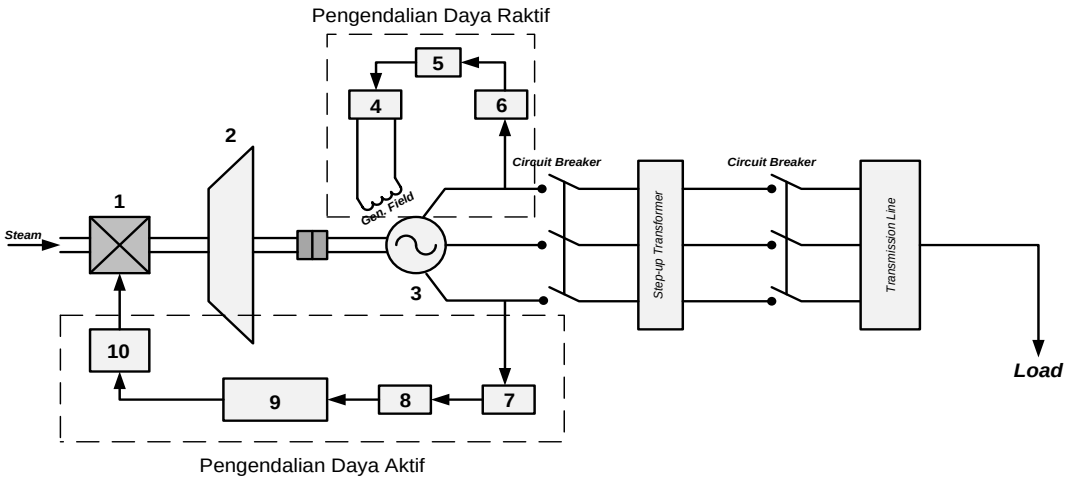
BAB VIII
PENGENDALIAN SISTEM TENAGA LISTRIK

8.1 PENDAHULUAN

Pengendalian sistem tenaga listrik dewasa ini berkembang pesat baik dalam ilmu dan teknologi maupun dalam dunia industri. Perkembangan ini dirasakan pula pihak pemasok daya listrik dalam mengatur suplainya ke beban. Hal ini terlihat dengan penggunaan peralatan kontrol baik di sisi pembangkitan, saluran transmisi dan sisi beban.

Peralatan kontrol untuk pembangkitan biasanya digunakan untuk mengatur suplai daya aktif dan reaktif. Perubahan beban yang terjadi sangat berpengaruh terhadap perubahan frekuensi dan tegangan. Naik turunnya frekuensi tergantung perubahan daya aktif, demikian halnya dengan tegangan tergantung pada perubahan daya reaktif.

Sebagaimana yang telah diketahui bahwa pengendalian daya aktif berkaitan dengan pengendalian frekuensi sementara pengendalian daya reaktif berhubungan dengan pengendalian tegangan.Selengkapnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Keterangan :
1. *Katup (Valves)*
2. *Turbin (Turbine)*
3. *Generator Sinkron*
4. *Sistem Eksitasi (Excitation System)*
5. *Automatic Voltager Regulator (AVR)*
6. *Sensor Tegangan (Voltage Sensor)*
7. *Sensor Frekwensi (Frequency Sensor)*
8. *Load Frequency Control (LFC)*
9. *Governor*
10. *Valve Control Mecanism*

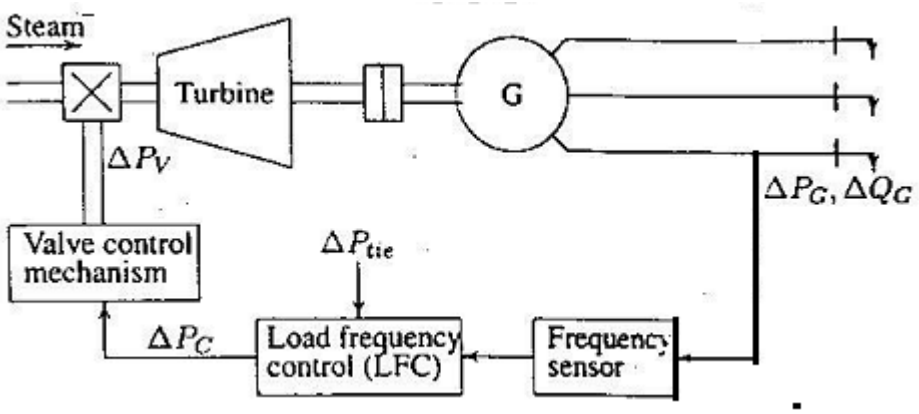
Sumber : POWER SYSTEM ANALYSIS, Hadi Saadat, Hal. 529, 1999.

Gambar 8.1 Skematik pengendalian daya aktif dan daya reaktif

8.2 PENGENDALIAN DAYA AKTIF DAN FREKUENSI

Pengendalian daya aktif pada generator, berkaitan dengan pengaturan frekwensi. Dimana frekwensi itu sendiri, diatur oleh putaran rotor generator yang terkopel dengan penggerak mula (*prime mover*).

Sebagaimana pembahasan sebelumnya, bahwa pengaturan daya aktif dilakukan oleh AVR (*Automatic Voltage Regulator*) sementara untuk pengaturan daya aktif dilakukan oleh LFC (*Load Frequency Regulator*) seperti yang terlihat pada gambar berikut ini :



Gambar 8.2 Diagram blok LFC pada sebuah generator

Frekwensi merupakan faktor umum yang terdapat pada seluruh sistem, perubahan permintaan (*demand*) di dalam daya aktif pada satu titik akan berakibat terhadap perubahan frekwensi. Oleh karena terdapat banyak generator yang mensuplai daya ke sistem, maka pada pembangkit harus disediakan alokasi perubahan pada permintaan terhadap generator. Kecepatan governor pada tiap-tiap pembangkit memberikan kecepatan pokok sebagai fungsi kontrol. Sementara itu tujuan dasar pengaturan frekwensi itu sendiri adalah :

- Member kesimbangan sistem pembangkit ke beban.
- Memperkecil penyimpangan frekwensi akibat perubahan beban secara tiba-tiba agar perubahan frekwensi tersebut mendekati nol.
- Menjaga aliran daya pada pembangkit-pembangkit yang terinterkoneksi agar berada pada kemampuan kapasitas masing-masing generator.

