

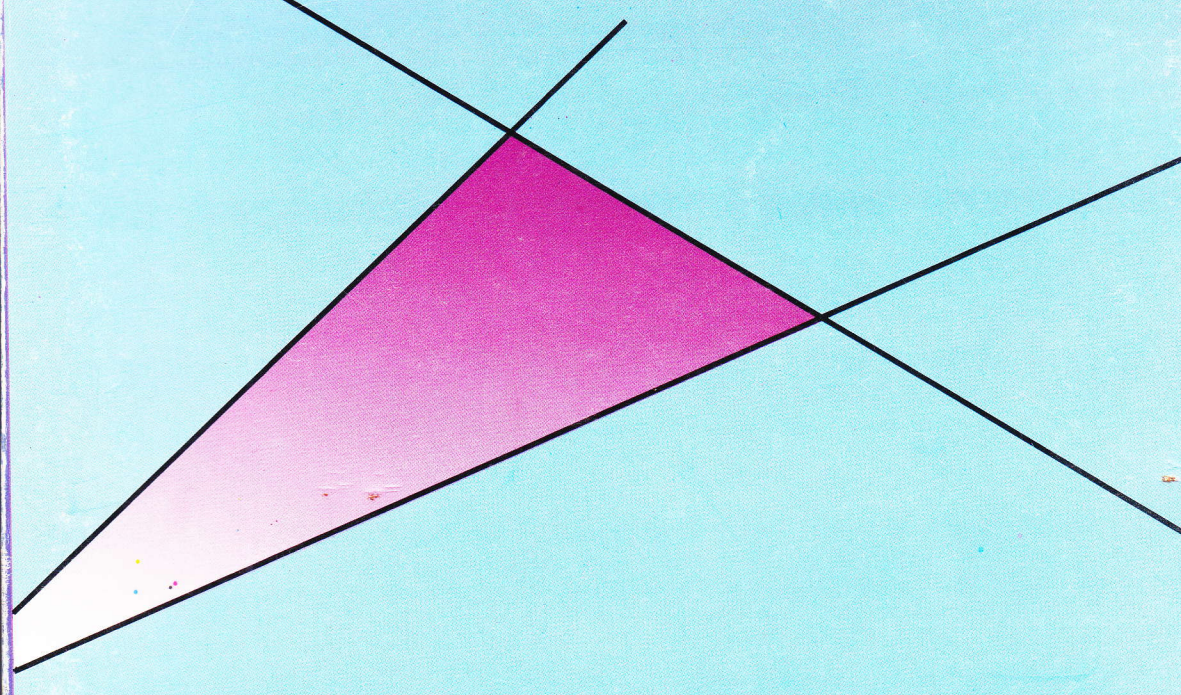
ISSN 1412 - 5137



Nomor. 1. Tahun I. Oktober 2001

# VISITEK

JURNAL PENELITIAN DAN WAWASAN TEKNOLOGI  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA





# VISITEK

Jurnal Penelitian dan Wawasan Teknologi  
Tahun ke 1 Nomor 1, Oktober 2001

---

## DAFTAR ISI

### *Hasil Penelitian*

<i>Sunar Rochmadi</i>	Pengukuran Topografi Untuk Pemeliharaan Sungai Dan Bangunannya	1
<i>Heri Wibowo</i>	Merancang Alat Berat "Wheel Loader"	13
<i>Darmono</i>	Eksplorasi dan Pemeliharaan Bangunan-Bangunan Pengatur Tata Air di Wilayah Sungai	25
<i>Didik Nurhadiyanto</i>	Pengaruh Parameter-Parameter Pemotongan Terhadap Gaya Pemotongan Pada Mesin Bubut	37
<i>Sukir</i>	Kajian Kestabilan Pengendalian Frekuensi-Beban Pada Pusat Listrik Tenaga Uap Dengan Menggunakan Metode Kokoh Normal Dan Linear Quadratic Regulator (LQR)	53
<i>Didik Purwantoro</i>	Pengaruh Karakteristik Hidrolik Saluran Terhadap Koefisien Dispersi Longitudinal Pada Saluran Terbuka	73
<i>Sigit Yatmono</i>	Sistem Komunikasi Terpadu Pesawat Ht - Telepon	93
<i>Sumarsono</i>	Pengaruh Pencucian Terhadap Jumlah Bakteri <i>Staphylococcus aureus</i> pada Daging Ayam	111
<i>Ikhwanuddin</i>	Arsitektur Sebagai Obyek Dan Arsitektur Sebagai Konsep	119
<i>Herlambang Sigit P.</i>	Pencatat Pulsa Telepon Dengan Mikrokontroler 8031 Yang Dihubungkan Secara Serial Dengan Komputer	131

# KAJIAN KESTABILAN PENGENDALIAN FREKUENSI-BEBAN PADA PUSAT LISTRIK TENAGA UAP DENGAN MENGGUNAKAN METODE KOKOH NORMAL DAN LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)

