

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Dalam penelitian Bakti Mulyoso yang berjudul “*Optimalisasi Daya Reaktif untuk Memperbaiki Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik dengan Menggunakan Program PSSE Versi 31.0.0 (Aplikasi PT PLN (Persero) UPB Sumbagut)*” dalam tugas akhir yang dipublikasikan oleh Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara tahun 2010. Pada sistem kelistrikan yang besar, pengaturan tegangan menjadi masalah yang penting, karena menyangkut masalah keandalan dari operasi sistem tenaga listrik. Perubahan struktur jaringan maupun pusat pembangkit listrik mutlak diperhatikan. Karena jika terjadi perubahan dalam struktur jaringan, maka akan diikuti oleh perubahan aliran daya maupun profil tegangan. Semakin besar beban induktif dalam sistem dan semakin panjang saluran transmisi yang digunakan, maka semakin besar pula daya reaktif yang akan diserap dan menyebabkan penurunan tegangan. Berdasarkan hubungan antara tegangan dan daya reaktif, maka tegangan dapat diperbaiki dengan mengatur aliran daya reaktif. PSS<sup>®</sup>E (Power System Simulation Engineering), adalah perangkat lunak yang dapat menampilkan antarmuka secara grafis dengan jumlah bus yang tidak terbatas. Salah satu kegunaan dari PSS<sup>®</sup>E adalah untuk studi aliran daya. Hasil pemasangan kapasitor di Gardu Induk Banda Aceh dan Lhokseumawe masing-masing dengan kapasitas sebesar 25 MVAR, dapat memperbaiki jatuh tegangan di Wilayah Nangroe Aceh Darussalam.

Dalam penelitian Dekpride Despa berjudul “*Pengaturan Aliran Daya Reaktif dengan Transformator Regulasi Jenis Pengatur Tegangan pada Jaringan Sistem Tenaga Listrik*” yang dipublikasikan dalam Jurnal Rekayasa Teknik Elektro “*Electrician*” Volume: 3, No.1, Januari 2009. Pengendalian daya reaktif dalam sistem tenaga listrik diperlukan untuk memperbaiki nilai tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya. Pengendalian daya reaktif bisa dilakukan dengan pengaturan yang tepat pada tap setting transformator. Penelitian ini dilakukan melalui studi literatur dan simulasi dengan perangkat lunak ETAP. Simulasi

dilakukan pada sistem 5 bus 6 saluran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformator dengan tap yang telah diatur tegangannya menunjukkan kenaikan tegangan sampai batas yang diijinkan ( $\pm 10\%$ ) terhadap tegangan nominal) dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem.

Dalam penelitian Liliana dan Syahputra berjudul “*Penempatan SVC (Static Var Compensator) Pada Jaringan Distribusi Dengan Etap 7.5.0*” yang dipublikasikan dalam Jurnal Sains, Teknologi dan Industri, Vol: 12, No. 1, Desember 2014, pp. 1 – 8. Studi kasus dalam penelitian ini adalah sistem distribusi 20 kV Rayon Bangkinang wilayah Salo. Sistem distribusi ini dimulai dari gardu induk Bangkinang sebagai *power grid* dengan kapasitas 35 MVA dan tegangan 150 kV yang menyuplai daya ke 41 bus dengan 216 beban dan 128 kabel. Pada jaringan distribusi tenaga listrik, aliran daya aktif dan reaktif merupakan parameter yang sangat penting dalam meningkatkan tegangan sistem. Daya reaktif yang berlebihan dapat mengakibatkan menurunnya faktor daya sehingga mengakibatkan kerugian daya meningkat. Penelitian ini menempatkan SVC yang telah dihitung berdasarkan persamaan daya reaktif, pada jaringan untuk menurunkan daya reaktif tersebut. Dari hasil simulasi yang dijalankan menggunakan ETAP 7.5.0, setelah ditematkannya SVC pada jaringan menghasilkan kenaikan nilai tegangan.

Dalam penelitian Khairina Noor dkk. berjudul “*Optimasi Penempatan dan Kapasitas SVC dengan Metode Artificial Bee Colony Algorithm*” yang dipublikasikan dalam Jurnal Mahasiswa TEUB, Vol: 2, No.3 tahun 2014. Dalam suatu sistem tenaga listrik, level tegangan turut berdampak pada kualitas daya yang dihasilkan. Karena permintaan beban yang terus bertambah level tegangan dapat mengalami penurunan. Injeksi daya reaktif menggunakan *Static VAR Compensator (SVC)* merupakan salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengurangi dan menurunkan tegangan akibat penambahan beban listrik. *Artificial Bee Colony Algorithm* merupakan salah satu jenis metode algoritma berbasis kemampuan intelegensi lebah yang dapat digunakan untuk menentukan penempatan dan kapasitas SVC. Pada penelitian ini, algoritma *Artificial Bee Colony* diterapkan pada data sistem transmisi Jawa–Bali 500 kV dengan tiga

macam kondisi pembebanan, yaitu 100%, 80%, dan 60%. Kapasitas SVC yang digunakan dalam simulasi tersebut adalah 0-300 MVAR. Hasil penelitian menunjukkan pemasangan SVC terbukti mampu mengatasi permasalahan tegangan sehingga level tegangan semua bus mampu memenuhi batas tegangan yang diijinkan. Selain itu juga menunjukkan semakin rendahnya tingkat pembebanan, kapasitas SVC yang perlukan akan semakin kecil.

Secara garis besar penelitian ini menggunakan data yang menjadi objek penelitian oleh Bakti Mulyoso. Perbedaan penelitian ini dari penelitian oleh Bakti Mulyoso adalah penelitian ini mengganti kapasitor dengan *Static Var Compensator* (SVC) dan menambah pengaturan *On Load Tap Changer* (OLTC) untuk memperbaiki jatuh tegangan (*undervoltage*) dan lonjakan tegangan (*overvoltage*). Perbedaan lainnya dalam penelitian ini adalah penggunaan perangkat lunak ETAP 12.6 untuk simulasi aliran daya.

## 2.2 Sistem Transmisi

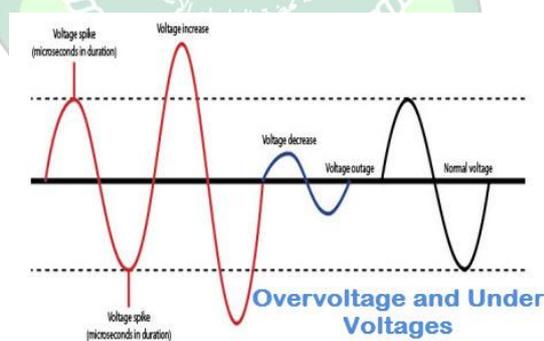
Sistem transmisi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari sumber pembangkit ke jaringan distribusi. Energi listrik yang dibangkitkan oleh generator akan dinaikkan tegangannya oleh transformator menjadi 150 kV maupun 500 kV untuk ditransmisikan menuju beban. Kenaikan nilai tegangan ini berfungsi untuk mengurangi rugi-rugi drop tegangan dan *losses* sepanjang jaringan transmisi (Liliana dan Syahputra, 2014).

Jaringan transmisi memiliki sistem yang kompleks dengan karakteristik yang sering berubah-ubah sehingga dapat menimbulkan banyak masalah. Masalah tersebut harus diperhatikan dengan baik karena sistem transmisi merupakan bagian kompleks dalam proses penyaluran energi listrik (Noor dkk., 2014). Contoh masalah yang sering dialami pada sistem transmisi adalah drop tegangan dan rugi-rugi daya. Jatuh tegangan menyebabkan kerugian pada sisi konsumen sedangkan rugi-rugi daya merugikan sisi penyedia layanan energi listrik (dalam hal ini adalah PLN).

## 2.3 Variasi Tegangan

Variasi tegangan adalah perubahan nilai tegangan pelayanan pada kondisi normal terhadap nilai tegangan nominal yang disebabkan oleh perubahan beban (tidak termasuk gejala transien dan subtransien) dan usaha pengaturan tegangan. Menurut SPLN No.1 tahun 1995 tentang Tegangan – Tegangan Standar, variasi tegangan pelayanan yang diperbolehkan adalah 5% diatas tegangan nominal dan 10% dibawah tegangan nominal. Tegangan yang variasinya melebihi batas yang ditentukan dinamakan *undervoltage* dan *overvoltage*.

*Undervoltage* adalah penurunan tegangan AC rms menjadi kurang dari 90% pada sistem dalam durasi lebih dari satu menit. Hal ini dapat disebabkan oleh penambahan beban yang besar. *Undervoltage* juga kadang-kadang disebabkan oleh pengurangan tegangan yang disengaja oleh peralatan untuk mengurangi beban selama periode beban puncak. *Overvoltage* adalah peningkatan tegangan AC rms ke tingkat yang lebih besar dari 105% pada sistem untuk durasi lebih dari satu menit. Ini disebabkan oleh *switching off* beban berukuran besar atau karena pasokan daya reaktif kapasitor bank. *Overvoltage* dapat mempersingkat masa pakai peralatan dan motor pada sistem tenaga, sedangkan *undervoltage* dapat mengurangi performa dan efisiensi dari peralatan. (Vedam dan Sarma, 2009)



Gambar 2. 1 Gelombang Terjadinya *Overvoltage* dan *Undervoltage*

### 2.3.1. Jatuh Tegangan

Beban yang terdapat pada sistem tenaga listrik umumnya bersifat resistif dan induktif. Beban resistif menyerap daya aktif sedangkan beban induktif akan menyerap daya reaktif yang dihasilkan oleh generator. Selain

beban, kawat penghantar sistem transmisi dan distribusi juga menyerap daya aktif dan daya reaktif.