Untuk melihat pengendalian frekwensi tersebut maka masing-masing komponen yang berperan dalam pengaturan frekwensi atau LFC tersebut dimodelkan dalam bentuk persamaan matematis, sebagai berikut (Hadi Saadat, 1999) :

- **Model generator**

Model matematis generator dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$\Delta\Omega(s) = \frac{1}{2Hs}[\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \tag{8.1}$$

dimana :

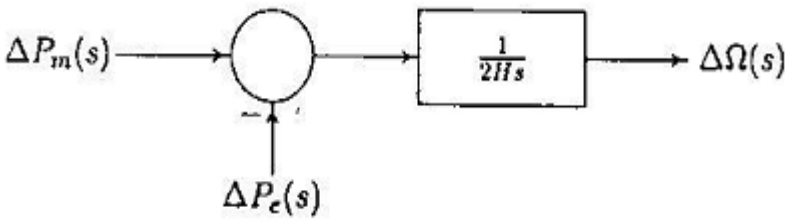
$\Delta\Omega(s)$: Perubahan kecepatan (rad/s)

H : Konstanta inersia

$\Delta P_m(s)$: Perubahan daya mekanik (Watt)

$\Delta P_e(s)$: Perubahan daya akibat perubahan beban (Watt)

Blok diagram dari persamaan di atas, yaitu :



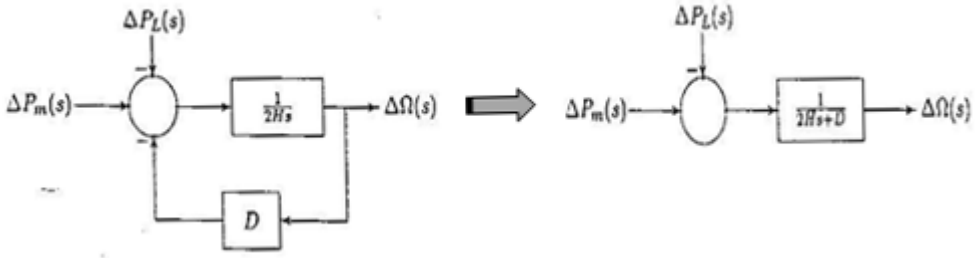
Gambar 8.3 Diagram blok model generator

- **Model beban**

Dari persamaan (8.1), komponen $\Delta P_e(s)$ merupakan penjumlahan antara komponen frekwensi ($D\,\Delta\omega$) dan non-frekwensi (ΔP_L), seperti pada persamaan berikut ini :

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \tag{8.2}$$

Sehingga gambar (8.3) dapat diubah menjadi :



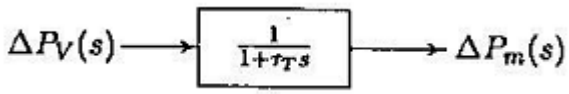
Gambar 8.4 Diagram blok model beban

- **Model penggerak mula**

Dasar pemodelan penggerak mula dalam hal ini sebagai contoh yaitu turbin uap adalah melihat hubungan antara daya mekanik ΔP_m dan perubahan posisi dari katup (*valve*) ΔP_V. Model matematis turbin dapat dituliskan sebagai berikut :

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_V(s)} = \frac{1}{1 + \tau_T s} \tag{8.3}$$

Sementara diagram blok berdasarkan pesamaan di atas, yaitu :



Gambar 8.5 Diagram blok model penggerak mula / turbin uap

Konstanta waktu turbin (τ_T) memiliki range antara 0,2 secons sampai 2,0 seconds

- **Model governor**

Model matematis untuk suatu governor dapat dituliskan menjadi :

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R}\Delta\Omega(s) \tag{8.4}$$

dengan :

ΔP_g : daya output governor (Watt)

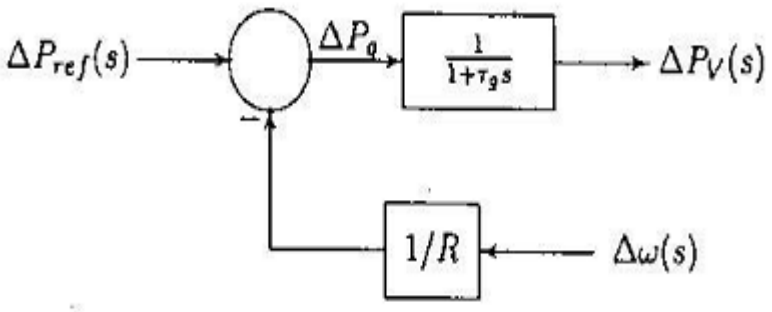
ΔP_{reff} : daya referensi/acuan (Watt)

R : *speed regulation* (berkisar 5 – 6 persen)

Daya output governor ΔP_g tersebut diubah dari penguat hidraulik ke sinyal input posisi katup (*valve*) ΔP_V, sehingga hubungan antara keduanya menjadi :

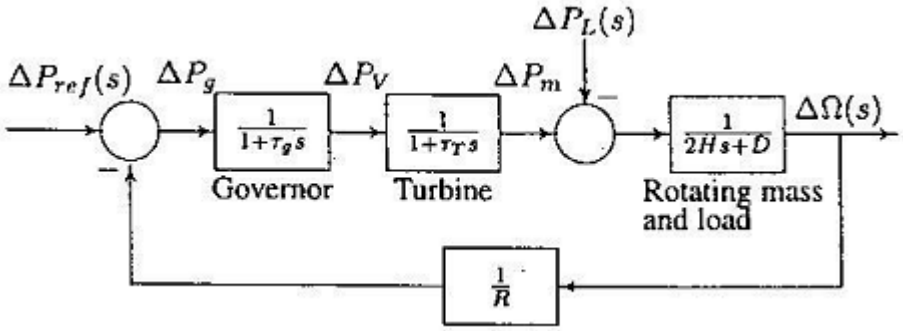
$$\Delta P_V(s) = \frac{1}{1 + \tau_g}\Delta P_g(s) \tag{8.5}$$

Dengan τ_g sebagai konstanta waktu governor. Sehingga persamaan (8.4) dan (8.5) dapat direpresentasikan dalam diagram blok berikut ini :



Gambar 8.6 Diagram blok model governor

Jika representasi diagram blok pada gambar (8.4), (8.5) dan (8.6) digabungkan, maka akan diperoleh suatu model *load frequency control* (LFC) seperti pada gambar berikut ini :



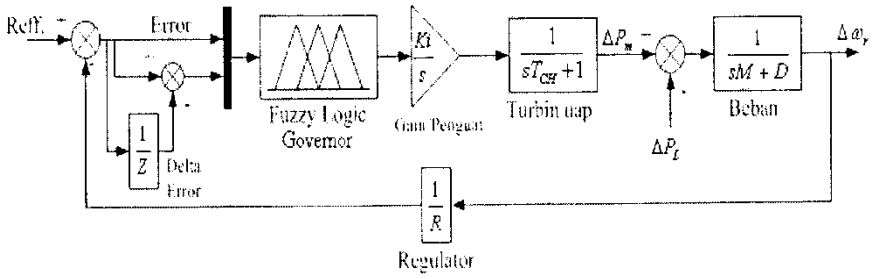
Gambar 8.7 Diagram blok sebagai representasi dari sebuah Load Frequency Control (LFC)

Seperti halnya pada pengaturan daya reaktif dengan menggunakan AVR, maka pada pengaturan daya aktif dengan LFC biasanya ditambahkan dengan suatu pengendali lain untuk mengoptimalkan kinerja LFC tersebut. Pengendali tersebut dapat berupa pengendali PID dan pengendali Logika Samar (*Fuzzy Logic Control / FLC*). Pengendali tambahan diharapkan dapat mempercepat respon LFC terhadap setiap perubahan frekwensi yang terjadi dalam sistem tenaga listrik, dan dalam pembahasan selanjutnya akan ditekankan pada pengendali *fuzzy logic*.