Oleh : Sukir

**Abstrak :** Load-frequency control is needed for controlling frequency variation, which had been caused by several of power demands in the power plant system. The design of control system must consider uncertainty model, due to modeling error, measurement inaccurate, linear approach and effects of system disturbance. The modern control design methods concerning state space equation are Normal Robust and Linear Quadratic Regulator (LQR) methods. The purpose of this research is to study the stability between those methods for load-frequency control design in a steam electricity power plant with uncertainty structured. The problem of this study is the stability of those two methods for control design as stated above. The object of the study is the Matlab 5.1-application program software with a personal computer and printer as supplements. For analyzing stability ratio between those methods it is needed to observe the eigen value of the closed loop system. In case all of the real part of the eigen values is negative, this system is asymptotic stable. The stability ratio between those methods may also be observed in the response of  $\Delta f(t)$  simulation to the  $\Delta P_d(t)$  disturbance. The result of this study showed that by taking  $Q_e$  and  $R_e$  dependent variables of the Normal Robust method the same or nearly the same with  $Q$  and  $R$  the LQR method, the Normal Robust method for load frequency control design on the steam electricity power with uncertainty structured parameters able to obtain good frequency stability, while the LQR method for load-frequency control resulting the worse frequency stability.

**Keywords :** stability, load-frequency control, normal robust method, LQR method and the steam electricity power plant.

## Latar Belakang

Penggunaan tenaga listrik yang sangat bervariasi dari waktu ke waktu menyebabkan jumlah beban yang harus dipikul mesin pembangkit tenaga listrik, berubah setiap saat. Keadaan tersebut menuntut mesin pembangkit harus dapat menyesuaikan dengan tepat dan cepat perubahan

---

Sukir, Dosen Pendidikan Teknik Elektro FT UNY



beban yang terjadi. Apabila mesin pembangkit tidak mampu menyesuaikan perubahan tersebut, yakni jika terjadi permintaan beban lebih tinggi dari pada keluaran mesin pembangkit atau dengan kata lain melebihi kesetimbangan nominal beban dan pembangkitan, akan menyebabkan kecepatan mesin pembangkit cenderung berkurang, sehingga frekuensi akan turun. Sebaliknya jika permintaan beban berubah menjadi lebih rendah dari pada keluaran mesin pembangkit, yang berarti lebih rendah dari pada kesetimbangan nominal beban dan pembangkitan, akan menyebabkan kecepatan mesin pembangkit cenderung bertambah dan frekuensi akan naik (Dhar, 1982). Untuk menjamin kestabilan frekuensi akibat perubahan beban tersebut maka dilakukan suatu pengendalian yakni pengendalian frekuensi-beban (*load-frequency control*).

Persoalan yang mendasar pada sistem pengendalian adalah upaya perancangan pengatur suatu sistem agar diperoleh sistem dengan kinerja yang diinginkan. Telah dan terus dikembangkan berbagai metode perancangan sistem pengendalian dengan pendekatan ranah frekuensi pada teori pengendalian klasik, atau metode dengan pendekatan ruang keadaan pada teori pengendalian modern. Metode-metode tersebut biasanya didasarkan pada anggapan bahwa model sistem fisik yang diatur dapat diketahui secara pasti baik struktur model maupun ukuran kuantitasnya. Kenyataannya, anggapan ini sulit dipenuhi, ketidakpastian sering menyertai sistem fisik yang umumnya diakibatkan oleh linearisasi di sekitar titik kerja, adanya pengabaian atau penyederhanaan perumusan matematis, ketidakmampuan dan ketidaktepatan dalam pengukuran berbagai kuantitas fisik, perubahan pada komponen sistem, derau dan lain-lain.



Metode perancangan pengendalian modern yang mempergunakan persamaan ruang keadaan sebagai landasannya diantaranya adalah metode Kokoh Normal dan Linear Quadratic Regulator (LQR). Apabila kedua metode tersebut digunakan untuk perancangan pengendalian frekuensi-beban pada Pusat Listrik Tenaga Uap yang modelnya mengandung ketidakpastian terstruktur maka akan dapat diketahui kinerja masing-masing metode, segi kelebihan dan kekurangannya serta tentunya akan terlihat metode yang lebih baik diantara keduanya.

#### **Perumusan Masalah**

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimanakah kestabilan pengendalian frekuensi beban pada Pusat Listrik Tenaga Uap dengan menggunakan metode Kokoh Normal dan LQR ?

#### **Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kestabilan pengendalian frekuensi beban pada Pusat Listrik Tenaga Uap dengan menggunakan metode Kokoh Normal dan LQR.

#### **Keaslian Penelitian**

Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini umumnya mengkhususkan pada penggunaan metode Kokoh tipe tertentu atau metode Linear Optimal Control jenis tertentu, untuk suatu pengendalian terhadap obyek tertentu pula. Demikian pula bila ditinjau dari obyek yang dikendalikan yakni frekuensi-beban seperti halnya dalam penelitian ini, namun



perancangan umumnya menggunakan metode pengendalian di luar metode Kokoh Normal dan LQR atau untuk tipe pembangkit listrik yang lain.

