum yang dapat dipikul trafo dimana arus beban melebihi arus beban penuh (*full load*) dari trafo. *Overload* akan menyebabkan trafo menjadi panas dan kawat tidak sanggup lagi menahan beban, sehingga timbul panas yang menyebabkan naiknya suhu lilitan tersebut. Kenaikan ini menyebabkan rusaknya isolasi lilitan pada kumparan trafo.

Besarnya drop tegangan pada JTR

Menurut SPLN No. 72 tahun 1987 pasal 4 ayat 19 tentang Pengaturan tegangan dan turun tegangan, bahwa jatuh tegangan yang diperbolehkan pada transformator distribusi dibolehkan 3% dari tegangan kerja. Turun tegangan pada STR dibolehkan sampai 4% dari tegangan kerja.

¹⁰ PT.PLN (Persero) Unit Pembangunan VIII. 2011. *PLN Bali Selatan Bangun 329 Gardu Sisipan*.

¹⁸ Thamrin, Fanoeel. 2012. *Studi Inferensi Fuzzy Tsukamoto untuk Penentuan Faktor Pembebanan Trafo PLN*.

2.3 Transformator²⁰

2.3.1 Definisi Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis. Dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya. Dalam bidang teknik listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

1. Transformator daya, yaitu transformator yang biasa digunakan untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi
2. Transformator distribusi, yaitu transformator yang biasa digunakan untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi
3. Transformator pengukuran, yaitu transformator yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

2.3.2 Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan alat yang memegang peran penting dalam sistem distribusi. Transformator distribusi mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator *step-down* 20KV/400V. Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380V. Karena terjadi drop tegangan, maka pada rak tegangan rendah dibuat di atas 380V agar tegangan pada ujung penerima tidak lebih kecil dari 380V.

2.3.3 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumparan (primer dan sekunder) yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi).

$$\dots\dots\dots (2.1)$$

²⁰ Zuhail. 1995. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Hlm 43

Dimana :

e = gaya gerak listrik (*Volt*)

N = jumlah lilitan

= perubahan fluks magnet (*weber/sec*)

Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik arus bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan arus bolak-balik antara rangkaian.

Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*).

2.3.4 Pembebanan Transformator

Menurut PT.PLN (Persero), transformator distribusi diusahakan agar tidak dibebani lebih dari 80 % atau dibawah 40 %. Jika melebihi atau kurang dari nilai tersebut transformator bisa dikatakan *overload* atau *underload*. Diusahakan agar trafo tidak dibebani keluar dari range tersebut. Bila beban trafo terlalu besar maka dilakukan penggantian trafo atau penyisipan trafo atau mutasi trafo. Rumus berikut dapat digunakan untuk melihat besar kapasitas trafo yang ada.

$$\text{kVA beban} = (I_R \times V_{R-N}) + (I_S \times V_{S-N}) + (I_T \times V_{T-N}) \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\% \text{ Persentase beban Transformator} = \dots\dots\dots \times 100 \% \dots\dots\dots (2.3)$$

2.4 Daya Listrik

Daya listrik didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Dalam sistem listrik AC/Arus Bolak-Balik ada tiga jenis daya yang dikenal, yaitu :

2.4.1 Daya semu

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

$$\text{Untuk 1 fasa : } S = V \times I \dots\dots\dots (2.4)^{17}$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \dots\dots\dots (2.5)^{15}$$

¹⁷ Subir, Ray. 2007. *Electrical Power System*. Hlm 17

¹⁵ Stevenson, William D. 1994. *Analisis Sistem tenaga Listrik*. Hlm 28

Dimana :

$S = \text{Daya semu (VA)}$

$V = \text{Tegangan antar saluran (Volt)}$

$I = \text{Arus saluran (Amper)}$

2.4.2 Daya Aktif

Daya aktif (daya nyata) merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya. Daya aktif ini merupakan pembentukan dari besar tegangan yang kemudian dikalikan dengan besaran arus dan faktor dayanya.

$$\text{Untuk 1 fasa : } P = V \times I \times \cos \emptyset \dots \dots \dots (2.6)^{17}$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos \emptyset \dots \dots \dots (2.7)^{15}$$

