

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan pustaka

Berikut merupakan rujukan penelitian yang pernah dilakukan untuk mendukung penulisan skripsi ini diantaranya:

“OPTIMALISASI PENGGUNAAN KAPASITOR BANK PADA JARINGAN 20 KV DENGAN SIMULASI ETAP (Studi Kasus Pada *Feeder* Srikandi di PLN Rayon Pangkalan Balai, Wilayah Sumatera Selatan), USU tahun 2014” dalam penelitian ini David Tampubolon dan Masykur Sjani bertujuan untuk mengetahui pengaruh kapasitor terhadap kualitas daya pada jaringan 20 kV. Dalam penelitian ini penulis menggunakan *software* ETAP dengan mengkomplikasikan data-data yang dibutuhkan pada ETAP kemudian dilakukan simulasi dan analisa. Penelitian ini menghasilkan Penggunaan kapasitor bank di jaringan tegangan menengah mampu meningkatkan level tegangan pada ujung-ujung jaringan hingga mencapai range standar PLN yaitu pada -10% dan +5% dari tegangan nominal. Selain itu, diperoleh juga penurunan nilai rugi-rugi daya listrik sebesar 19.33%.

“*STUDI ANALISIS PENGGUNAAN KAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI FAKTOR DAYA DAN KUALITAS TEGANGAN PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV* , MUHAMMAD IMAM SANTOSO, UMY TAHUN 2012” Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada jaringan distribusi 20 kV. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dan interpretative. Penelitian ini menghasilkan sebelum terjadi perbaikan factor daya, diperoleh nilai jatuh tegangan pada daerah Nanga Mau sebesar 344,4445 V, Nanga dedai 4.260,14 V, dan Desa Pangeran 259,435 V. Setelah terjadinya perbaikan faktor daya nilai jatuh tegangan pada daerah Nanga Mau 299,57 V, Daerah Nanga Dedai 3.582,63 V, dan Daerah Pangeran 203,395.

2.2 Landasan teori

Energi listrik merupakan energi utama yang hampir diseluruh sisi kehidupan. Seiring kemajuan zaman, permintaan energi listrik diseluruh dunia meningkat dilain sisi, perkembangan teknologi yang terjadi mulai memunculkan beban listrik baru yang memiliki karakteristik elektris yang baru pula. Kedua hal ini ternyata mempengaruhi sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menyuplai energi listrik ke konsumen. Salah satu pengaruhnya adalah pada permasalahan kualitas daya listrik yang di hantarkan. Penyedia asa listrik dalam hal ini PLN (Perusahaan Listrik Negara) harus bisa menyediakan sistem tenaga listrik yang digunakan dengan tetap memperhatikan kualitas daya listrik yang dihantarkan kekonsumen.

1.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem pengiriman energi listrik yang berasal dari suatu pembangkit dan disalurkan kepada konsumen. Sistem tenaga listrik merupakan kumpulan dari komponen-komponen listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban yang saling terhubung membentuk suatu sistem. Maka pada umumnya sistem tenaga listrik mengandung 3 unsur, yaitu:

1. Sistem pembangkitan
2. Sistem penyaluran
3. Instalasi pengguna tenaga listrik.

A. Sistem Pembangkitan

Sistem Pembangkitan adalah salah satu bagian utama dalam struktur sistem tenaga listrik, pembangkit pada sistem tenaga listrik mempunyai peran untuk menghasilkan energi listrik. Sumber energi utama pada pembangkit berasal dari sumber energi primer yang tersedia dari alam, kemudian dikonversikan menjadi energi listrik. Generator termasuk bagian yang penting dalam sistem pembangkitan, pada generator akan

mengkonversikan energi listrik menjadi energi listrik melalui porosnya. Secara umum pembangkit tenaga listrik ditunjang oleh beberapa fasilitas yang terpadu dan saling berinteraksi, yaitu instalasi listrik, sistem pemakaian sendiri, sistem mekanik, bangunan sipil, fasilitas pelengkap, peralatan kontrol, dan komponen bantu lainnya. [1]

Pada sistem pembangkitan, tenaga listrik yang dihasilkan pada umumnya adalah tegangan menengah. Selanjutnya dinaikkan tegangannya menjadi tegangan ekstra tinggi kemudian disalurkan pada sistem penyaluran transmisi. Selain itu tenaga listrik yang dihasilkan diturunkan tegangannya untuk digunakan pada sistem kelistrikan pemakaian sendiri pada pembangkit tersebut. Pada sistem pembangkitan, tenaga listrik yang dihasilkan pada umumnya adalah tegangan menengah. Selanjutnya dinaikkan tegangannya menjadi tegangan ekstra tinggi kemudian disalurkan pada sistem penyaluran transmisi. Selain itu tenaga listrik yang dihasilkan diturunkan tegangannya untuk digunakan pada sistem kelistrikan pemakaian sendiri pada pembangkit tersebut. [1]

B. Sistem Penyaluran

Sistem Penyaluran adalah salah satu bagian utama dalam struktur sistem tenaga listrik yang berperan untuk mengirimkan daya listrik mulai dari pembangkitan kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi, dan disalurkan ke instalasi pengguna tenaga listrik dengan menggunakan saluran distribusi. Sistem penyaluran terbagi 2 yaitu:

1. Sistem transmisi
2. Sistem distribusi

C. Instalasi Pengguna Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik yang dimaksud dengan Instalasi Pengguna Tenaga Listrik adalah semua instalasi pengguna yang memerlukan tenaga listrik dalam pengoperasiannya. Instalasi pengguna tenaga listrik yang terpasang pada umumnya letaknya jauh dari pusat listrik dan populasinya menyebar

keberbagai tempat sehingga untuk memanfaatkan energi listrik yang telah dibangkitkan diperlukan saluran atau jaringan listrik. Oleh karena itu, untuk menunjang proses penyaluran energi secara memadai maka dibutuhkan sistem transmisi dan sistem distribusi yang baik agar beban-beban yang tersebar mendapat kiriman tenaga listrik sesuai dengan kebutuhannya.[1]

1.2.1.1 Pembangkit Tenaga Listrik

Salah satu cara yang paling ekonomis, mudah dan aman untuk mengirimkan energi adalah melalui bentuk energi listrik. Pada pusat pembangkit, sumberdaya energi primer seperti bahan bakar fosil (minyak, gas alam, dan batubara), hidro, panas bumi dan nuklir diubah menjadi energi listrik. Sumber daya energi digunakan untuk menggerakkan turbin menjadi energi mekanis, kemudian turbin menggerakkan generator, dan generator menghasilkan listrik. Pada prinsipnya apabila suatu penghantar diputar memotong garis-garis gaya medan magnet yang diam maka pada penghantar tersebut akan timbul *Electro Motor Force* (EMF) atau Gaya Gerak Listrik (GGL). Energi mekanis dapat dibangkitkan dari bermacam-macam sumber daya energi.

Untuk mendapatkan energi listrik dari energi primer dikenal 2 cara yaitu :

1. Pembangkit listrik yang konvensional, pembangkit untuk mendapatkan energi listrik dari energi primer menggunakan media perantara (turbin air, turbin uap, turbin gas, motor bakar).
2. Pembangkit listrik yang nonkonvensional, pembangkit untuk mendapatkan energi listrik dari energi primer langsung tanpa menggunakan media perantara.

Berikut ini macam-macam metode pembangkitan tenaga listrik:

1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)
2. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)
3. Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)
4. Pembangkit Listrik Tenaga Gas & Uap (PLTGU)

5. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)
6. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)
7. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

2.2.2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Energi listrik merupakan bentuk energi yang sangat bermanfaat bagi kehidupan masyarakat dewasa ini. Kemajuan suatu Negara dapat diukur berdasarkan konsumsi energi listrik pada Negara tersebut.

Energi listrik yang dihasilkan dari pembangkit tenaga listrik yang jaraknya berjauhan dengan daerah-daerah dimana energi listrik tersebut dipakai (pusat beban). Karena tegangan yang dihasilkan generator umumnya relatif rendah (berkisar 6 kV hingga 24 kV), maka tegangan ini dinaikkan oleh transformator daya ketingkat tegangan yang lebih tinggi.

Tingkat tegangan yang lebih tinggi ini selain untuk memperbesar daya hantar saluran yang berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, juga untuk memperkecil rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran.

Penurunan dari tingkat tegangan transmisi pertama-tama dilakukan di gardu induk (GI), di man tegangan di turunkan ke tegangan yang lebih rendah misalnya dari 500 kV ke 150 kV, atau dari 150 kV ke 70 kV, dan sebagainya. Kemudian penurunan kedua dilakukan di gardu induk distribusi 150 kV ke 20 kV atau dari 70 kV ke 20 kV.

2.3 Klasifikasi Saluran Transmisi

Berdasarkan konstruksinya, saluran transmisi dibedakan atas saluran udara (*overhead lines*) dan saluran bawah tanah (*underground cable*). Saluran udara menyalurkan energi listrik melalui penghantar yang digantungkan pada menara atau tiang transmisi dengan perantara isolator, sedangkan saluran bawah tanah menyalurkan energi listrik melalui kabel yang ditanam di bawah permukaan tanah. [3]

2.3.1 Tegangan Pada Saluran Transmisi

Jika tegangan transmisi ditinggikan maka rugi-rugi transmisi akan dapat diperkecil sehingga efisiensi transmisi akan naik. Akan tetapi kenaikan tegangan pada saluran transmisi berarti juga kenaikan isolasi dan peralatan gardu induk oleh karena itu pemilihan tegangan dilakukan dengan perhitungan daya yang disalurkan, jumlah rangkaian, jenis penyaluran, keandalan, biaya peralatan untuk tegangan tertentu, serta tegangan-tegangan yang sekarang ada dan yang direncanakan.

Tabel 2. 1 Tegangan Tinggi Yang Berlaku Di Indonesia

(sumber: buku ajar transmisi dan distribusi tenaga listrik DR.Ramadoni syahptra)

Tegangan Nominal (kV)	Tegangan Tertinggi Untuk Peralatan (kV)
30	36
66	72.5
150	170
220	245
380	420
500	525

2.3.2 Komponen Saluran Transmisi

Saluran transmisi memiliki komponen-komponen utama yang terdiri dari :

1. Menara transmisi (tiang transmisi)

Menara transmisi ialah bangunan penopang saluran transmisi yang dapat berupa menara baja, tiang baja, tiang beton bertulang, atau tiang kayu. Tiang-tiang baja, beton, dan kayu umumnya digunakan pada saluran relatif rendah (dibawah 70 kV) sedang untuk saluran transmisi tegangan tinggi dan extra tinggi digunakan menara baja. [1]

2. Isolator

Isolator digunakan untuk mencegah hubungan singkat antara kawat penghantar dengan menara. Jenis isolator yang digunakan pada saluran transmisi adalah jenis porselin atau gelas.

3. Kawat penghantar

Jenis-jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100% (Cu 100%), tembaga dengan konduktivitas 97,5 % (Cu 7,5%), dan aluminium dengan konduktivitas 61% (Al 61%). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut:

AAC : *All Aluminium Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium

AAAC : *All Aluminium Alloy Conductor*, yaitu kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.

ACSR : *Aluminium Conductor Steel Reinforced*, yaitu kawat penghantar aluminium berinti baja.