Fuzzy Logic Control / *FLC* yang digunakan tersebut digunakan untuk menggantikan posisi governor dalam mengontrol mekanisme pembukaan dan penutupan katup (*valve*). Oleh

karena itu, maka pengendali dengan menggunakan FLC sering juga disebut sebagai *Fuzzy Logic Governor*. (Imam Robandi, 2006)

Adapun diagram blok dengan penambahan pengendali *Fuzzy Logic*, dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 8.8. Diagram blok representasi sebuah Load Frequency Control (LFC) dengan menggunakan Fuzzy Logic Control (FLC)

Pada gambar di atas, nilai 2H = M dan ditambahkan dengan sebuah *speed drop governor* (K_i/s) yang berfungsi sebagai pengatur proporsional untuk mengurangi kesalahan frekwensi yang terjadi selama operasi berlangsung.

Untuk mengetahui perbedaan antara governor konvensional dengan governor yang menggunakan logika fuzzy, berikut akan diberikan hasil simulasi dari gambar (8.9) dan (8.10) dengan menggunakan aplikasi MATLAB Versi 6.1. (Imam Robandi, 2006)

Parameter simulasi yang digunakan meliputi :

Konstanta waktu turbin (τ_T) = 0,3 detik

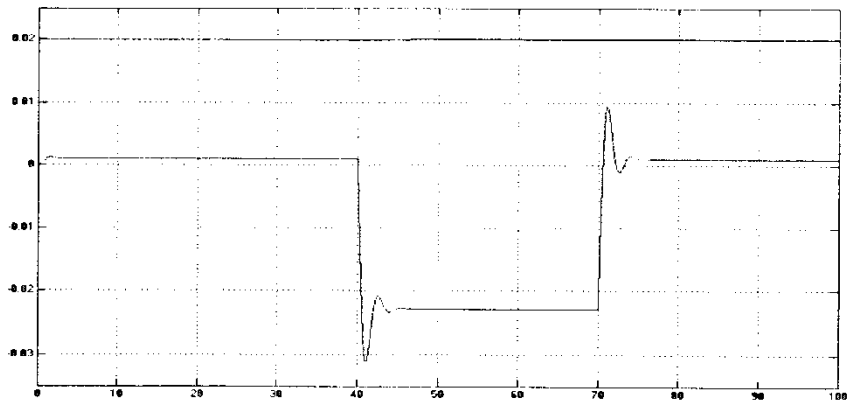
Konstanta waktu governor (τ_g) = 0,2 detik

D = 1,0

R = 0,05

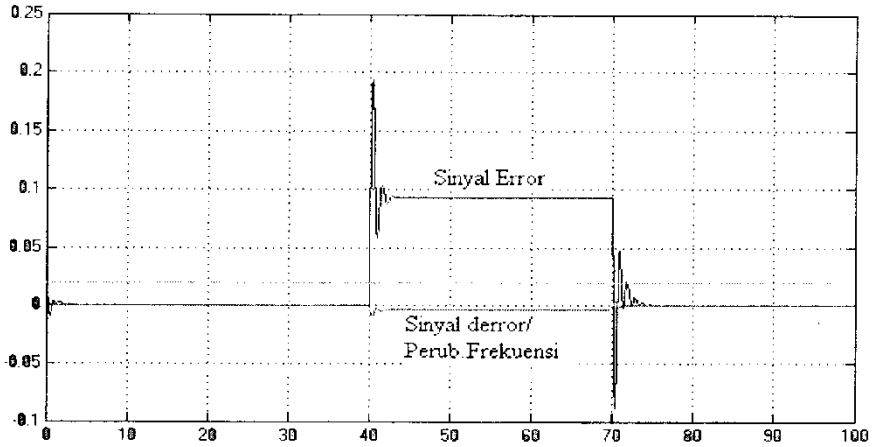
M = 10 detik

Hasil simulasi diperoleh, sebagai berikut :



Gambar 8. 9 Respon frekwensi sistem tanpa kendali Fuzzy

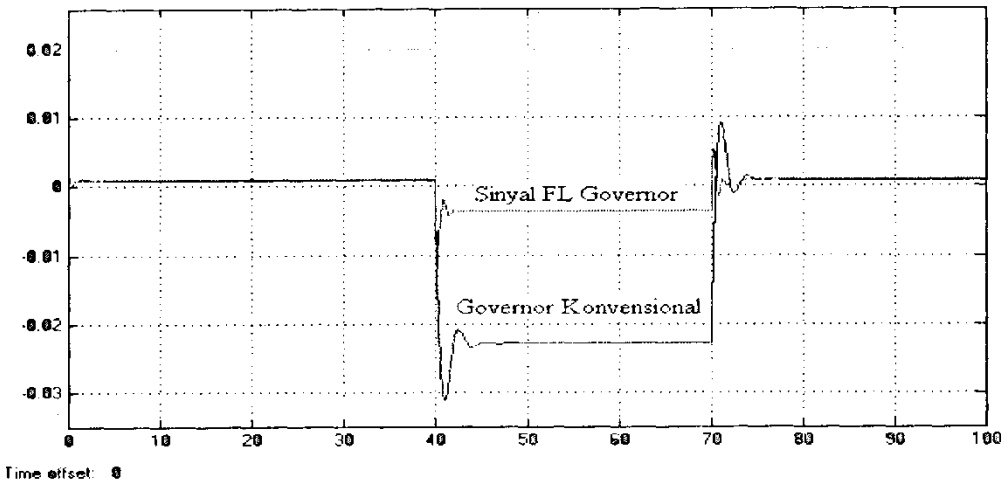
Gambar di atas menunjukkan respon frekwensi dengan hanya menggunakan pengendali LFC konvensional. Dimana dengan kenaikan kebutuhan daya aktif beban pada detik ke-40 maka frekwensi turun sampai -0,031pu lalu stabil pada -0,023 pu, begitu pula ketika terjadi penurunan beban pada detik ke 70 maka frekwensi naik lagi sampai 0,01 pu lalu stabil pada 0,001 pu.



Gambar 8.10 Respon frekwensi sistem dengan kendali Fuzzy

Hal sebaliknya terjadi ketika diberi pengendali fuzzy seperti pada gambar (8.10). Terlihat bahwa respon terhadap perubahan beban yang menyebabkan turun naiknya frekwensi berlangsung sangat cepat, artinya waktu untuk mencapai kestabilan pada frekwensi normalnya sangat cepat.