Dimana :

$P = \text{Daya Nyata (Watt)}$

$V = \text{Tegangan antar saluran (Volt)}$

$I = \text{Arus saluran (Amper)}$

$\cos \emptyset = \text{Faktor Daya (standar PLN 0,85)}$

2.4.3 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas. Daya reaktif ini adalah hasil kali antara besarnya arus dan tegangan yang dipengaruhi oleh faktor daya.

$$\text{Untuk 1 fasa : } Q = V \times I \times \sin \emptyset \dots \dots \dots (2.8)^{17}$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } Q = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \sin \emptyset \dots \dots \dots (2.9)^{15}$$

Dimana :

$Q = \text{Daya reaktif (VAR)}$

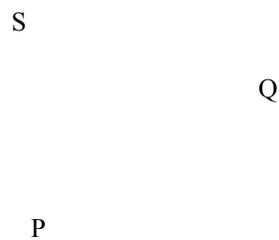
$V = \text{Tegangan antar saluran (Volt)}$

$I = \text{Arus saluran (Amper)}$

$\sin \emptyset = \text{Faktor Daya (tergantung nilai } \emptyset \text{)}$

2.4.4 Segitiga daya

Dari bermacam daya diatas maka daya listrik digambarkan sebagai segitiga siku, yang secara vektoris adalah penjumlahan daya aktif dan reaktif dan sebagai resultannya adalah daya semu.



Gambar 2.8 Segitiga daya

2.4.5 Faktor daya

Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu.

Secara teoritis, jika seluruh beban daya yang dipasok oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya satu, maka daya maksimum yang ditransfer setara dengan kapasitas sistim pendistribusian. Sehingga, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,5, maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA).

Faktor Daya / Faktor kerja menggambarkan sudut fasa antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi. Perbaikan faktor daya ini menggunakan kapasitor.

Dalam sistem tenaga listrik dikenal 3 jenis faktor daya yaitu faktor daya unity, faktor daya terbelakang (*lagging*) dan faktor daya terdahulu (*leading*) yang ditentukan oleh jenis beban yang ada pada sistem.

1. Faktor Daya *Unity*

Faktor daya unity adalah keadaan saat nilai $\cos \phi$ adalah satu dan tegangan sefasa dengan arus. Faktor daya *Unity* akan terjadi bila jenis beban adalah resistif murni.

V I

(b)

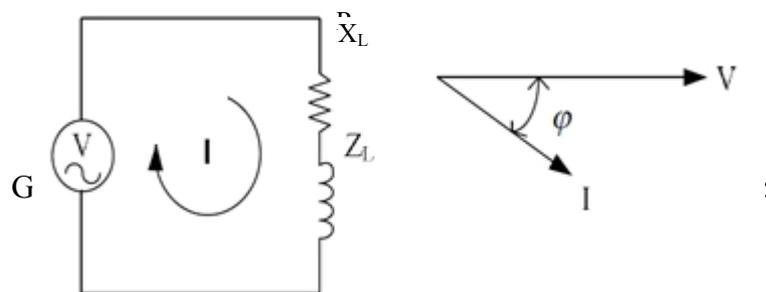
Gambar 2.9 Arus Sefasa dengan Tegangan
Rangkaian beban R
Diagram vektor I dan V sefasa

Pada Gambar terlihat nilai $\cos \phi$ sama dengan 1, yang menyebabkan jumlah daya nyata yang dikonsumsi beban sama dengan daya semu.

2. Faktor Daya Terbelakang (*Lagging*)

Faktor daya terbelakang (*lagging*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi sebagai berikut :

1. Beban/ peralatan listrik memerlukan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat induktif.
2. Arus (I) terbelakang dari tegangan (V), V mendahului I dengan sudut ϕ



Dari Gambar terlihat bahwa arus tertinggal dari tegangan maka daya reaktif mendahului daya semu, berarti beban membutuhkan atau menerima daya reaktif dari sistem.

