

# Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan Pengendali Robust Melalui Optimasi $H_\infty$

**Mardlijah dan Aris Dian Permata**

Jurusan Matematika  
FMIPA ITS Surabaya

tidak ada email

## Abstrak

Naik turunnya kebutuhan konsumen terhadap energi listrik berpengaruh pada frekuensi sistem pembangkit listrik. Hal ini menyebabkan sistem pengendali pada sistem pembangkit tersebut harus mengatur kembali parameter pengendalinya guna mempertahankan kestabilan sistem. Sehingga untuk lebih memperbaiki performansi sistem pembangkit listrik digunakan sistem pengendali optimal.

Pada penelitian ini dirancang sebuah sistem pengendali yang robust melalui optimasi yang diimplementasikan pada sistem pembangkit listrik tenaga uap dengan *reheat steam turbine*. Dari hasil simulasi yang dilakukan, overshoot sistem pengendali yang dirancang lebih kecil hingga 29,1667% dibandingkan sistem dengan gangguan dan waktu yang diperlukan untuk mencapai titik kestabilan lebih cepat hingga 21,3043%. Sistem pengendali yang dirancang memiliki sensitivitas yang lebih kecil hingga 30,0678%. Sehingga sistem pengendali yang dirancang dapat dikatakan memiliki kestabilan dan performansi yang robust melalui optimasi  $H_\infty$ .

**Kata Kunci:** Sistem PLTU dengan Reheat Steam Turbine, Pengendali Robust, Optimasi  $H_\infty$

## 1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan dasar manusia. Energi tersebut merupakan hasil dari sistem pembangkit listrik yang didistribusikan pusat pengatur beban melalui jaringan transmisi. Perubahan jumlah energi listrik yang dibutuhkan konsumen berpengaruh terhadap frekuensi sistem pembangkit listrik. Oleh karena itu, sistem pengendali pada sistem pembangkit tersebut harus mengatur kembali parameter pengendalinya guna mempertahankan kestabilan sistem.

Analisis terhadap kestabilan sistem pembangkit listrik dapat digunakan untuk mengetahui tingkat kestabilan sistem tersebut dan menjaga kelangsungan proses operasi. Kestabilan sistem pembangkit listrik tenaga uap yang dikaji dengan memperhatikan parameter-parameter pada governor, turbin dan generator.

Sistem pengendali harus dirancang sedemikian hingga *robust*, baik terhadap perubahan gangguan yang timbul, maupun ketidakpastian dari sistem yang dikendalikan. Ketidakpastian (*uncertainties*) dalam sistem nyata yang diubah ke dalam model matematika disebabkan oleh asumsi yang digunakan. Suatu sistem dapat dikatakan *robust* yaitu jika sistem tersebut mampu bekerja dengan baik dan mempertahankan kestabilan walaupun terdapat kesalahan pemodelan maupun gangguan yang tidak diketahui karakteristiknya.

Dalam penelitian ini akan dirancang suatu sistem pengendali *robust* melalui optimasi  $H_\infty$  sebagai metode alternatif memperbaiki performansi sistem pembangkit listrik tenaga uap dengan *reheat steam turbine*. Pengendali umpan-balik ini dirancang untuk meminimumkan *overshoot* dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan gambaran bagaimana merancang suatu sistem pengendali pada sistem pembangkit listrik tenaga uap agar keluaran sesuai dengan yang diinginkan.

Permasalahan yang dibahas disini dibatasi pada:

- a. Masalah pengendali daya reaktif (generator) dari sistem pembangkit listrik tenaga uap dengan reheat steam turbine.
- b. Variabel terkendali berupa frekuensi generator dan variabel termanipulasi berupa masukan ke generator.
- c. Sinyal masukan, kondisi keadaan dan sinyal keluaran kontinu terhadap waktu.
- d. Pemodelan sistem yang digunakan berdasarkan referensi.
- e. Sistem bersifat linier, berdimensi hingga, tidak berubah terhadap waktu (steady-state), non-autonomous dan real.
- f. Sistem berupa Single Input Single Output (SISO).