Penelitian yang mempergunakan metode Kokoh tipe tertentu untuk suatu pengendalian dilakukan oleh Noor Cholis Basyarudin (1992) yang meneliti tentang perancangan pengatur kokoh untuk pengendalian putaran motor arus searah serta Sanai Alireza, dan kawan-kawan(1995) yang meneliti tentang pengaturan Kokoh Kuadratik pada pengendalian generator. Penggunaan metode Linear Optimal Control untuk suatu pengendalian dilakukan oleh Fosha dan Elgerd (1990) yang meneliti tentang pendekatan teori Optimal Control untuk pengendalian Megawatt – Frekuensi serta Manansala (1995) yang mengangkat penelitian penggunaan teori optimal control untuk pengendalian putaran motor induksi tiga phase. Penelitian yang berkaitan dengan obyek yang dikendalikan yang dalam hal ini adalah pengendalian frekuensi – beban dengan menggunakan metode pengendalian tertentu antara lain dilakukan oleh Iqbal Ahmad (1993) yang memanfaatkan metode adaptive untuk pengendalian frekuensi-beban pembangkit listrik termis, Hariadi B, dan kawan-kawan (1995) yang meneliti pengendalian frekuensi dan tegangan dengan PID Swatala, Rubaai, A dan Udo, V (1992) yang meneliti penggunaan metode adaptive Control Scheme untuk pengendalian frekuensi – beban pada sistem tenaga listrik area jamak, serta Lim, dan kawan-kawan (1995) yang meneliti perancangan pengendalian frekuensi – beban dengan menggunakan metode Kokoh keluaran.

### **Kajian Teori**

#### **1. Telaah Metode Perancangan Pengendalian**



## a. Prinsip Metode Kokoh Normal

Persamaan dinamis sistem yang melibatkan ketidakpastian parameter diberikan oleh:

$$\dot{x}(t) = [A_0 + \Delta A(r(t))] x(t) + [B_0 + \Delta B(s(t))] u(t) \quad (1)$$

dengan,

$x(t) \in R^n$  = vektor keadaan sistem ( $n \times 1$ )

$u(t) \in R^m$  = vektor masukan atur ( $m \times 1$ )

$A_0$  = matriks sistem nominal ( $n \times n$ )

$B_0$  = matriks masukan atur ( $n \times m$ )

Ketidakpastian memasuki sistem melalui vektor  $r(t) \in R^k$ , dan  $s(t) \in S^l$  pada jangkauan dalam himpunan kompak tertentu yang diketahui ( $\mathcal{R}$ ) dan ( $S$ ) dengan,

$$\mathcal{R} \triangleq \{r: |r_i| \leq \bar{r}, i = 1, 2, \dots, k\} \quad (2)$$

$$S \triangleq \{s: |s_j| \leq \bar{s}, j = 1, 2, \dots, l\} \quad (3)$$

lebih lanjut dianggap bahwa ketidakpastian mempunyai "rank-1".

$$\Delta A(r(t)) = \sum_{i=1}^k A_i r_i(t) \quad (4)$$

$$\Delta B(s(t)) = \sum_{j=1}^l B_j s_j(t) \quad (5)$$

dengan  $\text{rank}(A_i) = 1$ , dan  $\text{rank}(B_j) = 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ ,  $j = 1, 2, \dots, l$ . Karena itu  $A_i$  dan  $B_j$  dapat ditulis

$$A_i = d_i e_i^T, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

$$B_j = f_j g_j^T, \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (7)$$



dengan,

$d_i, e_i, f_i$  = vektor-vektor  $n \times 1$

$g_i$  = vector-vektor  $m \times 1$

Kemudian untuk mencari kaidah atur umpan balik sistem dilakukan dengan memecahkan persamaan aljabar Riccati sebagai berikut :

$$PA_0 + A_0^T P - P \left[ -\frac{A_1}{\epsilon_a} + \frac{2}{\epsilon} B_0 R_\epsilon^{-1} B_0^T - \frac{\epsilon_b}{\epsilon^2} B_0 R_\epsilon^{-1} B_2 R_\epsilon^{-1} B_0^T + \frac{B_1}{\epsilon b} \right] P + \epsilon_a A_2 + Q_\epsilon = 0 \quad (8)$$

dengan  $\epsilon, \epsilon_a$  dan  $\epsilon_b > 0$  yang merupakan skalar,  $R_\epsilon$  dan  $Q_\epsilon$  adalah matriks pembobot simetrik dan definit positif yang dipilih dalam perancangan, sedangkan  $A_1, A_2, B_1$  dan  $B_2$  didefinisikan sebagai berikut :

$$A_1 \underline{\Delta r} \sum_{i=1}^k d_i d_i^T \quad (9)$$

$$A_2 \underline{\Delta r} \sum_{i=1}^k e_i e_i^T \quad (10)$$

$$B_1 \underline{\Delta s} \sum_{i=1}^k f_i f_i^T \quad (11)$$

$$B_2 \underline{\Delta s} \sum_{i=1}^k g_i g_i^T \quad (12)$$

Jika pemecahan aljabar Riccati tersebut menghasilkan  $P$  simetrik dan definit positif maka model persamaan (31) adalah stabil asimtotik untuk semua ketidakpastian, dengan hukum feedback linear sebagai berikut :

$$u(t) = -Kx(t) \quad (13)$$

dengan,

$$K = \frac{1}{\epsilon} R^{-1} B_0^T P \quad (14)$$

adalah penguat umpan balik.