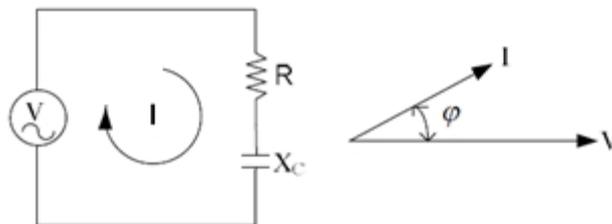
Rumus faktor daya tertinggal :

$$\text{Faktor daya (power factor)} = \sin \theta \dots\dots\dots (2.10)^{12}$$

Faktor Daya Mendahului (*Leading*)

Faktor daya mendahului (*leading*) adalah keadaan faktor daya saat memiliki kondisi-kondisi sebagai berikut :

1. Beban/ peralatan listrik memberikan daya reaktif dari sistem atau beban bersifat kapasitif.
2. Arus mendahului tegangan, V terbelakang dari I dengan sudut ϕ



(b)

Gambar 2.11 Arus tertinggal dari tegangan sebesar sudut ϕ
Rangkaian R dan C
Diagram vektor I leading terhadap V

Dari Gambar terlihat bahwa arus mendahului tegangan maka daya reaktif tertinggal dari daya semu, berarti beban memberikan daya reaktif kepada sistem.

Rumus faktor daya tertinggal :

$$\text{Faktor daya (power factor)} = \cos \theta \dots\dots\dots (2.11)^{13}$$

2.5 Resistansi penghantar

Resistansi adalah tahanan suatu penghantar baik itu pada saluran transmisi maupun distribusi yang menyebabkan kerugian daya. Maka besarnya resistansi pada jaringan listrik dapat dicari dengan rumus persamaan berikut:

$$R = \rho \dots\dots\dots (2.12)^{14}$$

Dimana :

- R : Resistansi (Ω),
- l : Panjang kawat penghantar (m),

¹³ Smith, Ralph. J. 1990. *Rangkaian, Piranti, dan Sistem*. Hlm 170.
⁴ Hutahuruk, T.S. 1996. *Transmisi Daya Listrik*. hlm 6
⁴ Ibid, hlm.40

A : Luas penampang kawat (m²),

ρ : Tahanan jenis (Ωm).

Tahanan penghantar mempunyai suhu maksimum yang telah distandarkan oleh pabrik pembuatnya (maksimum 30°C untuk Indonesia), perubahan suhu sebesar 1°C dapat menaikkan tahanan penghantar. Perubahan tahanan nilai tahanan ini disebut koefisien temperatur dari tahanan yang diberi simbol α, nilai α dapat dilihat pada tabel di bawah ini. Perubahan nilai tahanan terhadap suhu, dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$R_{t_2} = R_{t_1}[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \dots\dots\dots (2.13)^4$$

Dimana T₀ = Temperatur pada penghantar aluminium (°C)

$$R_{t_2} = R_{t_1} \dots\dots\dots (2.14)^4$$

Dimana:

R_{t2} = resistan pada suhu t₂ (Ω / km)

R_{t1} = resistan pada suhu t₁ (Ω / km)

α_{t1} = koefisien temperature dari tahanan pada suhu

0,03931 untuk Cu pada suhu 12345°C

0,03931 untuk Al pada suhu 12345°C

t₁ = suhu normal penghantar (°C)

t₂ = suhu yang ditentukan (°C)

T₀ = konstanta untuk penghantar tertentu :

234,5 untuk tembaga 100% Cu

241,0 untuk tembaga 97% Cu

228 untuk aluminium 61 % Al

Model Saluran Distribusi 10

Saluran distribusi digambarkan melalui suatu model ekivalen dengan mengambil parameter rangkaian pada suatu basis per fasa. Tegangan terminal digambarkan dari saluran ke netral, arus dari satu fasa saluran sehingga sistem distribusi tiga fasa berkurang menjadi ekivalen sistem distribusi fasa tunggal.