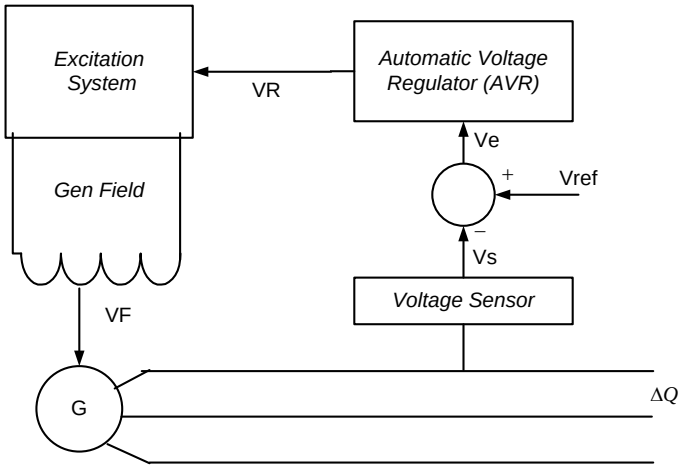
Untuk melihat langsung perbedaan ke dua respon di atas maka gambar hasil simulasi di plotkan dalam satu grafik sebagai berikut :



Gambar 8.11 Grafik perbandingan respon frekwensi FLC tanpa pengendali fuzzy (konvensional) dan dengan pengendali fuzzy

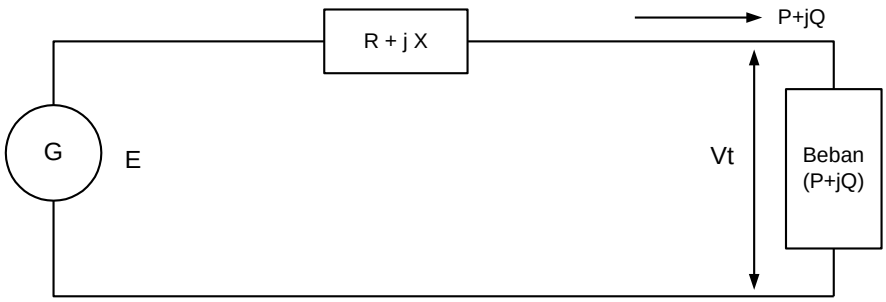
8.3 PENGENDALIAN DAYA REAKTIF DAN TEGANGAN

Berdasarkan gambar (8.1), dengan mengambil bagian pengendalian reaktifnya maka dapat digambarkan sebagai berikut :



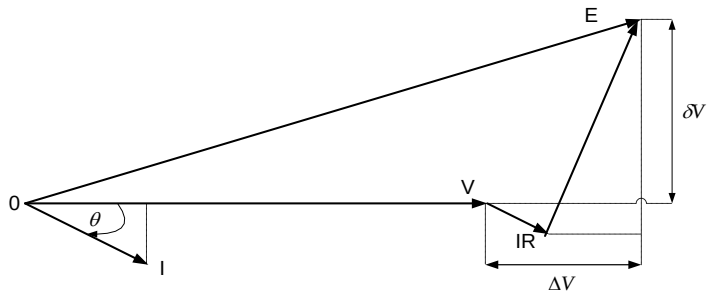
Gambar 8.12 Skematik pengendalian daya reaktif

Persoalannya sekarang adalah bagaimana hubungan antara daya reaktif dengan tegangan itu sendiri. Untuk melihat hubungan tersebut maka dapat dilihat pada persamaan gambar berikut ini



Gambar 8.13 Rangkaian sederhana pembebanan generator

Rangkaian pada gambar (8.13) dapat digambarkan dalam satu diiagram fasor sebagai berikut :



Gambar 8.14 Diagram fasor tegangan terminal generator

$$E^2 = (V + \Delta V)^2 + \delta V^2$$

(8.6)

$$E^2 = (V + IR\cos\theta + IX\sin\theta)^2 + (IX\cos\theta - IR\sin\theta)^2$$

karena:

$$P = VI\cos\theta \quad \text{dan } Q = VI\sin\theta \tag{8.7}$$

dimana:

E = tegangan induksi (EMF) dalam Volt

V = tegangan keluaran generator di beban dalam Volt

R = reistansi saluaran dalam Ohm

X = reaktansi induktif saluran dalam Ohm

I = arus beban dalam Ampere

P = daya aktif dalam Watt

Q = daya reaktif dalam VAr

maka:

$$E^2 = \left(V + \frac{PR}{V} + \frac{QX}{V}\right)^2 + \left(\frac{QX}{V} - \frac{PR}{V}\right)^2 \tag{8.8}$$

dengan demikian:

$$\Delta V = \frac{PR}{V} + \frac{QX}{V} \tag{8.9}$$

dan

$$\delta V = \frac{QX}{V} - \frac{PR}{V} \tag{8.10}$$

jika $\delta V <<< (V + \Delta V)$

maka:

$$E^2 = \left(V + \frac{PR}{V} + \frac{QX}{V}\right)^2 \text{ ataun } E - V = \frac{PR}{V} + \frac{QX}{V} \tag{8.11}$$

Jadi dapat juga dituliskan bahwa

$$E - V = \Delta V \tag{8.12}$$

dengan demikian maka terlihat bahwa hubungan daya reaktif beban dengan tegangan keluaran generator adalah:

$$E - V = \frac{PR}{V} + \frac{QX}{V}, \quad \text{bila} \quad R = 0, \tag{8.13}$$

maka

$$E - V = \frac{QX}{V} \tag{8.14}$$

atau

$$\frac{QX}{V} = \Delta V\ , \tag{8.15}$$

atau

$$\frac{QX}{\Delta V} = V \text{ dimana } X \text{ konstan} \tag{8.16}$$

Jadi berdasarkan persamaan (8.15) tersebut maka maka dapat dilihat bahwa perubahan tegangan keluaran generator tergantung pada perubahan daya reaktif beban. Tetapi dalam operasi sistem yang andal tegangan generator harus dijaga pada range tegangan 0,9 ≤ 1,0 ≤ 1,05 pu, dimana untuk memenuhi hal tersebut maka dibutuhkan suatu pengendalian yang baik.

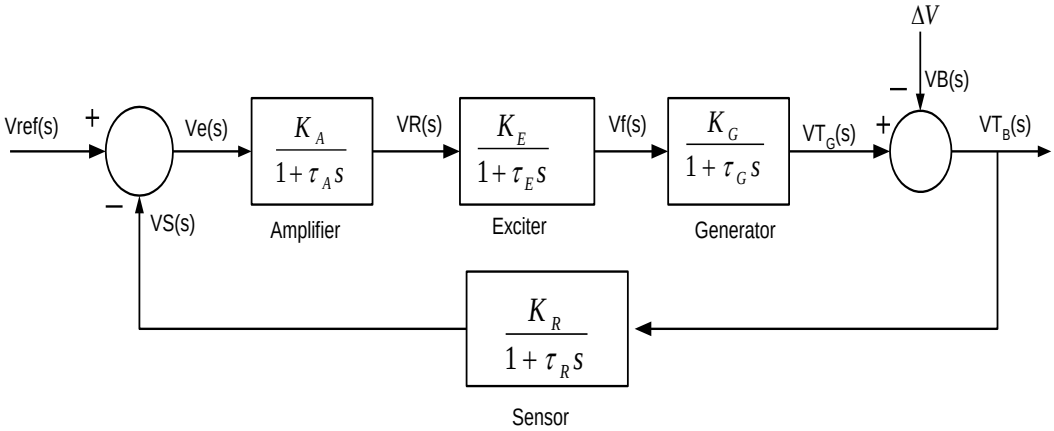
Persoalan pengendalian tegangan sebenarnya hanya terletak pada sisi pembangkitan tetapi juga terletak pada seluruh bagian-bagian sistem tenaga listrik itu sendiri. Misalnya pada sisi beban maupun pada saluran transmisi. Pengendalian yang digunakan pada bagian-bagian sistem tersebut antara lain (Prabha Kundur, 1993):

a. Pemasangan kapasitor shunt (*shunt capasitors*), reaktor shunt (*shunt reactors*), *synchronous condenser* / motor sinkron dan *static var compensators* (SVC).
b. Pemasangan *line reactance compensators* seperti kapasitor seri (*series capasitors*).
c. Pemasangan *regulating transformers* seperti *tap-changing transformers*.