#### b. Prinsip Metode Linear Quadratik Regulator (LQR)

Menurut Bernhard, P (1974) prinsip metode pengendalian LQR adalah sebagai berikut. Suatu sistem pengendalian optimal mempunyai persamaan ruang keadaan :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (15)$$

$$x(t_0) = x_0 \quad (16)$$

dengan  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  adalah ruang keadaan dan  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  merupakan pengontrol, serta indeks kinerja kuadratik :

$$J = \int_{t_0}^{\infty} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (17)$$

Matriks A dan B merupakan matriks konstan, Q dan R berupa matriks pembobot yang simetris, dengan:

$$R > 0 \text{ dan } Q \geq 0 \quad (18)$$

Dalam hal ini inisial waktu  $t_0$  dianggap nol serta :

$$\chi(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0 \quad (19)$$

Sistem dengan lima persamaan seperti tersebut di atas mempunyai penyelesaian jika dan hanya jika diperoleh matriks S yang simetrik dan semi definit positif dari pemecahan aljabar Riccati berikut :

$$SA + A^T S - S B R^{-1} B^T S + Q = 0 \quad (20)$$

Kontrol optimal diberikan oleh persamaan :



$$\begin{aligned} U(t) &= -K_c x(t) \\ K_c &= R^{-1} B^T S \end{aligned} \quad (21)$$

## 2. Pemodelan Sistem

Sistem tenaga listrik merupakan sistem dinamis yang kompleks dan non linear. Meskipun demikian, untuk pengendalian frekuensi-beban dapat dipertimbangkan bahwa sistem tenaga listrik akan mengalami perubahan relatif kecil pada beban, selama kondisi operasi normal. Dengan demikian pendekatan linear invarian waktu pada rumusan pemodelan seperti berikut ini cukup mewakili sistem di sekitar titik operasi (Lim, dkk, 1995).

$$\dot{\Delta f}(t) = -\frac{\Delta f(t)}{T_p} + \frac{K_p \Delta P_g}{T_p} - \frac{K_p \Delta P_d(t)}{T_p} \quad (22)$$

$$\dot{\Delta P_g}(t) = -\frac{\Delta P_g(t)}{T_t} + \frac{\Delta X_d(t)}{T_t} \quad (23)$$

$$\dot{\Delta X_d(t)} = -\frac{\Delta f(t)}{RT_g} - \frac{\Delta X_d(t)}{T_g} - \frac{\Delta E(t)}{T_g} + \frac{u(t)}{T_g} \quad (24)$$

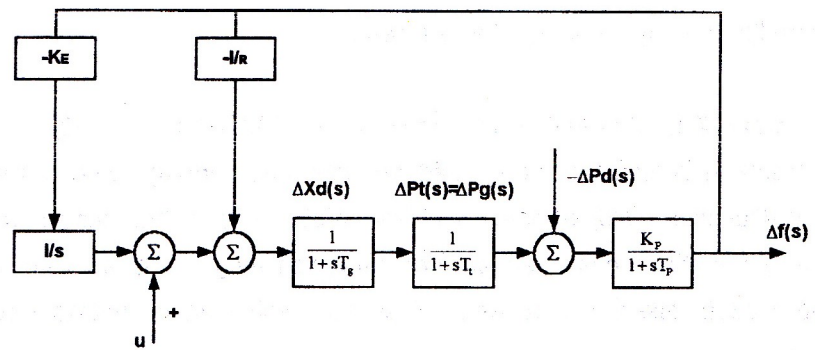
$$\dot{\Delta E(t)} = K_E \Delta f(t) \quad (25)$$

Rumusan tersebut di atas dapat disusun dalam persamaan ruang keadaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + F\Delta P_d(t) \\ \dot{\Delta f}(t) &= -\frac{\Delta f(t)}{T_p} + \frac{K_p \Delta P_g(t)}{T_p} - \frac{K_p \Delta P_d(t)}{T_p} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta f(t)} \\ \dot{\Delta P_g(t)} \\ \dot{\Delta X_d(t)} \\ \dot{\Delta E(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_p} & \frac{K_p}{T_p} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_t} & \frac{1}{T_t} & 0 \\ -\frac{1}{RT_g} & 0 & -\frac{1}{T_g} & -\frac{1}{T_g} \\ K_E & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f(t) \\ \Delta P_g(t) \\ \Delta X_d(t) \\ \Delta E(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_g} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} -\frac{K_p}{T_p} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta P_d(t) \quad (26)$$

Secara diagram blok, sistem dapat digambarkan seperti berikut ini.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Pengendalian Frekuensi-Beban Pusat Listrik Tenaga Uap.

### 3. Kerangka Berpikir

Dalam penerapan metode Kokoh Normal, persamaan ruang keadaan (26) memiliki parameter ketidakpastian sehingga persamaan tersebut menjadi :

$$\dot{x}(t) = (A_o + \Delta A)x(t) + (B_o + \Delta B)u(t) + (F_o + \Delta F)\Delta P_d(t) \quad (27)$$



dengan  $A_0$ ,  $B_0$  dan  $F_0$  adalah matriks nominal, sedangkan  $\Delta A$ ,  $\Delta B$  dan  $\Delta F$  merupakan matriks ketidakpastian. Selanjutnya dengan mengikuti langkah-langkah seperti yang diungkapkan dalam prinsip metode Kokoh Normal tersebut di muka, maka dapat ditentukan penguat umpan balik  $K$ , sehingga persamaan ruang keadaan lup tertutup parameter mean :

$$\dot{x}(t) = (A_0 - B_0 K)x(t) + F_0 \Delta P d(t) \quad (28)$$

Sistem lup tertutup parameter batas atas :

$$\dot{x}(t) = \{(A_0 + \Delta A) - (B_0 + \Delta B)K\}x(t) + (F_0 + \Delta F)\Delta P d(t) \quad (29)$$

Sistem lup tertutup parameter batas bawah :

$$\dot{x}(t) = \{(A_0 - \Delta A) - (B_0 - \Delta B)K\}x(t) + (F_0 - \Delta F)\Delta P d(t) \quad (30)$$

Berdasarkan persamaan ruang keadaan sistem lup tertutup tersebut maka dapat dilakukan penggambaran simulasi perubahan frekuensi fungsi waktu pada perubahan beban dengan memanfaatkan fungsi ODE 45 yang ada pada Matlab, disamping itu perlu dicari pula eigen value matriks sistem tersebut.

