

BAB II

Pengaturan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah rangkaian dari peralatan - peralatan listrik yang bekerja secara bersamaan dan saling memengaruhi satu dengan yang lainnya, diatur sedemikian rupa sehingga dapat menyalurkan daya listrik dari pusat listrik ke pusat beban.

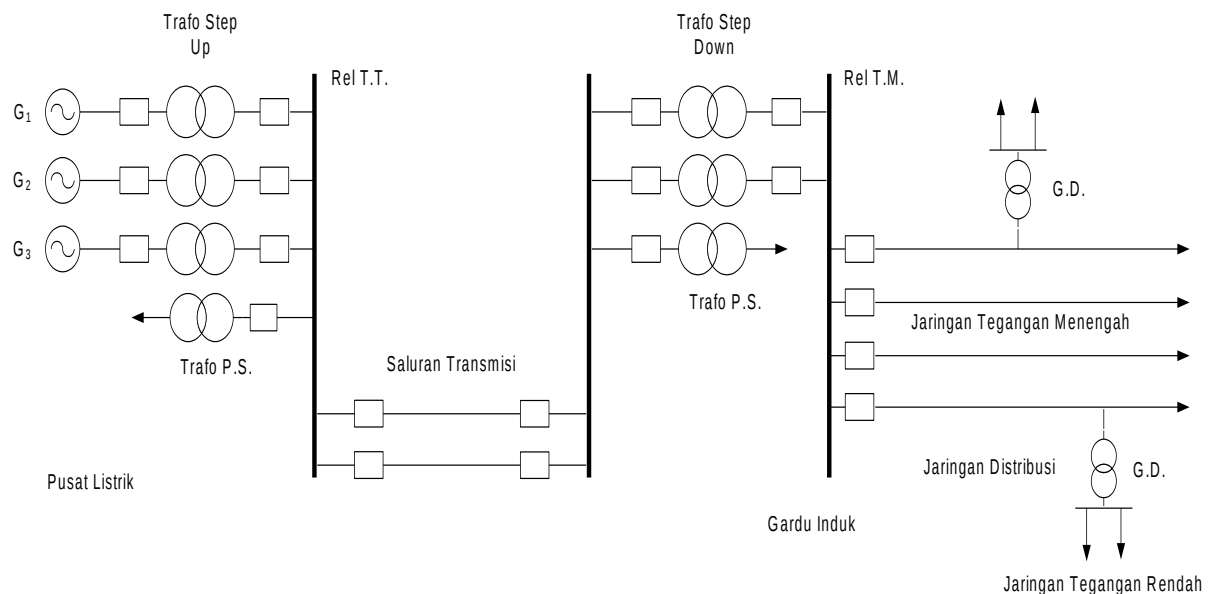
Secara garis besar sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan atas tiga bagian antara lain :

- Pusat Listrik
- Sistem Transmisi
- Sistem Distribusi

Pusat listrik adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk memproduksi energi listrik. Ada berbagai jenis pusat listrik, seperti :

- Pusat Listrik Tenaga Diesel (PLTD)
- Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU)
- Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA)
- Pusat Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)
- Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)
- Pusat Listrik Tenaga Gas (PLTG), dsb.

Tenaga listrik dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik, kemudian disalurkan melalui saluran transmisi setelah terlebih dahulu dinaikkan tegangannya oleh transformator penaik tegangan (step up transformer) yang ada di pusat listrik. Sistem tenaga listrik secara diagram kutub tunggal digambarkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2.1. Sistem Tenaga Listrik Dari Pusat Listrik Sampai Ke Jaringan Tegangan Rendah

Keterangan :

G = Generator

G.D. = Gardu Distribusi

P.S. = Pemakaian Sendiri

—□— = Pemutus Tenaga

T.T. = Tegangan Tinggi

T.M. = Tegangan Menengah

Sistem penyaluran tenaga listrik dibagi atas beberapa sistem yang dibedakan berdasarkan tegangannya, yaitu sistem Tegangan Ekstra Tinggi,

sistem Tegangan Tinggi, sistem Tegangan Menengah, dan sistem Tegangan Rendah.

