



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Distribusi Tenaga Listrik

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban (pelanggan) dilayani langsung melalui jaringan distribusi.

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154kV, 220kV atau 500kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir ($I^2.R$). Dengan daya yang sama bila nilai tegangannya diperbesar, maka arus yang mengalir semakin kecil sehingga kerugian daya juga akan kecil pula. Dari saluran transmisi, tegangan diturunkan lagi menjadi 20 kV dengan transformator penurun tegangan pada gardu induk distribusi, kemudian dengan sistem tegangan tersebut penyaluran tenaga listrik dilakukan oleh saluran distribusi primer. Dari saluran distribusi primer inilah gardu-gardu distribusi mengambil tegangan untuk diturunkan tegangannya dengan trafo distribusi menjadi sistem tegangan rendah, yaitu 220/380Volt. Selanjutnya disalurkan oleh saluran distribusi sekunder ke konsumen-konsumen. Dengan ini jelas bahwa sistem distribusi merupakan bagian yang penting dalam system tenaga listrik secara keseluruhan.

Pada sistem penyaluran daya jarak jauh, selalu digunakan tegangan setinggi mungkin, dengan menggunakan trafo-trafo step-up. Nilai tegangan yang sangat tinggi ini (HV, UHV, EHV) menimbulkan beberapa konsekuensi antara lain: berbahaya bagi lingkungan dan mahalnya harga perlengkapan-

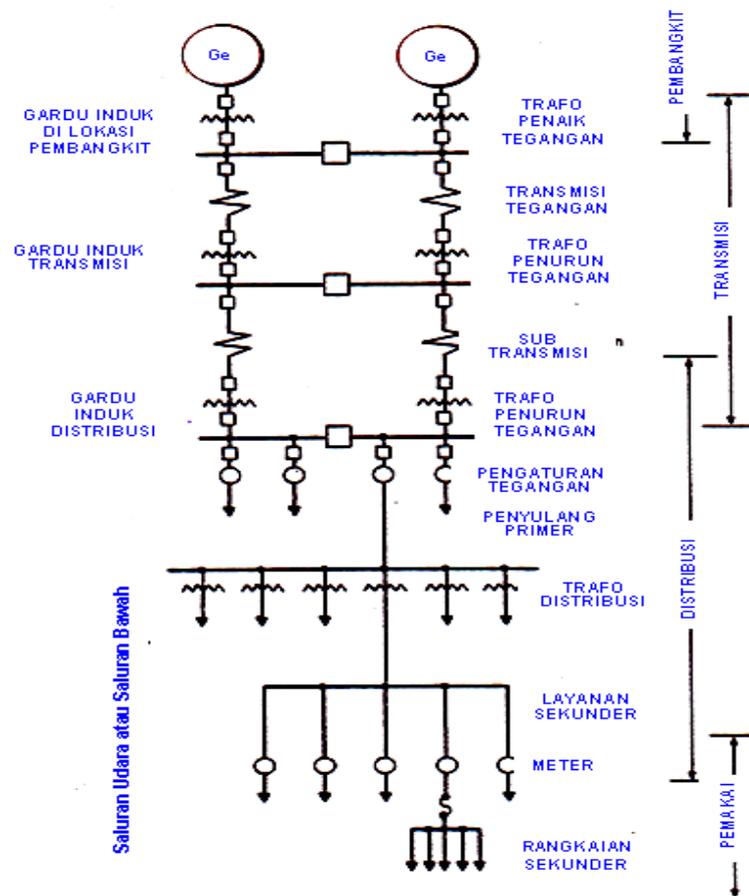
perlengkapannya, selain menjadi tidak cocok dengan nilai tegangan yang dibutuhkan pada sisi beban. Maka, pada daerah-daerah pusat beban tegangan saluran yang tinggi ini diturunkan kembali dengan menggunakan trafo-trafo step-down. Akibatnya, bila ditinjau nilai tegangannya, maka mulai dari titik sumber hingga di titik beban, terdapat bagian-bagian saluran yang memiliki nilai tegangan berbeda-beda. Sistem distribusi terdiri atas system distribusi primer dan sekunder. (www.dunialistrik.com)

2.1.1 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

Untuk kemudahan dan penyederhanaan, lalu diadakan pembagian serta pembatasan-pembatasan sebagai berikut:

1. Daerah I : Bagian pembangkitan (*Generation*)
2. Daerah II : Bagian penyaluran (*Transmission*) , bertegangan tinggi (HV,UHV,EHV)
3. Daerah III : Bagian Distribusi Primer, bertegangan menengah (6 atau 20kV).
4. Daerah IV : (Di dalam bangunan pada beban/konsumen), Instalasi, bertegangan rendah. (www.dunialistrik.com)

Berdasarkan pembatasan-pembatasan tersebut, maka diketahui bahwa porsi materi Sistem Distribusi adalah Daerah III dan IV, yang pada dasarnya dapat diklasifikasikan menurut beberapa cara, bergantung dari segi apa klasifikasi itu dibuat. Pembagian dari jaringan diatas dapat dijelaskan lebih detil melalui gambar 2.1 berikut ini:



Gbr. 2.1 Pengelompokan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik

2.1.2 Bagian – bagian jaringan distribusi

Untuk jaringan didistribusi pada umumnya terdiri dari dua bagian yang paling utama, yaitu sebagai berikut :

a. Jaringan distribusi primer

Jaringan distribusi primer yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu induk sub transmisi ke gardu distribusi. Jaringan ini merupakan jaringan tegangan menengah atau jaringan tegangan primer. Biasanya, jaringan ini menggunakan enam jenis jaringan yaitu system radial dan system tertutup atau loop, ring, network spindle dan cluster (Abdul Kadir, 2006)

b. Jaringan distribusi sekunder

Jaringan ini menggunakan tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan distribusi primer, terdapat pula pertimbangan perihal keadaan pelayanan dan regulasi tegangan, distribusi sekunder yaitu jaringan tenaga listrik yang menyalurkan daya listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Jaringan ini sering jaringan tegangan rendah. (Abdul Kadir, 2006)