ACAR : *Aluminium Conductor Alloy Reinforced*, yaitu kawat penghantar yang diperkuat dengan campuran logam

4. Kawat Tanah

Kawat tanah atau *ground wires* disebut juga kawat pelindung (*shield wires*). Kawat tanah berfungsi sebagai pelindung kawat-kawat penghantar atau kawat fase terhadap sambaran petir. Dengan demikian kawat tanah dipasang di atas kawat fase. Bahan yang dipakai pada umumnya kawat ACSR.

2.3.2.1 Sistem Distribusi Tenaga listrik

Definisi umum, sistem distribusi ialah bagian dari sistem tenaga listrik antara sumber daya besar (*bulk power source, BPS*) dan peralatan hubung

pelanggan (*customers service switch*). Berdasarkan definisi tersebut maka sistem distribusi meliputi komponen-komponen berikut :

1. Sistem subtransmisi

Jaringan subtransmisi merupakan jaringan yang berfungsi untuk mengalirkan daya dari GI menuju gardu distribusi. Namun jaringan subtransmisi belum tentu ada diseluruh sistem distribusi, karena jaringan subtransmisi merupakan jaringan dengan tegangan peralihan. Seandainya pada jaringan transmisi tegangan yang dipakai adalah 500 kV, maka setelah masuk GI tegangan menjadi 150 kV (belum termasuk tegangan distribusi). Sehingga jaringan ini dinamakan subtransmisi karena masih bertegangan tinggi.

2. Gardu induk distribusi

Gardu Induk merupakan unit di dalam sistem distribusi yang berfungsi untuk menerima daya dari sistem transmisi untuk kemudian diteruskan sistem distribusi. Di dalam Gardu Induk ini tegangan dari sistem transmisi (150kV-500kV) akan diubah menjadi tegangan untuk distribusi (20kV).

3. Penyulang distribusi atau penyulang primer

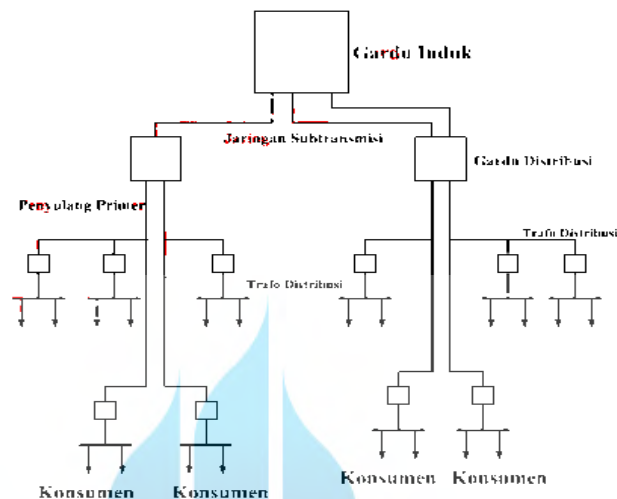
Saluran penyulang utama merupakan saluran atau rangkaian yang berfungsi untuk menghubungkan antara gardu distribusi utama dengan gardu transformator distribusi atau menghubungkan GI dengan gardu transformator distribusi.

4. Transformator distribusi

Transformator distribusi berada di dalam gardu gardu distribusi. Berfungsi untuk mengubah tegangan menengah (20 kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V). Kemudian daya dengan tegangan rendah tersebut disalurkan kepada konsumen.

5. Untai sekunder

Rangkaian sekunder merupakan rangkaian yang berasal dari gardu-gardu distribusi yang berfungsi untuk melayani konsumen yang tersebar di sepanjang simpul-simpul distribusi.[4]



Gambar 2.1 Komponen Penyusun Sistem Distribusi
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

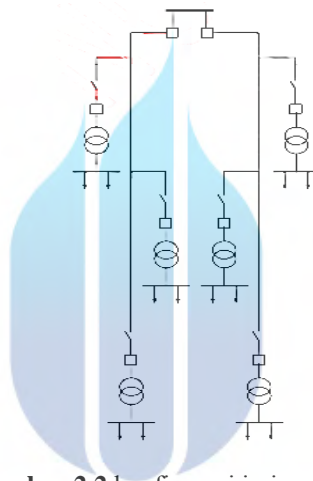
2.4 Kontruksi Struktur Jaringan Distribusi

Sistem konstruksi saluran distribusi terdiri dari saluran udara dan saluran bawah tanah. Pemilihan konstruksi tersebut didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut: alasan teknis yaitu berupa persyaratan teknis, alasan ekonomis, alasan estetika dan alasan pelayanan yaitu kontinuitas pelayanan sesuai jenis konsumen. Pada jaringan distribusi primer terdapat 4 jenis dasar yaitu :

1. Jaringan radial
2. Jaringan lingkaran (*Ring*)
3. Jaringan *spindle*
4. Jaringan anyaman

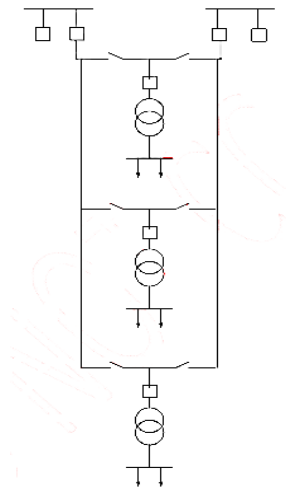
2.4.1 Jaringan Radial

Struktur jaringan distribusi radial adalah struktur jaringan yang paling sederhana, baik ditinjau dari perencanaannya maupun dari pengusahaannya. Penyaluran tenaga listrik dari penyulang berada pada kondisi satu arah. Akibatnya apabila terjadi gangguan pada salah satu titik pada rangkaian akan menyebabkan keseluruhan jaringan akan terkena dampaknya. Dengan demikian kontinuitas penyaluran tenaga listrik pada jaringan dengan struktur seperti ini sangat buruk. Karena apabila terjadi perbaikan pada salah satu titik akan menyebabkan seluruh jaringan harus dipadamkan.[4]



Gambar 2.2 konfigurasi jaringan radial
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

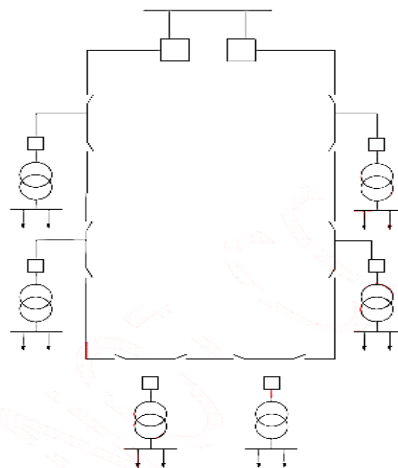
Untuk kontinuitas penyaluran yang lebih baik, maka struktur jaringan pada gambar 2.2 dikembangkan menjadi struktur jaringan radial ganda. Pada struktur jaringan radial ganda, setiap gardu distribusi mendapat suplai dari dua penyulang radial yang berasal dari GI atau dari gardu distribusi lainnya. Dalam keadaan operasi normal, maka gardu hanya mendapat suplai tenaga listrik dari satu penyulang saja. Namun apabila terjadi gangguan, maka jaringan akan dipindahkan ke penyulang lainnya. Sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listrik dapat diperbaiki. Gambar 2.3 merupakan contoh struktur jaringan radial ganda.[4]



Gambar 2.3 Struktur Jaringan Radial Ganda
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.4.2 Struktur Jaringan Lingkaran

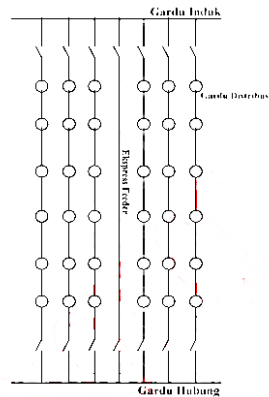
Struktur jaringan distribusi lingkaran merupakan struktur jaringan distribusi tertutup yang dimulai dari sumber daya besar (GI) kemudian melewati beberapa gardu distribusi kemudian kembali lagi menuju sumber semula sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.4. Kelebihan utama dari struktur jaringan distribusi ini adalah apabila terjadi gangguan, maka gangguan tersebut dapat diisolir sehingga tidak mengganggu jaringan distribusi secara keseluruhan. Hal ini dapat terjadi karena pada struktur jaringan distribusi lingkaran ini terdapat dua titik yang dapat disambungkan secara bergantian atau secara bersamaan. Sehingga kontinuitas penyalurannya sudah cukup baik. Meskipun jika terjadi gangguan pada banyak titik pada rangkaian serentak, maka keseluruhan jaringan dapat terganggu juga.[4]



Gambar 2.4. Struktur Jaringan Lingkaran / *Loop*
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.4.3 Struktur Jaringan Spindel

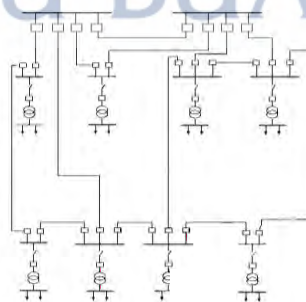
Struktur jaringan spindel merupakan hasil pengembangan dari struktur jaringan distribusi radial dan struktur jaringan distribusi lingkaran. Pada struktur jaringan spindel ini penyulang utama yang dipakai bertambah banyak jumlahnya serta memiliki penyulang cadangan. Konfigurasi yang umum dipakai untuk struktur jaringan distribusi spindel adalah tujuh buah penyulang utama dan satu buah penyulang cadangan. Seluruh penyulang ini bertemu pada satu titik yang menghubungkan seluruh penyulang utama dengan penyulang cadangan. Penyulang cadangan merupakan saluran khusus yang dilengkapi pemutus dan pemisah daya. Titik temu penyulang penyulang utama dengan penyulang cadangan berada pada sebuah gardu hubung. Penyulang cadangan berfungsi sebagai penyalur tenaga listrik darurat apabila saluran penyulang utama ada yang mengalami gangguan. Dalam keadaan operasi normal, maka penyulang cadangan tidak terhubung dengan beban. Gambar 2.5 merupakan contoh struktur jaringan spindel.[4]



Gambar 2.5. Struktur Jaringan Spindel
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.4.4 Struktur Jaringan Anyaman

Struktur jaringan distribusi anyaman merupakan bentuk jaringan yang paling rumit apabila dibandingkan dengan struktur jaringan distribusi lainnya. Untuk setiap gardu distribusi akan mendapat suplai tenaga listrik dari dua atau lebih penyulang, sehingga kontinuitas penyaluran tenaga listriknya jauh lebih baik dibandingkan struktur jaringan distribusi yang lain. Namun struktur jaringan distribusi jenis ini memiliki biaya investasi yang lebih mahal dibandingkan dengan struktur jaringan distribusi lainnya. Struktur ini biasanya dipakai untuk daerah yang memerlukan tingkat kontinuitas penyaluran tenaga listrik yang tinggi seperti pada daerah industri yang memerlukan suplai secara konstan. Gambar di bawah yaitu gambar 2.6 merupakan contoh struktur jaringan anyaman.[4]



Gambar 2.6. Struktur Jaringan Anyaman
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

2.5 Distribusi Tenaga Listrik

Terdapat dua cara dalam distribusi tenaga listrik ke daerah pemukiman, antara lain melalui gardu distribusi atau penyaluran setempat.