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat seperti :

➤ Reliabilitas

“Kemampuan sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus.”

➤ Kualitas

“Kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran - besaran standar yang telah ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.”

➤ Stabilitas

“Kemampuan dari sistem untuk kembali kepada kondisi normal apabila terjadi gangguan.”

➤ Ketersediaan

“Peluang suatu komponen atau sistem yang berfungsi menurut kebutuhan pada waktu tertentu saat digunakan dalam kondisi beroperasi.”

2.2. Faktor-Faktor Yang Memengaruhi Tegangan Sistem Tenaga Listrik

Dalam menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke konsumen diperlukan suatu sistem tenaga listrik. Tegangan yang konstan adalah syarat

utama yang harus diperhatikan dalam penyaluran tenaga listrik. Jika tegangan sistem terlalu tinggi/rendah sehingga melewati batas - batas toleransi maka akan mengganggu dan selanjutnya merusak peralatan. Beban sistem bervariasi dan besarnya berubah - ubah sepanjang waktu. Bila beban meningkat maka tegangan di ujung penerima menurun dan sebaliknya bila beban berkurang maka tegangan di ujung penerima naik.

Komponen utama yang berpengaruh terhadap besarnya tegangan adalah :

1. Pembebanan pada saluran.
2. Nilai tahanan (R) dan reaktansi (X_L) pada saluran.
3. Nilai faktor daya.

hal ini dapat dilihat dari rumus berikut :

$$\Delta V = |V_S| - |V_R| \quad (2.1)$$

$$\Delta V = I.R.\cos\theta + I.X_L.\sin\theta \quad (2.2)$$

2.2.1. Pembebanan

Semakin besar arus yang mengalir pada saluran, maka akan semakin besar juga jatuh tegangannya, sehingga tegangan pada ujung penerima akan menjadi rendah. Besarnya arus/beban tergantung dari pembebanan sistem karena pemakaian dari beban ini tidak bersamaan dalam penggunaannya sehingga mengakibatkan beban di setiap fasanya tidak seimbang.

2.2.2. Nilai Tahanan (R) dan Nilai Reaktansi (X_L)

Besarnya nilai tahanan dari suatu saluran dapat dilihat dari rumus berikut :

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{A} (\text{ohm}) \quad (2.3)$$

Dimana :

R = Resistansi (ohm)

ρ = Koefisien jenis penghantar

ℓ = Panjang saluran

A = Luas penampang penghantar

Dari persamaan dapat terlihat bahwa apabila saluran mempunyai nilai ℓ yang besar maka tahanan akan semakin besar pula, sehingga jatuh tegangan di sepanjang saluran akan semakin besar.

Nilai reaktansi pada saluran transmisi jarak pendek atau menengah lebih bersifat induktif, maka reaktansinya disebut induktif (X_L) yang dapat dilihat dari rumus berikut :

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L (\text{Ohm}) \quad (2.4)$$

Dimana :

X_L = Reaktansi (ohm)

f = Frekuensi (hz)

L = Induktansi

2.2.3. Nilai Faktor Daya

Sebagian besar beban yang merupakan peralatan listrik seperti motor, AC, pompa air, lampu TL dan lain - lain yang bersifat induktif. Dimana beban induktif ini menyebabkan pemakaian arus dari saluran menjadi naik sehingga pemakaian daya semu menjadi meningkat dan tegangan pada sistem menjadi turun. Hal ini disebabkan oleh beban tersebut. Begitu pula beban pelanggan listrik yang mempunyai daya besar yang mempunyai beban induktif, dapat mengurangi faktor daya sehingga pemakaian daya semu menjadi naik.

Untuk mengkompensasi beban - beban induktif ini dibutuhkan sumber daya reaktif dalam sistem tenaga listrik, yang dapat digunakan sebagai sumber daya reaktif misalnya kapasitor.

Untuk faktor daya yang rendah maka nilai arus akan lebih besar jika dibandingkan dengan keadaan dengan faktor daya yang lebih besar. Bila dilihat dari rumus jatuh tegangan, nilai arus yang besar dapat menyebabkan turunnya nilai tegangan pada ujung saluran penerima. Jadi untuk mengatasi jatuh tegangan nilai arus harus diperkecil, hal ini dapat dilakukan dengan menaikkan faktor daya atau dengan memperbaiki faktor daya yang dapat dilakukan dengan menggunakan sumber daya reaktif.