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

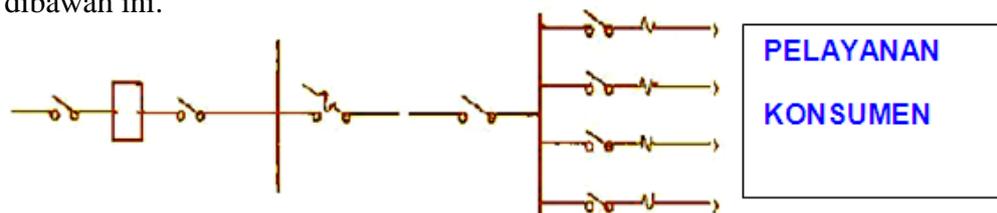
- Papan pembagi pada trafo distribusi,
- Hantaran tegangan rendah (saluran distribusi sekunder).
- Saluran Layanan Pelanggan (SLP) (ke konsumen/pemakai)
- Alat Pembatas dan pengukur daya (kWH. meter) serta fuse atau pengaman pada pelanggan.

Untuk distribusi sekunder terdapat bermacam-macam sistem tegangan distribusi sekunder menurut standar; (1) EEI : *Edison Electric Institut*, (2) NEMA (*National Electrical Manufactures Association*). Pada dasarnya tidak berbeda dengan system distribusi DC, factor utama yang perlu diperhatikan adalah besar tegangan yang diterima pada titik beban mendekati nilai nominal, sehingga peralatan/beban dapat dioperasikan secara optimal. Ditinjau dari cara pengawatannya, saluran distribusi AC dibedakan atas beberapa macam tipe, dan cara pengawatan ini bergantung pula pada jumlah fasanya, yaitu:

1. Sistem satu fasa dua kawat 120 Volt
2. Sistem satu fasa tiga kawat 120/240 Volt
3. Sistem tiga fasa empat kawat 120/208 Volt

4. Sistem tiga fasa empat kawat 120/240 Volt
5. Sistem tiga fasa tiga kawat 240 Volt
6. Sistem tiga fasa tiga kawat 480 Volt
7. Sistem tiga fasa empat kawat 240/416 Volt
8. Sistem tiga fasa empat kawat 265/460 Volt
9. Sistem tiga fasa empat kawat 220/380 Volt

Di Indonesia dalam hal ini PT. PLN menggunakan sistem tegangan 220/380 Volt. Sedang pemakai listrik yang tidak menggunakan tenaga listrik dari PT. PLN, menggunakan salah satu sistem diatas sesuai dengan standar yang ada. Pemakai listrik yang dimaksud umumnya mereka bergantung kepada Negara pemberi pinjaman atau dalam rangka kerja sama, dimana semua peralatan listrik mulai dari pembangkit (*generator set*) hingga peralatan kerja (motor-motor listrik) di suplai dari negara pemberi pinjaman/kerja sama tersebut. Sebagai anggota, IEC (*International Electrotechnical Comission*), Indonesia telah mulai menyesuaikan sistem tegangan menjadi 220/380 Volt saja, karena IEC sejak tahun 1967 sudah tidak mencantumkan lagi tegangan 127 Volt. (*IEC Standard Voltage*). Berdasarkan penjelasan diatas, bagian – bagian dari jaringan distribusi dapat dijelaskan secara sistematis oleh gambar 2.2 dibawah ini.



Gbr 2.2 Bagian – bagian jaringan distribusi

2.1.3 Ruang Lingkup Jaringan Distribusi

Berdasarkan penjelasan yang telah dijelaskan sebelumnya, ruang lingkup dari jaringan distribusi adalah sebagai berikut:

1. SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah), terdiri dari : Tiang dan peralatan kelengkapannya, konduktor dan peralatan per-lengkapannya, serta peralatan pengaman dan pemutus.
2. SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah), terdiri dari : Kabel tanah, indoor dan outdoor termination, batu bata, pasir dan lain-lain.
3. Gardu trafo, terdiri dari : Transformator, tiang, pondasi tiang, rangka tempat trafo, LV panel, pipa-pipa pelindung, *Arrester*, kabel-kabel, *transformer band*, peralatan grounding, dan lain-lain.
4. SUTR (Saluran Udara Tegangan Rendah) dan SKTR (Saluran Kabel Tegangan Rendah), terdiri dari: sama dengan perlengkapan/ material pada SUTM dan SKTM yang membedakan hanya dimensinya. (PLN Buku 5)

2.1.4 Jenis – Jenis Penghantar

Dalam proses transmisi dan 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.

1. AAC (all aluminium conductors) : seluruh bagian inti kabel terbuat dari aluminium.
2. AAAC (all aluminium alloyconductors) : seluruh bagian inti kabel terbuat dari campuran aluminium.
3. ACSR (aluminium conductor, steel-reinforced) : terbuat dari aluminium yang diperkuat dengan baja
4. ACAR (aluminium conductor, alloy-reinforced) ; terbuat dari aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

2.1.5 Jenis – jenis Hantaran Jaringan

Dalam system instalasi listrik, terdapat dua tipe pemasangan hantaran jaringan yaitu sebagai berikut :

a. Jaringan hantaran udara

Jaringan ini menyalurkan daya listrik melalui kawat terbuka atau kabel yang digantung pada tiang – tiang dengan peralatan isolator. Penghantar untuk jaringan distribusi primer yang biasa digunakan adalah tembaga atau aluminium. Tiang – tiang primer ataupun sekunder dapat berupa besi atau beton, tetapi biasanya untuk tiap jaringan distribusi yang paling banyak digunakan adalah tiang besi.

Berikut merupakan keuntungan dan kerugian dari jaringan hantaran udara:

1. Keuntungan :

- Mudah dilakukan perluasan pelayanan dengan menarik cabang yang diperlukan
- Mudah diperiksa bila terjadi gangguan pada jaringan
- Mudah dipelihara
- Harganya relatif lebih murah
- Pembangunannya tidak terlalu sulit
- Tiang – tiang pada jaringan distribusi primer dapat pula digunakan untuk jaringan distribusi sekunder dan keperluan pemasangan transformator.