Pada penerapan metode LQR, dengan melakukan langkah seperti yang diuraikan di depan, dapat diperoleh penguat umpan balik sistem  $K_c$ , sehingga persamaan ruang keadaan sistem lup tertutup menjadi :

$$\dot{x}(t) = (A - BK_c)x(t) + F\Delta P d(t) \quad (31)$$

## Cara Penelitian

### 1. Materi Penelitian

Untuk melaksanakan simulasi rancangan pengendalian, diperlukan pemodelan sistem, data parameter sistem, metode perancangan Kokoh Normal dan LQR serta penyelesaian pemrograman. Sebagai bahan atau materi penelitian berupa perangkat lunak dengan menggunakan program aplikasi Matlab 5.1.

### 2. Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa seperangkat komputer pribadi prosesor itel 486, RAM 8MB, monitor SGVA, harddisk 364 MB, dan printer.

### 3. Jalan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan menempuh langkah-langkah sebagai berikut :

#### a. Pemodelan sistem dan penyusunan ruang keadaan.

Pemodelan sistem merupakan uraian matematis dari sistem pengendalian frekuensi-beban pada Pusat Listrik Tenaga Uap *non reheater*. Hasil pemodelan tersebut kemudian disusun kedalam persamaan ruang keadaan.

#### b. Penentuan data konstanta dan parameter sistem

Oleh karena penelitian ini berupa simulasi, maka data konstanta dan parameter sistem dapat mengambil dari suatu contoh sistem pembangkit listrik. Agar data konstanta dan parameter tersebut dapat dipertanggungjawabkan maka dalam penelitian ini mengambil contoh pembangkit listrik seperti yang dipergunakan dalam penelitian yang dilakukan oleh Lim KY, dkk (1995), namun untuk metode perancangan pengendalian dan tipe turbin yang berbeda.

#### c. Pembuatan program metode perancangan pengendalian Kokoh Normal.



d. Pembuatan program metode perancangan LQR

#### 4. Analisis Hasil

Untuk melihat kestabilan penggunaan metode Kokoh Normal dan LQR dapat dilakukan dengan mengamati nilai eigen matriks sistem lup tertutup. Menurut Dhar, RN (1982), suatu sistem pembangkit yang mempunyai persamaan ruang keadaan  $\dot{X} = A x + F\Delta Pd$  respon dinamis sistem dapat ditentukan dari nilai eigen matriks A, syarat perlu dan cukup untuk kestabilan asimtotik adalah jika semua bagian real dari nilai eigen matrik A adalah negatif. Disamping itu dapat dilihat pula dari gambar simulasi tanggapan  $\Delta f(t)$  pada  $\Delta Pd = 0,01$  pu dari kedua metode.

#### Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dalam penelitian ini data diambil dari suatu Pusat Listrik Tenaga Uap seperti dalam penelitian yang dilakukan oleh Lim, KY dan kawan-kawan namun untuk tipe turbin dan metode pengendalian yang lain. Adapun data selengkapnya ditunjukkan seperti pada Tabel 1, dengan  $T_p$  adalah tetapan waktu sistem (detik),  $T_t$  merupakan tetapan waktu turbin (detik),  $T_g$  adalah tetapan waktu governor (detik), R merupakan regulasi kecepatan aksi governor ( $\text{Hz.p.u. Mw}^{-1}$ ),  $K_p$  penguatan sistem dan KE adalah penguatan integrator.

Tabel 1. Data Parameter Pembangkit Listrik Tenaga Uap

No	Parameter	Harga	Perubahan (%)	Kisaran	Satuan	Perhitungan elemen matriks
1	$T_p$	20	50	10 s.d. 30	detik	$\frac{1}{T_p} = 0,033 \text{ s.d } 0,1$
2	$T_t$	0,3	30	0,21 s.d. 0,39	detik	$\frac{1}{T_t} = 2,56 \text{ s.d } 4,76$
3	$T_g$	0,08	30	0,056 s.d. 0,104	detik	$\frac{1}{T_g} = 9,62 \text{ s.d } 17,86$
4	R	2,4	30	1,68 s.d. 3,12	Hz pu / MW <sup>1</sup>	$\frac{1}{RT_g} = 3,08 \text{ s.d } 10,63$
5	$K_p$	120	-	120		$\frac{K_p}{T_p} = 4 \text{ s.d } 12$
6	$K_E$	0,6	-	0,6		-

Dengan mengacu pada data seperti tersebut di atas dapat disusun matriks sistem dan matrik ketidakpastian berdasarkan perhitungan yang rumusannya telah diungkapkan di bagian depan. Selanjutnya dengan menggunakan program yang dibuat, yang dalam hal ini metode perancangan Kokoh Normal melibatkan matriks ketidakpastian dan diambil  $\varepsilon_a = \varepsilon_b = 1$ , sedangkan  $\varepsilon$ ,  $R_\varepsilon$  dan  $Q_\varepsilon$  merupakan variabel bebas yang ditentukan kemudian dalam perancangan, serta metode perancangan LQR dengan Q dan R merupakan variabel yang ditentukan oleh perancang, maka diperoleh hasil seperti yang diuraikan di bawah ini.