2.3. Pengaturan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

2.3.1. Umum

Pusat-pusat listrik berada cukup jauh dari pusat beban, letaknya yang jauh ini mengakibatkan timbulnya rugi - rugi daya dalam penyaluran daya listrik. Kerugian tersebut disebabkan oleh saluran yang cukup panjang, sehingga dalam penyaluran daya listrik melalui transmisi akan mengalami tegangan jatuh (drop voltage) sepanjang saluran yang dilalui. Maka dari itu diperlukan pengaturan tegangan pada sistem tenaga listrik agar syarat dalam penyediaan tenaga listrik terpenuhi yaitu tegangan yang konstan, oleh karenanya masalah pengaturan tegangan merupakan masalah operasi sistem tenaga listrik yang perlu mendapat penanganan tersendiri. Pada sistem Tegangan Tinggi, untuk tegangan suatu sistem tertentu pada tiap bus tidak sama tergantung dari konfigurasi dan operasi sistem tersebut. Ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk memperbaiki jatuh tegangan, yaitu :

1. Pengaturan sistem eksitasi generator.
2. Pengaturan daya reaktif yang didapat dari dalam sistem, seperti kapasitor, reaktor dan FACTS devices.
3. Pengaturan posisi tap transformator.

2.3.2. Sistem Eksitasi Generator

Arus penguat atau sistem eksitasi adalah sistem pasokan listrik sebagai penguatan pada generator listrik atau sebagai pembangkit medan magnet,

sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator yang bergantung pada besarnya arus eksitasinya.

Sistem eksitasi pada generator listrik ini dapat dibedakan menjadi 2 macam, yaitu:

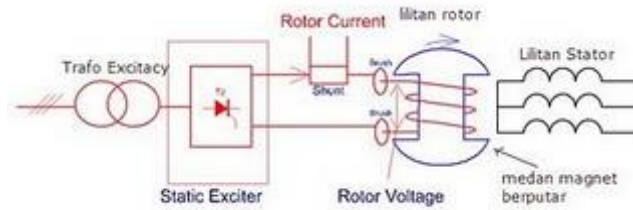
1. Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (brush excitation).
2. Sistem eksitasi tanpa sikat (brushless excitation).

2.3.2.1. Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Sikat

Pada sistem eksitasi dengan menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan rectifier.

Jika menggunakan sumber listrik yang berasal dari generator AC atau menggunakan Permanent Magnet Generator (PMG) medan magnetnya adalah magnet permanen. Tegangan listrik arus bolak balik diubah atau disearahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan eksiter utama (main exciter) oleh rectifier.

Untuk mengalirkan arus eksitasi dari main exciter ke rotor generator menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot exciter ke main exciter.



Gambar 2.2. Sistem Eksitasi dengan Sikat (Brush Excitation)

Prinsip kerja pada sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (Brush Excitation) :

Generator penguat yang pertama adalah generator arus searah hubungan shunt yang menghasilkan arus penguat bagi generator penguat kedua. Generator penguat (exciter) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.

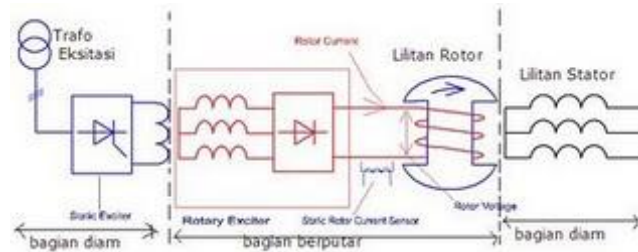
Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama.

Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis agar nilai tegangan klem generator konstan.

2.3.2.2. Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (brushless excitation)

Penggunaan sikat atau slip ring untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan

pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (brushless excitation).



