

# PEMODELAN SISTEM PENGONTROLAN FREKUENSI BEBAN KRITERIA OPTIMAL PADA PLTU MENGGUNAKAN METODA LINIER QUADRATIK REGULAR (LQR)

**Cahayahati  
Hidayat**

Dosen Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Bung Hatta  
Jln. Gajahmada No. 19 Padang Telp. (0751) 51341 - 54257

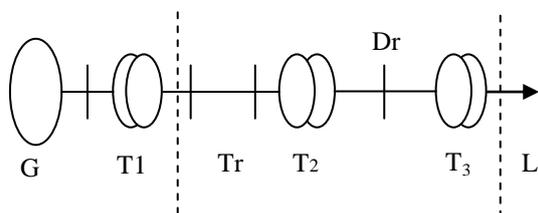
## **Abstract**

*Frequency Stability represents one of the performance yardsticks of an electric power system. Sensitive crucible frequency change to burden change oblige the us to design a controller capable to give the responds which quickly, accurate, stabilize and optimal to improve the performance governor as especial component in system of frequency controller. Linear Quadratic Regulator (LQR) method used to design the optimal feedback reinforcement. Because this method directly depict the form of fisis system. Pass the visible simulation of responds of system frequency to burden change of before and after optimal feedback applying.*

**Keyword :** Kontrol optimal frekuensi, Governor, LQR

## **1. PENDAHULUAN**

Suatu sistem tenaga listrik yang terdiri dari pembangkit, penyaluran dan beban, seperti pada gambar 1 yang memperlihatkan diagram segaris sistem tenaga listrik mulai dari pembangkit (G) sampai ke beban (L). beban yang selalu berubah-ubah setiap saat langsung dirasakan oleh pembangkit. Untuk itu pembangkit harus bisa mengikuti perubahan beban dengan respon yang cepat dan akurat sehingga dapat dicapai frekuensi dan tegangan sistem yang stabil.



**Gambar 1.** Diagram segaris sistem tenaga listrik

Keterangan :

G : Pembangkit Tenaga Listrik

T1 : Transformator daya step up

Tr : Saluran Transmisi

T2 : Transformator daya step down

Dr : Saluran Distribusi

T3 : Transformator Distribusi

L : Beban

Kesuksesan sistem tenaga listrik dalam melakukan tugasnya dicapai apabila ia mampu beroperasi dengan baik dan dapat melayani pelanggan sepenuhnya secara memuaskan. Hal ini menyangkut pembangkitkan daya mesti sesuai dengan kebutuhan pelanggan, frekuensi sistem yang harus berada dalam batas-batas yang ditentukan, tegangan sistem dijaga dalam batas yang diizinkan, andal dan sebagainya.

Hal khusus mengenai frekuensi sistem, sangat peka terhadap perubahan beban, maka diperlukan peralatan kontrol frekuensi selalu berada pada harga nominal (batas-batas yang diizinkan).

Peralatan pengaturan frekuensi yang umum di gunakan adalah governor, yang ditempatkan pada penggerak mula seperti turbin, diesel (tergantung jenis penggerak mula). Governor diharapkan memiliki karakteristik untuk dapat memberikan respon yang cepat, teliti, stabil dan bekerja optimal.

Dalam mempertahankan frekuensi untuk berbagai kondisi beban. Dengan berkembangnya metoda-metoda teknik kendali, dan melalui bantuan komputer, sangat membantu usaha dalam aplikasi mengoptimalkan kerja peralatan sistem kontrol.

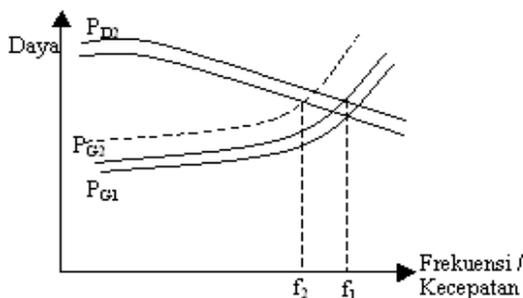
Dalam makalah ini pembahasan dibatasi hanya khusus pengaturan frekuensi sistem yang terdiri dari satu pembangkit mensuplai sekelompok beban, sedangkan tegangan sistem dianggap konstan melalui pengaturan eksitasi generator dan tap transformator (tidak dibahas dalam makalah ini). Fluktuasi beban dimodelkan dengan suatu fungsi random

Banyak tulisan yang membahas tentang pengontrolan frekuensi, seperti dalam makalah Tugas Akhir Ir. Ady Suwanto, MT pada program magister jurusan elektro ITB dengan judul pengendalian Swatara Frekuensi-Beban Sistem Tenaga Listrik Area Jamak, Pengendalian Frekuensi pada PLTU dengan Beban Terpisah. Menggunakan metoda LQG oleh Ir. M. Fackhrudin, MT, buku dengan judul Power System Operation and Control karangan PSR Murty dan sebagainya.