- g. Galat pada sistem nominal dan sistem pengendali terbatas dan tak terstruktur.
- h. Rancangan pengendali yang dibuat hanya bisa dijalankan pada program Matlab versi 7.0.

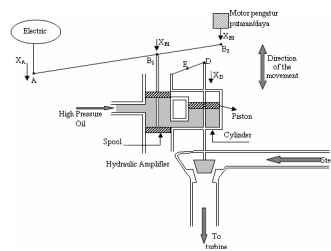
Dengan asumsi bahwa:

- a. Gangguan yang dapat diatasi merupakan gangguan yang tidak bisa diprediksi (unpredictable) besarnya dan tidak diketahui karakteristiknya serta terbatas.
- b. Keluaran tenaga turbin sama dengan keluaran generator.

Sedangkan metode yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain:

- Mempelajari model matematika dari sistem pembangkit listrik tenaga uap.
- Melakukan simulasi dengan memasukkan nilai parameter pada simulink program Matlab 7.0 sehingga memperoleh bentuk ruang keadaannya.
- Menguji keminimalan sistem.
- Menentukan fungsi bobot (weighting function) yang sesuai.
- Menghitung pengendali *robust* melalui optimasi  $H_\infty$ .
- Menganalisis hasil dari simulasi yang dilakukan.

## 2. Pemodelan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan Reheat Steam Turbine



Gambar 1: EHC

Governor yang digunakan adalah *Electro-Hydraulic Governor Control System* (EHC). Bagian electric merupakan pemicu gerakan hidrolik (*hydraulic amplifier*).

Gerakan titik  $D$  dinyatakan sebagai:

$$\Delta x_D = k_6 \int x_{B1} dt \quad (1)$$

Sedangkan gerakan di titik  $A$  dinyatakan:

$$\Delta x_A = -k_1 \Delta \omega \quad (2)$$

Unit pembangkit dari governor diparalel dengan sistem yang besar, maka  $x_{B2}$  juga dapat menyebabkan perubahan daya  $\Delta p$  dan tidak menimbulkan perubahan frekuensi, sehingga diperoleh:

$$\Delta x_{B2} = k_2 \Delta p \quad (3)$$

Gerakan di titik  $B_1$  dipengaruhi oleh titik  $A$ , maka:

$$\Delta x_{B1} = -k_3 k_1 \Delta \omega + k_4 k_2 \Delta p \quad (4)$$

Karena ada umpan balik dari titik  $D$  ke titik  $B_1$ , maka:

$$\Delta x_{B1} = -k_3 k_1 \Delta \omega + k_4 k_2 \Delta p + k_5 \Delta x_D \quad (5)$$

Dengan menggunakan transformasi Laplace dari bidang  $t$  ke bidang  $s$ , sehingga:

$\Delta \omega$  menjadi  $\Delta F(s)$ ,  $\Delta p$  menjadi  $\Delta P(s)$

$\Delta x_C$  menjadi  $\Delta x_C(s)$ ,  $\Delta x_D$  menjadi  $\Delta x_D(s)$

dan

$$\Delta x_{B1}(s) = -k_3 k_1 \Delta F(s) + k_4 k_2 \Delta P(s) + k_5 \Delta x_D(s) \quad (6)$$

$$\Delta x_D(s) = -\frac{k_6}{s} \Delta x_{B1}(s) \quad (7)$$

Maka dari persamaan (6) dan (7) diperoleh:

$$\Delta x_D(s) = \frac{-\frac{k_4 k_2}{k_5}}{1 + \frac{s}{k_5 k_6}} \left[ \Delta P(s) - \frac{k_3 k_1}{k_4 k_2} \Delta F(s) \right] \quad (8)$$