Gambar 2.3. Sistem Eksitasi tanpa Sikat (Brushless Excitation)

Prinsip kerja pada sistem eksitasi tanpa sikat (Brushless Excitation) :

Generator penguat pertama disebut pilot exciter dan generator penguat kedua disebut main exciter. Main exciter adalah generator arus bolak - balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak - balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros main exciter (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama. Pilot exciter pada generator arus bolak - balik dengan rotor berupa kutub magnet permanen yang berputar menginduksi pada lilitan stator. Arus bolak - balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub - kutub magnet yang ada pada stator main exciter. Besarnya arus searah yang mengalir ke kutub main exciter diatur oleh pengatur tegangan otomatis (Automatic Voltage Regulator/AVR).

Besarnya arus berpengaruh pada besarnya arus yang dihasilkan main exciter, maka besarnya arus main exciter juga memengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh generator utama.

2.3.3. Tap Pada Transformator

Tap changer merupakan sebuah alat perubah perbandingan transformasi untuk memperoleh tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan/primer yang berubah - ubah. Transformator adalah sebuah alat perantara yang dapat digunakan untuk menaikkan dan menurunkan level tegangan dan arus, saat beban di sekunder mengalami penurunan maka arus harus menyesuaikan kebutuhan, agar tidak terjadi overcurrent ataupun undercurrent, maka dari itu untuk memenuhi kebutuhan tersebut tegangan keluaran (sekunder) transformator harus dapat diubah sesuai keinginan. Untuk memenuhi hal tersebut, maka pada salah satu atau kedua sisi belitan transformator dibuat tap (penyadap) untuk merubah perbandingan transformasi (rasio) trafo.

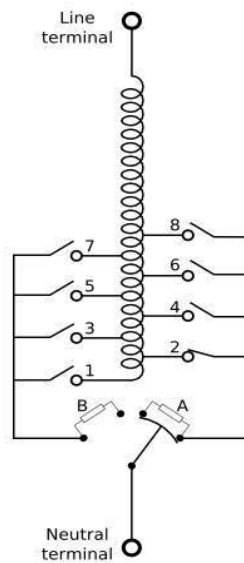
Ada dua cara kerja tap changer :

1. Off Load Tap Changer (OFLTC)
2. On Load Tap Changer (OLTC)

2.3.3.1. On Load Tap Changer (OLTC)

On Load Tap Changer transformator adalah suatu cara yang digunakan untuk mengubah rasio antara sisi primer dan sisi sekunder agar diperoleh tegangan atau arus yang diinginkan. Hal ini dilakukan dengan cara mengubah perbandingan lilitan pada kumparan primer atau kumparan sekunder. Beberapa transformator dirancang untuk mengubah posisi tap secara otomatis ketika

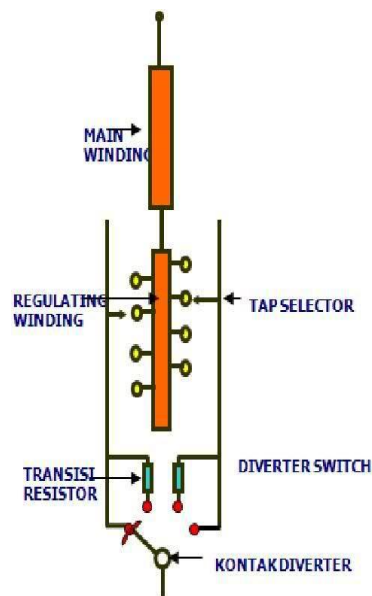
tegangan pada sisi sekunder berada diatas atau dibawah level yang diinginkan. Pada dasarnya kegunaan dari proses tap changing transformator ini adalah untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan ketika adanya fluktuasi tegangan yang tidak diinginkan.



Gambar 2.4. On Load Tap Changer

OLTC terdiri dari :

1. Selector Switch (saklar pemilik kumparan)
2. Diverter Switch (saklar pengalih)
3. Transisi Resistor



Gambar 2.5. On Load Tap Changer

secara umum prinsip dasar dari OLTC ini yaitu melakukan pengaturan tegangan baik sisi sekunder maupun primer yang dilakukan dengan cara memilih rasio tegangan, dimana untuk memilih rasio yang dikehendaki dilakukan dengan cara menambahkan atau mengurangi jumlah kumparan, proses tersebut dilakukan oleh tap selector dan diverter switch.