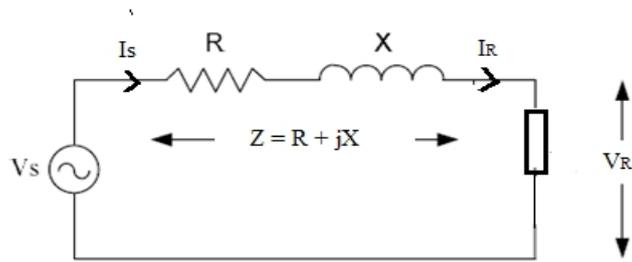
Model saluran distribusi digunakan untuk menghitung tegangan, arus dan aliran daya daya yang dipengaruhi oleh panjang saluran. Model saluran distribusi diperoleh dengan mengalikan impedansi saluran persatuan panjang dengan panjang saluran.

$$Z = (r + j\omega L)l \dots\dots\dots (2.15)$$

$$Z = R + jX \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana R dan X merupakan resistansi dan induktansi perfasa per satuan panjang, dan l merupakan panjang saluran. Model saluran distribusi pada suatu basis per fasa ditunjukkan pada gambar (2.10).

19 Theraja, B.L. 1983. *Worked examples in Electrical Technology*. Hlm 394

Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen saluran distribusi¹⁹ 11

Oleh karena arus rangkaian saluran distribusi merupakan hubungan seri maka arus ujung pengirim dan ujung penerima adalah sama

$$I_s = I_R \dots\dots\dots (2.17)$$

Rugi tegangan (*drop tegangan*)

Drop tegangan (*drop voltage*) adalah perbedaan tegangan kirim dan tegangan terima karena adanya impedansi pada penghantar.

Adapun penyebab jatuh tegangan (drop tegangan) adalah :

Panjang jaringan, jauhnya jaringan dari trafo

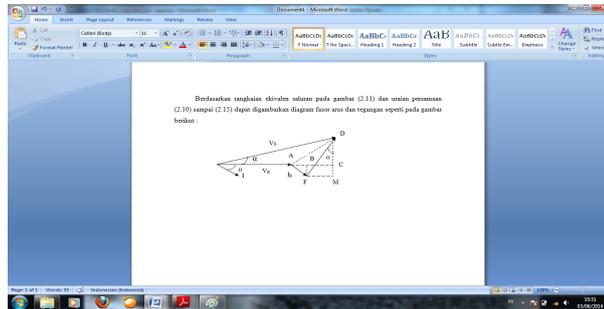
Rendahnya tegangan yang diberikan dari trafo distribusi

Jenis penghantar yang digunakan

Sambungan penghantar atau konektor yang tidak baik

Arus yang dihasilkan terlalu besar

Berdasarkan rangkaian ekivalen saluran pada gambar (2.11) dan uraian persamaan (2.10) sampai (2.15) dapat digambarkan diagram fasor arus dan tegangan seperti pada gambar berikut :



Gambar 2.13 Diagram fasor saluran distribusi¹⁹ 12

Besarnya drop tegangan yang terjadi pada saluran tersebut dapat dirumuskan :

$$\Delta V = |V_s| - |V_r| \dots\dots\dots (2.18)$$

Untuk mendapatkan susut tegangan seperti diagram fasor diatas dengan mengasumsikan bahwa Vs dan Vr berhimpitan.

Pada gambar 2.12 dapat diperhatikan bahwa persamaan tegangan yang mendasari diagram vektor tersebut adalah :

$$V_s = V_r + I (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots (2.19)$$

Karena faktor I (R cos θ + X sin θ) sama dengan Iz, maka persamaan menjadi :

$$V_s = V_r + I_z \text{ atau } V_s - V_r = I_z \dots\dots\dots (2.20)$$

Sehingga ΔV = Iz

$$\Delta V = I (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots (2.21)$$

Maka untuk saluran distribusi pada saluran distribusi 3 fasa adalah :

$$\Delta V = I . (R \cos \theta + X \sin \theta) \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana :

$$\cos \theta = 0,85 \text{ (standar PLN)}$$

$$\sin \theta = \text{Arc cos } \theta = 0,53$$

19 Ibid. Hlm 395

Tegangan pada sisi penerima $V_R = V_S - \Delta V$ (2.23)

Drop tegangan dalam persentase :

$$\% V \text{ rugi} = x \ 100 \% \text{ (2.24)}$$

Keterangan :