Jadi pengendalian tegangan sistem tenaga listrik merupakan suatu persoalan yang sangat luas sehingga kajian satu persatu terhadap berbagai pengendalian tersebut juga semakin luas. Oleh karena itu pembahasan dalam diktat ini dibatasi hanya pada pengendalian daya reaktif melalui kendali tegangan pada sisi pembangkitan saja.

- **Model Sistem AVR**

  Fungsi dari AVR adalah mempertahankan besaran tegangan terminal generator pada tingkatan yang ditentukan. System AVR terdiri dari empat (4) komponen utama yaitu: Amplifier, Exciter, Generator dan Sensor. Model matematika dan fungsi transfer dari ke empat komponen tersebut diperlihatkan di bawah ini *(Hadi Saadat, 1999).*



Gambar 8.15 Diagram blok sistem AVR

- **Amplifier / Penguatan**

Amplifier / penguatan dari sistem eksitasi merupakan penguatan magnetik, penguatan putaran atau penguatan elektronik moderen. Amplifier / penguatan dinyatakan dengan sebuah gain dengan simbol K_A dan konstanta waktu (*time constant*) dengan simbol τ_A. Fungsi transfernya adalah *(Hadi Saadat, 1999)*:

$$\frac{VR(s)}{Ve(s)} = \frac{K_A}{1+\tau_A s} \tag{8.17}$$

Nilai konstanta waktu τ_A sangat kecil yaitu berkisar antara 0.02 sampai 0.1 detik.

- **Exciter / Eksitasi**

Eksitasi yang umum digunakan dalam sebuah generator terdapat beberapa tipe mulai yang menggunakan generator DC sampai yang tipe modern dengan menggunakan SCR sebagai penyearah untuk menghasilkan daya AC.

Sebuah model yang layak dari eksitasi moderen adalah model yang linier, yang mana diambil untuk menghitung konstanta waktu yang besar dan mengabaikan saturasi atau non linier lainnya.

Dalam bentuk sederhana, fungsi transfer dari *modern exciter* dapat dipresentasekan dengan sebuah konstanta waktu tunggal (*a single time constant*) τ_E dan gain K_E. Dalam bentuk persamaan dituliskan*(Hadi Saadat, 1999)*:

$$\frac{VF(s)}{VR(s)} = \frac{K_E}{1+\tau_E s} \tag{8.18}$$

- **Generator**

Tegangan terminal sebuah generator sangat tergantung pada bebannya. Dalam bentuk linier *(in the model linearized),* hubungan fungsi transfer tegangan terminal generator dengan tegangan medannya dapat dipresentasekan dengan sebuah gain K_G dan sebuah konstanta waktu τ_G sebagai berikut *(Hadi Saadat, 1999)*:

$$\frac{Vt(s)}{VF(s)} = \frac{K_G}{1+\tau_G s} \tag{8.19}$$

- **Sensor**

  Tegangan yang dilewatkan pada sebuah transformator tegangan dan disearahkan lewat sebuah *bridge-rectifier*. Sensor dimodelkan dengan sebuah fungsi transfer orde pertama yang sederhana yang dituliskan dengan *(Hadi Saadat, 1999)* :

$$\frac{Vs(s)}{Vt(s)} = \frac{K_G}{1+\tau_G s} \tag{8.20}$$

- **Beban**

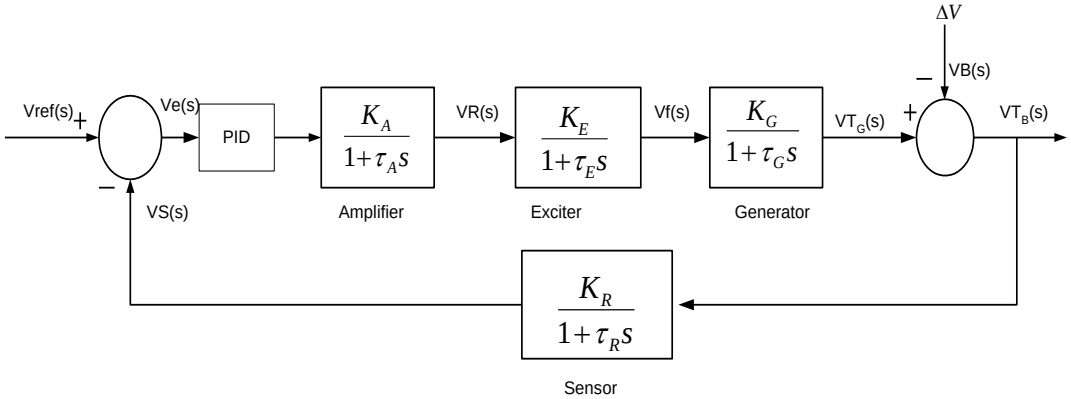
  Beban dalam sistem tenaga terdiri atas berbagai peralatan elektrik. Beban kapasitif yang terjadi seperti motor sangat mempengaruhi perubahan tegangan sistem. Beban tersebut dinyatakan sebagai daya reaktif ΔQ yang terjadi, dalam bentuk persamaan:

$$\Delta Q_L(s) = \frac{\Delta Q_L}{s} \tag{8.21}$$

Pengendalian Optimum Daya Reaktif

Pengendalian daya reaktif seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sebenarnya telah dapat dilakukan dengan baik oleh AVR. Namun kinerja AVR sebagai pengendali daya reaktif dapat dioptimalkan dengan menggunakan pengendali tambahan untuk meningkatkan performansi dari AVR itu sendiri. Pengendali modern saat ini sudah banyak digunakan dalam mengoptimalkan kinerja AVR, salah satunya dengan menggunakan pengendali PID (*Proporsional-Integrative-Derivative*).