Aliran daya reaktif inilah yang umumnya menyebabkan jatuh tegangan. Jika aliran daya reaktif terjadi dari sisi pengirim ke penerima, maka tegangan di sisi penerima akan lebih kecil dari sisi pengirim dan berlaku sebaliknya. Besarnya jatuh tegangan bergantung pada kuat arus ( $I$ ), reaktansi ( $R$ ) dan induktansi saluran ( $X$ ), besar sudut antara tegangan dan arus ( $\varphi$ ) dan panjang saluran ( $L$ ) dengan persamaan (Restu, 2008):

$$\Delta V = I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) L \quad \dots (2.1)$$

## 2.4 Daya

Dalam sistem tenaga listrik, daya adalah jumlah energi listrik yang diperlukan untuk melakukan suatu usaha (Liliana dan Syahputra, 2014). Daya listrik ( $P$ ) dilambangkan dalam satuan Watt. Satuan daya merupakan resultan dari tegangan ( $V$ ) dan kuat arus ( $I$ ). Besaran daya dan arus yang dikonsumsi suatu beban/ peralatan nilainya tetap. Sedangkan besaran lain umumnya akan berubah-ubah nilainya tergantung kondisi sistem.

$$P = V.I \quad \dots (2.2)$$

### 2.4.1. Daya Aktif

Daya aktif (*active power*,  $P$ ) adalah daya yang digunakan untuk melakukan usaha yang sebenarnya (Liliana dan Syahputra, 2014). Secara sederhana, daya nyata adalah daya yang dibutuhkan oleh beban yang bersifat resistif. Daya nyata menunjukkan aliran energi listrik dari pembangkit menuju jaringan beban untuk diubah menjadi bentuk energi lain. Satuan daya aktif adalah Watt.

$$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi \quad \dots (2.3)$$

### 2.4.2. Daya Reaktif

Daya reaktif (*reactive power, Q*) adalah daya yang digunakan untuk pembentukan medan magnet yang umumnya dibutuhkan oleh beban yang bersifat induktif. Satuan daya reaktif adalah VAR. Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan pemasangan kapasitor bank pada rangkaian yang memiliki beban bersifat induktif (Liliana dan Syahputra, 2014).

$$Q = \sqrt{3} V I \sin \varphi \quad \dots (2.4)$$

### 2.4.3. Daya Semu

Daya semu (*apparent power, S*) merupakan hasil perkalian dari tegangan dan arus. Daya semu merupakan satuan daya yang digunakan oleh pelanggan listrik PLN. Satuan daya semu adalah VA. Beban yang bersifat daya semu adalah beban yang hanya memiliki sifat resistif, contoh : lampu pijar, setrika listrik, kompor listrik dan lain sebagainya (Liliana dan Syahputra, 2014).

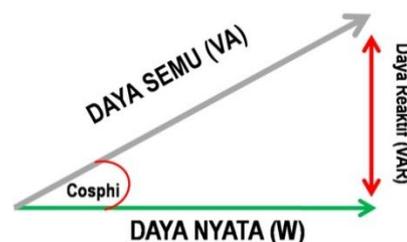
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \dots (2.5)$$

### 2.4.4. Faktor Daya

Faktor daya ( $\cos \varphi$ ) adalah perbandingan antara daya aktif terhadap daya semu. Sudut  $\varphi$  merupakan sudut pergeseran fasa. Semakin besar faktor daya, semakin kecil daya semu, dan semakin kecil pula daya reaktif (Liliana dan Syahputra, 2014).

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \dots (2.6)$$

Hubungan antara daya aktif, daya reaktif dan daya semu dapat dilihat pada segitiga daya dibawah ini:



**Gambar 2. 2** Segitiga Daya untuk Hubungan antara S, P & Q

#### 2.4.5. Rugi - Rugi Daya

Rugi-rugi daya atau *power losses* ( $P_L$ ) adalah hilangnya sejumlah energi, yang dibangkitkan oleh saluran sehingga mengurangi jumlah energi yang dapat dijual kepada konsumen. Hal ini memengaruhi tingkat profit dari perusahaan bersangkutan (dalam hal ini adalah PLN). Besarnya rugi-rugi dari suatu sistem tenaga listrik menunjukkan tingkat efisiensi dari sistem tersebut (Liliana dan Syahputra, 2014), makin rendah persentase rugi-rugi yang terjadi makin efisien sistem tersebut.

$$P_L = I^2 R \quad \dots (2.7)$$

Nilai resistansi suatu penghantar ( $R$ ) merupakan penyebab utama dari rugi-rugi daya yang terjadi pada saluran. Nilai resistansi penghantar sendiri dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti hambatan jenis ( $\rho$ ), panjang penghantar ( $l$ ), dan luas penampang ( $A$ ) sebagaimana persamaan berikut (Restu, 2008):

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad \dots (2.8)$$

Jumlah arus yang melewati penghantar merupakan faktor utama yang menentukan besarnya rugi-rugi daya. Itulah sebabnya tegangan dinaikkan menggunakan transformator sebelum melalui saluran transmisi karena sesuai persamaan 2.2, kuat arus akan mengecil jika tegangan dinaikkan.

### 2.5 Sistem Per Unit

Dalam analisis sistem tenaga, biasanya digunakan sistem per unit untuk menormalkan variabel sistem. Sistem per unit menawarkan kesederhanaan komputasi dengan menghilangkan unit dan mengekspresikan kuantitas sistem sebagai rasio tanpa dimensi (Momoh, 2001). Beberapa contoh persamaan untuk menghitung satuan per unit adalah sebagai berikut:

$$N_{pu} = \frac{N}{N_{base}} \quad \dots (2.9)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}} \quad \dots (2.10)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad \dots (2.11)$$

$$VA_{base} = V_{base} I_{base} \quad \dots (2.12)$$

$$\omega_{base} = 2 \pi f_{base} \quad \dots (2.13)$$

$N_{pu}$  = Nilai dalam per unit

$N$  = Nilai sebenarnya

$N_{base}$  = Nilai dasar dari suatu persamaan

$\omega$  = kecepatan sudut

$f$  = frekuensi

Nilai dasar dan nilai sebenarnya harus menggunakan parameter/ besaran yang sama, sehingga nilai per unit yang dihasilkan tidak lagi memiliki satuan. Misalkan nilai per unit suatu tegangan hanya didapat dari membandingkan nilai tegangan sebenarnya dengan nilai tegangan dasar. Sistem per unit yang dipilih dengan baik dapat meminimalkan usaha komputasi, menyederhanakan evaluasi, dan memfasilitasi pemahaman karakteristik sistem. (Momoh, 2001).

## 2.6 Studi Aliran Daya

Studi aliran daya adalah studi yang dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai aliran daya pada sistem dalam kondisi operasi konstan (normal). Studi aliran daya secara rutin digunakan dalam perencanaan, kontrol dan operasi sistem tenaga listrik yang sudah ada serta perencanaan untuk pengembangan di masa mendatang. Studi aliran daya juga memungkinkan kita untuk menentukan ukuran terbaik dan lokasi yang paling menguntungkan untuk kapasitor daya baik untuk meningkatkan faktor daya dan juga meningkatkan tegangan bus dari jaringan listrik. Studi aliran daya membantu kita untuk

menentukan lokasi terbaik serta kapasitas optimal dari stasiun pembangkit, gardu induk, atau jaringan baru yang telah diusulkan (Momoh, 2001).

Dalam operasi sistem tenaga, studi aliran daya digunakan untuk mengevaluasi keadaan sistem di bawah kondisi operasional yang diberikan dan untuk memungkinkan operator mendeteksi kelebihan muatan dan mengevaluasi batas dari transfer daya. Informasi yang diperoleh dari studi aliran daya meliputi besarnya dan sudut fase tegangan pada setiap bus dan aliran daya aktif dan reaktif di setiap jaringan (Momoh, 2001).

Ada 3 macam bus dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran diantaranya diketahui (Momoh, 2001), yakni:

- a. BUS PV (bus pembangkit). Pada tipe bus ini, nilai tegangan dan daya aktif telah diketahui sedangkan daya reaktif dan sudut fasa tegangan bisa didapat dari perhitungan.
- b. BUS PQ (bus beban). Pada tipe bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui, sedangkan dua lainnya bisa didapat dari perhitungan.
- c. Bus *swing/ slack*. Adalah suatu bus yang selalu mempunyai besaran dan sudut fasa yang tetap dan telah diketahui sebelumnya. Bus ini dipilih untuk memberikan tambahan daya nyata dan daya reaktif untuk memasok rugi-rugi transmisi karena rugi-rugi tidak diketahui sampai iterasi akhir didapatkan.

### 2.6.1. Bentuk Persamaan Aliran Daya Secara Umum

Untuk memahami aliran daya dalam sistem tenaga listrik, sebuah model matematika dapat digunakan. Model ini adalah persamaan aliran daya PFE (*Power Flow Equation*). Dalam kebanyakan kasus, pertimbangan bus  $i$  ditunjukkan seperti pada gambar 2.3. Pembangkit dan bebannya masing-masing diasumsikan sama dengan  $S_{Gi}$  dan  $S_{Di}$ . Dengan demikian daya bus  $S_i$  adalah (Momoh, 2001):

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = P_{Gi} - P_{Di} + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad \dots (2.14)$$

Saluran transmisi menghubungkan bus  $i$  ke bus lain dalam sistem. Paling banyak bisa ada  $n-1$  jalur output seperti itu, dimana masing-masing dapat diwakili oleh  $\pi$  ekuivalen, dengan admitansi seri ( $y_{sik}$ ) dan paralel ( $y_{pik}$ ). Jika suatu garis tidak ada, penerimaannya ditetapkan nol. Persamaan yang seimbang saat ini adalah (Momoh, 2001):

$$\begin{aligned} I_i = \frac{S_i}{V_i} &= V_i \sum_{k=1, k \neq i}^n y_{pik} + \sum_{k=1, k \neq i}^n y_{sik} (V_i - V_k) \\ &= V_i \sum_{k=1, k \neq i}^n (y_{pik} + y_{sik}) - \sum_{k=1, k \neq i}^n y_{sik} V_k \end{aligned}$$

... (2.15)