2.5.1 Gardu Distribusi

Penyaluran daya dengan menggunakan gardu distribusi yaitu menggunakan sistem tiga fasa untuk jaringan tegangan menengah (JTM) dan jaringan tegangan rendah (JTR) dengan transformator tiga fasa dengan kapasitas yang cukup besar. Jaringan tegangan rendah ditarik dari sisi sekunder transformator untuk kemudian disalurkan kepada konsumen. Sistem tiga fasa tersedia untuk seluruh daerah pelayanan distribusi, walaupun sebagian besar konsumen mendapat pelayanan distribusi tenaga listrik satu fasa. Jaringan tegangan menengah berpola radial dengan kawat udara sistem tiga fasa tiga kawat. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa empat kawat dengan netral.

2.5.2 Penyaluran Setempat

Penyaluran daya dengan menggunakan penyaluran setempat umumnya digunakan pada daerah-daerah dengan kondisi beban perumahan tidak terlalu besar, atau pada suatu daerah dengan tingkat pertumbuhan beban yang tinggi. Untuk jaringan tegangan menengahnya menggunakan sistem tiga fasa dengan percabangan satu fasa. Sementara untuk jaringan tegangan rendahnya menggunakan sistem satu fasa. Transformator yang digunakan memiliki kapasitas yang kecil dan cenderung dekat dengan konsumen. Jaringan tegangan menengah berpola radial dengan kawat udara sistem tiga fasa empat kawat dengan netral. Sementara jaringan tegangan rendah berpola radial dengan sistem tiga fasa tiga kawat dengan netral.

2.6 Tegangan distribusi

Berikut adalah beberapa jenis dari tegangan distribusi, yaitu:

2.6.1 Tegangan Menengah (TM)

Tegangan menengah adalah tegangan dengan rentang nilai 1 kV sampai dengan 30 kV. Untuk di Indonesia menggunakan tegangan menengah sebesar 20 kV. Tegangan menengah dipakai untuk penyaluran tenaga listrik dari GI menuju gardu-gardu distribusi atau langsung menuju pelanggan tegangan menengah.

2.6.2 Tegangan Rendah (TR)

Tegangan rendah adalah tegangan dengan nilai dibawah 1 kV yang digunakan untuk penyaluran daya dari gardu-gardu distribusi menuju pelanggan tegangan rendah. Penyalurannya dilakukan dengan menggunakan sistem tiga fasa empat kawat yang dilengkapi netral. Tegangan rendah di Indonesia adalah 380/220 V. 380 V merupakan besar tegangan antar fasa sementara tegangan 220 V merupakan tegangan fasa dengan netral.

2.7 Tegangan Pelayanan

Tegangan pelayanan merupakan ketetapan dari penyedia tenaga listrik kepada pelanggan-pelanggannya. Besarnya tegangan pelayanan di Indonesia pada umumnya sebagai berikut:

- a. 380/220 V tiga fasa empat kawat
- b. 220 V satu fasa dua kaw
- c. 6 kV tiga fasa tiga kawat
- d. 12 kV tiga fasa tiga kawat
- e. 20 kV tiga fasa tiga kawat

Selama beberapa tahun terakhir ini sistem distribusi mengarah kepada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi. Tegangan sistem distribusi yang lebih tinggi, maka sistem dapat membawa daya lebih besar dengan nilai arus yang sama. Arus yang lebih kecil berarti jatuh tegangan (*drop voltage*) yang lebih kecil, rugi-rugi yang lebih sedikit dan kapasitas membawa daya lebih besar.[4]

Tabel 2. 2 Perbandingan Keuntungan Kerugian Tegangan Tinggi pada Jaringan Distribusi
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Keuntungan	Kerugian
Jatuh tegangan akan lebih kecil pada sistem dengan tegangan yang lebih tinggi	Rangkaian yang lebih panjang, maka akan lebih sering terdapat gangguan pada pelanggan
Untuk daya yang tetap, sistem dengan tegangan yang lebih tinggi memiliki rugi – rugi saluran yang lebih kecil	Perbaikan dan pemeliharaan dilakukan pada sistem bertegangan tinggi lebih berbahaya
Dengan jatuh tegangan yang lebih kecil dan kapasitas yang lebih besar, maka sistem dengan tegangan yang lebih kecil dapat menjangkau daerah yang lebih luas	Biaya perlengkapan untuk sistem dengan tegangan yang lebih tinggi, seperti isolasi kabel sampai pada transformatornya, akan lebih mahal

Sistem distribusi dengan tegangan yang lebih besar membutuhkan regulator tegangan dan kapasitor untuk pendukung tegangan yang lebih sedikit. Perlengkapan yang digunakan juga membutuhkan konduktor yang lebih kecil atau dapat membawa daya yang lebih besar untuk konduktor yang berukuran sama pada sistem distribusi dengan tegangan yang lebih tinggi. Keuntungan sistem distribusi dengan tegangan lebih tinggi dapat dilihat pada persamaan berikut:

1. Daya

Untuk arus yang sama, daya akan berbanding lurus dengan tegangan.

$$P_2 = \frac{V_2}{V_1} P_1 \quad (2.1)$$

Ketika $I_1 = I_2$

2. Arus

Untuk daya yang sama, peningkatan tegangan akan berbanding lurus dengan penurunan besarnya arus.

$$I_2 = \frac{V_1}{V_2} I_1 \quad (2.2)$$

Ketika $P_2 = P_1$

3. Jatuh Tegangan

Untuk daya yang dihantarkan sama, maka persentase jatuh tegangan berubah sesuai dengan perbandingan tegangan dikuadratkan. Rangkaian dengan tegangan 20 kV memiliki persentase jatuh tegangan lebih besar daripada rangkaian dengan tegangan 40 kV dengan beban yang sama.

$$V\%_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 V\%_1 \quad (2.3)$$

4. Luas Area Pelayanan

Untuk kepadatan beban yang sama, ruang lingkup akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan tegangan. Sistem 440 V dapat mencakup wilayah dua kali daripada wilayah yang dapat dicakup oleh 220 V.

$$A_2 = \frac{V_2}{V_1} A_1 \quad (2.4)$$

Dimana :

V_1, V_2 = Tegangan pada rangkaian 1 dan 2

P_1, P_2 = Daya pada rangkain 1 dan 2

I_1, I_2 = Arus pada rangkaian 1 dan 2

$V\%_1, V\%_2$ = Jatuh tegangan / panjang unit (persen) pada rangkaian 1 dan 2

A_1, A_2 = Ruang lingkup dari rangkaian 1 dan 2

2.8 Jenis-jenis Permasalahan Daya Listrik

Permasalahan kualitas daya listrik disebabkan oleh gejala-gejala atau fenomena-fenomena elektromagnetik yang terjadi pada sistem tenaga listrik.

Gejala elektromagnetik yang menyebabkan permasalahan kualitas daya adalah (Roger C.Dugan,1996):

1. Gejala Peralihan (*Transient*), yaitu suatu gejala perubahan variabel (tegangan, arus dan lain-lain) yang terjadi selama masa transisi dari keadaan operasi tunak (*steady state*) menjadi keadaan yang lain.
2. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Pendek (*Short-Duration Variations*), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan dalam waktu yang singkat yaitu kurang dari 1 (satu) menit.
3. Gejala Perubahan Tegangan Durasi Panjang (*Long-Duration Variations*), yaitu suatu gejala perubahan nilai tegangan, dalam waktu yang lama yaitu lebih dari 1 (satu) menit.
4. Ketidakseimbangan tegangan, adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya.
5. *Distorsi* Gelombang, adalah gejala perbedaan besarnya tegangan dalam sistem tiga fasa serta sudut fasanya.
6. *Fluktuasi* Tegangan, adalah gejala perubahan besarnya tegangan secara sistematis.
7. Gejala Perubahan Frekuensi Daya yaitu gejala penyimpangan frekuensi daya listrik pada suatu sistem tenaga listrik.

2.9 Besaran Listrik Dasar

Terdapat tiga buah besaran listrik dasar yang digunakan di dalam teknik tenaga listrik, yaitu beda potensial atau sering disebut sebagai tegangan listrik, arus listrik dan frekuensi. Ketiga besaran tersebut merupakan satu kesatuan pokok pembahasan di dalam masalah-masalah sistem tenaga listrik. Selain ketiga besaran tersebut, masih terdapat satu faktor penting di dalam pembahasan sistem tenaga listrik yaitu daya dan faktor daya.

2.9.1 Tegangan Listrik

Tegangan listrik adalah perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik, dan dinyatakan dalam satuan *volt*. Berikut rumus persamaanya :

$$V = I \cdot R \quad (2.5)$$

Keterangan :

V = Beda potensial pada kedua ujung rangkaian. Dinyatakan dengan satuan *volt* (V).

I = Kuat arus listrik yang mengalir pada suatu rangkaian. Dinyatakan dengan satuan *Ampere* (A).

R = Besarnya hambatan dalam suatu rangkaian. Dinyatakan dengan satuan *Ohm*.

2.9.2 Arus Listrik

Arus listrik didefinisikan sebagai laju aliran sejumlah muatan listrik yang melalui suatu luasan penampang melintang. Menurut konvensi, arah arus listrik dianggap searah dengan aliran muatan positif. Arus listrik diukur dalam satuan *Ampere* (A), adalah satu *Coulomb* per detik. Arus listrik dirumuskan :

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.6)$$

Keterangan:

I = arus listrik (A)

dq = sejumlah muatan (C)

dt = waktu (detik)

2.9.3 Frekuensi

Tegangan dan arus listrik yang digunakan pada sistem kelistrikan merupakan listrik bolak-balik yang berbentuk sinusoidal. Tegangan dan arus listrik sinusoidal merupakan gelombang yang berulang, sehingga gelombang

sinusoidal mempunyai frekuensi. Frekuensi adalah ukuran jumlah putaran ulang per peristiwa dalam selang waktu yang diberikan, satuan frekuensi dinyatakan dalam *hertz* (Hz) yaitu nama pakar fisika Jerman Heinrich Rudolf Hertz yang menemukan fenomena ini pertama kali. Frekuensi sebesar 1 Hz menyatakan peristiwa yang terjadi satu kali per detik, di mana frekuensi (f) sebagai hasil kebalikan dari periode (T), seperti rumus di bawah ini:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.7)$$

Di setiap negara mempunyai frekuensi tegangan listrik yang berbeda-beda. Frekuensi tegangan listrik yang berlaku di Indonesia adalah 50 Hz, sedangkan di Amerika berlaku frekuensi 60 Hz.