Setelah menambahkan pengendali PID maka blok diagram seperti yang ditunjukkan pada gambar (8.15), akan berubah menjadi gambar (8.16) berikut ini :



Gambar 8.16 Diagram blok sistem AVR dengan pengendali PID

Persoalannya adalah dengan pengendali PID, harus dapat menentukan nilai parameter yang tepat agar dapat diperoleh pengendalian yang optimum. Parameter yang dimaksud adalah konstanta proporsional (K_p), konstanta Integrative (K_i) dan konstanta derivative (K_D), dimana fungsi alih dari pengendali PID dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$G_c(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d s\right) \tag{8.22}$$

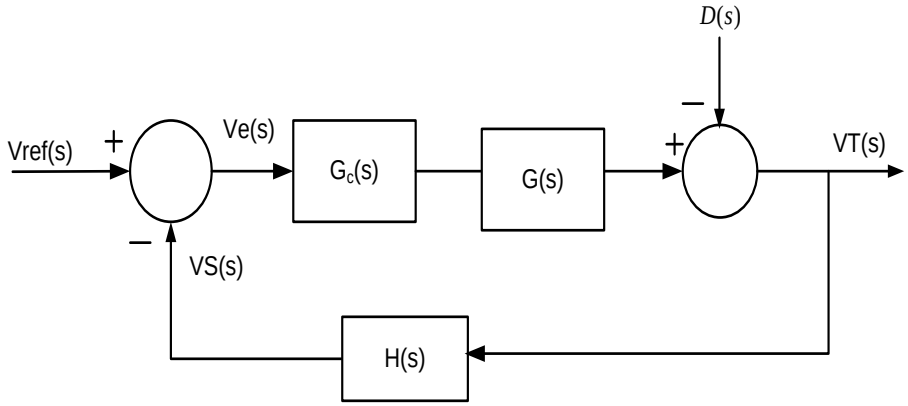
Nilai parameter tersebut di atas dapat ditentukan dengan menggunakan metode ke dua Ziegler-Nichols (*the second Ziegler-Nichols method*) yang dituangkan dalam bentuk tabel berikut ini ;

Tabel 8.1 Ziegler-Nichols Tuning Rules based on Critical Gain (K_{cr}) and Critical period (P_{cr}) (second method)

Tipe pengendali	**K_p**	**T_i**	**T_d**
P	0.5 K_{cr}	Tak berhingga	0
PI	0.45 K_{cr}	Pcr/1.2	0
PID	0.6 K_{cr}	0.5 P_{cr}	0.125 P_{cr}

Sumber, Ogata (1997) Hal. 673

Dengan demikian gambar (8.16), dapat disederhanakan dengan menjadi :



Gambar 8.17 Model transformasi laplace dari sistem AVR dengan pengendali PID

Model Simulasi AVR dengan Pengendali PID

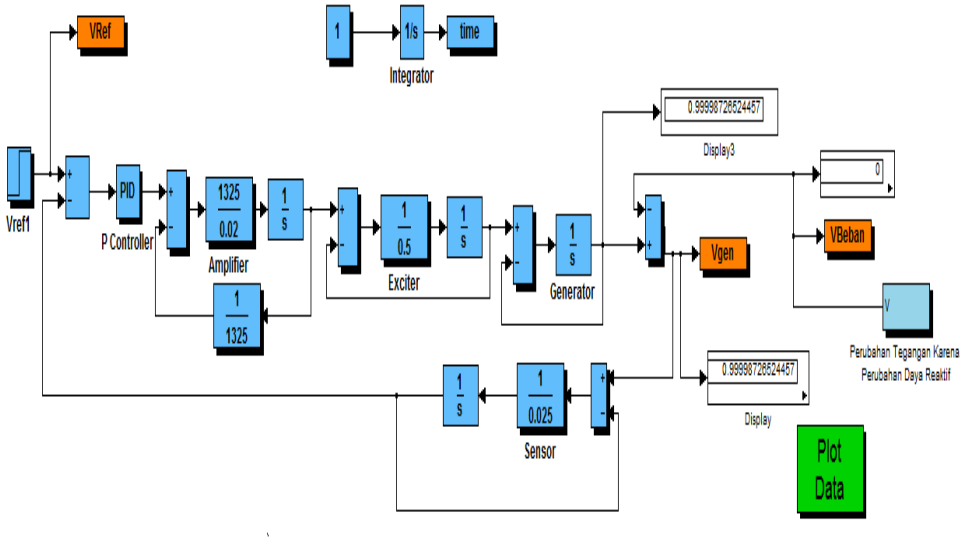
Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa dengan penentuan konstanta PID yang tepat maka akan diperoleh suatu pengendali AVR yang optimal. Oleh karena itu, dalam bahasan ini akan ditampilkan contoh simulasi sistem AVR dengan pengendali PID

Pada contoh simulasi ini, digunakan parameter-parameter sebagai berikut:

Tabel 8.2 Parameter AVR generator yang disimulasikan

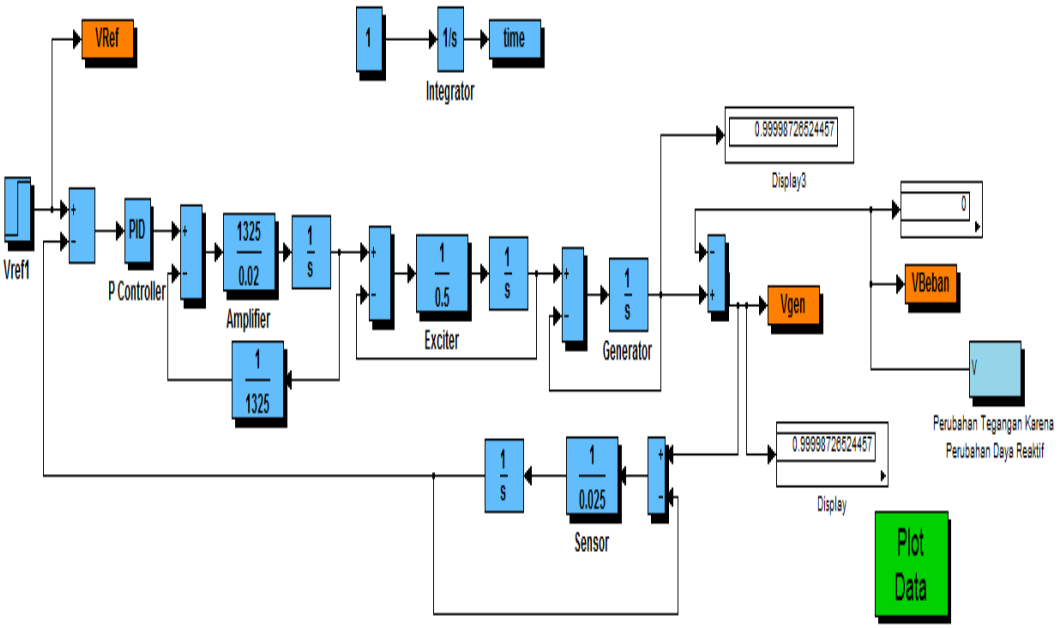
Gain	Time Constant (Second)
$K_A = 1325$	$\tau_A = 0.02$
$K_E = 1$	$\tau_E = 0.5$
$K_G = 1$	$\tau_G = 1$
$K_R = 1$	$\tau_R = 0.025$

Sementara itu parameter PID yang digunakan adalah : K_p = *0,0161354*, K_i= *0,01815 dan* K_d = *0,00359.*