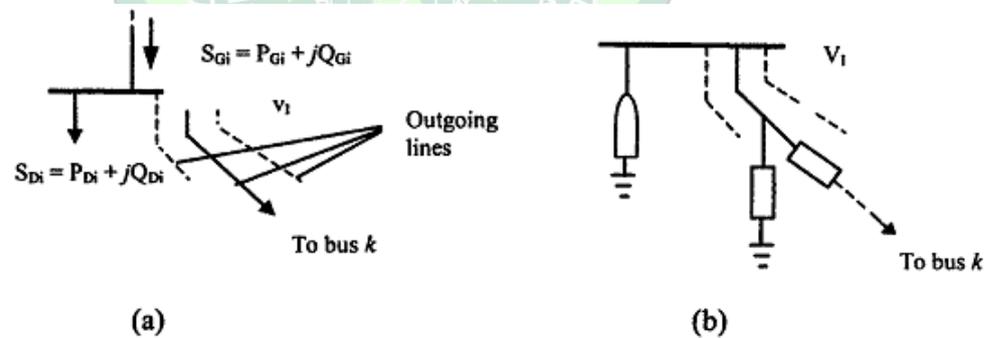
$y$  = admitansi

$k$  = konstanta

Persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk:

$$I_i = \frac{S_i}{V_i} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ii}V_i + Y_{in}V_n$$

... (2.16)



Gambar 2.3 Bus dengan Jalur Sumber, Beban dan Keluaran

$$Y_{ii} \triangleq \sum_{k=1, k \neq i}^n (y_{pik} + y_{sik}) \quad \dots (2.17)$$

$$Y_{ik} = Y_{ki} \triangleq -\frac{1}{2} y_{sik} \quad \dots (2.18)$$

Vektor arus bus dan tegangan bus n-dimensi menjadi:

$$I_{bus} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix},$$

$$V_{bus} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad \dots (2.19)$$

Kemudian matriks admitansi dan impedansi bus menjadi:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{in} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix},$$

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{in} \\ \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad \dots (2.20)$$

Saat ini ada beberapa metode yang sering digunakan menghitung aliran daya. Metode tersebut antara lain adalah Metode *Gauss Seidel*, Metode *Newton Rhapson*, dan Metode *Fast Decoupled*. Setiap metode untuk analisis aliran daya mempunyai kekurangan dan kelebihan satu sama lain. Metode *Gauss-Seidel* lebih sesuai untuk menghitung aliran daya pada sistem yang kecil, dan kurang sesuai untuk sistem besar, sedangkan metode *Newton Rhapson* bersifat sebaliknya. Adapun Metode *Fast Decoupled* adalah penyempurnaan dari metode-metode sebelumnya (Dwi Sulistiyono, 2011).

### 2.6.2. Bilangan Kompleks

Bilangan kompleks merupakan adalah bentuk bilangan yang memiliki komponen nyata dan komponen imajiner. Bilangan ini diperlukan pada analisis aliran daya listrik bolak-balik untuk menunjukkan nilai dan bentuk tegangan, arus serta impedansi dari suatu rangkaian sinusoidal (Sahputra, 2013). Bilangan ini digambarkan dalam bentuk *rectangular* seperti berikut:

$$x = a + jb \quad \dots (2.21)$$

$a$  dan  $b$  = bilangan nyata

$j$  = bilangan imajiner

Selain itu terdapat bentuk *polar* yang merupakan bilangan kompleks turunan dari bentuk *rectangular*. Persamaan bentuk polarnya yaitu:

$$y = c \angle \theta^\circ \quad \dots (2.22)$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta^\circ = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

$$a = \rho \cos \theta, \quad b = \rho \sin \theta$$

Untuk operasi bilangan kompleks, penjumlahan dan pengurangan dilakukan dalam bentuk *rectangular* sedangkan perkalian dan pembagian dilakukan dalam bentuk *polar*.

$$x_1 + x_2 = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2) \quad \dots (2.23)$$

$$x_1 + x_2 = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2) \quad \dots (2.24)$$

$$y_1 \cdot y_2 = (c_1 \cdot c_2) \angle (\theta_1 + \theta_2) \quad \dots (2.25)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \left( \frac{c_1}{c_2} \right) \angle (\theta_1 - \theta_2) \quad \dots (2.26)$$

## 2.7 ETAP 12.6

ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) adalah perangkat lunak rekayasa khusus untuk analisis, simulasi, pengawasan, kontrol, optimasi, dan automasi dari sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini dikembangkan oleh OTI Operation Technology, Inc. dan pertama kali dirilis pada tahun 1995.



Gambar 2. 4 Logo Perangkat Lunak ETAP

Perangkat lunak ETAP dikembangkan oleh program yang sudah terjamin kualitasnya dan telah digunakan di seluruh dunia sebagai perangkat lunak yang handal dan berpengaruh. Menggunakan modul simulasi *offline* standar, ETAP dapat memanfaatkan data operasi *real-time* untuk pemantauan lanjutan, simulasi *real-time*, optimasi, sistem manajemen energi, dan pemutusan beban berkecepatan tinggi secara cerdas.

ETAP memungkinkan pengguna untuk membuat dan mengedit grafis diagram satu garis, sistem saluran kabel bawah tanah, sistem kabel tiga dimensi, koordinasi yang canggih dan plot selektivitas, skema sistem informasi geografi, juga sebagai sistem jaringan tanah tiga dimensi dengan mudah. Program ini telah dirancang untuk menggabungkan ke tiga konsep utama:

1. *Virtual Reality Operation*

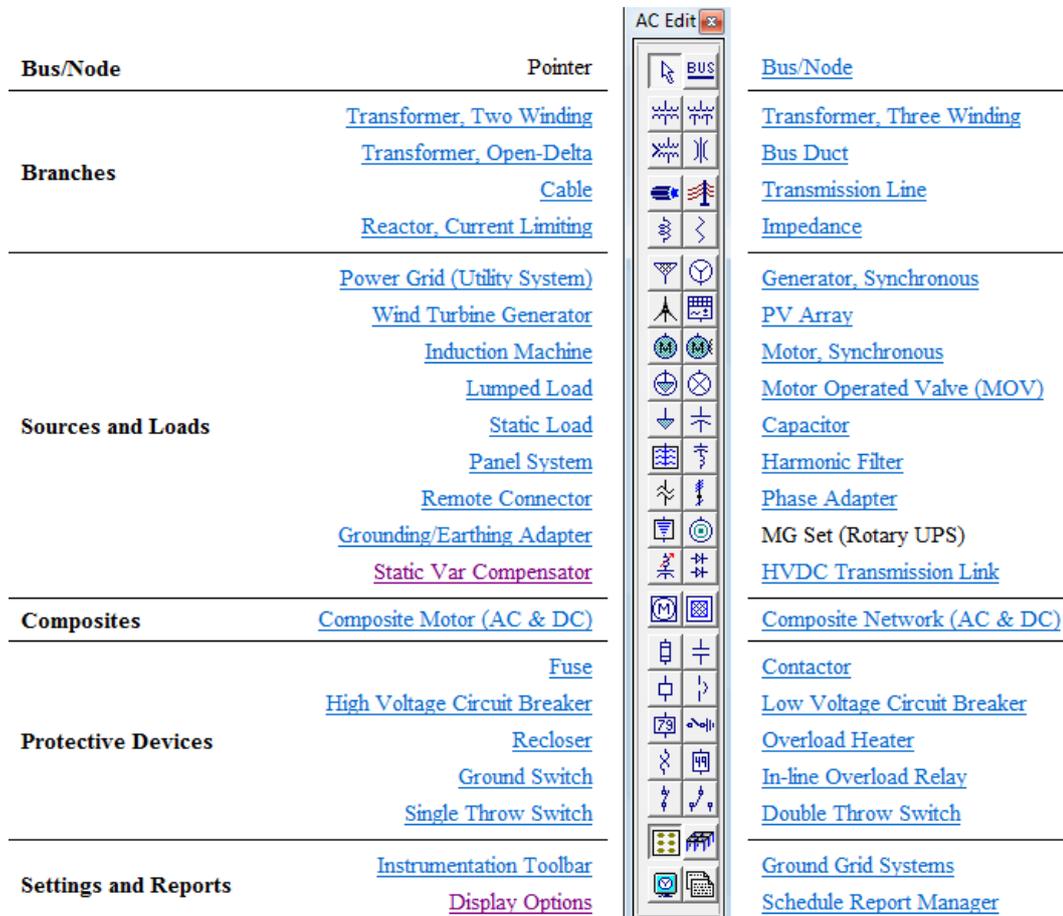
Program operasi mengemulasi operasi sistem listrik yang nyata sedekat mungkin. Misalnya, ketika pemutus daya dibuka, elemen dinonaktifkan, atau status operasi motor diubah maka elemen dan subsistem yang tidak tersuplai daya akan diindikasikan berwarna abu-abu.

2. *Total Integration of Data*

ETAP menggabungkan atribut listrik, logika, mekanik, dan fisik dari elemen sistem dalam database yang sama. Integrasi data ini memberikan konsistensi di seluruh sistem dan menghilangkan kebutuhan untuk memasukkan beberapa data untuk elemen yang sama, yang dapat menghemat waktu.

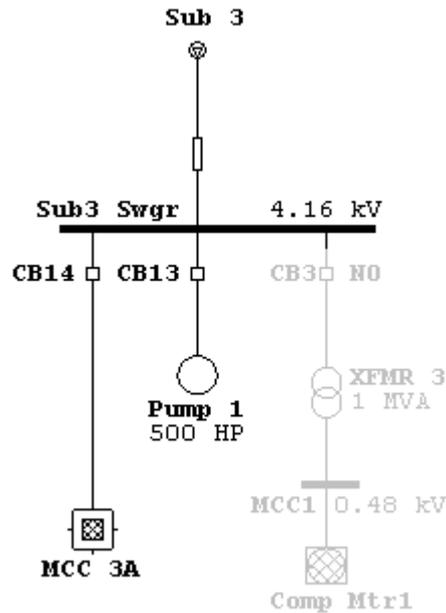
3. *Simplicity in Data Entry*

ETAP mencatat data terperinci untuk setiap peralatan listrik. Editor data dapat mempercepat proses entri data dengan meminta data minimum untuk studi tertentu. Untuk mencapai hal ini, editor properti telah disusun dengan cara yang paling logis untuk memasukkan data untuk berbagai jenis analisis atau desain.