ΔV = drop tegangan (V) I = Arus saluran (A)

V_S = Tegangan awal (V) I_R = Komponen arus aktif

V_R = Tegangan akhir (V) I_X = Komponen arus reaktif

R = Resistansi saluran (Ω) pf = power factor

X = Reaktansi saluran (Ω) qf = power factor reaktif

Rugi daya

Berdasarkan gambar 2.11 rugi daya saluran timbul karena adanya komponen resistansi dan reaktansi saluran dalam bentuk rugi daya aktif dan reaktif. Rugi daya aktif yang timbul pada komponen resistansi saluran distribusi akan terdisipasi dalam bentuk energi. Sedangkan rugi daya reaktif akan dikembalikan ke sistem dalam bentuk medan magnet atau medan listrik.

Rugi daya yang dapat dicari menggunakan rumus :

$$\Delta P = 3 \times I^2 \times R \text{ (2.25)}^9 \text{ 13}$$

Dimana :

P = Rugi daya (kw)

I = Arus yang mengalir (Ampere)

R = Resistansi saluran (ohm)

2.9 E T A P (Electrical Transient Analysis Program)

2.9.1 Definisi ETAP³ 1-

ETAP (Electric Transient and Analysis Program) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data real-time atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara real-time. Fitur yang terdapat di dalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi

⁹ PT.PLN Pusat Pendidikan dan Pelatihan. *Teknik Listrik Terapan*. Hlm 13

³ Firmansyah, Anton. *Modul Praktikum Pemrograman Komputer*. Hlm 12

maupun sistem distribusi tenaga listrik.

Analisa tenaga listrik yang dapat dilakukan ETAP antara lain :

- a. Analisa aliran daya
- b. Analisa hubung singkat
- c. Arc Flash Analysis
- d. Analisa kestabilan transien, dll.

Dalam menganalisa tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (single line diagram) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan diagram maupun dalam analisa rangkaian. Elemen elektrik seperti misalnya pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, bus bar maupun konduktor lain dapat ditunjukkan dengan menggunakan simbol yang telah distandardisasi untuk diagram saluran tunggal. Elemen pada diagram tidak mewakili ukuran fisik atau lokasi dari peralatan listrik, tetapi merupakan konvensi umum untuk mengatur diagram dengan urutan kiri-ke-kanan yang sama, atas-ke-bawah, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili.

2.9.2 Standar simbol ETAP

ETAP memiliki 2 macam standar yang digunakan untuk melakukan analisa kelistrikan, ANSI dan IEC. Pada dasarnya perbedaan yang terjadi di antara kedua standar tersebut adalah frekuensi yang digunakan, yang berakibat pada perbedaan spesifikasi peralatan yang sesuai dengan frekuensi tersebut. Simbol elemen listrik yang digunakan dalam analisa dengan menggunakan ETAP pun berbeda.

Langkah Menjalankan Program ETAP

Mempersiapkan Plant

Persiapan yang perlu dilakukan dalam analisa / desain dengan bantuan

ETAP PowerStation adalah :

- a. Single Line Diagram
- b. Data peralatan baik elektris maupun mekanis
- c. Library untuk mempermudah editing data

Single Line Diagram tersebut membutuhkan data peralatan sesuai dengan data peralatan baik elektrik maupun mekanis sebagai berikut :

- a. Power Grid
- b. Generator
- c. Bus
- d. Transformator
- e. Circuit Breaker
- f. Disconnect Switch
- g. Lumped Load
- h. Motor Sinkron
- i. Motor Induksi
- j. High Filter
- k. Capacitor
- l. Over Current Relay
- m. Variable Frequency Drive (VFD)
- n. Charger

Membuat Proyek Baru

a. Klik tombol New atau klik menu File lalu akan muncul kotak dialog sebagai berikut :

Gambar 2.14 Create New Project File

b. Lalu ketik nama file project . Misalnya : Pelatihan. Lalu klik Ok atau tekan

Enter.

- c. Akan muncul kotak dialog User Information yang berisi data pengguna software.