Gambar 8.18 Model simulink AVR tanpa pengendali PID

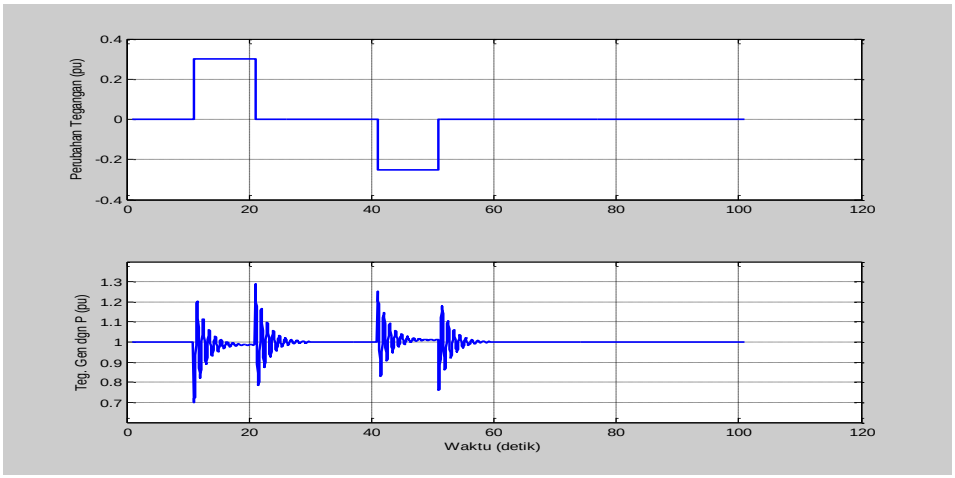
(K_p=0, K_i=0 dan K_D=0)



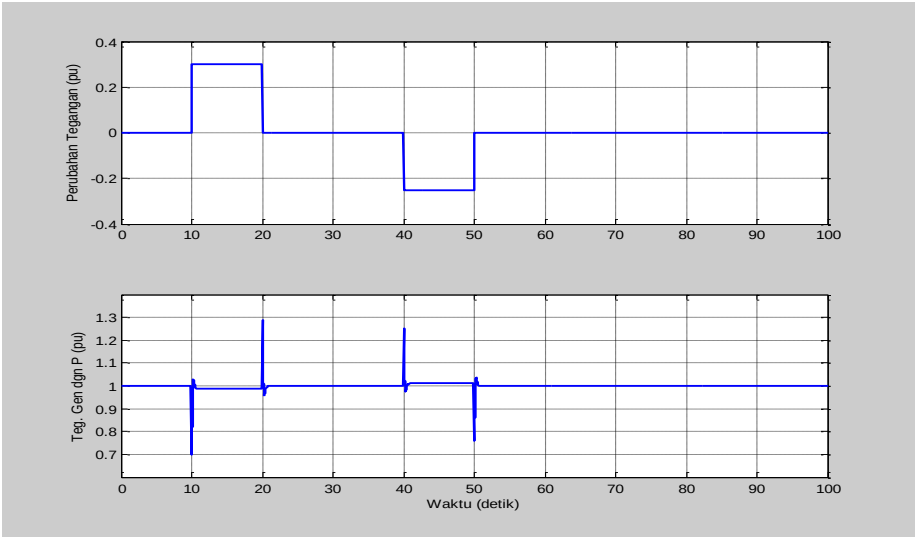
Gambar 8.19 Model simulink AVR dengan pengendali PID

(K_p=0,0161354, K_i=0,01815 dan K_D=0,00359)

Berdasarkan simulink seperti yang terlihat pada gambar (8.18) dan gambar (8.19), maka diperoleh perbedaan hasil output tegangan terminal generator sebagai berikut :



Gambar 8.20 Sinyal tegangan generator dengan AVR tanpa PID



Gambar 8.21 Sinyal tegangan generator dengan AVR tanpa PID

Jadi dengan mengacu pada persamaan (8.10), bahwa dengan AVR maka besarnya daya reaktif yang disuplai oleh generator ke beban dapat diatur sesuai dengan kebutuhan beban tersebut. Dimana setiap kenaikan beban atau kenaikan daya reaktif akan menyebabkan tegangan turun sehingga AVR secara otomatis akan menaikkan tegangan terminal generator begitupun sebaliknya. Namun perubahan naik turunnya tegangan tersebut menyebabkan terjadinya osilasi sebelum mencapai kondisi steady statenya. Untuk memperkecil periode osilasi tersebut maka AVR perlu ditambahkan dengan suatu pengendali tambahan yaitu pengendali PID untuk mengoptimumkan kinerja AVR tersebut.

8.4 PENGENDALIAN SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN FATCS

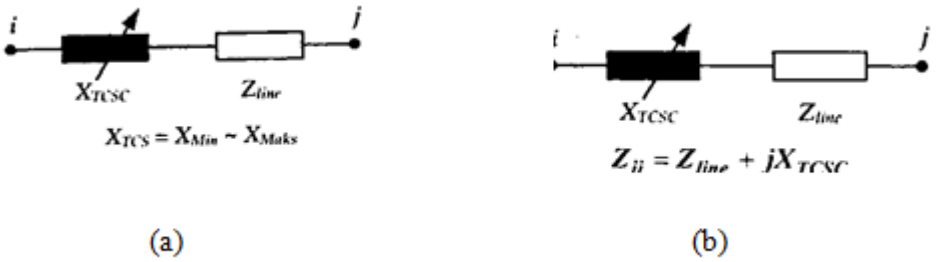
FACTS merupakan perangkat kontrol elektronik terpadu yang mengontrol varibel-variabel saluran transmisi seperti impedansi saluran, tegangan sistem dan sudut tegangan secara cepat dan efektif. Dengan demikian FACTS juga sangat berperan untuk menjaga operasi sistem tenaga listrik yang optimal.

Peralatan FACTS itu sendiri, terdiri atas beberapa tipe yang dapat bekerja pada keadaan transien (*transient state*) atau pada keadaan mantap (*steady state*). Adapun jenis-jenis FACTS antara lain :

.

- ***Thyristor Controlled Series Capacitor*** **(TCSC)**

TCSC berfungsi untuk mengontrol parameter saluran berupa reaktansi saluran. Sehingga dapat menjadi kompensasi kapasitif atau induktif dengan memodifikasi reaktansi saluran.



Gambar 8.22 TCSC : (a) Pasangan pada saluran, (b) Model matematis

Tingkatan nilai TCSC adalah fungsi reaktansi saluran transmisi dimana TCSC tersebut dipasang, yaitu ;

$$X_{ij} = X_{line} + X_{TCSC} \tag{8.23}$$

sedangkan reaktansi TCSC, sebesar :

$$X_{TCSC} = rtsc \cdot X_{line} \tag{8.24}$$

dengan :

X_{line} : reaktansi saluran (Ohm)

X_{ij} : reaktansi antara bus i dan j (Ohm)

rtsc : koefisien sudut kompensasi TCSC sebesar -0,7 (minimum) dan 0,2 (maksimum) yang merupakan batas bawah dan batas atas TCSC untuk menghindari kompensasi yang berlebihan.

