

# UJI KESTABILAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP MENGGUNAKAN KRITERIA NILAI EIGEN

Akhmad Taufik<sup>1)</sup>

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan untuk menguji nilai konstanta-konstanta mesin pembangkit listrik tenaga uap yang dapat menghasilkan kestabilan frekuensi dan menentukan batas-batas kestabilannya. Penelitian ini dilaksanakan dengan cara pengambilan data-data teknis mesin pembangkit yang kemudian dimodelkan dengan metode pendekatan ruang keadaan. Kestabilan dari hasil pemodelan tersebut diuji dengan nilai konstanta-konstanta mesin dengan menggunakan kriteria nilai Eigen. Dari hasil pengujian, maka didapatkan nilai konstanta-konstanta yang dapat menghasilkan kestabilan nilai frekuensi pembangkit listrik. Dengan menyederhanakan sistem menjadi sistem 2 daerah, diperoleh rentang kestabilan daerah 1 pada perubahan beban sebesar -2% (-1,1 MW) sampai +2,5% (1,375 MW) dan rentang kestabilan daerah 2 pada perubahan beban sebesar -1% (-0,55 MW) sampai +2% (1,1 MW).

**Kata kunci:** Kestabilan, Ruang Keadaan, Nilai Eigen.

## I. PENDAHULUAN

Pembangkit tenaga listrik dituntut agar dapat memenuhi kebutuhan daya pada konsumennya secara kontinyu. Namun disamping itu, sangat perlu diperhatikan kualitas daya yang dikirim oleh pembangkit tersebut. Daya listrik yang dikirim harus diupayakan tetap dalam kondisi yang stabil baik tegangan maupun frekuensinya (berada dalam rentang nilai yang dapat ditolerir oleh sistem).

Kestabilan tegangan dari pembangkit listrik sangat bergantung pada kestabilan frekuensi, sedangkan kestabilan frekuensi sangat dipengaruhi oleh besarnya perubahan daya yang terpakai oleh konsumen, yang mana besar daya tersebut senantiasa berubah setiap waktu. Jika beban lebih besar daripada daya yang dibangkitkan, maka frekuensi sistem akan turun. Sebaliknya jika terdapat surplus daya dari pembangkit, maka frekuensi sistem akan naik.

Sistem kelistrikan sekarang ini semakin kompleks dengan sistem interkoneksi beberapa pembangkit tenaga listrik. Secara otomatis diperlukan sistem pengontrolan frekuensi yang handal, dimana kestabilan frekuensi tersebut sangat tergantung pada konstanta-konstanta yang disetting untuk setiap mesin pada pembangkit. Dengan adanya sistem kontrol tersebut, maka diharapkan bahwa sistem akan tetap stabil meskipun mengalami fluktuasi beban. Hal ini sangat perlu diperhatikan untuk menyediakan tenaga listrik dengan kualitas yang baik dalam memenuhi kebutuhan

---

<sup>1</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

tenaga listrik konsumen. Oleh karena itu, harus diperoleh nilai konstanta-konstanta mesin yang dapat menghasilkan kestabilan frekuensi pembangkit listrik pada saat terjadi perubahan besar beban dari sistem.

**Pemodelan Ruang Keadaan**

Teori pemodelan ruang keadaan merupakan teori kontrol modern yang didasarkan pada konsep keadaan yang merupakan pendekatan baru dalam analisis dan desain sistem kontrol yang kompleks telah dikembangkan sejak 1960. Teori ini menggunakan persamaan keadaan dari matriks ABCD sebagai berikut :

Persamaan input :  $x = Ax + Bu$

Persamaan output:  $y = Cx + Du$

Sistem dinamik terdiri dari sejumlah terhingga elemen terkumpul (*lumped elements*) dapat digambarkan dengan persamaan diferensial ordiner dengan waktu sebagai variabel bebas. Dengan menggunakan notasi matriks-vektor orde pertama. Jika n elemen vektor tersebut merupakan himpunan variabel keadaan, maka persamaan diferensial matriks-vektor tersebut disebut persamaan keadaan.