Dalam makalah ini dikemukakan model kontrol umpan balik optimal dilakukan dengan menerapkan metoda Linier Kuadrat Regular (LQR).

## 2. Tinjauan Pustaka

Pengerak mula dikopel dengan generator untuk melayani beban, dapat digambarkan karakteristik hubungan antara daya output ( $P_G$ ) dan ditambahkan beban ( $P_D$ ) seperti pada gambar 2



**Gambar 2.** Karakteristik Pembangkitan daya

Dan penambahan beban terhadap kecepatan. Pada keadaan seimbang, keluaran daya dan penambahan beban dinyatakan berturut-turut oleh kurva  $P_{G1}$  dan  $P_{D1}$ . Untuk menjaga keseimbangan, diperlukan hubungan

$$\frac{dP_G}{dw} > \frac{dP_D}{dw}$$

Dengan :

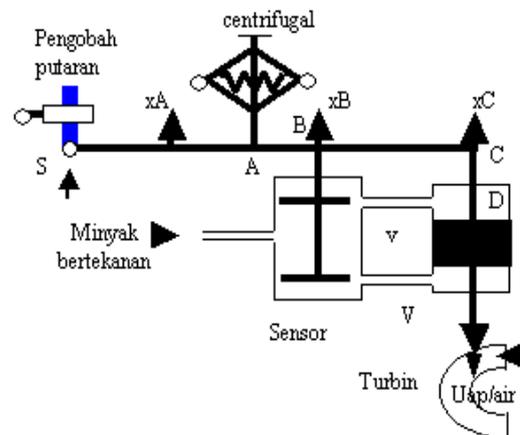
$$\frac{dP_D}{dw} = \text{Perbandingan perubahan keluaran daya terhadap perubahan kecepatan}$$

$$\frac{dP_G}{dw} = \text{Perbandingan perubahan beban terhadap perubahan kecepatan.}$$

Dengan memperhatikan gambar 2, jika beban pada  $P_{D1}$  perubahan menjadi  $P_{D2}$  dan keluaran daya  $P_{G1}$  tetap, frekuensi akan turun dari  $f_1$  menjadi  $f_2$  dan titik operasi berpindah dari titik A menjadi titik B. Untuk itu diperlukan tambahan pembangkitan daya. Governor digunakan untuk menaikkan keluaran daya  $P_{G2}$ , sehingga titik operasi menjadi titik C dan frekuensi kembali normal.

### 2.1. Model Sistem Governor Kecepatan

Pengontrolan frekuensi pada sistem pembangkit tenaga listrik yang umum dipakai adalah menggunakan sistem governor. Gambar 3 menunjukkan sistem governor.



**Gambar 3.** Speed governor turbo generator keadaan mantap

Cara kerja governor dapat dijelaskan sebagai berikut : pengubah putaran berfungsi untuk pengaturan frekuensi secara manual atau set awal governor. Governor sentrifuga berhubungan langsung dengan putaran

turbin, jika putaran bertambah maka gaya sentrifugal bertambah yang mengakibatkan titik A bergeser ke atas bersamaan dengan titik B. hal ini mengakibatkan katup pilot bagian atas membuka, sehingga minyak bertekanan mengalir dan menekan piston utama servomotor D kebawah, akibatnya kutup utama akan memperkecil bukannya yang secara langsung memperkecil uap atau air masuk turbin. Karena penutupan katup V secara langsung berhubungan dengan daya input turbin maka pada kondisi ini terjadi pengurangan daya turbin.