2.3.4. Kompensasi Daya Reaktif

Salah satu cara untuk memperbaiki jatuh tegangan dalam sistem tenaga listrik yaitu dengan mengkompensasi daya reaktif pada sistem. Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem transmisi, reaktor dan kapasitor. Karena kebutuhan daya reaktif pada sistem bervariasi yang disebabkan oleh perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi, perubahan konfigurasi jaringan. Hal ini berdampak pada bervariasinya level

tegangan pada gardu induk. Pada umumnya gardu induk yang berada jauh dari pembangkit akan mengalami penurunan level tegangan besar, oleh sebab itu diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang dapat mengikuti perubahan tegangan tersebut.

Ada dua macam daya reaktif, yaitu daya reaktif induktif dan daya reaktif kapasitif.

- Daya reaktif induktif

Daya reaktif induktif adalah daya listrik yang diperlukan untuk membangkitkan medan magnet.

- Daya reaktif kapasitif

Daya reaktif kapasitif merupakan daya reaktif yang dibangkitkan oleh kapasitor.

Kedua daya reaktif ini tidak menghasilkan kerja, tetapi hanya tersimpan dalam bentuk energi mekanis. Adapun kebutuhan daya reaktif ini dapat diperoleh dari sumber reaktif seperti generator dan kapasitor.

Jika ditinjau dari tujuan kompensasi, hal ini dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu:

1. Kompensasi produksi daya reaktif

Kompensasi produksi daya reaktif untuk menghasilkan atau menyuplai daya reaktif yang dibutuhkan oleh sistem ataupun beban. Bila besarnya bersifat induktif (menyerap daya reaktif) maka produksi daya reaktifnya bersifat kapasitif.

2. Kompensasi penyerap daya reaktif

Kompensasi penyerap daya reaktif untuk menyerap atau mengambil daya reaktif dari sistem. Jika sistem bersifat kapasitif (menghasilkan daya reaktif) maka penyerap daya reaktifnya bersifat induktif.

2.3.4.1. Kapasitor

Dalam komponen rangkaian listrik salah satu dari sumber daya reaktif adalah kapasitor. Kapasitor pada dasarnya merupakan alat yang sederhana. Alat ini terdiri dari dua lempeng yang terpisahkan oleh bahan isolasi diantara kedua lempeng tersebut. Bila kapasitor tersebut diberi tegangan tertentu, maka tiap lempeng konduktor tersebut akan mempunyai muatan yang sama besar, tetapi berlawanan jenis. Bila terminal kapasitor dihubungkan dengan sumber/jaringan arus bolak balik, maka akan menghasilkan arus yang mendahului (leading) terhadap tegangan dan biasa disebut arus kapasitif. Satuan dari kapasitor adalah farad, dan simbolnya adalah C. Dalam bentuk persamaan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$C : \frac{Q}{V} \text{ (Farad)} \quad (2.5)$$

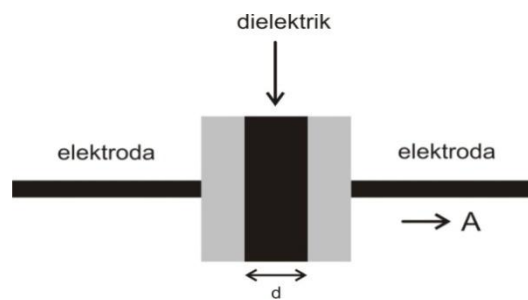
Dimana :

C = kapasitansi kapasitor (Farad)

Q = muatan listrik (Coulomb)

V = tegangan (Volt)

Besarnya kapasitansi dari suatu kapasitor ditentukan oleh jarak lempeng yang diparalelkan (d), dengan luas penampang (A). Maka besarnya kapasitansi tersebut adalah :



Gambar 2.6. Rangkaian Dua Baja Pipih

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \text{ (Farad)} \quad (2.6)$$

Dimana :

C = kapasitansi kapasitor (Farad)

ε = konstanta dielektrik bahan isolasi

A = luas lempeng (m^2)

d = jarak antar lempeng (m)

Pengaruh pemasangan kapasitor pada saluran adalah untuk mengurangi jatuh tegangan dan reaktansi induktif dari beban.