2. Kerugian :

- Mengurangi estetika tata kota
- Mudah mengalami gangguan karena berinteraksi langsung dengan udara luar
- Keandalannya kurang
- Biaya pemeliharaannya besar

Jaringan hantaran udara menyalurkan daya listrik menggunakan kawat telanjang atau kabel yang digantung pada tiang – tiang dengan menggunakan peralatan isolator, sehingga dengan demikian gangguan lebih mudah terjadi, samping itu mengurangi keindahan di sekitarnya karena saluran kabel tersebut terkadang terpasang tidak teratur. Jenis

penghantar yang sering digunakan pada jaringan distribusi hantaran udara biasanya menggunakan jenis kabel atau kawat belitan dengan jenis tembaga atau dari jenis aluminium.

Tiang – tiang jaringan distribusi primer dan sekunder biasanya dapat berupa tiang kayu, besi ataupun beton. Tetapi untuk tiang jaringan distribusi ini yang paling banyak digunakan adalah tiang dari jenis beton dan besi. (Abdul Kadir, 2006)

b. Jaringan hantaran Bawah Tanah

Jaringan ini merupakan jaringan kabel yang dipasang dibawah tanah dengan beberapa ketentuan pengamanan seperti batas kedalaman dan persyaratan material kabel. Jaringan ini biasanya dipasang pada daerah kerapatan beban tinggi, seperti pusat kota ataupun pusat industry, pemasangan jaringan hantaran udara akan mengganggu, baik ditinjau dari keindahan maupun dari segi keamanan. Adapun keuntungan dan kerugian dari jaringan ini adalah sebagai berikut:

1. Keuntungan:

- Kabel yang dipasang bebas dari gangguan petir atau pun manusia
- Tidak mengganggu estetika tata kota
- Keandalannya lebih tinggi
- Kemungkinan gangguan lebih kecil

2. Kerugian :

- Harganya relatif mahal
- Sulit untuk mendeteksi dan memeriksa gangguan yang terjadi
- Pemeliharaan tidak bersifat fleksibel
- Sulit dilakukan perluasan dan percabangan

Secara umum kabel – kabel yang digunakan pada kedua system penyaluran daya diatas sesuai dengan konsep sebagai berikut:

1. Inti / teras (core) :tunggal, ganda, tiga dan setengah
2. Bentuk (shape) :bulat, sector
3. Susunan (arrangement) :Sabuk, bertabir, berisi minyak, berisi gas diperkuat dan tidak diperkuat
4. Dielektris : kertas (PILCTA), polyvynil chloride (PVC), rantai silang polyethylene (XIPE), berisi gas (Nitrogen atau SF6). (A.S Pabla, 1991)

2.2 Jenis – Jenis Gardu Distribusi

2.2.1 Menurut system pemasangannya

Menurut system pemasangannya, gardu distribusi dibagi menjadi pemasangan luar dan pemasangan dalam. Berikut merupakan penjelasan lebih lanjut mengenai masing jenis gardu distribusi menurut system pemasangannya :

a. Pemasangan luar

1. Pole Mounting

Gardu distribusi dan peralatannya dipasang langsung pada tiang, cara pemasangan ini cukup baik untuk trafo kecil sampai kapasitas 50 kVA.

2. H-Pole Mounting

Gardu distribusi ini dipasang pada lengan antara dua tiang, cara pemasangan ini baik untuk gardu berkapasitas sampai 200 kVA.

3. Plat Form Mounting

Gardu distribusi ini dipasang pada konstruksi tersendiri dari empat tiang untuk penempatan trafo, cara ini baik untuk tempat dimana diperlukan peralatan yang membahayakan. Kapasitas maksimal dari gardu ini adalah 200 kVA.

4. Pemasangan di Lantai

Gardu distribusi ini baik untuk semua ukuran gardu, tetapi biasanya untuk kapasitas daya lebih besar dari 250 kVA.

b. Pemasangan Dalam

Gardu distribusi pemasangan dalam memiliki jarak minimum sebagai persyaratan bangunan rumah trafo, yaitu sebagai berikut:

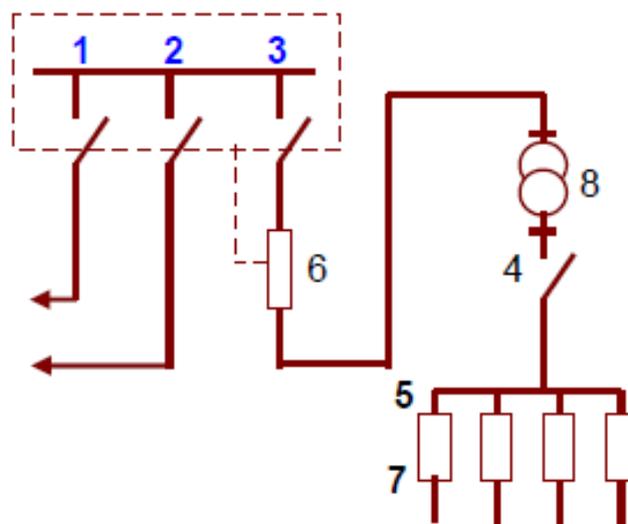
1. Jarak dari sisi dinding pada satu sisi minimum 1,25 m
2. Jarak dari sisi dinding pada dua sisi minimum 0,75 m
3. Jarak dari sisi dinding pada tiga sisi minimum 100 m
4. Jarak dari sisi minimum 1,25 m (PLN buku 1, 2010)

2.2.2 Menurut Bentuk Tampilan

Untuk mengoptimalkan fungsinya sebagai penyalur daya listrik, maka gardu distribusi dibentuk dalam beberapa tampilan yang disesuaikan dengan kebutuhan dan beberapa factor penyesuaian, seperti luas wilayah pemasangan, besarnya daya yang dibutuhkan atau pun kondisi alam dari daerah dimana gardu tersebut akan dipasang. Berdasarkan faktor – faktor tersebut, maka tampilan gardu distribusi terbagi dalam beberapa tampilan sebagai berikut :

a. Gardu Distribusi Beton

Gardu distribusi ini dikonstruksi dari beton dengan peralatan – peralatan listrik terdapat dalam gardu beton. Pada umumnya gardu ini dibangun untuk melayani beban yang besar dan diagram satu garis dari gardu distribusi tersebut dijelaskan pada gambar 2.3 dibawah ini.