Jika:  $R = -\frac{k_4 k_2}{k_3 k_1}$ ,  $K_G = \frac{k_4 k_2}{k_5}$ ,  $T_G = \frac{1}{k_5 k_6}$ ,  $G_G(s) = \frac{K_G}{1 + s T_G}$   
maka Persamaan (8) menjadi:

$$\Delta x_D(s) = G_G(s) \left[ \Delta P(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right] \quad (9)$$

Uap keluaran dari governor ( $\Delta x_D(s)$ ) akan masuk ke dalam turbin, maka diperoleh hubungan antara  $\Delta x_D(s)$  dengan keluaran dari generator sebagai berikut:

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_G(s)}{\Delta x_D(s)} = \frac{K_T(1 + s F_{HP} T_{RH})}{(1 + s T_{CH})(1 + s T_{RH})} \quad (10)$$

Saat terjadi penambahan beban sebesar  $\Delta P_D$ , governor akan membuka lebih lebar. Penambahan beban ini akan menyebabkan penambahan daya sebesar  $\Delta P_G$ , sehingga tambahan daya bersih yang diterima sistem adalah  $\Delta P_G - \Delta P_D$ , dengan:

$$\Delta P_G - \Delta P_D = \frac{d}{dt} W_k + D \Delta \omega \quad (11)$$

Energi kinetik sebanding dengan kuadrat kecepatan sudut yang juga berarti merupakan kuadrat dari frekuensi, sehingga:

$$W_k = \left( \frac{\omega}{\omega^*} \right)^2 W_k^* = \left( \frac{\omega^* + \Delta \omega}{\omega^*} \right)^2 W_k^* \quad (12)$$

Persamaan (12) menjadi:

$$W_k = \left( 1 + \frac{\Delta \omega}{\omega^*} \right)^2 W_k^* \approx \left( 1 + 2 \frac{\Delta \omega}{\omega^*} \right) W_k^*$$

karena kecil, sehingga diperoleh perubahan energi kinetik yaitu:

$$\frac{d}{dt} W_k = 2 \frac{W_k^*}{\omega^*} \frac{d}{dt} (\Delta \omega) \quad (\text{dalam MW}) \quad (13)$$

Di lapangan, besaran energi kinetik sering dinyatakan dalam:

$$H = \frac{W_k}{P_S} \implies W_k = H P_S$$

Dengan substitusi persamaan diatas dan Persamaan (13) ke dalam Persamaan (11), maka diperoleh:

$$\Delta P_G - \Delta P_D = 2 \frac{H P_S}{\omega^*} \frac{d}{dt} (\Delta f) + D \Delta \omega = \frac{2H}{\omega^*} \frac{d}{dt} (\Delta \omega) + D \Delta \omega \quad (14)$$

Persamaan (14) di transformasi Laplace menjadi:

$$\Delta P_G(s) - \Delta P_D(s) = \left( \frac{2H}{\omega^*} s + D \right) \Delta F(s)$$

dengan

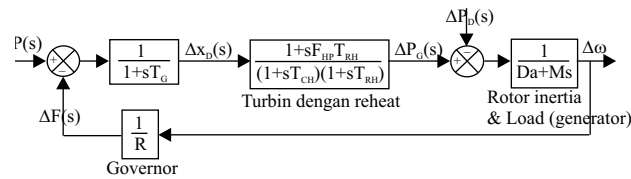
$$\Delta F(s) = \left( \frac{\omega^*}{2Hs + D\omega^*} \right) (\Delta P_G(s) - \Delta P_D(s)) \quad (15)$$

Sehingga Persamaan (15) menjadi:

$$\frac{\Delta F(s)}{\Delta P_G(s) - \Delta P_D(s)} = \frac{1}{D + Ms} \quad (16)$$

Dari uraian diatas diperoleh blok diagram untuk sistem PLTU dengan reheat steam turbine sebagai berikut:

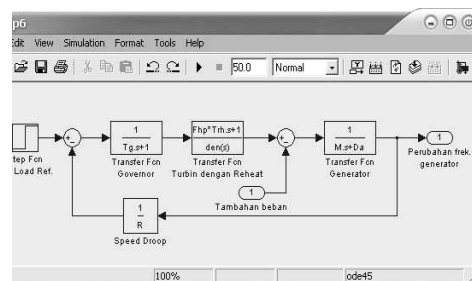
dengan:



Gambar 2: Simulink Sistem PLTU dengan Reheat Steam Turbine

- $\Delta P$  : perubahan daya  
 $\Delta x_P$  : setting steam valve  
 $\Delta P_G$  : perubahan keluaran generator  
 $\Delta P_D$  : penambahan beban  
 $\Delta \omega$  : perubahan frekuensi generator  
 $F_{HP}$  : koefisien pemanas ulang (reheat)  
 $R$  : konstanta pengaruh kerja governor terhadap frekuensi (speed droop)  
 $T_G$  : time-constant dari mekanisme speed governing (detik)  
 $T_{CH}$  : time-constant turbin bertekanan rendah (low pressure turbine) (detik)  
 $T_{RH}$  : time-constant turbin bertekanan tinggi (high pressure turbine) (detik)  
 $H$  : konstanta inersia generator  
 $Da$  : konstanta load-damping

### 3. Analisis dan Pembahasan



Gambar 3: Simulink Sistem PLTU dengan Reheat Steam Turbine

Gambar 3 menunjukkan model sistem PLTU dengan reheat turbine dalam bentuk simulink Matlab dengan:

$$T_G = 0,09 \text{ det}, \quad R = 0,034, \quad M = 10 \text{ det}, \quad Da = 1,389,$$

$$F_{HP} = 0,3, \quad T_{CH} = 0,3 \text{ det}, \quad T_{RH} = 7 \text{ det}$$

Dari simulink diatas, diperoleh matriks ruang keadaan:

$$\begin{aligned} x &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

dengan:

$$A = \begin{pmatrix} -0,1389 & 1 & 0,1 & 0 \\ 0 & -3,3333 & 0 & 11,1111 \\ 0 & 3,3333 & -0,1429 & 0 \\ -2,9412 & 0 & 0 & -11,1111 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = (0,1 \ 0 \ 0 \ 0), \quad D = (0)$$

Dan matriks transfer  $G$  yaitu:

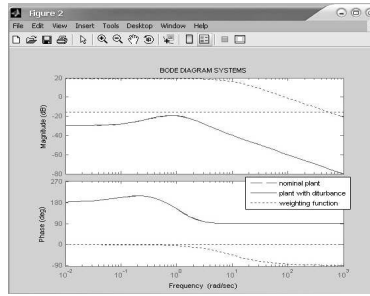
$$G = \begin{pmatrix} -0,1389 & 1 & 0,1 & 0 & -1 & 4 \\ 0 & -3,3333 & 0 & 11,1111 & 0 & 0 \\ 0 & 3,3333 & -0,1429 & 0 & 0 & 0 \\ -2,9412 & 0 & 0 & -11,1111 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \infty \end{pmatrix}$$

Sistem pembangkit yang diteliti bersifat minimal karena rank dari matriks keterkendalian dan keteramatannya sama dengan ordo matriks  $A$  yaitu  $n = 4$ . Kemudian dipilih fungsi bobot sedemikian hingga magnitudonya diatas sistem nominal dan menyebabkan matriks  $D_{12}$  memiliki rank yang penuh, dengan:

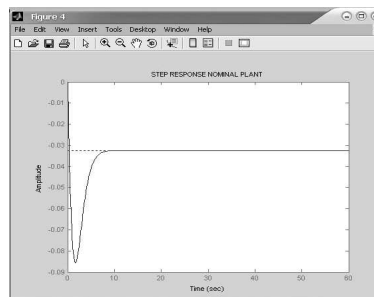
$$w_1 = \frac{9}{0,1s + 1}, \quad w_2 = \frac{0,17}{1} = 0,17 \quad w_3 = 0$$

Gangguan yang dipilih merupakan salah satu parameter dari sub blok pengendali daya reaktif (generator) sistem PLTU dengan reheat steam turbine, yaitu konstanta load-damping ( $Da$ ) dengan asumsi bersifat tidak diketahui karakteristiknya dan tidak dapat diprediksi besarnya. Sistem dengan gangguan akan memasukkan beberapa nilai  $Da$ , diantaranya  $Da = 1$ .