Gambar 2. 5 Elemen-elemen Input untuk *One Line Diagram* ETAP 12.6

Perangkat lunak ETAP memiliki fitur *one line diagram* yang cerdas, editor komponen, data perlengkapan teknis yang valid dan akurat, manajemen konfigurasi dan hasil, basis data multi dimensi, konversi data dan manajemen akses pengguna. Modul analisis bawaan seperti kekuatan arus dan ukuran kabel serta saluran transmisi terintegrasi dengan kemampuan untuk desain, analisis, dan pengukuran peralatan.

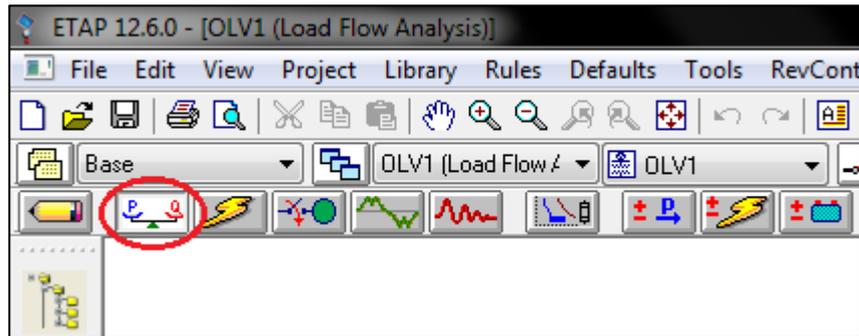


Gambar 2. 6 Contoh *One Line Diagram* yang Telah Dibuat

*One line diagram* ETAP mendukung sejumlah fitur untuk membantu dalam membangun jaringan dengan berbagai kerumitan. Misalnya, setiap elemen dapat memiliki orientasi, ukuran, dan simbol tampilan yang berbeda secara individual (IEC atau ANSI). Diagram satu garis juga memungkinkan untuk menempatkan beberapa perangkat proteksi antara cabang sirkuit dan bus.

## 2.8 Studi Aliran Daya pada ETAP

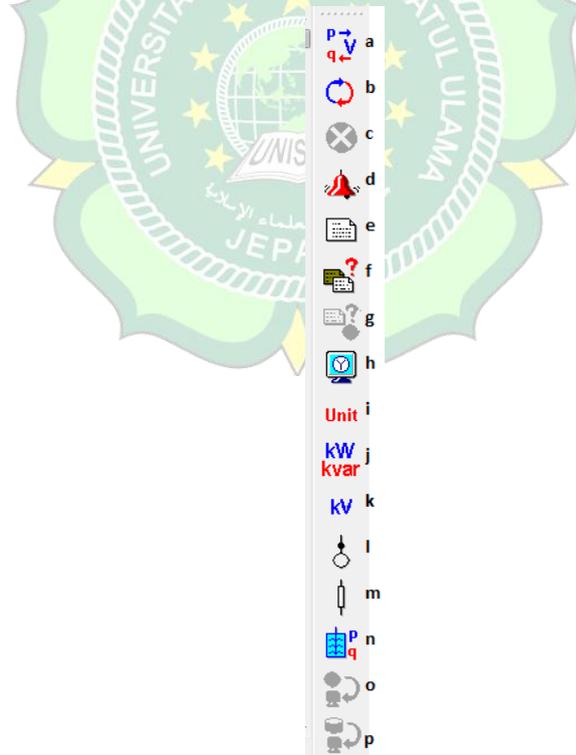
Salah satu modul simulasi pada *software* ETAP adalah Load Flow Analysis atau analisis aliran daya. Modul analisis aliran daya pada ETAP akan menghitung tegangan bus, faktor daya pada setiap cabang, arus, aliran daya yang berjalan pada sistem. ETAP bisa menerapkan *swing*, *voltage regulated*, dan *unregulated* pada sumber tenaga listrik dengan banyak jaringan listrik dan hubungan generator. Modul ini mampu menampilkan analisis pada sistem jaringan *loop* dan *radial* sekaligus. ETAP memungkinkan untuk penggunaan beberapa metode yang berbeda untuk mencapai efisiensi penghitungan terbaik.



**Gambar 2. 7** Ikon untuk *Load Flow Analysis*

### 2.8.1. *Load Flow Toolbar*

Bagian *Load Flow Toolbar* menjelaskan bagaimana untuk memulai perhitungan aliran daya, membuka dan melihat laporan output atau memilih opsi tampilan. Toolbar ini akan muncul di sebelah kanan halaman kerja setelah pengguna mengklik ikon *Load Flow Analysis* yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2. 8** Ikon pada *Load Flow Toolbar*

a. *Run Load Flow Studies*

Utuk menjalankan studi aliran daya. Setelah diklik, kotak dialog akan muncul untuk menentukan nama laporan output jika nama file output diatur ke *Prompt*. Hasil studi kemudian akan muncul pada *one line diagram* dan dalam laporan keluaran.

b. *Auto Run*

Untuk mengaktifkan dan menonaktifkan fitur *Auto Run*. Saat fitur *Auto Run* aktif, studi aliran daya akan tetap berjalan jika status dan properti elemen/peralatan diubah, maupun studi kasus aliran daya yang diubah.

c. *Halt Current Calculation*

Tombol berhenti yang biasanya berwarna abu-abu. Ketika perhitungan aliran daya telah dimulai, tombol ini menjadi aktif dan menunjukkan tanda berhenti berwarna merah. Mengklik tombol ini akan menghentikan proses perhitungan aliran daya.

d. *Alert View*

Setelah menjalankan studi aliran daya, fitur ini dapat digunakan untuk membuka pemberitahuan siaga, yang mencantumkan semua peralatan dengan pelanggaran yang bersifat kritis maupun kecil berdasarkan pengaturan pada *Study Case Editor*.

e. *Load Flow Report Manager*

Laporan output aliran daya disediakan dalam bentuk *Crystal Report*. *Report Manager* menyediakan empat halaman (*Complete, Input, Result, and Summary*) untuk melihat bagian yang berbeda dari laporan output untuk *Crystal Reports*.

f. *Load Flow Result Analyzer*

*Load Flow Result Analyzer* memungkinkan untuk melihat hasil dari berbagai studi dalam satu layar sehingga pengguna dapat menganalisis dan membandingkan hasil yang berbeda.

g. *Load Flow Comparator*

Fitur ini memuat daftar perbandingan semua nilai-nilai operasi sistem antara *output mode real-time* pada ETAP dan perhitungan *Load Flow*.

h. *Load Flow Display Options*

Hasil dari studi aliran daya ditampilkan pada *one line diagram*. Untuk mengedit bagaimana tampilan hasil studi aliran daya, pengguna bisa memilih ikon *Load Flow Display Options*.

i. *Unit Display Options*

Untuk menyalakan / mematikan unit di layar OLV.

j. *Power Flow Display Options*

Untuk memilih opsi tampilan aliran daya.

k. *Voltage Display Options*

Untuk memilih opsi tampilan voltase.

l. *Load Terminal Voltage*

Untuk menampilkan tegangan terminal beban.

m. *Line/Cable Voltage Drop*

Untuk menampilkan jatuh tegangan pada saluran atau kabel.

n. *Panel/Single Phase System*

Untuk menampilkan hasil panel atau sistem fase tunggal.

o. *Get Online Data*

Ketika mode *real-time* pada ETAP sudah diatur dan presentasi Sys Monitor sedang *online*, pengguna dapat membawa data *real-time* ke presentasi luring dan menjalankan aliran daya dengan menekan tombol ini. Pengguna akan melihat bahwa beban operasi, tegangan bus, dan editor studi kasus akan diperbarui dengan data daring.

p. *Get Archived Data*

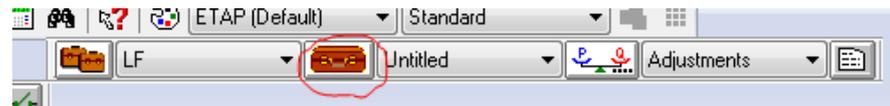
Ketika ETAPS *Playback* telah diatur dan presentasi apa pun berada pada mode *Playback*, pengguna dapat membawa data ini ke dalam presentasi dan menjalankan aliran daya dengan menekan tombol ini.

q. *Load Analyzer*

Alat *Load Analyzer* dan laporan terkaitnya dirancang untuk pelaporan jadwal beban dari model ETAP.

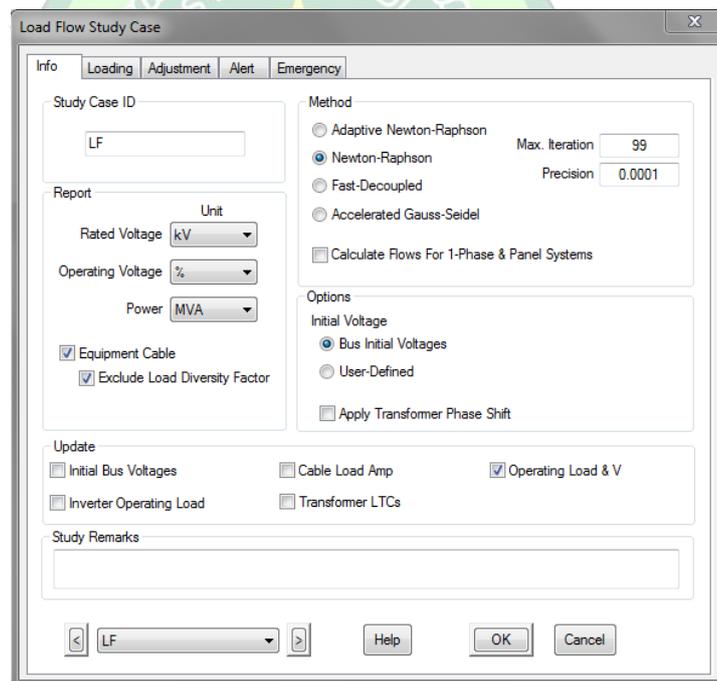
### 2.8.2. Study Case Editor

*Load Flow Study Case Editor* berisi variabel kontrol solusi, kondisi pembebanan, dan berbagai opsi untuk laporan keluaran. ETAP memungkinkan pengguna untuk membuat dan menyimpan sejumlah studi kasus tanpa batas. Perhitungan aliran daya dilakukan dan dilaporkan sesuai dengan pengaturan studi kasus yang dipilih pada *toolbar*.