Gbr. 2.3 Diagram satu garis gardu beton

Keterangan :

1. Kabel masuk-pemisah atau sakelar beban (load break)
 2. Kabel keluar-sakelar beban (load break)
 3. Pengaman transformator-sakelar beban+pengaman lebur.
 4. Sakelar beban sisi TR.
 5. Rak TR dengan 4 sirkit beban.
 6. Pengaman lebur TM (HRC-Fuse)
 7. Pengaman lebur TR (NH - Fuse)
 8. Transformator
- b. Gardu Distribusi Tiang

Gardu ini merupakan gardu distrinusi pasang luar karena perlengkapannya terdapat diluar yang dilengkapi dengan peralatan pengaman seperti arrester. Biasanya gardu tiang dipasang pada saluran udara tegangan menengah dengan jenis trafo pasangan luar. Berikut dua tipe gardu tiang yang biasa digunakan dalam system distribusi tenaga listrik :

1. Gardu Tiang tipe Portal

Yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya/ penyangganya terbuat dari tiang. Dalam hal ini trafo distribusi terletak di bagian atas tiang. Karena trafo distribusi terletak pada bagian atas tiang, maka gardu tiang hanya dapat melayani daya listrik terbatas, mengingat berat trafo yang relatif tinggi, sehingga tidak mungkin menempatkan trafo berkapasitas besar di bagian atas tiang (± 5 meter di atas tanah). Untuk gardu tiang dengan trafo satu fasa kapasitas yang ada maksimum 50 KVA, sedang gardu tiang dengan trafo tiga fasa kapasitas maksimum 160 KVA (200 kVA). Trafo tiga fasa untuk gradu tiang ada dua macam, yaitu trafo 1x3 fasa dan trafo 3x1fasa. Gambar 3-22 memperlihatkan sebuah gardu distribusi tiang tipe portal

lengkap dengan perlengkapan proteksinya dan panel distribusi tegangan rendah yang terletak di bagian bawah tiang (tengah).

2. Gardu Tiang tipe Cantol

Gardu cantol adalah type gardu listrik dengan transformator yang dicantolkan pada tiang listrik besarnya kekuatan tiang minimal 500 daN.

- Instalasi gardu dapat berupa :

- 1 Cut out fused
- 1 lighting arrester.
- 1 panel PHB tegangan rendah dengan 2 jurusan atau transformator completely self protected (CSP - Transformator)

c. Gardu distribusi Metal Clad

Yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya terbuat dari besi. Gardu besi termasuk gardu jenis pasangan dalam, karena pada umumnya semua peralatan penghubung/pemutus, pemisah dan trafo distribusi terletak di dalam bangunan besi. Semua peralatan tersebut sudah di instalasi di dalam bangunan besi, sehingga dalam pembangunannya pelaksana pekerjaan tinggal menyiapkan pondasinya saja.

d. Gardu Mobil

Yaitu gardu distribusi yang bangunan pelindungnya berupa sebuah mobil (diletakkan diatas mobil), sehingga bisa dipindah-pindah sesuai dengan tempat yang membutuhkan. Oleh karenanya gardu mobil ini pada umumnya untuk pemakaian sementara (darurat), yaitu untuk mengatasi kebutuhan daya yang sifatnya temporer. Secara umum ada dua jenis gardu mobil, yaitu pertama gardu mobil jenis pasangan dalam (mobil boks) dimana semua peralatan gardu berada di dalam bangunan besi yang mirip dengan gardu besi.

Kedua, gardu mobil jenis pasangan luar, yaitu gardu yang berada diatas mobil trailer, sehingga bentuk pisiknya lebih panjang dan semua peralatan penghubung/pemutus, pemisah dan trafo distribusi tampak dari

luar. Gardu distribusi jenis trailer ini umumnya berkapasitas lebih besar daripada yang jenis mobil. Hal ini bias dilihat dari konstruksi peralatan penghubung yang digunakan. Pada setiap gardu distribusi umumnya terdiri dari empat ruang (bagian) yaitu, bagian penyambungan/pemutusan sisi tegangan tinggi, bagian pengukuran sisi tegangan tinggi, bagian trafo distribusi dan bagian panel sisi tegangan rendah (PLN Buku 4, 2010)

2.3 Faktor – faktor yang mempengaruhi Keandalan Sistem Distribusi

Beberapa faktor yang harus diperhitungkan untuk menjaga keandalan kerja system distribusi adalah sebagai berikut :

a. Suhu

Suhu membatasi besarnya arus beban, ini berarti bahwa beban untuk tipe system elemen lebih ditentukan oleh suhu dari pada mekanis dan batas – batas tersebut berubah untuk susunan beban dan keadaan cuaca yang berbeda, jadi daerah yang membatasi akan didapatkan untuk mengatur beban dalam berbagai keadaan. (As Pabla, Abdul hadi, 1991)

b. Ekonomis

Tingkat ekonomi pembebanan dicapai bila hanya untuk membayar kerugian sama dengan hanya mengurangi kerugian (berdasarkan biaya tahunan), meskipun pada kota yang padat beban, pembebanan yang normal pada komponen di bawah batas ekonomi, ini dipakai untuk menjaga agar batas tidak dilampau meskipun untuk waktu sesaat dalam keadaan darurat. (As Pabla, Abdul Hadi, 1991)

c. Tegangan Jatuh

Jatuh tegangan pada saluran adalah selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (sending) dan tegangan pada ujung penerimaan (receiving) tenaga listrik. Pada saluran arus bolak balik, besar tegangan tergantung dari impedansi dan admitansi saluran serta pada beban dan faktor kerja. (Kumawahara, arismunandar, 1993)

d. Tegangan Lebih

Diluar tegangan jatuh, komponen – komponen harus mampu menghadapi loncatan tegangan yang ditimbulkan system sendiri atau sumber dari luar. (As Pabla, Abdulhadi, 1991)

2.4 Parameter Saluran

Seluruh saluran yang menggunakan penghantar dari suatu system tenaga listrik memiliki sifat – sifat listrik sebagai parameter saluran seperti resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi. Resistansi yang timbul pada saluran dihasilkan dari jenis penghantar yang memiliki tahanan jenis dan besar resistansi pada penghantar tergantung dari jenis material, luas penampang dan panjang saluran. Resistansi saluran sangat penting dalam evaluasi efisiensi distribusi dan studi ekonomis.