2.9.4 Daya dan Faktor Daya

Daya adalah suatu ukuran terhadap penggunaan energi dalam suatu waktu tertentu, dimana:

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.8)$$

Keterangan :

P = daya (*Watt*)

E = energi (*Joule*)

t = waktu (detik)

Terdapat tiga macam daya listrik yang digunakan untuk menggambarkan penggunaan energi listrik, yaitu daya nyata atau daya aktif, daya reaktif serta daya semu. Daya nyata atau daya aktif adalah daya listrik yang digunakan secara nyata, misalnya untuk menghasilkan panas, cahaya atau putaran motor listrik. Daya nyata dihasilkan oleh beban-beban listrik yang bersifat resistif murni (Heinz Reiger, 1987). Besarnya daya nyata sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban resistif dan dinyatakan dalam satuan *Watt* (Sanjeev Sharma, 2007), dimana:

$$P = I^2 R \quad (2.9)$$

Keterangan :

P = daya (*Watt*)

I = arus listrik (*Ampere*)

R = tahanan (*Ohm*)

Daya reaktif dinyatakan dengan satuan VAR (Volt Amper Reaktan) adalah daya listrik yang dihasilkan oleh beban-beban yang bersifat reaktansi. Terdapat dua jenis reaktansi, yaitu reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Beban-beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan magnet. Contoh beban listrik yang bersifat induktif antara lain transformator, motor induksi satu fasa maupun tiga fasa yang bisa digunakan untuk menggerakkan kipas angin, pompa air, *lift*, escalator, kompresor, dan konveyor. Beban-beban yang bersifat kapasitif akan menyerap daya reaktif untuk menghasilkan medan listrik. Contoh beban yang bersifat kapasitif adalah kapasitor (Heinz Reiger, 1987). Besarnya daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus listrik yang mengalir pada beban reaktansi dimana (Sanjeev Sharma, 2007):

$$Q = I^2 X \quad (2.10)$$

$$X = X_L - X_C \quad (2.11)$$

Keterangan:

Q = daya (VAR)

X = reaktansi total (*Ohm*)

X_L = reaktansi induktif (*Ohm*)

X_C = reaktansi kapasitif (*Ohm*)

Daya semu adalah penjumlahan secara vector antara daya aktif dan daya reaktif, di mana:

$$S = P + jQ \quad (2.12)$$

Daya semu dinyatakan dengan VA (*Volt Ampere*) adalah hasil kali antara tegangan dan arus listrik yang mengalir pada beban, di mana:

$$S = VI \quad (2.13)$$

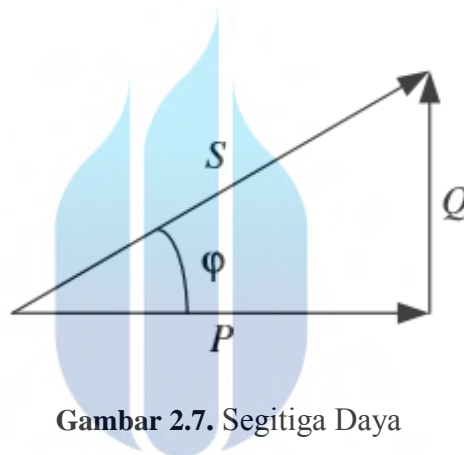
Keterangan:

S = daya semu (VA)

V = tegangan (*Volt*)

I = arus (A)

Hubungan ketiga buah daya listrik yaitu daya aktif P, daya reaktif Q, serta daya semu S, dinyatakan dengan sebuah segitiga, yang disebut segitiga daya (B. L. Theraja, 1984) Berikut gambar 2.7 yang menjelaskan tentang segitiga daya.



Gambar 2.7. Segitiga Daya

(Sumber: <file:///C:/Users/alfarobi/Downloads/Documents/jtptunimus-gdl-noviariant-5926-3-bab2.pdf>)

Dari gambar segitiga daya tersebut, hubungan antara ketiga daya listrik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.14)$$

$$P = S \cos \varphi \quad (2.15)$$

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.16)$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (2.17)$$

$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.18)$$

$$\cos \varphi = pf = \frac{P}{S} \quad (2.19)$$

φ adalah sudut antara daya aktif dan daya semu S , sehingga $\cos \varphi$ didefinisikan sebagai faktor daya (*power factor*, pf). Untuk beban yang bersifat induktif, pf *lagging* di mana arusnya tertinggal dari tegangannya. Sementara untuk beban yang bersifat kapasitif, pf *leading* dimana arusnya mendahului tegangannya.

2.10 Penyusutan Energi Pada Jaringan Distribusi

Rugi-rugi atau biasa dikatakan sebagai susut energi merupakan fenomena yang umum terjadi dimana suatu sistem tidak mungkin memiliki efisiensi sebesar 100 %. Artinya selalu ada bagian dari daya yang hilang ketika disalurkan, sehingga tidak seluruh daya yang dikirimkan dapat sampai pada konsumen.

Sistem distribusi merupakan komponen yang mempunyai kerugian terbesar. Sebagai contoh, berdasarkan audit energi hingga tahun 2004, angka kerugian energi total PLN seluruh Indonesia adalah 16.84%. Dari total kerugian tersebut, kerugian sistem distribusi memiliki kerugian terbesar yaitu 14.47%, sedangkan kerugian transmisi hanya 2.37% [1].

Penyusutan energi pada jaringan distribusi ini dapat dibagi menjadi beberapa bagian, antara lain:

1. Penyusutan energi pada penyulang
2. Penyusutan energi pada transformator distribusi
3. Penyusutan energi pada persambungan (*jointing*)

2.11 Konduktor Fasa

Pada bagian penyulang ini konduktor fasa merupakan bagian dari penyulang yang terbuat dari bahan logam. Umumnya bahan yang digunakan berupa aluminium dan tembaga. Karena terbuat dari bahan logam, maka

konduktor yang dipakai memiliki nilai resistansi (R) tertentu. Resistansi dari konduktor pada kabel merupakan bagian penting dari impedansi yang digunakan untuk studi kegagalan dan studi aliran daya. Resistansi memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap kapasitas arus yang dapat dibawa oleh kabel. Variabel umum yang mempengaruhi resistansi adalah suhu dari konduktor tersebut, dapat dikatakan bahwa resistansi meningkat seiring dengan peningkatan suhu sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$R_{t2} = R_{t1} \frac{M+t2}{M+t1} \quad (2.20)$$

Dimana :

R_{t2} = Resistansi pada saat suhu t_2 , °C

R_{t1} = Resistansi pada saat suhu t_1 , °C

M = Koefisien *temperature* untuk material tertentu

= 228.1 untuk aluminium

= 245.5 untuk tembaga

Untuk jangkauan suhu yang luas, resistansi akan meningkat hampir linier terhadap suhu baik pada aluminium maupun pada tembaga. Efek dari suhu terhadap kenaikan resistansi dapat disederhanakan sebagai persamaan linier sebagai berikut:

$$R_{t2} = R_{t1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (2.21)$$

Dimana :

α = Koefisien *temperature* dari resistansi

= 0.00404 untuk 61.2 % aluminium IACS pada suhu 20 °C

= 0.00347 untuk 6201-T81 aluminium *alloy* pada suhu 20 °C

= 0.00383 untuk tembaga *hard-drawn* pada suhu 20 °C

= 0.0036 untuk aluminium-*clad steel* pada suhu 20 °C

Sehingga dari persamaan (2.20) dan (2.21) diatas di dapat hubungan bahwa $\alpha = \frac{1}{M}$ yang perlu diperhatikan dalam permasalahan ini adalah ketika

jaringan transmisi masuk ke dalam GI, maka tegangan sistem akan diturunkan dari tegangan tinggi untuk transmisi (150 kV) menjadi tegangan menengah (20 kV) sehingga dengan besar daya yang sama, maka penurunan tegangan akan sejalan dengan kenaikan arus pada sistem. Arus yang besar pada konduktor dapat menimbulkan rugi-rugi daya yang besar pada konduktor tersebut karena fungsi arus merupakan fungsi kuadrat pada persamaan daya yang hilang, sebagaimana dinyatakan pada persamaan berikut:

$$P_{\text{losses}} = I^2 R \quad (2.22)$$

Dimana :

P_{losses} = Daya yang hilang pada rangkaian, *Watt*

I = Arus yang mengalir pada rangkaian, *Ampere*

R = Hambatan pada rangkaian, *Ohm*

Arus dengan besar 4 *ampere* membuat daya yang hilang 16 kali lebih besar dibandingkan arus sebesar 1 *ampere* pada konduktor dengan hambatan yang sama. Sementara total energi yang hilang akibat terjadinya susut daya ini dapat diperhitungkan berdasarkan persamaan berikut:

$$W_{\text{losses}} = P_{\text{losses}} \cdot t \quad (2.23)$$

Dimana :

W_{losses} = Energi yang hilang, *Joule*

P_{losses} = Daya yang hilang pada rangkaian, *Watt*

t = Waktu, detik

2.12 Kabel Distribusi

Pada umumnya kabel yang digunakan untuk distribusi terdiri atas konduktor fasa, kemudian terdapat pelindung yang terbuat dari semikonduktor, isolasi kabel tersebut, pelindung isolator yang terbuat dari semikonduktor, kawat netral atau pelindung, dan selubung penutup bagian

terakhir atau luarnya. Sebagian besar kabel distribusi merupakan kabel dengan konduktor tunggal. Terdapat dua jenis kabel, yaitu kebel dengan netral yang tersusun secara konsentrik yang terbuat dari alumunium, isolasi padat, dan netral yang tersusun secara konsentrik. Netral konsentrik terbuat dari beberapa kawat tembaga yang dililit mengitari isolasi. Gambar 2.8 contoh penampang kabel distribusi.[4]



Gambar 2.8 Penampang Kabel Distribusi
(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Sementara itu kabel daya memiliki konduktor fasa yang terbuat dari tembaga atau alumunium, isolasi padat, dan umumnya pita pelindung tipis yang terbuat dari tembaga. Untuk keperluan rangkaian distribusi, kabel daya digunakan untuk aplikasi penyulang saluran utama, penyulang rangkaian dan untuk aplikasi tiga fasa dengan arus besar lainnya. Selain dua jenis kabel utama tersebut, juga terdapat kabel untuk keperluan aplikasi dengan tegangan menengah, seperti kabel daya tiga konduktor fasa, kabel yang tahan terhadap api, kabel dengan fleksibilitas tinggi, dan kabel bawah laut.[4]

Bagian yang perlu mendapat perhatian utama dari suatu kabel adalah isolasinya. Beberapa hal kunci yang perlu mendapat perhatian di dalam isolasi kebel adalah sebagai berikut:

a. Konstanta Dielektrik (Permitivitas)

Faktor ini mempengaruhi kapasitas dari kabel. Konstanta dielektrik merupakan perbandingan dari kapasitansi dengan material isolasi terhadap kapasitansi dengan konfigurasi yang sama di ruang hampa. Kabel dengan kapasitansi yang lebih besar dapat menarik arus *charging* yang lebih besar.

b. Resistivitas Volume

Arus bocor yang melalui isolasi merupakan fungsi dari resistivitas isolasi terhadap arus searah (DC). Resistivitas isolasi menurun seiring dengan kenaikan suhu. Isolasi pada saat ini memiliki resistivitas yang sangat tinggi sehingga hanya sedikit sekali arus resistif yang dapat mengalir dari konduktor menuju isolasi.

c. Rugi Dielektrik

Seperti pada kapasitor, kabel memiliki rugi dielektrik. Kerugian ini diakibatkan oleh pergerakan dipol-dipol di dalam polimer atau sebagai akibat dari pergerakan muatan pembawa di dalam lokasi. Rugi dielektrik memiliki kontribusi terhadap arus resistif bocor pada kabel.