**Gambar 2. 9** Ikon *Load Flow Study Case Editor*

Dalam *Load Flow Study Case Editor* juga terdapat *Alert Page* yang dapat digunakan untuk menentukan pengaturan semua peringatan simulasi yang disediakan untuk memberi tahu pengguna tentang kondisi pembebanan tidak normal yang telah ditentukan.



**Gambar 2. 10** Pilihan Menu pada *Load Flow Study Case Editor*

a. *Study Case ID*

ID Studi Kasus ditunjukkan dalam bidang entri ini. Pengguna dapat mengganti nama studi kasus dengan menghapus ID lama dan memasukkan ID baru.

b. *Method*

Dalam perangkat lunak ini ada empat metode solusi aliran daya yang bisa dipilih, diantaranya adalah: *Newton-Raphson*, *Adaptive Newton-Raphson*, *Fast-decoupled*, dan *Accelerated Gauss-Seidel*.

c. *Max. Iteration*

Untuk memasukkan jumlah maksimum untuk iterasi dalam *field* ini. Jika solusi belum terkumpul sebelum jumlah iterasi yang ditentukan, program akan berhenti dan memberi tahu pengguna.

d. *Precision*

Untuk memasukkan nilai untuk solusi yang paling presisi dalam studi kasus ini, yang digunakan untuk memeriksa konvergensi. Nilai ini menentukan seberapa presisi yang diinginkan pengguna untuk solusi akhir.

e. *Accel. Factor*

Field ini tersedia jika metode *Accelerated Gauss-Seidel* digunakan. Faktor percepatan konvergensi yang akan digunakan di antara iterasi harus dimasukkan. Nilai-nilai tipikal antara 1,2 sampai 1,7; sedangkan standarnya adalah 1,45.

f. *Apply Transformer Phase-Shift*

Untuk mempertimbangkan pergeseran fasa transformator dalam perhitungan aliran daya. Pergeseran fasa transformator dapat ditemukan di *Transformer Editor*.

g. *Update*

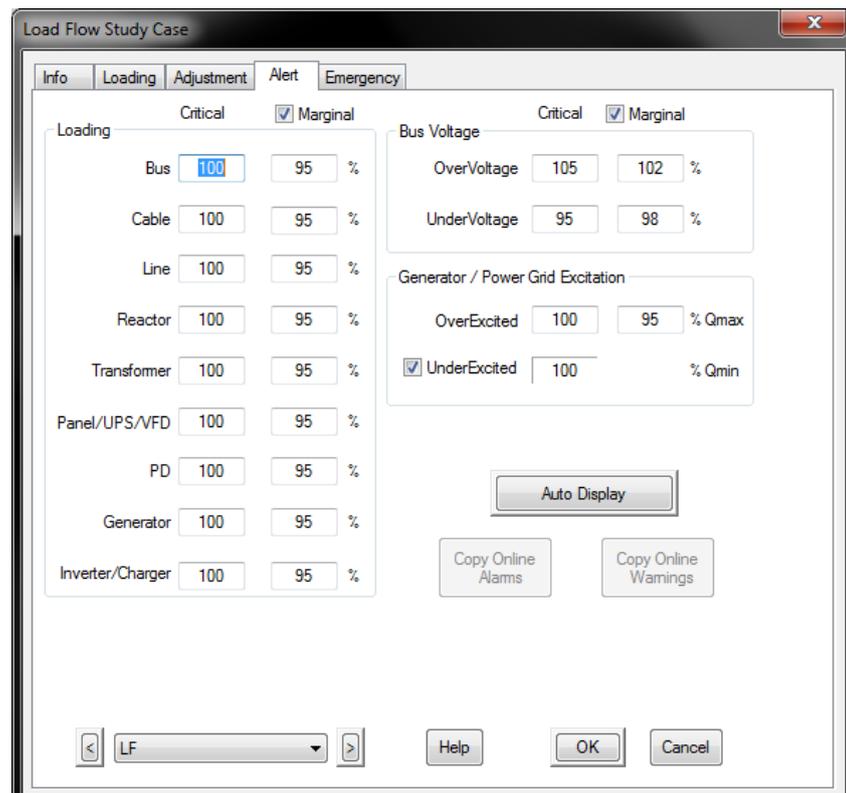
Dalam grup ini, pengguna dapat memutuskan untuk memperbarui kondisi awal bus dan mengatur tap transformator ke nilai *Load Tap Changer* yang telah dihitung. Opsi yang dipilih akan diperbarui setelah aliran daya berikutnya dijalankan.

h. *Report*

Untuk memilih satuan yang nantinya akan ditampilkan pada laporan setelah *load flow* dijalankan

i. *Initial Voltage Condition*

Kondisi awal untuk semua tegangan dan sudut bus dapat ditentukan di bagian ini untuk keperluan perhitungan aliran daya.



**Gambar 2. 11** Setting Alert pada Load Flow Study Case Editor

j. *Critical dan Marginal Alerts*

Ada dua jenis peringatan simulasi yang dihasilkan setelah studi aliran daya. Perbedaan antara *Marginal* dan *Critical Alerts* adalah penggunaan persentase yang berbeda untuk peringatan. Jika persentase untuk peringatan kritis terpenuhi, maka peringatan akan muncul di jendela *Alert View* dan elemen yang *overload* akan berubah menjadi merah pada diagram satu baris. Hal yang sama berlaku untuk *Marginal Alerts*, kecuali bahwa komponen yang *overload* akan ditampilkan dalam warna magenta.

k. *Loading*

Kumpulan nilai ini memungkinkan pengguna memasukkan nilai persentase dari parameter yang terpantau yang digunakan untuk menentukan apakah peringatan harus dilaporkan berdasarkan kondisi pembebanan yang ditentukan oleh perhitungan aliran daya.

l. *Bus Voltage Alerts*

*Bus Voltage Simulation Alerts* menghasilkan peringatan jika besarnya persentase tegangan hasil dari perhitungan aliran daya melebihi atau berada di bawah nilai nominal kV yang telah ditentukan.

m. *Generator/Power Grid Excitation Alerts*

*Simulation Alerts* untuk eksitasi generator dan jaringan listrik akan memantau persentase daya reaktif.

n. *Marginal Limit*

Jika opsi *Marginal* dicentang, jendela *Alert View* akan menampilkan peringatan marjinal juga. Jika tidak dicentang, jendela *Alert View* hanya akan menampilkan peringatan *Critical*.

### 2.8.3. Data yang Diperlukan untuk Simulasi *Load Flow*

a. Data Bus

1. Nominal kV
2. % dan sudut tegangan (dalam kondisi awal diatur untuk menggunakan *Use Bus Voltages*)
3. Faktor keragaman beban (ketika opsi loading diatur untuk menggunakan *Load Diversity Factor*)

b. Data Cabang

1. Data cabang dimasukkan ke *Branch Editors*, yaitu transformator, saluran transmisi, kabel, reaktor, dan impedansi. Data yang diperlukan untuk perhitungan aliran daya untuk cabang meliputi:
2. Nilai dan unit cabang Z, R, X, atau X / R dalam satuan per fasa, toleransi, dan suhu jika berlaku
3. Unit dan panjang kabel dan saluran transmisi

4. Transformator dengan rating kV dan kVA / MVA, tap, dan pengaturan LTC
  5. Impedansi kV dasar dan kVA / MVA dasar
- c. Data *Power Grid*
1. Mode operasi (*Swing, Voltage Control, Mvar Control*, atau *PF Control*)
  2. Nominal kV
  3. % dan sudut tegangan untuk mode *swing*
  4. % tegangan, pembebanan (MW), dan batasan Mvar ( $Q_{max}$  &  $Q_{min}$ ) untuk mode *voltage control*
  5. Pembebanan (MW dan Mvar), dan batasan Mvar untuk mode Mvar control
  6. Pembebanan (MW dan PF), dan batasan Mvar untuk mode PF Control
- d. Data Generator Sinkron
1. Mode operasi (*Swing, Voltage Control*, atau *Mvar Control*)
  2. Rating tegangan (kV)
  3. % dan sudut tegangan untuk mode *swing*
  4. % tegangan, pembebanan (MW), dan batasan Mvar ( $Q_{max}$  &  $Q_{min}$ ) untuk mode *voltage control*
  5. Pembebanan (MW dan Mvar), dan batasan Mvar untuk mode Mvar control
  6. Pembebanan (MW dan PF), dan batasan Mvar untuk mode PF Control
- e. Data Inverter
1. ID Inverter
  2. Data rating DC dan AC
  3. Data output pengatur tegangan AC
- f. Data Motor Induksi dan Motor Sinkron
1. Rating daya (kW/hp) dan tegangan (kV)
  2. Faktor daya dan efisiensi pada pembebanan 100%, 75%, dan 50%

3. % pembebanan untuk kategori pembebanan yang diinginkan
  4. Data kabel peralatan
- g. Data Beban Statis
1. ID beban statis
  2. Rating daya (kW/hp) dan tegangan (kV)
  3. Faktor daya
  4. % pembebanan untuk kategori pembebanan yang diinginkan
  5. Data kabel peralatan
- h. Data Kapasitor
1. ID Kapasitor
  2. Nilai kV, kvar / bank, dan jumlah bank
  3. % pembebanan untuk kategori pembebanan yang diinginkan
  4. Data kabel peralatan
- i. Data SVC
1. ID Elemen
  2. Rating tegangan (kV)
  3. Rating induktif (Baik  $Q_L$ ,  $I_L$ , atau  $B_L$ )
  4. Rating kapasitif (Baik  $Q_C$ ,  $I_C$ , atau  $B_C$ )
  5. Rating induktif maksimum (Baik  $Q_{L(Max)}$ , atau  $I_{L(Max)}$ )
  6. Rating kapasitif maksimum (Baik  $Q_{C(Min)}$ , atau  $I_{C(Min)}$ )
- Catatan:  $Q_C$ ,  $Q_{C(Min)}$ , dan  $B_L$  harus dimasukkan sebagai nilai negatif
- j. Data Lain
- Ada beberapa data terkait studi kasus yang juga harus disediakan, antara lain:
1. Metode (*Newton-Raphson*, *Fast-Decoupled*, atau *Accelerated Gauss-Seidel*)
  2. Iterasi maksimum
  3. Presisi
  4. Faktor akselerasi (ketika metode *Accelerated Gauss-Seidel* dipilih)
  5. Kategori beban
  6. Kondisi tegangan awal

7. Report (format laporan)
8. Pembaruan (untuk tegangan bus dan transformator LTC menggunakan hasil aliran daya)

#### 2.8.4. Menyesuaikan Data yang Tersedia dengan Data yang Disyaratkan

Untuk memulai simulasi *load flow*, data yang dimasukkan harus memenuhi ketentuan yang ada pada subbab 2.8.3. Karena tanpa spesifikasi data yang sesuai, simulasi pada software ETAP tidak akan berjalan. Data yang sesuai tersebut bisa didapat melalui perhitungan dari data-data yang sudah ada.