Pada penelitian ini untuk melakukan peninjauan bersama antara kedua metode dipilih matrik pembobot  $R_\varepsilon$  pada metode Kokoh Normal sama dengan R pada metode LQR, matrik pembobot  $Q_\varepsilon$  pada metode Kokoh



Normal diambil sama atau mendekati dengan Q pada metode LQR, dan waktu komputasi dipilih relatif cepat. Berikut ini diberikan suatu kasus, metode perancangan Kokoh Normal dengan  $Q_{\epsilon} = kn * eye(4)$ ,  $kn = 0,15$ , Step = 0,0001,  $R_{\epsilon} = 10$  dan  $\epsilon = 0,1$  serta metode LQR dengan  $Q = kn * eye(4)$ ,  $kn = 0,1637$ , Step = 0,0001 dan  $R = 10$ . Data rancangan tersebut dimasukkan ke dalam program, selanjutnya program dijalankan sehingga diperoleh hasil seperti ditunjukkan dalam tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Perancangan Metode Kokoh Normal dengan  $kn$  awal = 0,15, step = 0,0001,  $R_{\epsilon} = 10$ ,  $\epsilon = 0,1$  dan Metode LQR dengan  $kn = 0,1637$ , step = 0,0001,  $R = 10$**

No	Matriks Arsitektur	Nilai							
		Metode Kokoh Normal				Metode LQR			
1	Matrik Pembobot $Q_{\epsilon}$ atau Q	0,1642	0	0	0	0,1643	0	0	0
		0	0,1642	0	0	0	0,1643	0	0
		0	0	0,1642	0	0	0	0,1643	0
		0	0	0	0,1642	0	0	0	0,1643
2	Pemecahan aljabar Riccati P atau S	1,5546	1,1291	0,18023	1,5048	0,20535	0,22018	0,043803	0,28541
		1,1291	3,8659	0,34028	0,81801	0,22018	0,39871	0,097486	0,14525
		0,18023	0,34028	0,14535	0,13444	0,043803	0,097486	0,031926	0,00654
		1,5048	0,81801	0,13444	2,0531	0,28541	0,14525	0,00654	1,0006
3	$K_1$	2,4764				0,054753			
	$K_2$	4,8754				0,12183			
	$K_3$	1,9971				0,038907			
	$K_4$	1,8472				0,0081815			
4	nilai eigen parameter	-45,4357 + Qi				-19,9828 + Qi			
		-0,619363 + Qi				-1,20417 + 5,31033i			
		-6,16884 + 4,88877i				-1,20417 - 5,31033i			
		-6,16884 - 4,88877i				-1,04156 + Qi			
5	nilai eigen parameter (kokoh), tetap (LQR)	-34,7012 + Qi				-13,2862 + Qi			
		-4,74873 + 2,32146i				-0,586613 + 2,38688i			
		-4,74873 - 2,32146i				-0,586613 - 2,38688i			
		-0,70887 + Qi				-1,91275 + Qi			

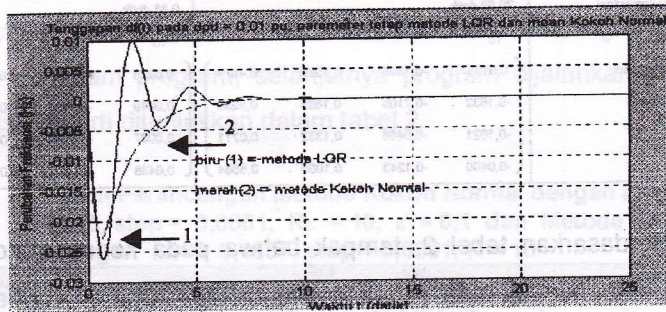
6	nilai eigen parameter awah	-23,9804 + 0i -5,63182 + 0i -0,907078 + 0,650602i -0,907078 - 0,650602i	-10,0177 + 0i -0,13365 + 1,59812i -0,13305 - 1,59812i -2,31287 + 0i
7	waktu komputasi	25,85 detik	0,88 detik
8	Sisa Persamaan (Z atau T)	$10^{-13}$ $\begin{pmatrix} 0,0133 & -0,1898 & 0,1288 & 0,4974 \\ -0,1632 & -0,7105 & 0,1665 & 0,3286 \\ -0,1021 & -0,0466 & 0,1332 & 0,0711 \\ -0,0400 & -0,1243 & 0,1066 & 0,5684 \end{pmatrix}$	$10^{-13}$ $\begin{pmatrix} 0,0225 & 0,0419 & 0,0095 & 0,0779 \\ 0,0049 & -0,0080 & 0,0005 & 0,0051 \\ 0,0067 & -0,0155 & 0,0017 & 0,0636 \\ 0,0438 & 0,1075 & 0,0281 & 0,1921 \end{pmatrix}$