Dari perhitungan yang dilakukan dengan Matlab diperoleh gamma optimal sebesar 0,1543 pada iterasi ke delapan dengan toleransi kesalahan 0,01. Overshoot dari sistem pengendali *robust* lebih kecil dibandingkan dengan sistem dengan gangguan. Perbandingan tingkat overshoot ini berkisar antara 27,1186% sampai



Gambar 4: Grafik Fungsi Bobot untuk  $Da_{plant}$  with  $disturbance = 1$



Gambar 5: Step response sistem nominal

dengan 29,1667%. Begitu pula waktu yang diperlukan sistem pengendali *robust* untuk mencapai titik kestabilan lebih cepat hingga 21,3043%.

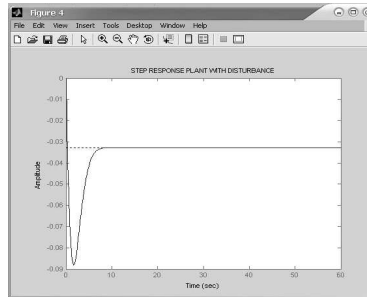
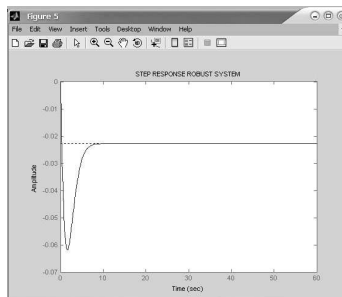
Berdasarkan Gambar 5, overshoot sistem nominal adalah sebesar 0,0531 dan waktu untuk mencapai titik kestabilan sistem nominal tersebut adalah pada saat  $t = 9,41$  det.

Overshoot sistem dengan gangguan lebih besar 0,0021 dibandingkan dengan sistem nominal dan waktu yang diperlukan untuk mencapai kestabilan lebih lama 2,9 detik.

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa overshoot dari sistem pengendali cenderung lebih kecil atau waktu yang diperlukan sistem pengendali *robust* untuk mencapai titik kestabilan lebih cepat. Overshoot sistem pengendali untuk nilai gangguan  $Da = 1$  adalah sebesar 0,0391 dan waktu yang diperlukan sistem pengendali untuk mencapai kestabilan adalah  $gt = 9,05$  sec.

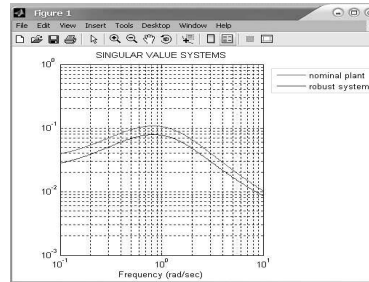
Safonov, Stein, Doyle dan Sandell menyatakan bahwa dasar utama pengendalian *robust* adalah jika nilai singular sistem pengendali yang dirancang memiliki nilai singular jauh dari titik kritis atau jika nilai singular sistem pengendali yang



Gambar 6: Step Response Sistem dengan Gangguan  $Da = 1$ Gambar 7: Step Response untuk  $Da_{plant\ with\ disturbance} = 1$ 

dirancang jauh dari titik kritis, maka sensitivitas sistem tersebut kecil.