Isikan nama anda dan deskripsi proyek anda. Lalu klik Ok atau tekan Enter.

Gambar 2.15 User Information

- d. Anda telah membuat file proyek baru dan siap untuk menggambar one-line diagram di layar. Lalu buat One-line diagram seperti pada gambar dibawah dan isikan data peralatan.

Menggambar Single Line Diagram

Menggambar single line diagram dilakukan dengan cara memilih simbol peralatan listrik pada menu bar disebelah kanan layar. Klik pada simbol, kemudian arahkan kursor pada media gambar. Untuk menempatkan peralatan pada media gambar, klik kursor pada media gambar.

Untuk mempercepat proses penyusunan single line diagram, semua komponen dapat secara langsung diletakkan pada media gambar. Untuk mengetahui kontinuitas antar komponen dapat di-cek dengan Continuity Check pada menu bar utama.

Pemakaian Continuity Check dapat diketahui hasilnya dengan melihat warna komponen/branch. Warna hitam berarti telah terhubung, warna abu-abu berarti belum terhubung.

Editing Data Peralatan

Bus

Generator

Cable

Two Winding Transformator

Induction Machine

Static Load

Circuit Breaker

Fuse

Data Peralatan yang diperlukan oleh PowerStation untuk analisa sangat detail sehingga kadang membuat beberapa pengguna kesulitan dalam memperoleh data tersebut. Untuk mempermudah memasukkan data, maka harus diidentifikasi terlebih dahulu keperluan data. Sebagai contoh, analisa hubung singkat membutuhkan data yang lebih kompleks daripada analisa aliran daya. Jadi tidak perlu memasukkan semua parameter yang diminta pada menu editor komponen oleh ETAP PowerStation.

Melakukan Studi/Analisa

Dengan ETAP PowerStation dapat dilakukan beberapa analisa pada sistem kelistrikan yang telah digambarkan dalam single line diagram. Studi-studi tersebut adalah :

1. Load Flow Analysis (LF)
2. Short Circuit Analysis (SC)
3. Motor Starting Analysis (MS)
4. Transient Stability Analysis (TS)
5. Cable Ampacity Derating Analysis (CD)
6. Power Plot Interface

Menyimpan File Project (Save Project)

Masuk menu bar File, pilih Save atau click toolbar



Membuka File Project (Open Project)

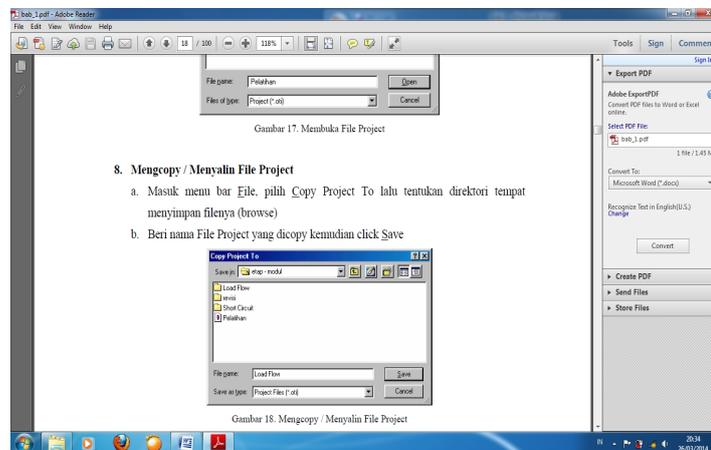
- a. Masuk menu bar File, pilih Open File lalu tentukan direktori tempat menyimpan filenya (browse) atau click toolbar

- b. Pilih file yang dituju kemudian click open

Gambar 2.16 Membuka File Project

Mengcopy / Menyalin File Project

- a. Masuk menu bar File, pilih Copy Project To lalu tentukan direktori tempat menyimpan filenya (browse)
- b. Beri nama File Project yang dicopy kemudian click Save



Gambar 2.17 Mengcopy / Menyalin File Project

Menutup Project (Close Project)

Klik menu File lalu klik Close Project atau kill toolbar Close

Keluar dari Program (Exit Program)

Klik menu File lalu klik Exit untuk keluar dari program ETAP.