Dalam hal pengurangan rugi-rugi, pemasangan kapasitor dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu :

1. Kapasitor dipasang secara seri
2. Kapasitor dipasang secara paralel

Kapasitor Dipasang Secara Seri

Kapasitor yang dikoneksikan secara seri pada saluran transmisi bertujuan untuk mengurangi tegangan jatuh yang disebabkan oleh reaktansi induktif pada saluran transmisi.

Tegangan jatuh di saluran transmisi setelah dipasang kapasitor seri dapat dinyatakan dengan :

$$\Delta V = I.R.\cos\theta + I.(X_L - X_C).\sin\theta \quad (2.7)$$

Suatu sistem transmisi yang dikompensasi dengan kapasitor seri dapat menyebabkan kenaikan kapasitas pengiriman daya. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

Misalkan daya yang dikirimkan melalui saluran transmisi tanpa kompensasi adalah

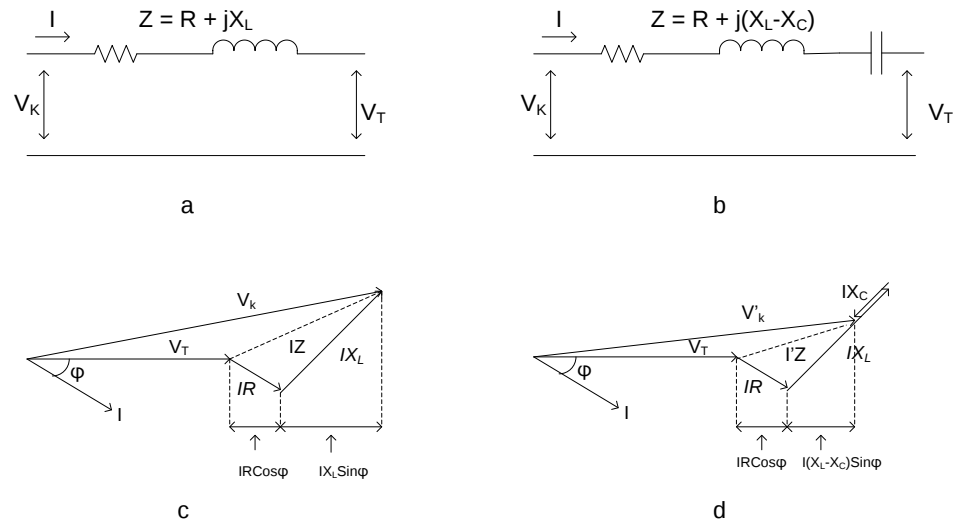
$$P = \frac{E_S.E_R}{X_L}.\sin\theta \quad (2.8)$$

Bila tegangan dipertahankan konstan, maka besar daya yang dikirimkan melalui saluran transmisi yang dikompensasi dengan kapasitor seri menjadi :

$$P = \frac{E_S.E_R.\sin\theta}{X_L - X_C} \quad (2.9)$$

Kapasitor yang dipasang secara seri dapat menyebabkan terjadinya tegangan lebih di jaringan bila nilai resistansi jaringan lebih besar dari pada nilai reaktansi induktifnya.

Efek pemasangan kapasitor secara seri dapat dilihat secara diagram fasor pada gambar 2.7.