Persamaan sistem orde ke-n sebagai berikut:

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} y + a_n y = u \dots\dots\dots (1)$$

Dengan mengingat bahwa pengetahuan mengenai  $y(0), y'(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$ , bersama sama dengan masukan  $u(t)$  untuk  $t \geq 0$ , menentukan secara lengkap perilaku yang akan datang dari sistem, maka kita dapat memilih  $y(t), y'(t), \dots, y^{(n-1)}(t)$ , sebagai himpunan n variabel keadaan.

Marilah kita definisikan :

$x_1 = y$

$x_2 = y'$

.....

$x_n = y^{(n-1)}$

Selanjutnya persamaan sistem orde ke-n diatas dapat dituliskan sebagai berikut :

$x_1 = x_2$

$x_2 = x_3$

.....

$x_{n-1} = x_n$

$x_n = -a_n x_1 - \dots - a_1 x_n + u$

atau :

$x = Ax + Bu \dots\dots\dots (2)$

dimana :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Persamaan keluaran menjadi :

$$y = 1 \mid \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

atau :  $y = Cx$  .....(4)

dimana :  $C = 1 \ 0 \ \dots \ 0$  .....(5)

Selanjutnya dari matriks ruang keadaan tersebut akan dicari nilai Eigen yang menghasilkan kestabilan sistem.

**Kriteria nilai Eigen**

Untuk menguji kestabilan sistem yang telah dimodelkan dalam persamaan matematis, maka dapat dilakukan dengan kriteria nilai Eigen. Stabilitas pada sebuah sistem dapat dianalisis dengan melihat akar-akar persamaan karakteristik sistem tersebut, yakni nilai Eigen dari matriks A. Kriteria dari kestabilan tersebut adalah:

- Jika semua bagian real dari nilai Eigen bertanda negatif, maka sistem tersebut stabil.
- Jika terdapat salah satu atau lebih bagian real dari nilai Eigen bertanda positif, maka sistem tidak stabil.
- jika bagian real dari nilai Eigen bernilai nol, maka sistem tersebut tidak dapat ditentukan apakah stabil atau tidak stabil.

**II. METODE PENELITIAN**

Penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data-data teknis dari generator dan turbin uap dari sebuah PLTU seperti: rating daya, daya pembangkitan, konstanta kelembaman, konstanta waktu dari governor, dan sebagainya. Dengan menggunakan data-data teknis tersebut, maka dapat dihitung konstanta waktu dan penguatan sistem. Sebelum nilai konstanta-konstanta mesin diuji, terlebih dahulu sistem dimodelkan dalam persamaan matematis. Karena sistem tersebut adalah sistem yang kompleks, maka pemodelan dilakukan dengan menggunakan teori Pendekatan Ruang Keadaan.

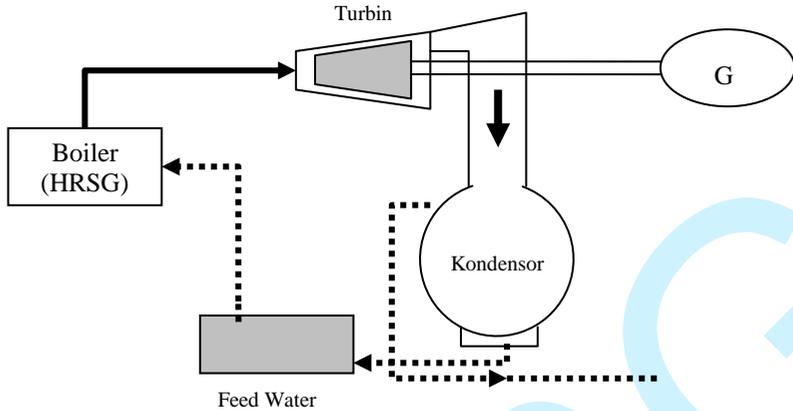
Untuk menguji kestabilan sistem tenaga listrik terinterkoneksi ini, maka dilakukan metode penelitian sebagai berikut:

- a. Pengenalan karakteristik dan pengambilan data-data di lapangan
  - Pengenalan karakteristik berbagai macam komponen/mesin yang terlibat dalam proses pembangkitan energi listrik dengan tenaga uap (PLTU), seperti: generator, turbin uap, governor, dan sebagainya.
  - Pengambilan data-data konstanta dari setiap komponen/mesin
- b. Pemodelan Sistem
  - Pemodelan setiap komponen dalam bentuk persamaan matematis dengan menganalisis proses kerja yang terjadi pada setiap komponen
  - Pemodelan setiap komponen dalam bentuk diagram blok dengan melihat dari persamaan matematis komponen yang bersangkutan
  - Agar dapat menganalisis sistem, maka selanjutnya dilakukan penggabungan model diagram blok dari setiap komponen ke dalam sebuah model sistem yang terpadu
  - Pemodelan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan sehingga diperoleh matrix A
- c. Prosedur Pengujian
  - Substitusi konstanta-konstanta dalam matriks A dengan nilai konstanta-konstanta mesin
  - Pengujian kestabilan sistem dilakukan dengan mencari akar-akar persamaan (nilai Eigen) dari nilai-nilai matrix A yang dengan menggunakan program Matlab
  - Penentuan kestabilan sistem dengan melihat tanda dari bagian real semua akar-akar persamaan yang dihasilkan
  - Penentuan batas-batas kestabilan sistem dengan melakukan perubahan beban dan menguji kembali kestabilan sistem dengan cara seperti tersebut di atas

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Model Fisik

Pembangkit listrik tenaga uap yang disimulasi memiliki kapasitas terpasang 50 MW. Uap air dihasilkan oleh *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) melalui pemanasan bertingkat. Kemudian uap yang tertekan dan bersuhu tinggi tersebut dialirkan ke turbin dan digunakan untuk memutar turbin. Turbin tersebut memutar generator yang kemudian menghasilkan tenaga listrik. Selengkapnya prinsip pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Dengan menggunakan rumus-rumus dasar dari generator, maka kita dapat memperoleh persamaan matematis generator dalam bentuk Laplace, yakni:

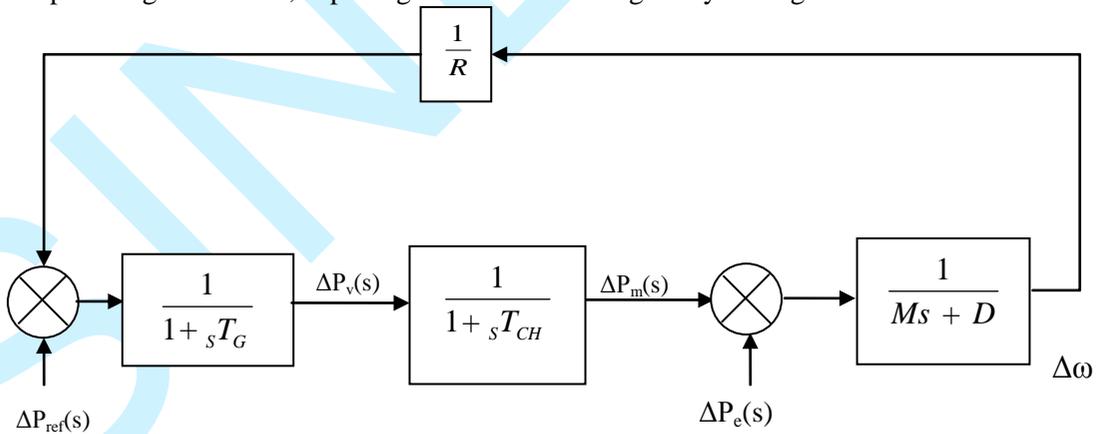
$$\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s) = Ms \Delta \omega \quad \dots\dots\dots(6)$$