Induktansi timbul dari efek medan disekitar penghantar jika pada penghantar terdapat arus yang mengalir, parameter ini penting untuk pengembangan model saluran distribusi yang digunakan dalam analisa system sedangkan besarnya reaktansi sangat ditentukan oleh induktansi dari kawat dan frekuensi arus bolak – balik yaitu:

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.1)$$

(Hutauruk, 1996)

Dimana :

R = Resistansi kawat penghantar (Ω)

A = Luas penampang kawat penghantar (mm^2)

P = Tahanan jenis kawat penghantar ($\Omega\text{mm}^2 / \text{m}$)

$\rho = 0,01724 \Omega\text{m}$ untuk Cu

$\rho = 0,03333 \Omega\text{m}$ untuk Al

ℓ = panjang kawat (m)

2.4.1 Resistansi Saluran

Resistansi adalah tahanan pada suatu penghantar baik pada saluran transmisi maupun distribusi yang menyebabkan kerugian daya. Besarnya kerugian daya terjadi pada saluran tersebut tergantung pada besarnya tahanan dari panjang saluran, luas penampang kawat serta jenis kawat yang digunakan.

Tahanan penghantar akan berubah menurut perubahan temperature. Dalam batas $10^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$ maka untuk kawat penghantar tembaga dan aluminium berlaku :

$$R_2 = R_1 (1 + \alpha_1(t_1 - t_2)) \quad (2.2)$$

dimana :

R_1 = Tahanan pada temperature t_1

R_2 = Tahanan pada temperature t_2

α_1 = koefisien temperature dari tahanan pada suhu t_1

sehingga,

$$\frac{R_1}{R_2} = 1 + \alpha_1(t_1 - t_2) \quad (2.3)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{T\alpha + t_2}{T\alpha + t_1} \quad (2.4)$$

Keterangan :

R_1 = Tahanan pada temperature t_1

R_2 = Tahanan pada temperature t_2

α_1 = koefisien temperature dari tahanan pada suhu

0,03931 untuk Cu pada suhu 12345°C

0,03931 untuk Al pada suhu 12345°C

T = konstanta suatu penghantar tertentu yang ditentukan dalam konstanta t

(Hutahuruk, 1996)

2.4.2 Induktansi Saluran

Induktansi kawat tiga fasa pada umumnya berlainan untuk mengetahui masing – masing kawat saluran, tergantung dari besar fluksi yang ditimbulkan oleh arus yang mengalir pada saluran penghantar tersebut. Besarnya nilai induktansi ditentukan oleh persamaan:

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} \left\{ 1 + 4 \ln \left(\frac{d-r}{r} \right) \right\} \quad (2.5)$$

Berdasarkan konfigurasi horizontal dari saluran distribusi, bila diamtara ketiga saluran fasanya saling membentuk lurus horizontal, sejajar dengan permukaan tanah. Dimana konfigurasi ini ada dua macam yaitu konfigurasi horizontal tanpa perisai pelindung dan konfigurasi horizontal dengan perisai pelindung. Untuk menghitung jari – jari penghantar, digunakan persamaan sebagai berikut :

$$A = \pi \cdot r^2 \frac{A}{\pi} \quad (2.6)$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2.7)$$

keterangan :

L = Induktansi kawat (Henry)

d = Jarak antar kawat (cm)

r = jari – jari kawat

A = Luas penampang kawat (mm²)

(BM. Weedy, 1972)

Sedangkan untuk besarnya reaktansi sangat ditentukan oleh induktansi dari kawat dan frekuensi arus bolak – balik, sehingga persamaanya adalah sebagai berikut:

$$X_L = 2 \pi f L \quad (2.8)$$

Dimana,

X_L = Reaktansi saluran (Ω)

f = Frekuensi arus bolak balik (Hz)

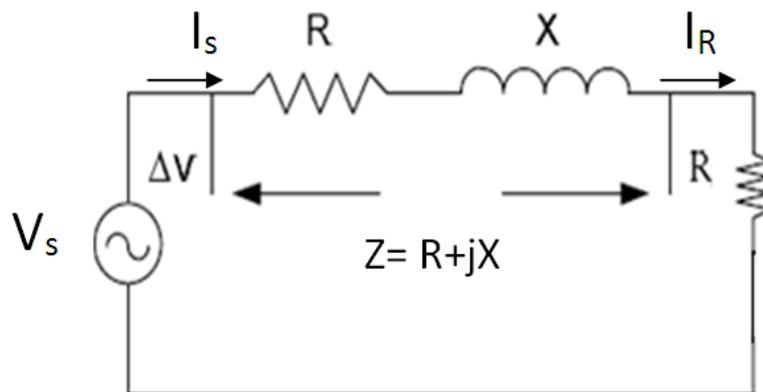
2π = Sudut arus bolak balik

L = Induktansi kawat penghantar (Henry)

(CEDengineering)

2.5 Pengertian Susut Daya Listrik

Susut daya atau rugi daya listrik adalah berkurangnya pasokan daya yang dikirimkan oleh sumber (pembangkit) kepada beban (konsumen) yang disebabkan oleh adanya tahanan jenis penghantar yang dipengaruhi oleh arus dan tegangan saat penyaluran energi listrik dilakukan sehingga menghasilkan nilai tahanan yang berakibat pada munculnya nilai jatuh tegangan. Susut daya jaringan listrik dinyatakan dengan persamaan dan gambar 2.4 berikut ini:



Gbr 2.4 Rangkaian Ekivalen

Berdasarkan gambar diatas, didapat persamaan sebagai berikut:

$$I_s = I_r \quad (2.9)$$

$$R + jX = Z \quad (2.10)$$

$$V_z = I (R + jX) \quad (2.11)$$

$$V_s = V_r + V_z \quad (2.12)$$

$$P_L = 3 I^2 R \ell \quad (2.13)$$

dimana :

P_L = Daya Hilang (watt)

R = Tahanan kawat per fasa (Ω / Km)

ℓ = Panjang saluran (Km)

$\cos \theta_r$ = Faktor - daya beban / ujung penerima

I = Arus per fasa (A)

Persamaan :

$$P_L = P_S - P_R \quad (2.14)$$

Persentase antara daya yang diterima dan daya yang disalurkan dinyatakan dengan persamaan :

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi} \quad (2.15)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.16)$$

dimana :

P_R = Daya yang dipakai (KW)

P_S = Daya yang dikirimkan (KW)

H = Efisiensi daya trafo (%)

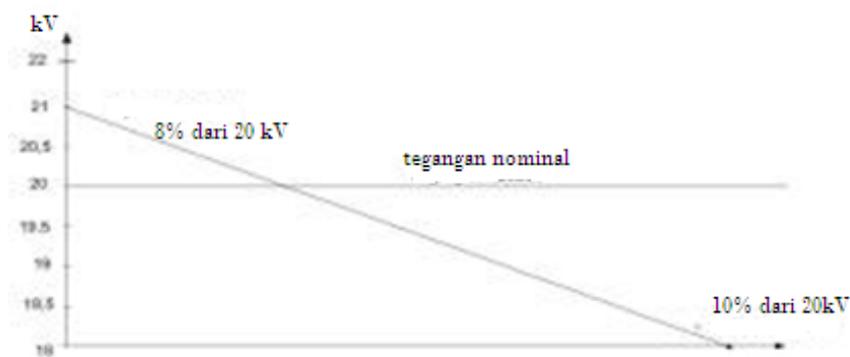
P_L = Hilang/ Susut daya (KW)

Susut daya listrik merupakan persoalan krusial yang dewasa ini dihadapi oleh PLN dan belum dapat sepenuhnya terpecahkan. Pemadaman bergilir kemudian dilakukan untuk menghindarkan sistem mengalami pemadaman total (*totally black out*). Persoalan kualitas daya merupakan persoalan lain yang diantaranya disebabkan oleh kekurangan pasokan daya listrik. Persoalan ini meliputi profil tegangan yang buruk, frekuensi tegangan yang tidak stabil serta distorsi harmonik yang berlebihan. Ketika kontinuitas pasokan masih merupakan persoalan, hal-hal yang berkaitan dengan persoalan kualitas daya untuk sementara dapat "diabaikan" yang kemudian mengherankan adalah ketika data di lapangan menunjukkan bahwa kapasitas pembangkit yang tersedia lebih dari cukup untuk memikul beban yang ada. Kesimpulan yang sementara bisa ditarik adalah bahwa terjadi susut daya yang cukup besar di jaringan. Kesimpulan ini diperkuat dengan data di lapangan bahwa susut daya di jaringan cukup besar melebihi estimasi yang ditetapkan. Kerugian finansial akibat susut daya ini merupakan hal yang tidak bisa dihindarkan.

2.6 Jatuh Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti (PT.PLN (Persero),2010)

Tegangan jatuh secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Tegangan jatuh ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Tegangan jatuh V pada penghantar semakin besar jika arus I di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar $R\ell$ semakin besar pula. Tegangan jatuh merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan. Atas dasar hal tersebut maka tegangan jatuh yang diijinkan untuk instalasi arus kuat hingga 1.000 V yang ditetapkan dalam persen dari tegangan kerjanya (Daryanto,2010). Toleransi dari nilai tegangan jatuh tersebut di jelaskan pada gambar 2.5 berikut.



Gbr. 2.5 Toleransi tegangan pelayanan yang diijinkan

Sesuai dengan standar tegangan yang ditentukan oleh PLN (SPLN), perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima 10%.

Tegangan jatuh pada jaringan disebabkan adanya rugi tegangan akibat hambatan listrik (R) dan reaktansi (X). Jatuh tegangan phasor V_d pada suatu penghantar yang mempunyai impedansi (Z) dan membawa arus (I) dapat dijabarkan dengan rumus :

$$V_d = IZ \quad (2.17)$$

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

$$\Delta V = (V_s) - (V_r) \quad (2.18)$$

Karena adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga tegangan jatuh (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Tegangan jatuh relatif dinamakan regulasi tegangan V_R (*voltage regulation*) dan dinyatakan oleh rumus :

$$Vr = \frac{Vr - Vs}{Vs} \times 100\% \quad (2.19)$$

Dimana

V_s = tegangan pada pangkal pengiriman atau tegangan kirim (V)

V_r = tegangan pada ujung pengiriman atau tegangan diterima (V)

Untuk menghitung jatuh tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun faktor dayanya yang tidak sama dengan satu, maka berikut ini akan diuraikan cara perhitungannya. Dalam penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan faktor dayanya ($\cos \phi$) antara 0,6 s/d 0,85. tegangan dapat dihitung berdasarkan rumus pendekatan hubungan sebagai berikut :

$$\Delta V = I \ell (R \cdot \cos \Theta + X \cdot \sin \Theta) 0,5 \quad (2.20)$$

Dimana :

I = Arus beban (A)

R = Tahanan rangkaian (Ω)