Berdasarkan pada lampiran 1-7, data yang harus disesuaikan adalah:

- a. Faktor daya beban (data beban yang tersedia adalah impedansi dan pembebanan MW dan MVAR, kapasitas MVA tidak termasuk karena angka tersebut adalah angka baku dari produk tersebut). Untuk mencari nilai faktor daya berdasarkan data tersebut, dapat menggunakan persamaan 2.5, dan persamaan 2.6.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \dots (2.27)$$

- b. Faktor daya generator (data generator yang tersedia adalah impedansi dan pembebanan MW dan MVAR, kapasitas MVA tidak termasuk karena angka tersebut adalah angka baku dari produk tersebut). Persamaan yang akan digunakan untuk mencari faktor daya tersebut sama dengan poin sebelumnya.
- c. Impedansi per fasa dari saluran (data saluran yang tersedia adalah panjang saluran dan impedansi per unit). Untuk mencari nilai faktor daya berdasarkan data tersebut, dapat menggunakan persamaan 2.1, 2.10, 2.11, dan 2.12.

$$VA_{base} = V_{base} I_{base}$$

$$\text{Nilai arus dasar} = I_{base} = \frac{VA_{base}}{V_{base}}$$

$$\begin{aligned} \text{Nilai impedansi dasar} = Z_{base} &= \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base} \cdot V_{base}}{VA_{base}} \\ &= \frac{V_{base}^2}{VA_{base}} \end{aligned} \quad \dots (2.28)$$

Diasumsikan nilai daya semu dasar menggunakan  $kVA_{base}$  atau  $MVA_{base}$

$$I_{base} = \frac{kVA_{base}}{kV_{base}} = \frac{1000 \cdot MVA_{base}}{kV_{base}} \quad \dots (2.29)$$

Diasumsikan nilai tegangan dasar menggunakan  $kV_{base}$

$$\begin{aligned} Z_{base} &= \frac{1000 \cdot kV_{base}}{I_{base}} = \frac{1000 \cdot kV_{base} \cdot kV_{base}}{kVA_{base}} \\ &= \frac{1000 \cdot kV_{base}^2}{kVA_{base}} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \end{aligned} \quad \dots (2.30)$$

Nilai impedansi sebenarnya =

$$Z = Z_{pu} \cdot Z_{base} = \frac{Z_{pu} \cdot V_{base}^2}{VA_{base}} \quad \dots (2.31)$$

$$= \frac{Z_{pu} \cdot kV_{base}^2}{MVA_{base}} \quad \dots (2.32)$$

Nilai impedansi per fasa, perkilometer =  $\frac{\text{nilai impedansi sebenarnya}}{\text{panjang saluran}}$

$$\begin{aligned} Z_{per\phi} &= \frac{Z}{L} \\ &= \left( \frac{Z_{pu} \cdot kV_{base}^2}{MVA_{base}} \right) / L \end{aligned} \quad \dots (2.33)$$

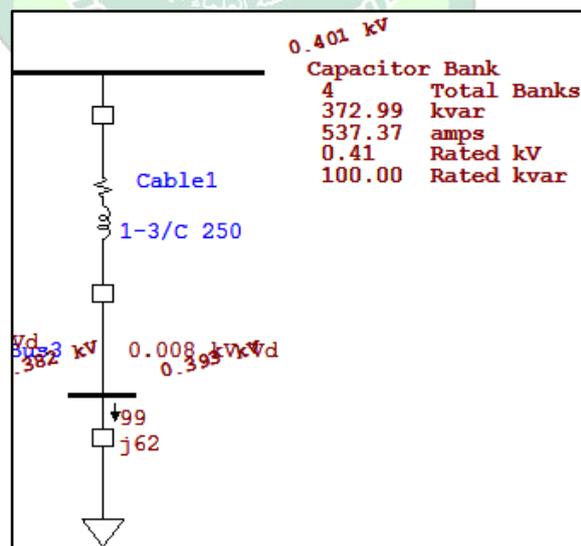
### 2.8.5. *Optimal Capacitor Placement*

*Optimal Capacitor Placement* (OCP) adalah salah satu modul simulasi ETAP yang masih memiliki keterkaitan dengan *Load Flow Analysis*. Simulasi OCP ini dapat menempatkan kapasitor untuk menaikkan nilai tegangan dan koreksi faktor daya, sambil meminimalkan total biaya pemasangan dan operasi. OCP Ini adalah alat simulasi yang sangat kuat yang dirancang khusus untuk aplikasi ini. Pendekatan perhitungan yang tepat secara otomatis pada OCP ini dapat menentukan lokasi dan ukuran kapasitor bank yang terbaik. Selain itu, hasil dari OCP ini melaporkan pelepasan dan penghematan kapasitas cabang akibat pengurangan VAR.



**Gambar 2. 12** Ikon *Optimal Capacitor Placement*

Untuk melakukan simulasi OCP ini pengguna harus memilih ikon *Optimal Capacitor Placement*. Kemudian pengguna harus memilih bus yang akan dikompensasi tegangan dan daya reaktifnya, serta kandidat bus yang akan dipasang kapasitor pada menu *Edit Study Case*. Setelah di *running* maka rekomendasi kapasitas dan jumlah kapasitor akan muncul di samping bus.



**Gambar 2. 13** Hasil Simulasi *Optimal Capacitor Placement*

## 2.9 Static VAR Compensator (SVC)

*Static VAR Compensator (SVC)* adalah peralatan yang berfungsi untuk kompensasi daya reaktif dengan kecepatan tinggi pada jaringan transmisi. Istilah *static* tersebut berdasarkan pada kenyataan bahwa pada saat beroperasi, tidak ada bagian SVC yang bergerak karena proses kompensasi secara penuh dikontrol oleh sistem elektronika daya. SVC akan menggunakan reaktor untuk mengurangi daya reaktif dari sistem saat beban cenderung reaktif kapasitif (*leading*), sehingga tegangan sistem turun. Pada kondisi reaktif induktif (*lagging*), SVC akan memberi daya dari kapasitor ke sistem sehingga tegangan sistem akan naik (Restu, 2008).

Penerapan SVC awalnya untuk kompensasi beban dari beban *fast charging* seperti pabrik baja dan pusat peleburan logam. Di sini tujuannya adalah untuk menyediakan peningkatan faktor daya secara dinamis dan juga menyeimbangkan arus di sisi sumber kapan pun diperlukan (Padiyar, 2007).

Tujuan dari penggunaan SVC adalah (Vedam dan Sarma, 2009):

- a. Dalam sistem transmisi
  - i. Meningkatkan transfer daya dalam saluran yang panjang.
  - ii. Untuk mengurangi tegangan lebih yang bersifat temporer.
  - iii. Untuk meredam resonansi subsinkron.
  - iv. Untuk meredam osilasi daya dalam sistem daya yang saling berhubungan.
- b. Dalam sistem traksi
  - i. Untuk menyeimbangkan beban
  - ii. Untuk meningkatkan faktor daya
  - iii. Untuk meningkatkan regulasi tegangan
- c. Dalam sistem HVDC
  - i. Untuk memberikan daya reaktif ke konverter AC-DC

Prinsip kerja SVC adalah dengan cara mengatur sudut penyalan thyristor, sehingga dapat mengendalikan keluaran daya reaktif dari SVC. Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali, yang kemudian akan

mengatur sudut penyalan thyristor. Dengan demikian SVC akan memberikan kompensasi daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem (Restu, 2008).

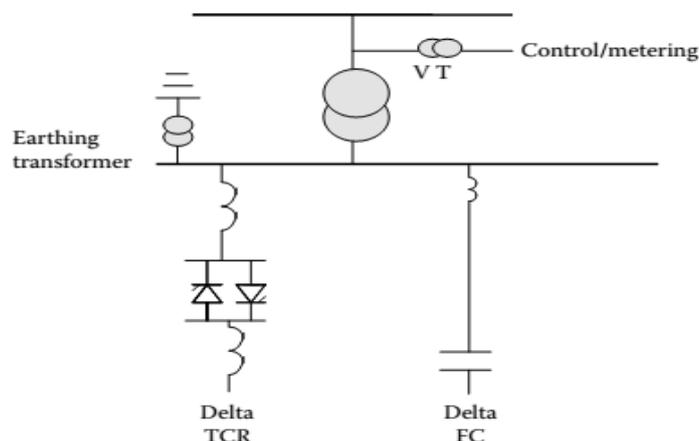
Reaktor hanya dapat mengurangi daya reaktif ketika jaringan kelebihan daya reaktif akibat permintaan beban yang rendah (waktu beban dasar). Sedangkan kapasitor hanya menambah pasokan daya reaktif saat waktu beban puncak. Kondensator sinkron sendiri dapat menyerap atau memasok daya reaktif ke sistem dalam jaringan dan memiliki kapabilitas terhadap *overload*. Namun peralatan tersebut memiliki respon yang lambat dan memerlukan biaya modal dan operasional yang mahal (Vedam dan Sarma, 2009).