Berdasarkan tabel 2, tampak bahwa pada kedua metode dengan matrik pembobot  $Q_c$  dan  $Q$  yang mendekati sama, menghasilkan nilai penguat (K) pemecahan aljabar riccati yang simetrik dan definit positif dan sisa persamaan yang mendekati nol, serta pada ketiga kondisi parameter dari kedua metode, semua bagian riil dari nilai eigen bertanda negatif. Hal ini berarti baik pada metode Kokoh Normal maupun LQR frekuensi sistem dapat mencapai kestabilan asimtotis meskipun dengan kondisi kestabilan yang berbeda. Adapun tanggapan  $\Delta f$  (t) pada perubahan beban  $\Delta Pd$  (t) seperti ditunjukkan pada gambar 2 ternyata bahwa penggunaan metode Kokoh Normal pada parameter mean terjadi kestabilan dengan redaman lebih, lewatan maksimum  $-0,0225$  Hz dan waktu penetapan 7,5 detik, sedangkan penggunaan metode LQR pada parameter tetap terjadi kestabilan dengan redaman kurang, lewatan maksimum  $-0,026$  Hz dan waktu penetapan 8 detik.

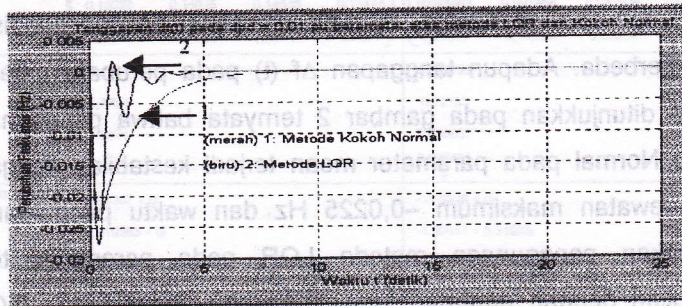
Untuk parameter batas atas  $\Delta f$  (t) pada perubahan beban  $\Delta Pd$  (t) seperti ditunjukkan pada gambar 3 ternyata penggunaan metode Kokoh Normal pada parameter batas atas terjadi kestabilan redaman lebih, lewatan



maksimum  $-0,0235$  Hz dan waktu penetapan 8 detik, sedangkan penggunaan metode LQR, terjadi kestabilan redaman kurang dengan grafik kurang halus, lewatan maksimum  $-0,0275$  Hz dan waktu penetapan 5,5 detik.



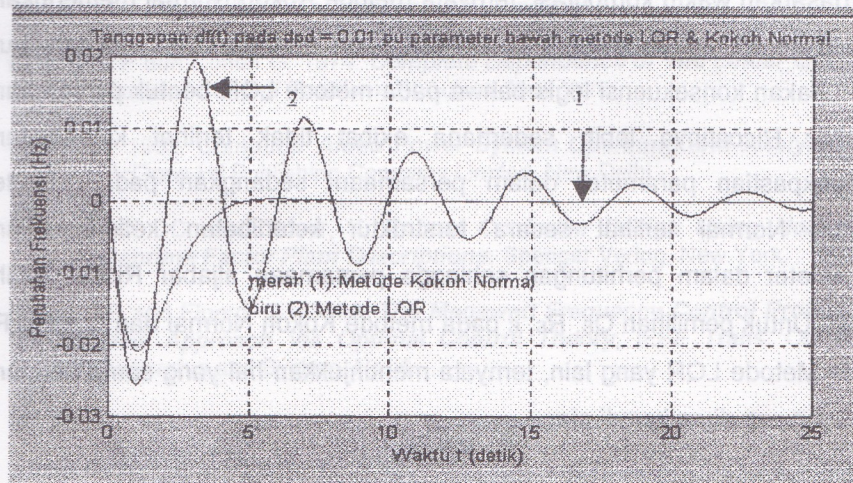
Gambar 2. Tanggapan  $\Delta f(t)$  pada  $\Delta Pd = 0.01$  pu sistem menggunakan metode pengendalian Kokoh Normal pada parameter mean dengan  $Q_{\epsilon} = 0.1642 \cdot \text{eye}(4)$ ,  $R_{\epsilon} = [10]$ ,  $\epsilon = 0.1$  dan metode LQR pada parameter tetap dengan  $Q = 0.1643 \cdot \text{eye}(4)$  serta  $R = [10]$ .



Gambar 3. Tanggapan  $\Delta f(t)$  pada  $\Delta Pd = 0.01$  pu sistem pada parameter batas atas menggunakan metode pengendalian Kokoh Normal dengan  $Q_{\epsilon} = 0.1642 \cdot \text{eye}(4)$ ,  $R_{\epsilon} = [10]$ ,  $\epsilon = 0.1$  dan metode LQR dengan  $Q = 0.1644 \cdot \text{eye}(4)$  serta  $R = [10]$ .



Pada penggunaan metode Kokoh Normal untuk kondisi parameter batas bawah seperti ditunjukkan pada gambar 4, ternyata terjadi kestabilan redaman lebih dengan lewatan maksimum  $-0,0205$  Hz, waktu penetapan 5 detik, sedangkan penggunaan metode LQR mengalami kestabilan dengan redaman kurang, berosilasi teredam, waktu penetapan lebih dari 25 detik dan lewatan maksimum  $-0,0275$  Hz.