Berdasarkan Gambar 8, nilai singular sistem pengendali untuk nilai gangguan  $Da = 10,02784$  pada frekuensi  $0,1\ rad/sec$  dan  $0,00852$  pada frekuensi  $10\ rad/sec$ . Nilai singular maksimumnya adalah sebesar  $0,02462$  pada frekuensi  $0,3784\ rad/sec$ . Sedangkan nilai singular sistem dengan gangguannya adalah  $0,03981$  pada frekuensi  $0,1\ rad/sec$  dan  $0,01019$  pada frekuensi  $10\ rad/sec$ . Nilai singular maksimumnya adalah sebesar  $0,1123$  pada frekuensi  $0,8214\ rad/sec$ . Hal ini menyatakan bahwa sistem pengendali yang dirancang memiliki nilai singular dibawah titik kritis. Sehingga, sistem pengendali yang dirancang memiliki sensitivitas yang kecil. Selain itu, ukuran kesalahan pemodelan sistem pengendali yang dirancang juga kurang dari satu, sehingga sistem pengendali yang dirancang memenuhi kestabilan *robust*. Dengan kata lain, sistem pengendali yang dirancang bersifat *robust* dengan optimasi  $H_{\infty}$ .



Gambar 8: Nilai singular sistem untuk  $D_{a_{plant\ with\ disturbance}} = 1$

## 4. Kesimpulan dan Saran

### 4.1. Kesimpulan

- Dari hasil simulasi dan analisa yang dilakukan telah diperoleh sistem pengendali yang memiliki kestabilan dan performansi yang lebih baik. Overshoot dari sistem pengendali *robust* lebih kecil hingga 29,1667% dibandingkan sistem dengan gangguan. Waktu yang diperlukan sistem pengendali *robust* untuk mencapai titik kestabilan lebih cepat hingga 21,3043%.
- Sensitivitas sistem pengendali yang dirancang terhadap gangguan lebih kecil hingga 30,0678% dibandingkan sistem dengan gangguan.
- Karena sistem pengendali yang dirancang memiliki performansi dan kestabilan yang *robust*, maka sistem tersebut dikatakan sistem pengendali *robust* dengan optimasi  $H_{\infty}$ .

### 4.2. Saran

- Untuk mencegah terjadinya error pada pemrograman dengan  $H_{infty}$  optimal, dapat dipilih fungsi bobot (weighting function) dengan (I adalah matriks identitas ordo satu).
- Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan menggunakan gangguan yang lain sesuai parameter dari sistem pembangkit listrik dengan reheat steam turbine.

## Pustaka

- [1] Green, Michael, and David J. N. Limebeer, 1996, *Linear robust Control*, Prentice Hall International Inc., USA.

- 
- [2] Kreyzig, Erwin, 1978, Introductory Functional Analysis with Application, John Wiley and Sons, Inc., Canada.
  - [3] Kundur, Prabha S., M. Zwyno, M. Klieng, G.J. Rongers, 1989, Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability, Mc Graw-Hill Inc., USA.
  - [4] Ogata, Katsuhito, 1984, Modern Control Engineering, Prentice Hall, USA.
  - [5] Olsder, G. J., prof. dr. and dr. J. W. van der Woude, 1994, Mathematical System Theory, delftse Uitgevers Maatschappij b.v., Netherlands.
  - [6] Permata, Aris Dian, 2007, Pemodelan Matematika dan Analisis Sifat-Sifat Sistem Pembangkit Listrik di PT Pembangkitan Jawa-Bali (PT PJB) Unit Pembangkitan Gresik, Kerja Praktek, Matematika, ITS, Surabaya.
  - [7] Rijanto, Estiko, 2000, *robust* Control Theory for Application, ITB Press, Bandung.
  - [8] Setiabudi, Andri, 1998, Perancangan Sistem Pengendali Moisture Pada Mesin Kertas Dengan Metode Kontrol *robust* , Tugas Akhir, Teknik Fisika, ITS, Surabaya.
  - [9] Tamaela, Gysber Jan, 1993, Analisis Dan Perancangan Sistem Pengendalian Tekanan Pada Deaerator Secara *robust* Melalui Optimasi , Tugas Akhir, Matematika, ITS, Surabaya.
  - [10] Zhou, Kemin, and John C. Doyle, 1997, Essentials of robust Control, Prentice Hall, USA.
  - [11] NN, Robust Control Toolbox, Matlab 7.0, The Mathworks Inc.