### 2.9.1. Jenis-jenis SVC

Ada 4 jenis SVC yang sekarang umum dijumpai (Vedam dan Sarma, 2009), yaitu:

#### a. SVC tipe FC-TCR

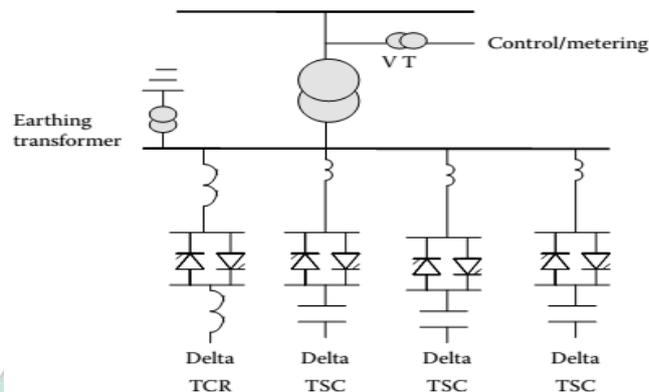
Dalam tipe ini, dua atau lebih FC (*Fixed Capacitor*) bank terhubung ke TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) melalui trafo step-down. Rating dari reaktor dipilih yang lebih besar dari rating untuk memberikan daya reaktif maksimum yang harus diserap dari sistem. Dengan mengubah sudut pengapian dari thyristor yang mengendalikan reaktor dari  $90^\circ$  ke  $180^\circ$ , daya reaktif dapat divariasikan di seluruh *range* dari *lagging* maksimum ke *leading* maksimum yang dapat diserap dari sistem oleh kompensator ini.



Gambar 2. 14 Rangkaian SVC Tipe FC-TCR

b. SVC tipe TSC-TCR

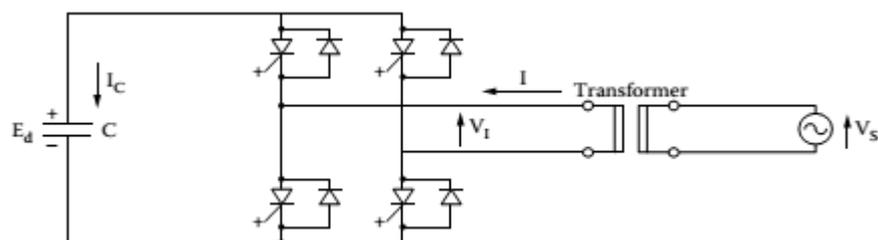
Kompensator ini mengatasi kekurangan utama dari kompensator sebelumnya dengan mengurangi kerugian dalam kondisi operasi dan kinerja yang lebih baik di bawah gangguan sistem yang besar. Mengingat *rating* yang lebih kecil dari setiap kapasitor bank, *rating* reaktor bank akan menjadi  $1/n$  kali output maksimum SVC, sehingga mengurangi harmonik yang dihasilkan oleh reaktor.



Gambar 2. 15 Rangkaian SVC tipe TSC-TC

c. SVC tipe Inverter *Self-Commutated*

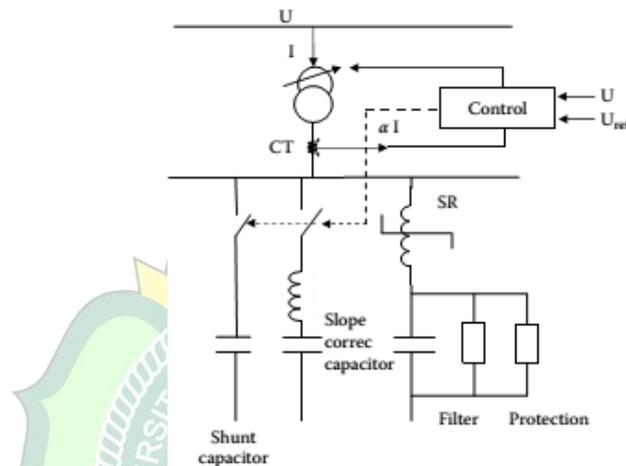
SVC tipe ini terdiri dari sebuah inverter menggunakan thyristor *gate turn-off*. Untuk inverter ini, sumber DC dapat berupa baterai atau kapasitor yang tegangan terminalnya dapat dinaikkan atau diturunkan dengan mengendalikan inverter yang terhubung. Ketika tegangan inverter  $V_i$  sama dengan tegangan sistem, SVC belum bereaksi. Ketika  $V_i$  lebih besar dari tegangan sistem, SVC bertindak seperti kapasitor, dan jika  $V_i$  kurang dari tegangan sistem, SVC bertindak seperti induktor.



Gambar 2. 16 Rangkaian SVC tipe Inverter Self-Commutated

d. SVC tipe Saturated Reactor (SR)

Secara historis, kompensator reaktor jenuh (SR) dikembangkan terlebih dahulu sebelum munculnya TCR SVC. Sebuah reaktor jenuh terdiri dari reaktor enam atau sembilan core yang jenuh dari konstruksi tipe transformator konvensional. Dengan menghubungkan gulungan delta sarat dengan induktansi, pengurangan lebih lanjut dari harmonik dapat dicapai.



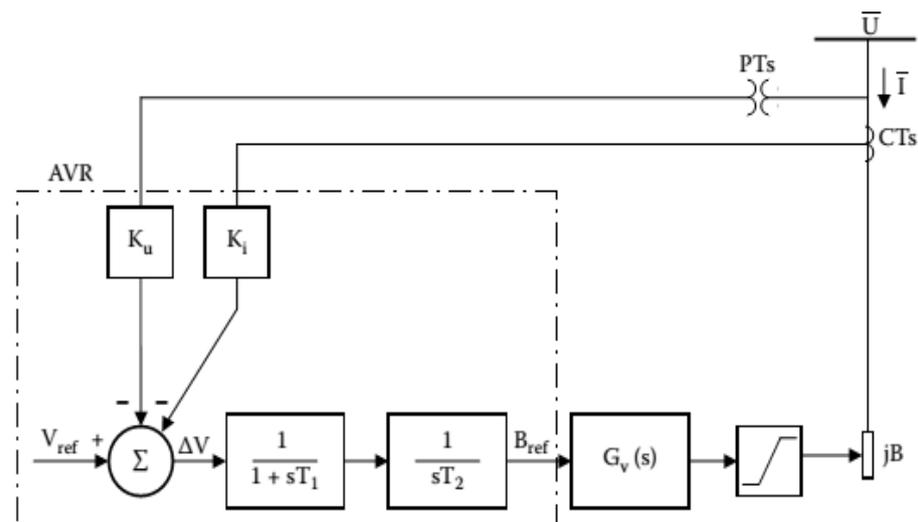
Gambar 2. 17 Rangkaian SVC tipe Saturated Reactor (SR)

Tabel 2. 1 Perbandingan Tipe-tipe SVC

Poin	TCR-Type SVC	TCR-TSC-FC Type SVC	Self-Commutated Inverter SVC	Saturated-Reactor Type SVC
Kontrol tegangan yang dapat diatur	Ya	Ya	Ya	Terbatas
Penyeimbang tiap fasa	Ya	Ya	Ya, jika unbalance kecil	Tidak
Kecepatan respon	Cepat, tapi tergantung sistem	Cepat, tapi tergantung sistem	Sangat cepat	Cepat, tapi tergantung sistem dan terhambat oleh koreksi kemiringan kapasitor
Sumber harmonisa	Filter mungkin diperlukan tergantung kondisi sistem	Sangat rendah, filter mungkin diperlukan tergantung kondisi sistem	Rendah	Sangat Rendah
Pembatasan overvoltage	Medium	Sangat terbatas	Buruk	Bagus, di bawah pembatasan koreksi kemiringan kapasitor
Rugi daya	Medium, cenderung meningkat seiring arus lagging	Kecil-medium, tergantung layout	Medium	Medium

### 2.9.2. Regulasi Tegangan pada SVC

Sistem kontrol harus menjaga tegangan bus di mana ia terhubung dalam batas yang ditentukan oleh pelanggan. Ini merupakan pengaturan tegangan urutan positif dari bus pelanggan. Untuk melakukan fungsi ini, sistem kontrol akan memiliki loop pengaturan tegangan dengan *feedback loop* dari tegangan dan arus yang menyediakan sudut yang diperlukan dari kondisi beban nol ke beban penuh (Vedam dan Sarma, 2009).



**Gambar 2. 18** Blok Diagram SVS Automatic Voltage Regulator

Misalkan  $X_e$  adalah reaktansi sistem ekuivalen yang menggambarkan jaringan yang terus bervariasi tergantung pada kondisi operasi sistem seperti pembangkit, beban, dan konfigurasi saluran transmisi. Hubungan (karakteristik sistem) antara tegangan bus aktual  $V$  dan tegangan bus  $E$  tanpa SVC dalam operasi dapat ditulis sebagai sebagai (Vedam dan Sarma, 2009);

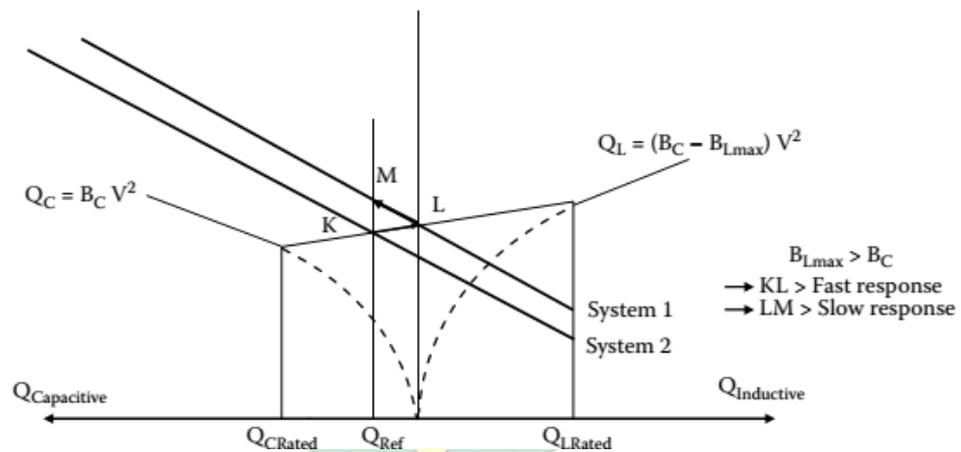
$$V = E - X_e I_{SVC} \quad \dots(2.34)$$

di mana  $I_{SVC}$  adalah arus yang ditarik oleh SVC. Hubungan antara  $E$  dan  $V$  juga dapat digambarkan dalam bentuk rating SVC ( $Q_{SVC}$ ) dan level hubung singkat tiga fasa ( $S_C$ ) di bus di mana SVC terhubung.