d. Faktor Disipasi (*loss angle*, *loss tangent*, $\tan \delta$, dan pendekatan nilai PF)

Faktor disipasi merupakan perbandingan dari arus resistif yang muncul oleh kabel terhadap arus kapasitif yang muncul (I_R / I_X). Karena arus bocor umumnya kecil, maka faktor disipasi dapat digunakan sebagai pendekatan nilai faktor daya, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$pf = I_R / |I| = I_R / \sqrt{I_R^2 + I_X^2} \approx I_R / I_X = \text{faktor disipasi} \quad (2.24)$$

Beberapa faktor kunci untuk kabel dengan isolasi yang berbeda beda ditunjukkan oleh tabel berikut:

Tabel 2. 3 Faktor Kunci Isolasi pada Berbagai Macam Kabel

(sumber:buku skripsi fikri al farobi 2016)

	Konstanta Dielektrik 20° C	Loss Angl ϵ Tan δ 20° C	Resistansi Volume 20° C	Rugi Dielektrik tahunan W/1000 ft	Kekuatan Impuls V/mil	Penyerapan air ppm
PILC	3.6	0.003	10^{11}	N / A	1000-2000	25
PE	2.3	0.0002	10^{14}	N / A		100
XLPE	2.3	0.0003	10^{14}	8	3300	350
TR-XLPE	2.4	0.001	10^{14}	10	3000	<300
EPR	2.7-3.3	0.005-0.008	10^{13} - 10^{14}	28-599	1200-2000	1150-3200

Pada kabel, nilai kapasitansi yang muncul lebih signifikan dibandingkan nilai kapasitansi pada kawat saluran udara. Nilai kapasitansi dari kabel dengan konduktor tunggal ditunjukkan oleh persamaan berikut ini:

$$C = \frac{0.00736 \epsilon}{10 \epsilon_{10} \frac{D}{d}} \quad (2.25)$$

Dimana :

C = Kapasitansi, $\mu\text{F}/1000 \text{ ft}$

0.00736 = Konstanta dielektrik ruang hampa (ϵ_0)

ϵ = Konstanta dielektrik bahan (2.3 untuk XLPE, 3 untuk EPR)

d = Diameter bagian dalam dari isolasi

D = Diameter bagian luar dari isolasi

Pengaruh dari adanya nilai kapasitansi dari kabel akan menimbulkan daya reaktif pada sistem, sebagaimana dijelaskan dalam persamaan berikut ini:

$$Q_{\text{var}} = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot V_{\text{LG,kV}}^2 \quad (2.26)$$

Dimana :

Q_{var} = var / 1000ft / fasa

f = frekuensi dari sistem, Hz

C = kapasitansi, $\mu\text{F}/1000 \text{ ft}$

$V_{LG,kV}$ = tegangan saluran ke tanah, kV

Pada kabel untuk distribusi terdapat nilai hambatan yang muncul selain hambatan resistif yang berasal dari konduktor fasanya. Nilai hambatan yang lain ini akan menentukan impedansi total dari kabel yang digunakan. Hal yang mempengaruhi nilai impedansi total tersebut adalah nilai reaktansi yang berasal dari rangkaian yang bersifat induktif dan bagian rangkaian yang bersifat kapasitif.

Nilai reaktansi proporsional terhadap induktansi dan dari rangkaian induktansi akan menyebabkan tegangan yang berlawanan dengan perubahan aliran arus. Arus bolak balik (AC) selalu berubah, sehingga nilai reaktansi akan selalu menciptakan tegangan sebagai akibat dari aliran arus. Jarak antar konduktor akan menentukan komponen eksternal dari nilai reaktansi tersebut. Nilai induktansi berdasarkan oleh wilayah yang dipengaruhi oleh lingkaran arus, sehingga wilayah yang lebih besar (jarak antar konduktor yang lebih lebar) akan menimbulkan nilai induktansi yang besar juga. Pada kawat saluran udara, nilai reaktansi induktif terutama berdasarkan jarak pemisahan antar konduktor dan bukan ukuran dari konduktor tersebut, bukan pula jenis logam yang digunakan untuk konduktor tersebut, serta bukan kemampuan regang dari konduktor tersebut. Dengan adanya reaktansi pada jaringan maka dapat timbul daya reaktif. Daya reaktif dapat menimbulkan jatuh tegangan pada sisi penerima. [1]

Adanya jatuh tegangan di sisi penerima merupakan indikator adanya susut energi pada jaringan. Karena untuk beban-beban dengan kebutuhan suplai daya yang tetap, seperti pada motor-motor listrik, penurunan tegangan akan menyebabkan terjadinya peningkatan arus. Sedangkan telah dibahas diawal bahwa dengan adanya arus yang besar, maka rugi-rugi saluran akibat arus (I^2R) juga akan semakin besar, sehingga energi yang hilang pada jangka waktu tertentu juga akan besar. Hubungan antara tegangan dengan arus pada

beban yang membutuhkan suplai daya tetap dituliskan dalam persamaan berikut:

$$P = V I \cos \theta \quad (2.27)$$

Dimana :

P = daya yang dibutuhkan oleh motor motor (besarnya tetap)

V = tegangan operasi, *Volt*

I = arus pada rangkaian, *Ampere*

$\cos \theta$ = faktor daya

Ketika daya yang dibutuhkan konstan, maka penurunan tegangan akan diikuti dengan kenaikan arus.

2.13 Penyusutan Energi Pada Transformator Distribusi

Transformator merupakan komponen dalam jaringan tenaga listrik yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik dari suatu tingkat tegangan ke suatu tingkat lainnya. Sebuah transformator terdiri atas dua pasang kumparan yang terhubung oleh medan magnetik. Medan magnetik akan menghantarkan seluruh energi (kecuali pada autotransformator). Pada transformator yang ideal, tegangan pada sisi masukan dan keluaran berhubungan dengan perbandingan lilitan dari transformator tersebut, sebagaimana dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (2.28)$$

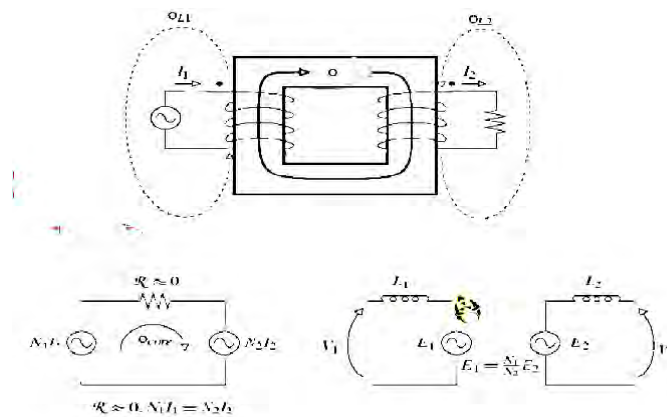
Dimana N_1 dan N_2 merupakan jumlah lilitan dan V_1 dan V_2 adalah tegangan pada kumparan 1 dan kumparan 2. Pada transformator yang sesungguhnya, tidak semua *fluks* berada diantara dua kumparan tersebut disalurkan. *Fluks* yang bocor tersebut akan menyebabkan terjadinya jatuh tegangan diantara kumparan primer dan kumparan sekunder, sehingga besarnya tegangan akan lebih akurat ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 - X_L I_1 \quad (2.29)$$

Dimana X_L merupakan reaktansi bocor dalam satuan ohm yang dilihat dari sisi kumparan primer, dan I_1 merupakan arus yang keluar dari kumparan primer. Arus pada transformator juga dipengaruhi oleh jumlah lilitan yang ada pada transformator tersebut, seperti pada persamaan berikut:

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad \text{atau} \quad N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.30)$$

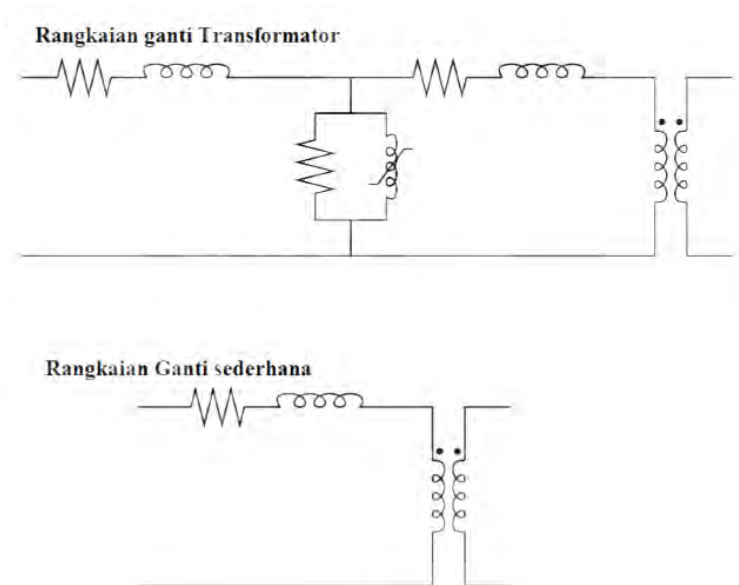
Transformator memiliki inti yang bersifat magnetik yang berfungsi untuk membawa medan magnetik yang besar. Baja yang dipergunakan sebagai inti di dalam transformator memiliki permeabilitas lebih dari 1000 kali dari permeabilitas udara. Apabila pada sisi primer (sisi sumber, sisi tegangan tinggi) diberikan suatu nilai tegangan tertentu dan pada sisi sekunder (sisi beban, sisi tegangan rendah) tidak ada beban yang terpasang. Maka kumparan akan menarik arus eksitasi dari sistem yang menimbulkan medan magnetik sinusoidal di inti transformator. *Fluks* yang muncul pada lilitan akan menyebabkan ggl (gaya gerak listrik) balik pada kumparan yang akan membatasi arus yang masuk ke dalam transformator. Transformator tanpa beban (*no load*) pada sisi sekundernya akan menarik arus yang kecil sekali (hanya berupa arus eksitasi) yang besarnya sekitar 0.5 % dari total arus yang mengalir pada transformator pada saat berbeban penuh. Pada sisi sekunder yang tidak berbeban, maka *fluks* sinusoidal akan menciptakan tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*) yang nilainya sama dengan nilai tegangan pada sisi primer dikalikan dengan perbandingan jumlah lilitan. Ketika kita tambahkan beban pada sisi sekunder dari transformator, maka beban akan menarik arus melalui kumparan sekunder. Umumnya pada rangkaian yang bersifat induktif, arus yang semakin besar akan menciptakan *fluks* yang lebih banyak, tetapi tidak pada transformator. Peningkatan gaya pada arus pada satu kumparan yang lainnya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.9.[1]



Gambar 2.9 Diagram *Fluks* yang dibangkitkan pada Transformator
(*Sumber*: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Fluks pada bagian inti transformator yang sedang dibebani besarnya sama dengan *fluks* pada bagian inti transformator yang tidak dibebani, walaupun arus pada transformator yang sedang dibebani lebih besar. Tegangan pada kumparan primer akan menentukan jumlah *fluks* pada transformator. Sementara *fluks* pada bagian inti menentukan tegangan pada sisi keluaran dari transformator.