Sedangkan untuk beban, diperoleh persamaan

$$\Delta P_e(s) = \Delta PL(s) + D\Delta F(s) \quad \dots\dots\dots(7)$$

Untuk model matematik turbin, hanya dipakai konstanta  $T_{CH}$ , konstanta waktu pengisian turbin. Demikian halnya dengan governor, menggunakan konstanta pengisian,  $T_G$ .

Dengan menganalisa parameter-parameter input dan output dari setiap bagian dari pembangkit tersebut, dapat digambarkan blok diagramnya sebagai berikut:



Gambar 2. Blok diagram sistem kontrol frekuensi pada PLTU

**Aksi Sistem Kontrol Frekuensi Sistem Terinterkoneksi Dua Daerah**

Dengan mengasumsikan daerah pembangkitan pada PLTU sebagai daerah 1 dan daerah pembangkitan lain sebagai daerah 2, maka perubahan besar beban pada setiap daerah pembangkitan akan menghasilkan aksi kontrol pada daerah lain. Aksi kontrol yang dihasilkan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Aksi kontrol frekuensi sistem terinterkoneksi 2 daerah

$\Delta\omega$	$\Delta P_{12}$	Perubahan beban		Aksi kontrol yang dihasilkan
-	-	$\Delta P_{L1}$ $\Delta P_{L2}$	+ 0	Menambah $P_{gen}$ pada daerah 1
+	+	$\Delta P_{L1}$ $\Delta P_{L2}$	- 0	Menambah $P_{gen}$ pada daerah 1
-	+	$\Delta P_{L1}$ $\Delta P_{L2}$	0 +	Menambah $P_{gen}$ pada daerah 2
+	-	$\Delta P_{L1}$ $\Delta P_{L2}$	0 -	Menambah $P_{gen}$ pada daerah 2

Sumber: Kundur (1994)

**Penyajian Ruang Keadaan Sistem**

Berdasarkan blok diagram sistem kontrol frekuensi pada gambar 2 di atas, dihasilkan sepuluh model matematis sistem dalam bentuk persamaan diferensial orde satu. Dengan menganalisa parameter masukan (input), keluaran (output) dan variabel penunjuk keadaan (*state assignment*), diperoleh matriks ABCD dengan dimensi A[10x10], B[10x2], C[4x10] dan D[4x2].

Matriks A[10x10] yang diperoleh adalah :

$$\begin{bmatrix}
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{T_{12}}{M_1} & -\frac{D_1}{M_1} & -\frac{1}{M_1} & 0 & 0 & \frac{T_{12}}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{1}{T_{CH1}} & \frac{1}{T_{CH1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{1}{R_1 T_{G1}} & 0 & -\frac{1}{T_{G1}} & \frac{1}{T_{G1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -K_1 T_{12} & -K_1 B_1 & 0 & 0 & 0 & K_1 T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{T_{12}}{M_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T_{12}}{M_2} & -\frac{D_2}{M_2} & -\frac{1}{M_2} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{CH2}} & -\frac{1}{T_{CH2}} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_2 T_{G2}} & 0 & -\frac{1}{T_{G2}} & \frac{1}{T_{G2}} \\
 K_2 T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_2 T_{12} & -K_2 B_2 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix}$$

### Pengujian nilai Eigen dari matriks A

Untuk menguji kestabilan sistem kontrol frekuensi seperti pada gambar 2, maka harus dicari nilai Eigen (Eigenvalues) dari matriks A tersebut di atas. Pengujian dilakukan melalui Program Matlab setelah nilai dari matriks A tersebut diganti dengan konstanta-konstanta seperti pada tabel 2. Nilai-nilai matriks A dimasukkan dalam sebuah file dengan ekstensi m, yang selanjutnya dieksekusi dengan perintah runscript.