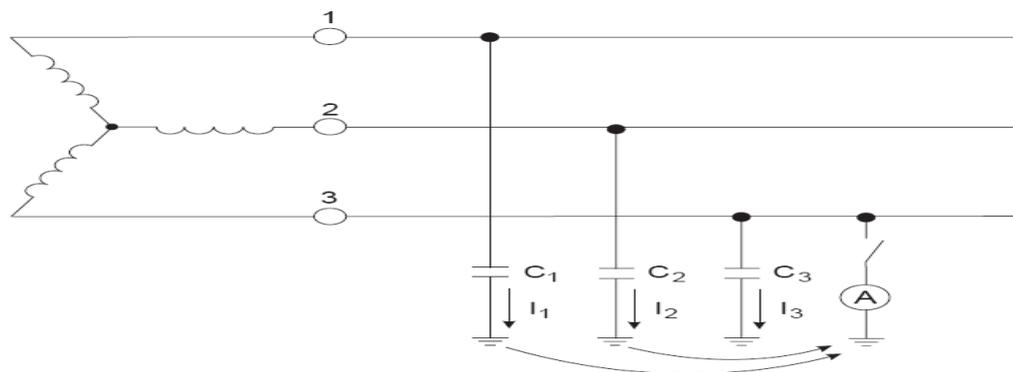
V = Jatuh Tegangan (tegangan impedansi rangkaian) (V)

X = Reaktansi rangkaian

2.7 Arus Pengisian

Arus pengisian adalah arus yang akan mengalir ke hubungan pentanahan ketika salah satu fasa yang tidak ditanahkan mengalami gangguan ke tanah. Kondisi ideal dari system yang tidak ditanahkan adalah tidak akan ada arus listrik yang akan mengalir jika satu fasa ditanahkan karena kondisi rangkaian yang tidak lengkap. Pada implementasinya, system yang tidak ditanahkan akan dialiri arus listrik. Kapasitor – kapasitor ini mewakili kapasitansi total yang terdistribusi pada system dan terjadi akibat nilai kapasitansi yang menuju kabel pentanahan, putaran motor dan komponen lain seperti kapasitor pelindung petir yang terhubung dari fasa ke tanah.

Ketika pendesainan system baru, arus pengisian dapat diestimasi dari data untuk komponen system. Pada system yang sudah ada, arus pengisian dapat diukur seperti gambar 2.6 dibawah ini.



Gbr 2.6 Sistem arus pengisian

Berdasarkan gambar 2.6 diatas, dapat dijelaskan bahwa dalam keadaan tanpa gangguan, maka $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ maka nilai arus bocor akan seimbang, dan jika saklar A ditutup, maka $I_3 = 0$ dan arus pengisian adalah $I_1 + I_2$

Dengan system yang di berikan suplai, saklar akan menutup dan ammeter siap untuk mengukur. Pembacaan ammeter tersebut adalah penjumlahan vector $I_1 + I_2$ dan jumlah ini sama dengan besarnya nilai arus pengisian. System arus pengisian harus sama pada masing – masing fasa. Dengan kondisi arus tersebut,

maka arus pengisian juga mempengaruhi nilai dari susut daya sesuai dengan persamaan dibawah ini:

$$P_L = I^2 R \quad (2.21)$$

Dimana:

I = Arus pengisian (A)

R = Tahanan arrester (Ω)

(Paulson dan Dudiak, 1995).

2.8 Sistem Pentanahan

Dalam implementasinya, terdapat beberapa jenis system pembumian, antara lain:

2.8.1 Pembumian trafo pada sisi tegangan menengah

Lilitan sekunder/ sisi tegangan menengah trafo dihubungkan secara bintang (Y). titik netral lilitan dibumikan melalui :

- Pembumian dengan tahanan 12 ohm untuk system SKTM. Untuk kawasan industry yang peka terhadap kedip, nilai Rn dapat lebih besar dari pada 12 ohm untuk memperkecil kedalaman kedip tegangan.
- Pembumian dengan tahanan 40 ohm untuk system SUTM, atau campuran antara SKTM dan SUTM
- Pembumian dengan tahanan 500 ohm untuk system SUTM
- Pembumian langsung/solid grounded
- Tanpa pembumian/ system mengambang

System yang menggunakan pembumian dengan nilai tahanan mendekati nol (solid ground) menyebabkan arus gangguan tanah sangat besar. Kabel tanah yang memakai pita tembaga (copper shield) hanya mampu menahan arus gangguan 1000 ampere selama satu detik sehingga tidak dapat dipergunakan.

Nilai tahanan pembumian transformator pada gardu induk membatasi arus hubung singkat ke tanah menjadi 1000 A untuk R= 12 ohm, 300 A untuk R= 40 ohm dan 25 A untuk R= 500 ohm. Kriterianya adalah kapasitas penyulang atau

pusat listrik dibatasi sebesar 10 MVA, sehingga arus per fasa sebesar 300 A. Besar arus gangguan tanah dibatasi 300 A pada SUTM atau campuran SUTM dan SKTM; sebesar 1000 A pada SKTM; dan sebesar 25 A pada tahanan pentahanan 500 ohm. Pertimbangan memilih system pembumian tersebut merupakan pertimbangan manajemen perancangan dengan memperhatikan aspek:

- Aman terhadap manusia
- Cepatnya pemeliharaan gangguan/ selektifitas penyulang yang mengalami gangguan
- Kerusakan akibat hubungan pendek
- Pengaruh terhadap system telekomunikasi
- Pertimbangan teknis kepadatan beban.

2.8.2 Pembumian trafo distribusi pada sisi tegangan rendah

Bagian – bagian trafo sisi tegangan rendah yang perlu dibumikan adalah titik netral lilitan sekunder, bagian konduktif terbuka, badan trafo dan bagian konduktif ekstra. Pembumian dilakukan secara langsung (solid grounded) dengan nilai tahanan pembumian tidak melebihi 1 ohm.