$$V = E (1 - (Q_{SVC} / S_C)) \quad \dots(2.35)$$

### 2.9.3. Kontrol Daya Reaktif dan Koordinasi pada SVC

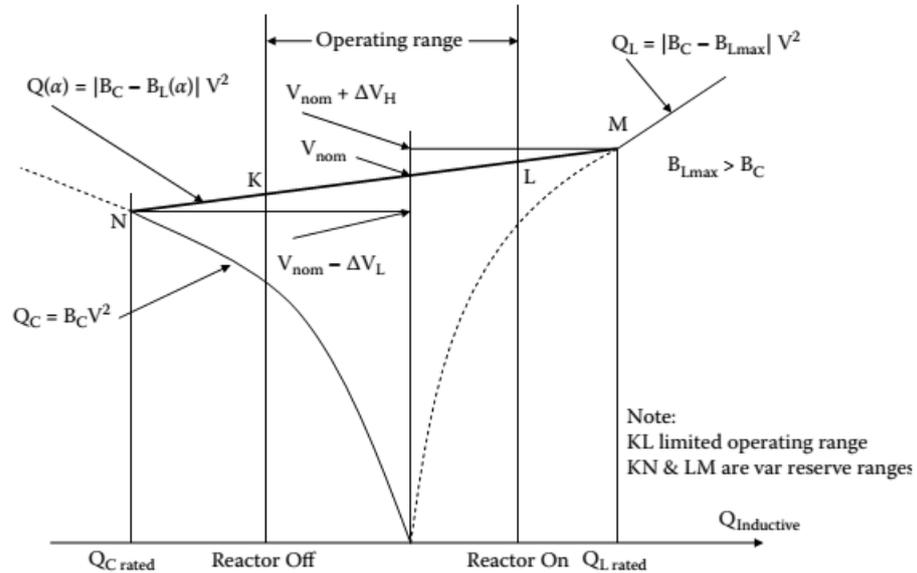
Sebuah sumber daya reaktif dengan variabel kontinu adalah sistem yang relatif mahal dibandingkan dengan kompensator paralel. Oleh karena itu, SVC perlu menstabilkan jaringan dengan cara perubahan daya reaktif yang cepat. Sumber lain dapat menutupi kebutuhan akan daya reaktif yang dihasilkan dari perubahan aliran daya, yang merupakan perubahan yang relatif lambat. Jika koordinasi ini tidak dilakukan, SVC akan cenderung sangat sering beroperasi pada rentang kemampuan ekstrimnya karena kecepatan respon SVC sendiri. Sedangkan sumber daya reaktif lainnya relatif tetap diam. Oleh karena itu SVC akan menyediakan perlindungan untuk perubahan operasional jaringan normal, dengan menyisakan sedikit untuk pembalikan dinamis ketika gangguan besar dan kecil (Vedam dan Sarma, 2009).



Gambar 2. 19 Kurva SVC dengan regulasi tegangan yang lambat

*Loop* kontrol daya reaktif adalah *loop* yang bertindak lebih lambat daripada *loop* kontrol tegangan. Dalam bentuk yang paling sederhana *loop* tersebut membawa SVC kembali ke titik operasi yang telah ditentukan dalam rentang kontrolnya dengan mengikuti setiap perubahan sistem. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2.19. Jika SVC beroperasi pada titik  $K$  dengan  $Q_{\text{ref}}$ , setelah perubahan sistem itu akan pindah ke titik  $L$  sepanjang garis  $KL$ , ini karena tindakan yang cepat dari regulator tegangan. Pada titik  $L$ , karena  $Q$  berbeda dari  $Q_{\text{ref}}$ , ia akan bergerak lebih jauh sepanjang garis  $LM$ , dan akhirnya menetap di titik  $M$ , ini dikarenakan tindakan kontrol daya reaktif yang lambat (Vedam dan

Sarma, 2009). Pergantian reaktor dan perpindahan titik operasi dalam *range* operasi yang terbatas dari SVC ditunjukkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2. 20 Kurva Karakteristik SVC

#### 2.9.4. Penentuan Letak dan Kapasitas SVC

Untuk mendapatkan hasil yang optimal dari pemasangan SVC, harus dilakukan perencanaan lokasi dan kapasitas SVC sebelumnya. Indikasi bus yang berkandidat sebagai tempat pemasangan SVC (*Static Var Compensator*) adalah bus yang memiliki profil tegangan yang tidak sesuai dengan yang diizinkan, yaitu dibawah 90% dan/ melebihi 105% dari tegangan nominal (sesuai SPLN No.1 tahun 1995).Setelah menentukan lokasinya, kapasitas SVC akan ditentukan melalui perhitungan.

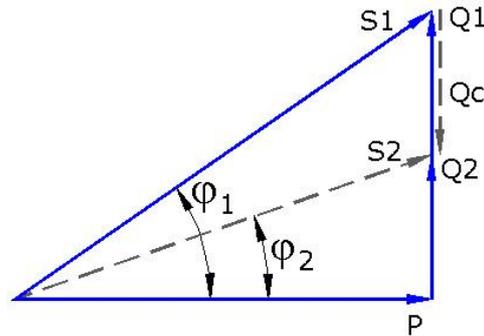
##### a. Menghitung Kapasitas Kapasitor pada SVC

Tegangan pada ujung beban ( $V_r$ ) diupayakan sama dengan ujung sumber ( $V_s$ ) atau  $|V_r| = |V_s|$ . Bila nilai daya aktif pada ujung beban mendekati 1 ( $\cos \varphi = 1$ ) dan  $|V_r| = |V_s|$  maka dapat dicari nilai  $\delta$ , dengan rumus berikut (Liliana dan Syahputra, 2014) :

$$Pr = \frac{|V_r| = |V_s|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_r|^2 \sin(\beta - \alpha) \quad \dots (2.36)$$

Kapasitas kapasitor ( $Q_C$ ) pada SVC dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q_C = \frac{|V_s| = |V_r|}{|B|} \sin(\beta - \delta) - \frac{|A|}{|B|} |V_r|^2 \cos(\beta - \alpha) \quad \dots (2.37)$$



**Gambar 2. 21** Kurva Daya Reaktif pada Segitiga Daya

Berdasarkan faktor daya, Q bisa dicari dengan persamaan berikut:

Nilai kVAR sebelum pemasangan SVC (*Static Var Compensator*)

$$Q_1 = P \tan \phi_1$$

Nilai kVAR yang diinginkan (dengan PF=0.99):

$$Q_2 = P \tan \phi_2$$

Kapasitas kapasitor pada SVC ( $Q_{C_{SVC}}$ ) yang disarankan adalah:

$$Q_{C_{SVC}} = Q_1 - Q_2 \quad \dots (2.38)$$

b. Menghitung Kapasitas Reaktor pada SVC

Kapasitas reaktor pada SVC yang dibutuhkan dapat ditentukan melalui persamaan berikut (Areva T&D):

$$Q_{L_{SVC}} = MVA_{SC} \left( \frac{V_{pu}' - V_{pu}''}{V_{pu}''} \right) \quad \dots (2.39)$$

$Q_{L_{SVC}}$  = kapasitas reaktor pada SVC

$MVA_{SC}$  = rating MVA short circuit

$V_{pu}'$  = nilai per unit tegangan saat mengalami *overvoltage*

$V_{pu}''$  = nilai per unit tegangan yang dikehendaki (0,99)

## 2.10 Pengaturan *Tap* Transformator

Selain menggunakan kompensator, cara lain untuk membantu kompensasi nilai tegangan adalah dengan mengatur *tap-changer* pada transformator. Dengan *tap-changer* ini, rasio jumlah lilitan kumparan primer ( $N_p$ ) dan sekunder ( $N_{sk}$ ) dapat diubah. Perubahan ini terjadi secara otomatis dan dikerjakan oleh motor yang memberi reaksi pada rel-rel yang disetel untuk menahan tegangan pada tingkat yang ditentukan. Rangkaian khusus akan memungkinkan perubahan ini tanpa memutuskan arusnya. Karena itulah alat ini dinamakan dengan *On Load Tap Changer* (Despa, 2009). Pengaturan ini umumnya dilakukan pada sisi tegangan tinggi karena sisi tersebut memiliki arus yang rendah sehingga dapat meminimalisir busur api. Perbandingan rasio lilitan transformator sesuai dengan persamaan:

$$\frac{N_p}{N_{sk}} = \frac{V_p}{V_{sk}} = \alpha \quad \dots (2.40)$$

Jika tegangan pada sisi primer ( $V_p$ ) nilainya turun karena aliran daya reaktif, maka nilai tegangan pada sisi sekunder ( $V_{sk}$ ) juga akan jatuh. Untuk mengembalikan tegangan sekunder ke nilai yang seharusnya, maka dilakukan perubahan *tap* pada transformator dengan mengubah rasio lilitan ( $\alpha$ ). Jadi pengaturan *tap* transformator ini tidak mengubah daya reaktif melainkan hanya mengembalikan nilai tegangan atau mengubah impedansi jalur yang dilalui daya reaktif.

Transformator pengubah *tap* biasanya telah memiliki ukuran *tap* sendiri tergantung dari pabrik yang memproduksinya. Sehingga pengaturan tegangan dengan menggunakan transformator pengubah *tap* sifatnya terbatas dan tergantung dari jenis trafo pengubah *tap* yang digunakan. Semakin banyak level perubahan *tap* yang dimiliki oleh suatu transformator, semakin baik pula proses pengaturan tegangan yang dapat dilakukan (Restu, 2008).