Sementara itu menurut database *Siemen AG* [Zimmermann, 1997], fungsi biaya peralatan TCSC dapat dirumuskan menjadi :

$$c_{TCSC} = 0{,}0003\, q^2 - 0{,}7130\, q + 153{,}75 \tag{8.25}$$

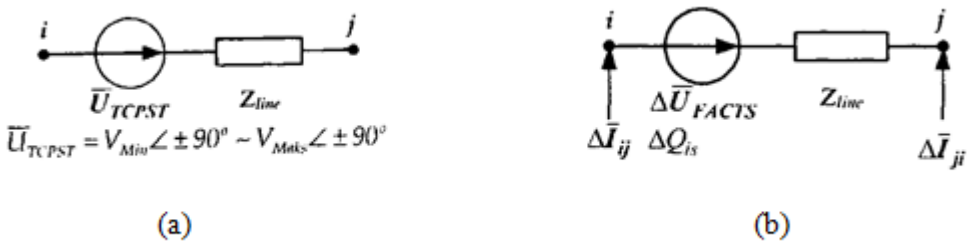
dengan :

c_{TCSC} : biaya peralatan TCSC (*US*$/kVAr)

q : daerah operasi peralatan TCSC (MVAr)

- ***Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer*** **(TCPST)**

TCSPT berfungsi untuk mengatur sudut tegangan antara sisi pengiriman dan sisi penerima pada saluran transmisi. TCPST dimodelkan sebagai kompensasi seri tegangan, seperti yang terlihat pada gambar berikut ini :



Gambar 8.23 TCSPT : (a) Pemasangan pada saluran, (b) Model matematis

Range kerja dari TCSPT antara sudut -5^0 sampai $+5^0$, dimana besarnya arus yang diinjeksikan pada bus i dan j sebesar :

$$\Delta I_{is} = \frac{\Delta U_{TCPST}}{Z_{ij}} \tag{8.26}$$

$$\Delta I_{js} = \frac{\Delta U_{TCPST}}{Z_{ij}} \tag{8.27}$$

dengan :

ΔI_{is} : arus yang diinjeksikan pada bus i (Ampere)

ΔI_{js} : arus yang diinjeksikan pada bus j (Ampere)

ΔU_{TCPST} : kompensasi tegangan TCPST (kV)

Z_{ij} : impedansi saluran antara bus i dan bus j (Ohm)

Fungsi biaya peralatan TCPST, dirumuskan sebagai berikut :

$$C_{TCPST} = d \cdot P_{maks} + IC \tag{8.28}$$

dengan :

C_{TCPST} : biaya peralatan TCPST (*US*$/kVAr)

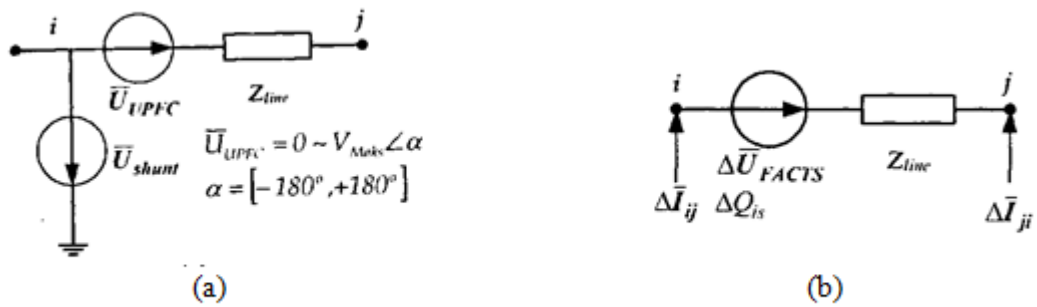
d : konstanta biaya capital

P_{maks} : batas daya penyaluran maksimum (MW)

IC : biaya instalasi TCPST (*US*$)

- ***Unified Power Flow Controller*** **(UPFC)**

UPFC merupakan peralatan FACTS yang paling efektif karena dapat mengatur beberapa variabel sistem secara terpadu yaitu impedansi saluran, tegangan terminal dan sudut tegangan.



Gambar 8.24 UPFC : (a) Pemasangan pada saluran, (b) Model matematis

Range kerja dari TCSPT antara sudut -180^0 sampai +180^0, dimana besarnya arus yang diinjeksikan pada bus i dan j sebesar :

$$\Delta I_{is} = \frac{\Delta U_{UPFC}}{Z_{ij}} \quad (8.29)$$

$$\Delta I_{js} = \frac{\Delta U_{UPFC}}{Z_{ij}} \quad (8.30)$$

dengan :

ΔI_{is} : arus yang diinjeksikan pada bus i (Ampere)

ΔI_{js} : arus yang diinjeksikan pada bus j (Ampere)

ΔU_{UPFC} : kompensasi tegangan UPFC (kV)

Z_{ij} : impedansi saluran antara bus i dan bus j (Ohm)

Fungsi biaya peralatan UPFC, dirumuskan sebagai berikut :

$$C_{UPFC} = 0{,}0003\ q^2 - 0{,}2691\ q + 188{,}22 \quad (8.31)$$

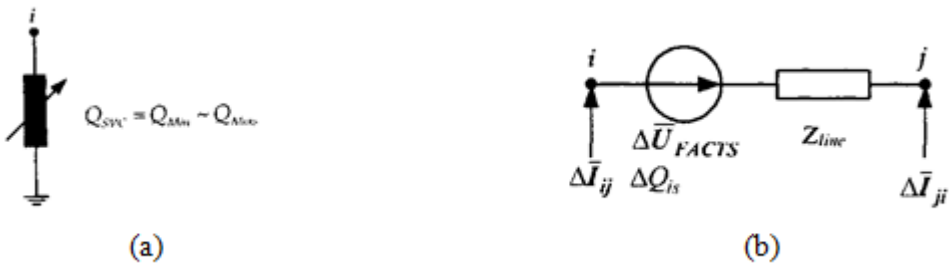
dengan :

C_{UPFC} : biaya peralatan UPFC (*US*$/kVAr)

q : daerah operasi peralatan UPFC (MVAr)

- ***Static Var Compensator* (SVC)**

Peralatan ini dapat dioperasikan pada kompensasi induktif maupun kompensasi kapasitif. Range kerja dari SVC yaitu dari -100 MVAr sampai +100 MVAr.



Gambar 8.25 SVC : (a) Pemasangan pada saluran, (b) Model matematis

Besarnya injeksi daya reaktif pada bus i adalah sebesar ;

$$\Delta Q_{is} = \Delta Q_{SVC} \tag{8.32}$$

dengan :

ΔQ_{is} : daya yang dinjeksikan pada bus I (MVAr)

ΔQ_{SVC} : daya kompensasi peralatan SVC (MVAr)

Sementara itu fungsi biaya peralatan SVC dirumuskan sebagai berikut:

$$C_{SVC} = 0{,}0003\ q^2 - 0{,}301\ q + 127{,}38 \tag{8.33}$$

dengan :

C_{SVC} : biaya peralatan SVC (*US*$/kVAr)

q : daerah operasi peralatan UPFC (MVAr)

Pada analsis lebih lanjut, penempatan peralatan FACTS yang optimal pada sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan menggunakan metode optimasi seperti Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm*).