2.8.3 Pembumian lightning arrester

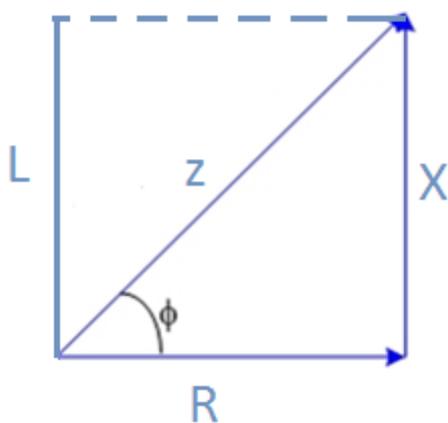
Lightning arrester (LA) pada sisi tegangan menengah gardu distribusi pasangan luar mempunyai elektroda pembumian tersendiri. Ikatan penyama potensial dilakukan dengan menghubungkan pembumian LA, pembumian titik netral trafo, pembumian bagian konduktif terbuka/ekstra. Kontribusi ikatan penyamaan potensial dilakukan dibawah tanah. Pada trafo jenis CSP fasa-1, penghantar pembumian LA disatukan dengan badan trafo. (PLN Buku 1, 2010)

2.9 Daya Listrik

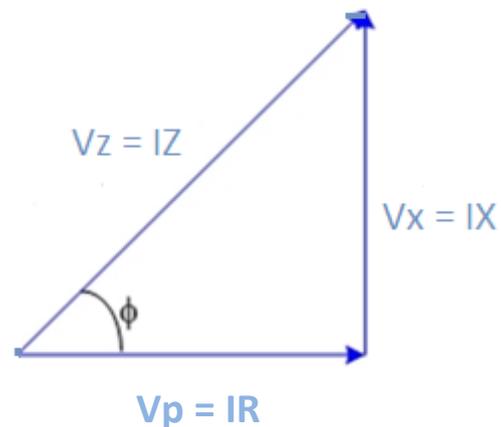
Daya listrik adalah hasil kali antara tegangan dan arus listrik. Dalam implementasinya, terdapat beberapa jenis daya yang digambarkan dalam sebuah grafik fungsi yang biasa disebut sebagai segitiga daya. Segitiga daya merupakan grafik hubungan yang terbentuk oleh tiga jenis daya yang diawali dari besaran

listrik yang terjadi saat proses penyaluran, seperti tegangan dan arus listrik karena saat proses penyaluran tenaga listrik dari pembangkit menuju konsumen, akan terdapat arus yang mengalir pada penghantar yang menghasilkan medan magnet dan terbentuklah nilai induktansi (L) selanjutnya pada penghantar tersebut juga terdapat tegangan yang menyebabkan terjadinya medan magnet sehingga timbulah nilai kapasitansi (C).

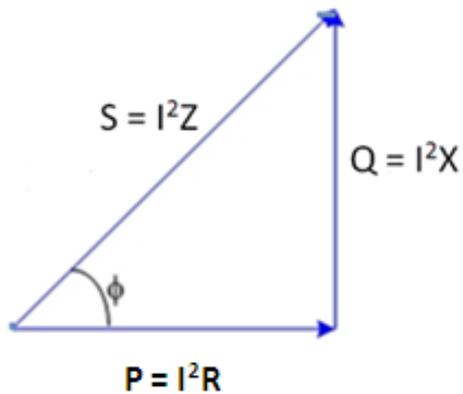
Kemudian, untuk penghantar yang digunakan, terdapat nilai reaktansi yang bersifat reaktif yang merupakan efek dari nilai induktansi dan kapasitansi material logam penghantar, namun karena nilai arus dalam hal ini lebih mendominasi, maka nilai induktansi cenderung lebih digunakan, sehingga terbentuklah grafik seperti pada gambar A. Kemudian, dari nilai arus yang ada, untuk mencari nilai tegangan, maka digunakan rumus arus (I) dikalikan dengan nilai impedansi (Z), reaktansi (X), dan resistansi (R) seperti yang tunjukkan oleh grafik gambar B dan terakhir, untuk menentukan nilai dari masing – masing jenis daya listrik yang dihasilkan, maka nilai arus yang dikuadratkan dikalikan dengan masing – masing besaran tahanan sesuai gambar C. Proses dari grafik hubungan dari jenis – jenis daya tersebut di bentuk dalam sebuah gambar segitiga yang dapat menjelaskan jenis – jenis daya tersebut secara sistematis, seperti yang terdapat pada gambar D.



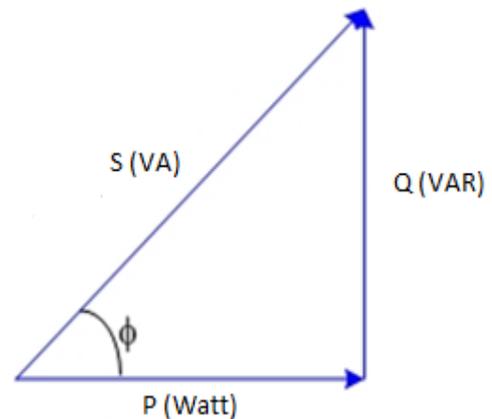
Gbr 2.7. A



Gbr 2.8 B



Gbr 2.9 C



Gbr 2.10 D

Berdasarkan gambar D, berikut dijelaskan jenis – jenis daya yang biasanya muncul dalam sstem penyaluran tenaga listrik.

2.9.1 Daya Nyata

Daya nyata merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya.

$$L - N / 1 \text{ fasa ; } P = V \times I \times \cos \emptyset \quad (2.22)$$

$$L - L / 3 \text{ fasa ; } P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \emptyset \quad (2.23)$$

Dimana:

V = Tegangan (V)

I = Arus yang melalui penghantar (A)

cos \emptyset = Faktor daya

P = Daya Nyata

2.9.2 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.

$$L - N / 1 \text{ fasa ; } S = V \times I^* \quad (2.24)$$

$$L - L/3 \text{ fasa ; } S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (2.25)$$

Dimana:

S = Daya Semu (VA)

I = Arus yang melalui penghantar (A)

V = Tegangan (V)

2.9.3 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.

$$L - N / 1 \text{ fasa ; } Q = V \times I \times \sin \Theta \quad (2.26)$$

$$L - L/3 \text{ fasa ; } Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \Theta \quad (2.27)$$

Dimana :

V = Tegangan (V)

I = Arus yang mengalir pada penghantar (A)

$\sin \Theta$ = Faktor daya

Q = Daya Reaktif

(www.fajar'sblog.blogspot.com, 09/09/2013, 05:45)