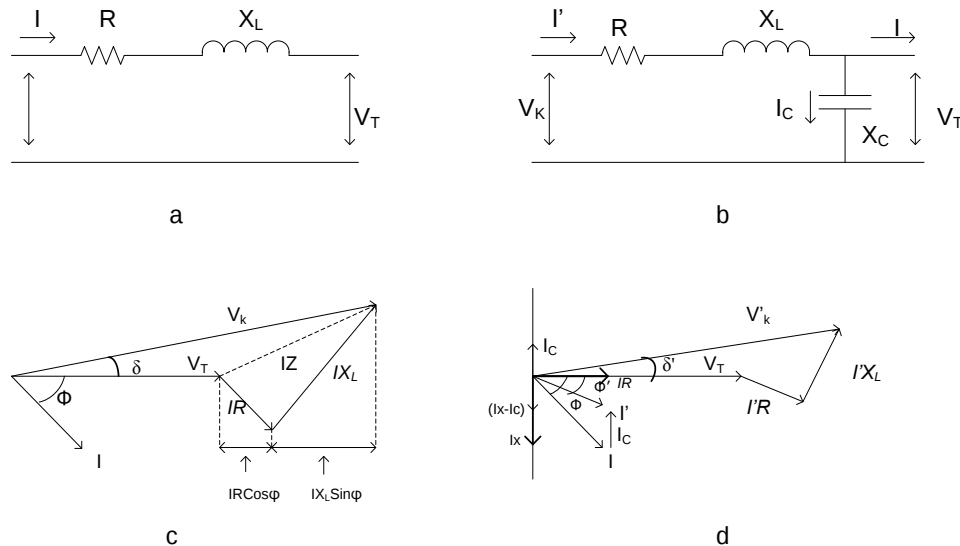
Gambar 2.7. Efek Pemasangan Kapasitor Seri

Sebagaimana terlihat pada diagram fasor bahwa sebelum pemasangan kapasitor nilai reaktansi induktif lebih besar dari resistansinya. Perbedaan ini akan semakin besar pada saat faktor daya kecil dan ratio dari R/X_L juga kecil. Namun setelah pemasangan kapasitor seri maka besarnya reaktansi induktif akan berkurang karena adanya reaktansi kapasitif X_C sebagai efek dari kapasitor yang akan menekan besarnya X_L .

Kapasitor Dipasang Secara Paralel

Pemasangan kapasitor secara paralel merupakan hal yang sering dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi pada jaringan, selain dari mengurangi jatuh tegangan juga memperbaiki faktor daya. Kapasitor yang dipasang secara paralel memberikan suplai daya reaktif atau arus kapasitif yang akan mengurangi jatuh tegangan akibat beban induktif. Sebagaimana dapat dilihat pada gambar 2.8 bahwa pemasangan kapasitor secara paralel terhadap jaringan mampu

mengurangi besarnya sumber yang merupakan komponen rugi jaringan, memperbaiki faktor daya jaringan sehingga rugi yang ditanggung berkurang, dan juga mengurangi jatuh tegangan antara sisi kirim dengan beban.



Gambar 2.8. Efek Pemasangan Kapasitor Paralel

2.3.4.2 Peralatan FACTS

FACTS device adalah kumpulan peralatan yang dibuat dari komponen elektronik solid state untuk pengaturan atau pengendalian transmisi daya listrik secara fleksible.

FACTS device dalam pengembangannya sangat erat sekali hubungannya dengan pengkajian aplikasi Thyristor untuk elektronika daya. Dengan pemanfaatan peralatan kendali elektronika daya tersebut, maka FACTS akan sangat diminati karena menyediakan banyak kelebihan dibanding dengan peralatan kendali mekanik. Keuntungan alat kendali elektronik seperti misalnya

waktu reaksi yang berkecepatan tinggi dibandingkan dengan waktu reaksi dari peralatan kendali mekanik. Sebagai gambaran FACTS dapat mengubah arah daya listrik dalam waktu kurang dari satu cycle, dengan kecepatan reaksi yang tinggi ini berarti FACTS dapat juga menyediakan fungsi lainnya yang tidak mungkin didapatkan pada alat kendali mekanik, seperti misalnya fungsi untuk mengatasi gangguan peralihan (transient disturbance) pada jaringan transmisi.

Pada umumnya berdasarkan kontrol FACTS terbagi menjadi empat bagian :

1. Pengontrol Seri

Contohnya Static Synchronous Series Compensator (SSSC).

2. Pengontrol Shunt

Contohnya Static Var Compensator (SVC), Static Synchronous Compensator (STATCOM).

3. Pengontrol Kombinasi Seri dengan Seri

4. Pengontrol Kombinasi Seri dengan Shunt