Gambar 4. Tanggapan  $\Delta f(t)$  pada  $\Delta P_d = 0.01$  pu sistem pada parameter batas bawah menggunakan metode pengendalian Kokoh Normal dengan  $Q_\varepsilon = 0.1642 \cdot \text{eye}(4)$ ,  $R_\varepsilon = [10]$ ,  $\varepsilon = 0.1$  dan metode LQR dengan  $Q = 0.1643 \cdot \text{eye}(4)$  serta  $R = [10]$ .

Berdasarkan gambar-gambar tersebut terlihat bahwa pada penggunaan metode Kokoh Normal mempunyai lewatan maksimum yang lebih kecil daripada metode LQR dan bentuk grafik  $\Delta f(t)$  lebih halus serta waktu penetapan menuju kestabilan yang lebih cepat, sehingga dapat



dikatakan bahwa kestabilan  $\Delta f(t)$  yang dihasilkan metode Kokoh Normal adalah baik, sedangkan metode LQR kurang baik. Hal tersebut terjadi karena pada metode Kokoh Normal ketidakpastian parameter sistem terlibat secara terstruktur dalam perumusan persamaan aljabar Riccati, sedangkan pada metode LQR ketidakpastian parameter sistem tersebut tidak terlihat keterlibatannya dalam perumusan aljabar Riccati. Namun bila ditinjau berdasarkan waktu komputasi, ternyata metode Kokoh Normal memerlukan waktu komputasi yang lebih besar dari pada metode LQR. Hal tersebut merupakan konsekuensi logis bahwa pada metode LQR bentuk persamaan aljabar Riccatinya lebih sederhana akibat tidak terlihat keterlibatan ketidakpastian parameter dalam persamaan, sedangkan pada metode Kokoh Normal terlihat secara terstruktur keterlibatan ketidakpastian parameter dalam perhitungan sehingga persamaan aljabar Riccati lebih rumit. Untuk pemilihan  $Q_\varepsilon$ ,  $R_\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  pada metode Kokoh Normal dan  $Q$  serta  $R$  pada Metode LQR yang lain, ternyata menunjukkan hal yang sama dengan seperti yang diuraikan di atas.

### **Kesimpulan**

Pada pemilihan variabel bebas  $Q_\varepsilon$  dan  $R_\varepsilon$  dari metode Kokoh Normal diambil sama atau mendekati sama dengan  $Q$  dan  $R$  pada metode LQR, dapat diambil kesimpulan :

1. Penggunaan metode Kokoh Normal untuk pengendalian frekuensi-beban pada Pusat Listrik Tenaga Uap yang parameter-parameternya mengandung ketidakpastian terstruktur dapat menghasilkan kestabilan frekuensi yang baik.

2. Penggunaan metode Linear Quadratic Regulator (LQR) untuk pengendalian frekuensi-beban seperti tersebut di atas menghasilkan kestabilan frekuensi yang kurang baik.

### Daftar Pustaka

- Basyaruddin Noor Choliz. 1992. *Perancangan Pengatur Kokoh dengan Umpan Balik Ruang Keadaan Pada Sistem Pengantar Kecepatan Motor Arus Searah*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Bernhard, P dan Cohen G. 1974. *Complete Dependence of The Linear Quadratic Optimal Control Problem*, RI Autom, New York.
- Dhar, RN. 1982. *Computer Aided Power System Operating and Analysis*. Tata McGraw-Hil Publishing Company Limited. New Delhi.
- Farlane, MC.DC. and Glover, K. *Robust Controller Design Using Normalized Caprime Factor Plant Descriptions*. Spenger Verlog. New York.
- Fosha, CE and Elgerd, O.I. 1990. *The Megawatt Frequency Control Problem : A New Approach Via Optimal Control Theory*, IEEE Trans. ON Power Apparatus and System. No. 4.
- Hariadi, B, Nurdin, C dan Mahbub. 1995. *Pengendalian Frekuensi dan Tegangan dengan PID Swatala : Kasus Sistem Pembangkit Hidro*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Iqbal Ahmad. 1993. *Penggunaan Metode Adaptive Untuk Pengendalian Frekuensi – beban Pada Pembangkit Listrik Termis*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Lim, KY, Wang, YY and Zhon RJ. 1995. *Output-Robust Load Frequency Contoller Design For Power System*. Nanyang Technological University. Singapura.
- Manansala, EC. 1995. *Application of Optimal Control Theory to the Control of Three Phase Induction Motor*. Nanyang Technological University. Singapura.
- Peterson, I.R and Hllot, CV. 1986. *A Riccati Equation Approach to the Stabilization of Uncertain Linear System*. Automalica Vol. 22.



Rubai, A and Udo U. 1992. **An Adaptive Control Scheme for Load Frequency Control of Multi Area Power System, Part II, Implementation and Functional Design.** Electric Power System Approach.

Sanai Alireza, Sabzevary and Ahinichi, I. 1995. **Robust Quadratic Generator Control.** Waseda University. Tokyo.

Schemitendorf, WE. 1988. **Designing Stabilizing System Research Uncertain System Using the Riccati Equation Approach.** IEEE Transaction Automatic Control.

Suwarto, E, Carmadi, M dan Nurdin, M. **Pengendalian Swatata Frekuensi-Beban Sistem Tenaga Listrik Area Jamak.** 1995. Institut Teknologi Bandung. Bandung.