Gambar 2.9 menunjukkan model dengan nilai impedansi tertentu pada sebuah transformator. Model yang mendetail menunjukkan serangkaian impedansi yang terdiri atas resistansi dan reaktansi. Serangkaian resistansi pada transformator sebagian besar merupakan resistansi kawat pada setiap kumparan. Sementara nilai reaktansi menunjukkan adanya impedansi bocor. Percabangan *shunt* merupakan cabang termagnetisasi, arus yang mengalir akan membuat inti pada transformator menjadi bersifat magnetic.



Gambar 2.10 Rangkaian Ganti Transformator

(Sumber: Buku Skripsi Danang Ramadhianto, 2008)

Sebagian besar arus magnetisasi merupakan daya reaktif, tetapi tetap memiliki unsur daya *real*. Daya pada transformator dapat mengalami penyusutan pada bagian inti transformator melalui beberapa hal, antara lain:

1. Histersis

Karena dipol-dipol magnet berubah arah, maka terjadi peningkatan panas pada inti transformator sebagai akibat adanya tumbukan antar dipol-dipol magnetik tersebut. Rugi histersis merupakan fungsi dari volume inti, frekuensi, dan kepadatan *fluks* maksimum sebagaimana dituliskan pada persamaan berikut:

$$P_h \propto V_e f B^{1.6} \quad (2.31)$$

Dimana :

V_e = volume dari inti

f = frekuensi

B = kepadatan *fluks* maksimum

2. Arus *Eddy*

Arus *Eddy* pada bahan penyusun inti transformator akan menyebabkan rugi-rugi resistir (I^2R). *Fluks* dari inti akan menginduksi arus *Eddy* sehingga menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan *fluks* pada transformator. Rugi arus *Eddy* merupakan fungsi dari volume inti, frekuensi, dan kepadatan *fluks*, ketebalan lempeng, resistivitas dari material penyusun inti sebagaimana dituliskan dalam persamaan berikut:

$$P_e \propto V_e B^2 f^2 t^2 / r \quad (2.32)$$

Dimana :

t = ketebalan lempeng

r = resistivitas dari material inti

Inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan secara signifikan mengurangi susut pada bagian inti, kurang lebih menjadi $1/4$ dari susut yang terjadi pada inti yang terbuat dari bahan baja-silikon, antara 0.005 % sampai 0.01 % dari *rating* transformator. Inti dari bahan *amorphous* memiliki rugi histerisis yang rendah. Rugi arus *Eddy* juga sangat rendah karena material memiliki resistivitas yang tinggi dan ketebalan lempeng yang sangat tipis (ketebalannya mencapai 1 mm). Transformator dengan inti yang terbuat dari logam *amorphous* akan memiliki ukuran yang lebih besar daripada transformator biasa pada *rating* yang sama dan memiliki biaya pengadaan yang lebih tinggi. Rugi pada susut tranformator dibebani, rugi ada saat transformator tanpa beban, dan harga semuanya memiliki hubungan. Ketika kita ingin mengurangi rugi-rugi saat transformator berbeban maka akan meningkatkan rugi saat transformator tidak berbeban dan begitu pula kebalikannya. Tabel 2.4 menunjukkan hubungan tersebut.[1]

Tabel 2.4 Hubungan antara Material Penyusun Transformator dengan Rugi-ruginya

Untuk menurunkan <i>no load losses</i>	<i>No load Losses</i>	<i>Load Losses</i>	Biaya
Menggunakan material dengan rugi lebih rendah	Lebih rendah	Tidak berubah	Lebih tinggi
Mengurangi kepadatan fluks dengan cara: <ol style="list-style-type: none"> 1. Memperbesar CSA (<i>cross-section area</i>) 2. Menurunkan tegangan/jumlah lilitan 	Lebih rendah	Lebih tinggi	Lebih tinggi
Untuk menurunkan <i>no load losses</i>			
Menggunakan material konduktor yang memiliki rugi-rugi rendah	Tidak berubah	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi kepadatan arus dengan cara memperbesar CSA (<i>cross-section area</i>)	Lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih tinggi
Mengurangi panjang daerah yang dilewati arus dengan cara: <ol style="list-style-type: none"> 1. Mengurangi CSA inti 2. Meningkatkan tegangan / jumlah lilitan 	Lebih tinggi	Lebih rendah	Lebih rendah

2.14 Penyusutan Energi Pada Sambungan (*Jointing*)

Persambungan merupakan salah satu hal yang penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Sambungan ini sedikit banyak menentukan keefisienan sistem atau peralatan listrik tersebut. Kontakor seperti saklar dan rele merupakan peralatan yang harus dapat mengalirkan arus dengan baik apabila dalam kondisi rangkaian tertutup. Dalam kondisi ideal, arus akan mengalir pada rangkaian tertutup dan akan langsung terputus apabila rangkaian terbuka. Pada kenyataannya, kondisi ideal merupakan hal yang

mustahil untuk dicapai. Banyak faktor-faktor lain yang menyebabkan kondisi di lapangan berbeda dengan teori yang ada. Busur listrik (*arching*) merupakan fenomena yang muncul pada persambungan. Busur listrik memiliki beberapa efek negatif yang harus diperhatikan seperti munculnya interferensi elektromagnetik, merusak permukaan kontak pada saklar, panas yang dihasilkan dapat menyebabkan permukaan kontak meleleh, dan yang paling berbahaya ialah dapat mencederai atau menyebabkan kematian pada manusia akibat kontak fisik secara langsung.

Busur listrik merupakan fenomena dimana arus bisa melewati celah antara permukaan elektrik seperti dua permukaan kontak pada konektor terpisah. Busur listrik dapat muncul pada kontak yang tertutup, yaitu ketika kedua permukaan saling mendekati sebelum keduanya benar-benar bersentuhan. Busur listrik juga bisa muncul pada kontak yang terbuka, yaitu pada saat permukaan kontak terpisah antara satu dengan lain.

Konektor elektrik atau saklar harus dapat melewatkan arus antara kedua permukaan kontak apabila dalam posisi tertutup. Hal ini menandakan adanya tegangan pada permukaan kontak. Apabila konektor tidak terhubung, atau saklar dalam posisi terbuka, arus akan berhenti mengalir tetapi tegangannya diputus. Pada keadaan yang tepat, tegangan ini akan menyebabkan munculnya busur pada celah antara kedua permukaan kontak.

Busur dapat muncul baik pada permukaan kontak yang terbuka maupun yang tertutup. Dalam kondisi tertutup, tegangan minimum busur turun sebagaimana kedua permukaan kontak saling mendekati. Apabila sumber tegangan terlalu rendah, tidak akan terbentuk busur dan arus hanya akan mulai mengalir apabila kedua permukaan saling bersentuhan. Sumber tegangan yang cukup, busur penutupan akan muncul dimana tegangan minimum busur turun sampai di bawah tegangan sumber.

Busur penutupan diawali dengan elektron meninggalkan katoda dan berpindah melewati celah kontak menuju anoda. Selama perjalanan, elektron akan bertabrakan dengan molekul ionisasi gas di udara. Cahaya yang muncul

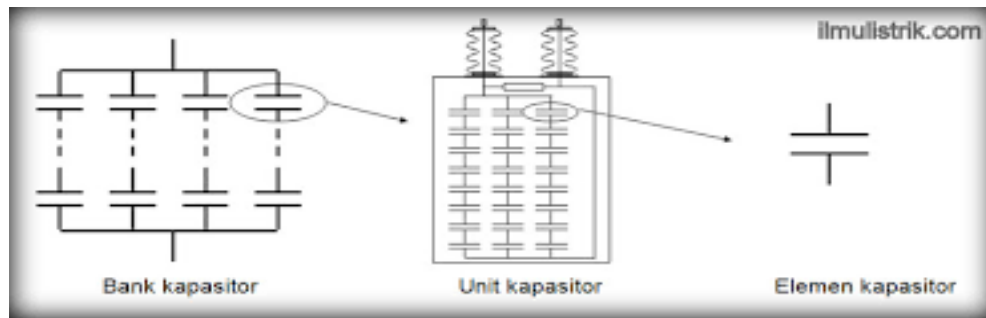
dari busur berasal dari energi molekul gas. Elektron akan menuju anoda dan memanaskannya sehingga dapat melepaskan ion-ion positif ke celah tersebut. Ion-ion positif ini bersamaan dengan campuran gas yang terjadi juga akan terbombardir dan memanaskan katoda. Pemanasan ini bisa menguapkan bagian dari katoda. Elektron, ion, metal, ion gas dan metal yang menguap semua membentuk kolom busur.

Busur listrik juga dapat muncul bila kedua permukaan kontak terpisah yang menyebabkan terputusnya arus pada rangkain. Hal ini terjadi bila arus dan tegangan beban yang besar terganggu sebagaimana sering ditemukan pada saklar atau rele. Busur terbuka dapat terjadi dengan cara berbeda. Ada nilai yang pasti dan resistansi elektrik sebagaimana arus ditekan melewati jalur yang kecil melewati permukaan. Dengan permukaan kontak yang mulai terpisah, tekanan berkurang baik dari jumlah maupun ukurannya. Hal ini mendorong nilai arus yang semakin besar yang melewati sisa jalurnya dan resistansi elektrik bertambah. Sementara nilai resistansi yang besar akan menyebabkan penyusutan energi karena rugi saluran resistif juga akan semakin besar.[1]

2.15 Kapasitor Bank

Bank kapasitor adalah peralatan yang digunakan untuk memperbaiki kualitas paskan energi listrik antara lain muu tegangan di sisi beban, memperbaiki faktor daya ($\cos p$) dan mengurangi rugi-rugi transmisi. Kekurangan dari pemakaian kapasitor adalah menimbulkan desain husus PMT (*switching conoller*).

Penjelasan istilah-istilah terkait bagian-bagian dapat di jelaskan pada gambar berikut:



Gambar 2. 11. ilustrasi bagian-bagian kapasitor
(sumber : buku skripsi imam samtoso 2012)

a. Elemen kapasitor

Elemen kapasitor merupakan bagian terkecil dari kapasitor yang berupa belitna alumunim foil dan plasti film

b. Unit kapasitor

Sebuah unit kapasitor terdiri dari elemen elemen yang di hubungkan dalam suatu matriks secara seri atau parallel. Unit capasitor rata rata terdiri dari 40 elemen elemen elemen elemen kapasitor dihubungkan secara seri untuk mebangun tegangan dan di hubungkan secara parallel untuj membanun daya (VAR) pad unit kapasitor. Unit kapasitor dilengkapi degan resistor yang berfungsi sebagai elemen pelepas muatan kapasitor(discharge device). Rating tegangan unit kapasitor bervariasi dari 240 V sampai 25 kV dan rating kapasitas dari 2,5 kVAR sampai 1MVAR.

Pada IEEE std 18-1992 dan std 1036-1992 dinyatakan bahwa :

- Unit kapsitor beroperasi ters menerus pada rating 110% Vrms dan tegangan puncak tidak melebihi $1,2 \sqrt{2}$ Vrms serta harus mampu dilalui arus sebesar 135% Inominal
- Pada rating tegangan dan frekuensi, daya reaktif harus berkisar antara 100% sampai 115% rating daya reaktif.