Tabel 2. Konstanta-konstanta uji

Simbol	Nilai	Satuan
$M_1$	5	d
$T_{CH1}$	0.3	d
$T_{G1}$	0.1	d
$R_1$	0.2	Hz/MW
$D_1$	0.25	MW/Hz
$B_1$	5.25	MW/Hz
$KI_1$	0.4	-
$M_2$	6.0	d
$T_{CH2}$	0.4	d
$T_{G2}$	0.15	d
$R_2$	0.058	Hz/MW
$D_2$	0.83	MW/Hz
$B_2$	17.83	MW/Hz
$KI_2$	0.5	-
$T_{I2}$	3.88	MW

Sumber: ABB Power Gen. (1997) dan hasil simulasi

Dengan mencari *Eigenvalue* dari matriks A, diperoleh akar-akar persamaan berikut :

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -10.434406314065 \\ \lambda_2 &= -7.75081328985258 \\ \lambda_3 &= -0.353109203299533+2.4008757246511i \\ \lambda_4 &= -0.353109203299533-2.4008757246511i \\ \lambda_5 &= -0.564541207038285+1.130573057883881i \\ \lambda_6 &= -0.564541207038285-1.130573057883881i \\ \lambda_7 &= -1.62400155987329 \\ \lambda_8 &= -3.08284109840494e-016 \\ \lambda_9 &= -0.39565384822925 \\ \lambda_{10} &= -0.654754049962719 \end{aligned}$$

Dari semua nilai Eigen tersebut, terlihat bahwa semua bagian realnya mempunyai tanda negatif, sehingga memenuhi kriteria nilai Eigen. Jadi dapat disimpulkan bahwa penggunaan konstanta-konstanta mesin pada Tabel 2, dapat menghasilkan sistem kontrol frekuensi yang stabil.

Nilai Eigen di atas diperoleh untuk kondisi normal dimana besar daya yang dibangkitkan sama dengan besar daya yang digunakan oleh konsumen. Berdasarkan

penyederhanaan sistem menjadi sistem 2 daerah, dilakukan uji batas-batas kestabilan dengan mensimulasi perubahan beban yang masih bisa menghasilkan kondisi stabil pada sistem. Dari pengujian tersebut diperoleh rentang kestabilan daerah 1 pada perubahan beban sebesar -2% (-1,1 MW) sampai +2,5% (1,375 MW) dan daerah 2 pada perubahan beban sebesar -1% (-0,55 MW) sampai +2% (1,1 MW).

#### IV. KESIMPULAN

1. Pengujian konstanta-konstanta mesin pada sistem kontrol frekuensi menggunakan uji nilai Eigen, diperoleh konstanta-konstanta mesin yang dapat menghasilkan sistem kontrol frekuensi yang stabil (Tabel 2), dimana dari hasil pengujian konstanta-konstanta tersebut, diperoleh akar-akar persamaan karakteristik yang semua bagian realnya mempunyai tanda negatif, sehingga memenuhi kriteria kestabilan nilai Eigen.
2. Dengan menyederhanakan sistem menjadi sistem 2 daerah, diperoleh rentang kestabilan daerah 1 pada perubahan beban sebesar -2% (-1,1 MW) sampai +2,5% (1,375 MW) dan rentang kestabilan daerah 2 pada perubahan beban sebesar -1% (-0,55 MW) sampai +2% (1,1 MW).

#### V. DAFTAR PUSTAKA

- ABB Power Generation Ltd, 1997. *Combined Cycle Power Plant (Training Program)*.
- Anderson, P.M., and Fouad, A.A., 1982. *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA.
- Kreyszig, E., 1998. *Advanced Engineering Mathematics*, John Willey and Sons, Singapore.
- Kundur, Prabha., 1984. *Power System and Stability*, Mc. Graw Hill, Inc., United States of America.