Tabel 2. 5. Spesifikasi kapasitas kapasitor yang di pasaran*(Sumber : Buku skripsi Imam Santoso 2012)*

Merk	Lifasa	Merlin gerlin
Qn	50 KVAR (delta) x 12 step = 600 KVAR	75 KVAR (delta) x 12 step =900 KVAR
Un	415 volt	415 volt
In	69,6 ampere	69,6 ampere
Temp	- 40/50 ⁰ C	- 40/50 ⁰ C
Merk	Merlin gerlin	Merlin gerlin
Qn	50 KVAR (Delta) x 18 step = 900 KVAR	75 KVAR (delta) x 12 step = 900 KVAR
Un	415 volt	415 volt
In	69,6 ampere	69,6 ampere
Temp	- 40/50 ⁰ C	- 40/50 ⁰ C

c. Automatic Power Factor Regulator (APFR)

Untuk merakit sebuah automatic capacitor bank pasti diperlukan alat yang bernama Power Factor (PF) controller, sering juga disebut power factor regulator atau regulator saja. Seperti namanya, alat ini berguna untuk menjaga kondisi Pf di jaringan agar sesuai dengan pf yang diinginkan. Pada alat tersebut setidaknya akan ditampilkan hasil dari PF jaringan, step yang sudah masuk. Untuk parameter yang lain seperti tegangan, arus, THD, dll mungkin juga di tampilkan tergantung jenis dan merknya. Dan untuk *type* yang sederhana setting hanya dengan memasukkan nilai C/K, target PF, konfigurasi step, dan time *connect / disconnect*. Step merupakan parameter yang menunjukkan jumlah output relay yang dikontrol oleh PF controller.

d. Bank kapasitor

Unit-unit terpasang dalam rak baja galvanis untuk membentuk suatu bank kapasitor dari unit-unit kapasitor fasa tunggal. Jumlah unit-unit kapasitor pada sebuah kapasitor bank ditentukan oleh tegangan dan daya

yang dibutuhkan. Untuk daya dan tegangan yang lebih tinggi, unit-unit kapasitor dihubungkan secara seri maupun paralel.

2.15.1 Prinsip Kerja

Kapasitor yang akan digunakan untuk memperbesar factor daya dipasang paralel dengan rangkaian beban. Bila rangkaian itu diberi tegangan maka elektron akan mengalir masuk ke kapasitor. Pada saat kapasitor penuh dengan muatan elektron maka tegangan akan berubah. Kemudian elektron akan keluar dari kapasitor dan mengalir kedalam rangkaian yang memerlukannya dengan demikian pada saat itu kapasitor membangkitkan daya reaktif. Bila tegangan yang berubah itu kembali normal (tetap) maka kapasitor akan menyimpan kembali elektron. Pada saat kapasitor mengeluarkan elektron (ic) berarti sama juga kapasitor menyuplai daya reaktif kebeban, karena beban biasanya mempunyai daya reaktif positif (Q positif) yang disebabkan adanya beban induktif, sedangkan kapasitor merupakan daya reaktif negative (Q negatif). Jadi pengaruh kapasitor adalah untuk mengurangi daya reaktif didalam jaringan.[3]

2.15.2 Fungsi

Kapasitor berfungsi untuk memperbaiki faktor daya jaringan, mengurangi rugi-rugi (losses) jaringan, menetralkan jatuh tegangan, dan memperbaiki stabilitas tegangan.

2.16 Jenis Kapasitor

2.16.1 Jenis Kapasitor yang Digunakan Pada Sistem Tenaga Listrik

A. Kapasitor Daya

Kapasitor daya terdiri dari 3 jenis yaitu kapasitor *shunt*, seri, dan penyadap

1. Kapasitor *Shunt*

Kapasitor *shunt* digunakan untuk kompensasi beban induktif dan untuk pengatur tegangan ujung transmisi. Aplikasi kapasitor shunt akan

memperbaiki faktor jaringan, mengurangi rugi-rugi jaringan, menetralkan jatuh tegangan dan memperbaiki stabilitas tegangan sehingga dengan kata lain suatu kapasitor *shunt* akan menaikkan angka efisiensi pada jaringan dengan memperbaiki faktor daya. Kapasitor akan menghasilkan daya reaktif bila dihubungkan dengan jaringan listrik. Pemasangan kapasitor ini, maka dapat mengkompensasi arus induktif yang banyak dibutuhkan oleh beban yang faktor dayanya rendah. Kapasitor tegangan rendah dipasang pada sistem saluran distribusi masing-masing atau motor-motor para pelanggan untuk mengurangi kerugian sistem dan memperbaiki tegangan maupun kemampuan sistem. Sebagai keuntungan tambahan bagi konsumen antara lain turunnya KVA yang dibutuhkan, kerugian daya dan tegangan stabil.[3]

2. Kapasitor Seri

Kapasitor seri digunakan pada transmisi daya yang sangat panjang untuk mengkompensasi reaktansi induktif transmisi. Dalam kapasitor seri daya reaktif sebanding dengan kuadrat tegangan. Ada beberapa aspek tertentu yang tidak menyenangkan pada kapasitor seri, secara umum dapat dikatakan biaya untuk memasang kapasitor seri jauh lebih tinggi dari biaya pemasangan kapasitor shunt.

Hal ini disebabkan karena peralatan pelindung untuk kapasitor seri sering lebih kompleks dan juga biasanya kapasitor seri didesign untuk beberapa daya yang lebih besar dari pada kapasitor *shunt*, ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kapasitor seri dan kapasitor *shunt* yang dapat dilihat pada table berikut[3]

Tabel 2. 6. kapasitor shunt dan kapasitor seri*(Sumber :Buku Skripsi Imam Santoso)*

No.	Tujuan	Pilihan	
		Kapasitor Shunt	Kapasitor Seri
1.	Memperbaiki factor daya	Pertama	Kedua
2.	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan factor daya normal dan rendah	Kedua	Pertama
3.	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran udara dengan factor daya tinggi	Pertama	Tidak Pakai
4.	Memperbaiki tingkat tegangan pada sitem saluran bawah tanah dengan factor daya normal dan rendah	Tidak Pakai	Pertama
5.	Memperbaiki tingkat tegangan pada sistem saluran bawah tanah dengan fator daya tinggi	Tidak Pakai	Tidak Pakai
6.	Mengurangi kerugian saluran	Pertama	Kedua
7.	Mengurangi fluktuasi tegangan	Tidak Pakai	Pertama

3. Kapasitor Penyadap

Kapasitor penyadap berfungsi untuk menyadap daya dari jaringan tegangan tinggi untuk keperluan daya yang tidak begitu besar.

B. Kapasitor Gandeng

Kapasitor gandeng yaitu kapasitor yang digunakan untuk pembawa sinyal komunikasi antara gardu induk.

C. Kapasitor Pembagi Tegangan

Kapasitor pembagi tegangan yaitu kapasitor yang digunakan untuk pengukuran tegangan transmisi dan rel daya.

D. Kapasitor Filter

Kapasitor filter yaitu kapasitor yang digunakan untuk *converter*, terutama pada sistem transmisi arus searah. Selain itu juga dapat digunakan

sebagai filter *harmonic* yang di pasang untuk mengurangi resonansi harmonic pada suatu jaringan memiliki kemampuan sebaik menyediakan daya reaktif yang dibutuhkan untuk kompensasi jaringan.

E. Kapasitor Perata

Kapasitor perata yaitu kapasitor yang digunakan untuk meratakan distribusi tegangan pada peralatan tegangan tinggi seperti pada pemutus daya (*circuit breaker*).

2.16.2 Pengelompokan Kapasitor Berdasarkan Fuse

Unit kapastor dikelompokan berdasarka letak *fuse* sebagai proteksi unit kapasitor. Letak *fuse* ini mempengaruhi desain dari rangkaian kapasitor dan desain proteksi yang diterapkan.

A. Fuse Internal

Setiap elemen kapasitor dilengkapi fuse, apabila terjadi kegagalan elemen kapasitor maka fuse yang berfungsi sebagai pembatas arus akan memutuskan secara efektif suatu elemen yang terjadi gangguan. Hanya sebagian kecil dari kapasitas total kapasitor yang hilang dan sisanya masih dapat beroperasi sehingga elemen tersebut terisolir dari elemen lainnya yang terhubung paralel dalam group. Umumnya bank kapasitor dengan *fuse* internal umumnya memiliki lebih sedikit unit kapasitor yang terhubung parallel dan lebih banyak group kapasitor yang terhubung seri di bandingkan unit kapasitor yang memiliki fuse external. Unit kapasitor dengan fuse internal umumnya memiliki ukuran yang besar karena diharapkan kerusakan seluruh elemen pada unit kapasitor bisa lebih lama.

B. Fuse Eksternal

Konstruksi kapasitor dengan fuse eksternal yaitu bahwa setiap unit kapasitor di proteksi oleh fuse pasangan luar. Kerusakan pada elemen kapasitor (hubung singkat) menyebabkan elemen-elemen pada group yang sama yang terhubung parallel dengan elemen yang rusak tersebut terhubung

singkat. Group kapasitor lainnya dengan elemen yang terhubung seri akan memiliki tegangan yang lebih tinggi dan arus yang lebih besar sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada group kapasitor seri lainnya. Hal ini berlangsung sampai fuse eksternal bekerja.[3]

C. Tanpa Fuse

Unit kapasitor tanpa fuse identik dengan unit kapasitor dengan kedua unit kapasitor yang di jelaskan sebelumnya. Bank kapasitor tanpa fuse dihubungkan secara seri diantara fasa dan netral. Proteksi berdasarkan elemen dari kapasitor apabila terjadi kerusakan pada elemen maka group elemen tersebut akan terhubung singkat sedangkan unit kapasitor tetap beroperasi dengan distribusi tegangan pada group seri akan meningkat. Missal 6 unit kapasitor di hubungkan seri dan setiap unit kapasitor memiliki 8 group seri sehingga total elemen yang terhubung seri menjadi 48 elemen group. Apabila terjadi kerusakan pada satu elemen kapasitor maka satu elemen group seri terhubung singkat, akhirnya distribusi tegangan pada elemen seri menjadi 48/47 atau terjadi kenaikan tegangan sekitar 2%.[1]

Kapasitor unit tanpa fuse biasanya tidak digunakan tegangan sistem lebih kecil dari 35 kV atau minimal 10 elemen seri agar kapasitor menjadi 10/9 atau terjadi kenaikan tegangan sekitar 11%. Pada konfigurasi ini , discharge energy kecil karena unit kapasitor tidak adayang dihubungkan parallel, selain itu proteksi unbalance tidak perlu didelay untuk koordinasi dengan fuse.

Kapasitor jenis ini digunakan untuk filter harmonic dengan daya yang relative rendah pada suatu level tegangan tinggi tertentu

2.16.3 Pengelompokan Kapasitor Berdasarkan Koneksi

Jumlah unit kapasitor unit terhubung parallel diperhitungkan apabila unit kapasitor terisolasi. Tidak akan menyebabkan unbalance tegangan pada unit kapasitor lainnya melebihi 110% rating tegangan. Jumlah minimum dari group kapasitor yang terhubung seri apabila satu group tereleminasi (hubung

singkat) tidak akan menyebabkan kapasitor lain *over voltage* lebih dari 110%.

Jumlah maksimum unit kapasitor pada setiap group paralel ditentukan oleh beberapa pertimbangan. Jika unit kapasitor rusak, unit kapasitor lain pada group paralel yang sama masih memiliki sejumlah muatan. Muatan sisa tersebut akan dibuang melalui kapasitor yang rusak dan melalui masing-masing *fuse*. Kapasitor yang rusak dan *fuse* harus tahan terhadap arus transient akibat pelepasan muatan tersebut.

Pelepasan muatan transient dari paralel kapasitor dalam jumlah besar dapat memecahkan kapasitor yang rusak atau meledakkan *fuse*, yang dapat menyebabkan kerusakan pada bank kapasitor. Untuk meminimalkan resiko diatas maka harus dibatasi energy maksimum yang tersimpan dalam group paralel kapasitor. Hal ini dapat dicapai dengan mengatur lebih banyak jumlah kapasitor dengan rating tegangan yang lebih kecil terhubung seri sehingga jumlah unit kapasitor dalam paralel group akan lebih sedikit tetapi mengurangi sensitivitas deteksi *unbalance*. [1]

Koneksi bank kapasitor yang umum digunakan ada 3 koneksi yaitu :

A. WYE Tunggal

Koneksi WYE tunggal sebagian besar digunakan unit kapasitor *fuse* eksternal atau bank kapasitor dengan suatu rating daya yang rendah. Proteksi *unbalance* diperoleh dengan membandingkan netral bank kapasitor dengan ground.

B. WYE dobel

Koneksi WYE dobel merupakan koneksi yang umum untuk kapasitor *fuse* internal dan sistem transmisi dengan satu netral yang terisolasi. Proteksi *unbalance* di bentuk dengan membandingkan dua koneksi WYE proteksi *unbalance* sehingga tidak dipengaruhi oleh variasi tegangan pada *feeding* sistem.

C. Koneksi H bridge

Merupakan salah satu koneksi WYE dengan sebuah netral yang terhubung ke ground. Proteksi unbalance secara normal terpasang dalam setiap fasa dengan membandingkan 2 (dua) titik pertengahan dalam fasa koneksi ini biasa digunakan sistem tegangan tinggi dengan netral yang terhubung solid ke *ground*.

2.17 Pemasangan Kapasitor

Kapasitor yang akan digunakan untuk memperbaiki (memperkecil) faktor daya, penempatan ada dua cara:

1. Terpusat kapasitor ditempatkan pada:
 - a. Sisi primer dan sekunder transformator
 - b. Pada bus pusat pengontrol
2. Cara terbatas kapasitor ditempatkan:
 - a. Feeder kecil
 - b. Pada rangkaian cabang
 - c. Langsung pada beban

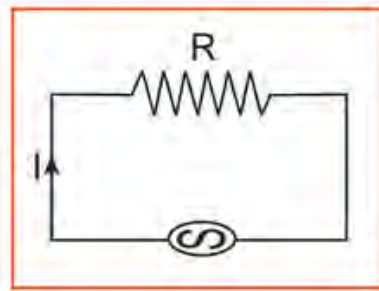
2.18 Karakteristik Beban Pada Sistem Arus Listrik Bolak-Balik (AC)

2.18.1 Karakteristik beban AC

Ada 3 macam karakteristik beban listrik arus bolak-balik (AC) yaitu:

1. Beban resistif
2. Beban induktif
3. Beban kapasitif

2.18.1.1 Beban Resistif



Gambar 2.12. rangkaian resistif
(sumber : buku skripsi fikriyan fajar al-farobi 2016)

Beban resistif ialah beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (resistance), seperti elemen pemanas (heating element) dan lampu pijar. Beban ini hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai factor daya sama dengan satu. Tegangan dan arus sefasa. Persamaan daya sebagai berikut :

$$P = V.I \quad (2.32)$$

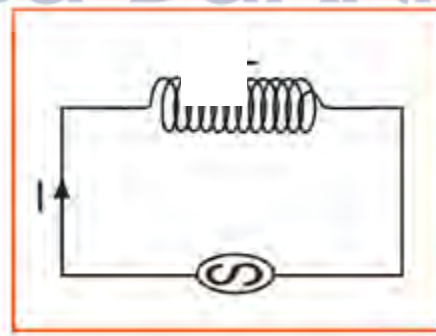
Dengan :

P = Daya aktif yang diserap beban (Watt)

V = tegangan yang mencatu beban (Volt)

I = Arus yang mengalir pada beban (A)

2.18.1.2 Beban Induktif



Gambar 2.13 rangkaian induktif
(sumber : buku skripsi fikriyan fajar al-farobi 2016)

Beban induktif ialah beban yang terdiri dari kumparan yang dililitkan suatu inti, seperti coil, transformator, solenoid. Beban induktif dapat mengakibatkan pergeseran fasa pada arus sehingga bersifat lagging. Hal ini disebabkan oleh energy yang tersimpan berupa medan magnetis akan mengakibatkan fasa arus bergeser menjadi tertinggal terhadap tegangan. Beban jenis ini meyerap daya aktif dan reaktif. Persamaan daya aktif untuk beban induktif ialah :

$$P = V.I \cos \phi \quad (2.33)$$

Dengan:

P = daya aktif yang di serap beban (watt)

V = tegangan yang mencatu beban (volt)

I = arus yang mengalir pada beban (A)

Φ = sudut antara arus dan tegangan

Untuk besarnya reaktansi induktif (XL) dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.34)$$

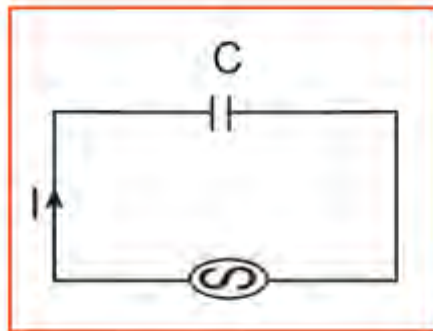
Dengan :

X_L = reaktansi induktif

f = frekuensi (Hz)

L = induktansi (Henry)

2.18.1.3 Beban Kapasitif



Gambar 2.14 Rangkaian kapasitif
(sumber : buku skripsi fikriyan fajar al-farobi 2016)

Beban kapasitif (C) ialah beban yang memiliki kemampuan kapasitansi atau kemampuan untuk menyimpan energy yang berasal dari pengisian elektrik (electrical discharge). Pada suatu sirkuit. Komponen ini menyebabkan arus leading terhadap tegangan. Beban jenis ini menyerap daya aktif dan mengeluarkan daya reaktif. Persamaan daya aktif untuk beban induktif adalah sebagai berikut:

$$P = V \cdot I \cos \Phi \quad (2.35)$$

Dengan :

P = Daya aktif yang diserap beban (watt)

V = Tegangan yang mencatu beban (Volt)

I = arus yang mengalir pada beban (A)

Φ = sudut antara arus dan tegangan

Untuk menghitung besarnya reaktansi kapasitif (X_c), dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c} \quad (2.36)$$

Dengan:

X_c = reaktansi kapasitif

F = frekuensi

C = kapasitansi (Farad)

2.19 ETAP 12.6.0

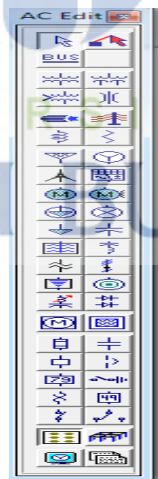
ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan offline untuk simulasi tenaga listrik, online untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang terdapat didalamnya pun bermacam-macam antara lain fitur yang digunakan untuk menganalisa pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik. Pada penelitian ini, SVC (*Static Var Compensator*) akan dimodelkan sebagai injeksi daya reaktif pada sistem tenaga listrik dilakukan analisa pengaruh penempatan SVC (*Static Var Compensator*) dengan menggunakan analisa aliran daya dalam merancang suatu sistem tenaga listrik perlu dilakukan simulasi terhadap sistem yang akan dibuat, hal ini dapat membantu penulis mempermudah menganalisa sistem tersebut handal atau tidak. Perangkat lunak yang bisaa digunakan untuk simulasi sistem tenaga listrik salah satunya adalah Etap 7.5.0. Perangkat lunak tersebut dikembangkan oleh perusahaan operation technology inc, dan mengalami perubahan versi dari tahun ke tahun.

Analisa tegangan yang dapat dilakukan ETAP:

1. Analisa aliran daya
2. Analisa hubung singkat
3. Arc flash analisis
4. Analisa kestabilan transient

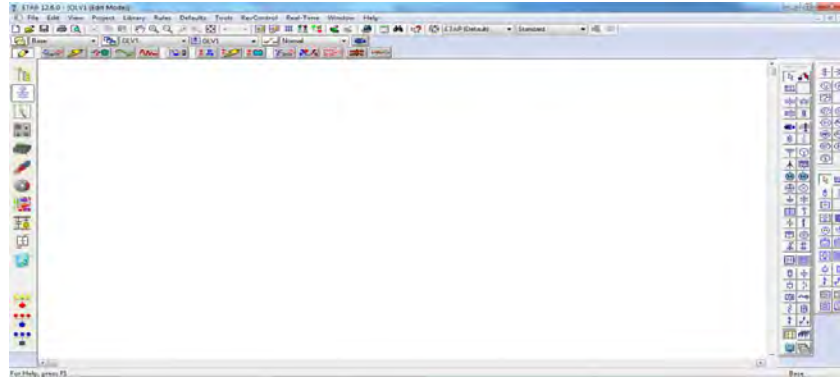
Dalam menganalisa tenaga listrik, suatu diagram saluran tunggal (*single line diagram*) merupakan notasi yang disederhanakan untuk sebuah sistem tenaga listrik tiga fasa. Sebagai ganti dari representasi saluran tiga fasa yang terpisah, digunakanlah sebuah konduktor. Hal ini memudahkan dalam pembacaan 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-kekanan yang sama, atas-ke-bawah, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili. 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-kekanan yang sama, atas-ke-bawah, sebagai saklar atau peralatan lainnya diwakili.



Gambar 2. 15. Elemen AC toolbar
(sumber : E:\tugas akhir)

Tampilan perangkat lunak Etap 12.6.0. secara umum dapat melihat gambar dibawah ini



Gambar 2. 16. tampilan ETAP 12.6.0.
(sumber : *E:\tugas akhir*)

2.19.1 Langkah Kerja penggunaan ETAP 12.6.0 Untuk Analisis Penempatan Kapasitor Guna Memperbaiki Losses dan Profil tegangan.

Menggunakan ETAP 12.6.0 dari awal hingga keluaran akhir penggunaan program:

1. Membuat one-line diagram sistem yang akan dibahas, dalam tulisan ini adalah sistem distribusi 150kV PT. PLN (Persero) Ranting pasar kemis.
2. Masukan data studi kasus yang ditinjau
3. Jalankan program Etap 12.6.0. dengan memilih icon optimal load flow analysis pada toolbar. Program tidak jalan (error) apabila terdapat kesalahan, data yang kurang dapat dimasukan kembali.
4. Keluaran studi aliran daya dapat diketahui setelah program dapat dijalankan.
5. Setelah mendapat hasil dari aliran daya optimal. Selanjutnya menjalankan program dengan penempatan kapasitor bank.
6. Hasil keluaran didapat dan membandingkan dengan hasil sebelum penempatan kapasitor.