Demikian sebaliknya untuk kasus penurunan putaran / frekuensi, maka gaya sentrifugal menurun yang juga bersamaan dengan penurunan titik A dan B. akibatnya katup pilot bawah membuka, sehingga minyak bertekanan mengalir dan menekan piston utama D ke atas bersamaan bersamaan dengan bertambahnya pembukaan katup utama V, konsekuensinya akan menambah daya turbin. Hal ini berlangsung sampai mencapai kondisi mantap.

Pada keadaan input daya daya turbin dalam keadaan mantap (Ptr) dengan pisisi lengan C, kemudian berubah kesuatu kondisi (Pto) dengan pisisi lengan xC berlaku hubungan:

$$\frac{P_{to}}{P_{tr}} = \frac{x_C}{C} \dots\dots\dots(1)$$

dimana C adalah titik keadaan mantap pembukaan katup utama, xC adalah perubahan posisi lengan untuk menghasilkan daya output turbin (Pto). Perubahan harga xA sebanding dengan perubahan kecepatan, dinyatakan oleh :

$$x_A = k (\omega_0 - \omega) = \Delta\omega \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{x_A}{x_C} = \frac{AB}{BC} = I_1$$

$$x_A = I_1 \cdot x_C \dots\dots\dots(3)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2),(3) ke persamaan (1) diperoleh :

$$\Delta\omega = \frac{C \cdot I_1}{k} \frac{P_{to}}{P_{tr}} \dots\dots\dots(3a)$$

Steady state speed regulation governor diberikan oleh :

$$R = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_r} = \left[ \frac{C \cdot I_1}{k P_{tr} \cdot \omega_r} \right] P_{to} \dots\dots\dots(3b)$$

Jika titik C dibuat tetap muka :

$$\frac{x_B}{x_A} = \frac{BC}{AC} = I_2 \text{ atau } x_B = I_2 \cdot x_A \dots\dots\dots(4)$$

Pegeseran titik C keatas kertas sebesar xC bersama dengan kenaikan beban yang mempengaruhi titik B dinyatakan :

$$x_B = I_2 \cdot x_A - I_3 \cdot x_C \dots\dots\dots(5)$$

Pembukaan katub pilot ditentukan oleh aliran minyak ke dalam servomotor. Dimana perpindahan katub utama V, xC sebanding dengan jumlah minyak yang mengalir pada D, yang dapat dinyatakan oleh :

$$x_C = k \int x_B \dots\dots\dots(6)$$

Dalam bentuk transformasi laplace :

$$x_C(s) = \frac{k}{s} x_B(s) \dots\dots\dots(7)$$

Persamaan 5 dalam bentuk transformasi Laplace

$$x_B(s) = I_2 \cdot x_A(s) - I_3 \cdot x_C(s) \dots\dots\dots(8)$$

Subtitusi persamaan (7) ke (8)

$$\frac{s x_C(s)}{k} = I_2 \cdot x_A(s) - I_3 \cdot x_C(s) \dots\dots\dots(9)$$

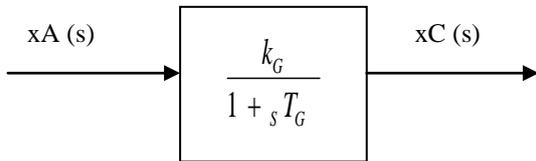
$$x_C(s) = \frac{(I_2 / I_3)}{\left[ 1 + \frac{1}{k \cdot I_3} \right]} \cdot x_A(s) \dots\dots\dots(10)$$

maka fungsi transfer speed governor adalah

$$G_3 = \frac{x_C(s)}{x_A(s)} = \frac{k_3}{1 + t_s \cdot s} \dots\dots\dots(11)$$

dengan :

$k_G = 1_2 / 1_3$  : Konstanta penguatan mekanis governor.  
 $T_G = 1 / k. 1_3$  : Konstanta waktu governor



**Gambar 4.** Diagram blok speed governor

**2.2. Model Turbin.**

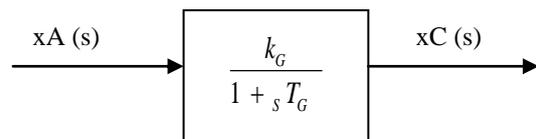
Pada bagian terdahulu telah dijelaskan bahwa dengan membuka katub uap lebih besar atau merubah posisi katub uap akan menaikkan daya turbin ( $\Delta P_G$ ). Jika rugi-rugi kenaikan daya generator diabaikan, akan dihasilkan :

$$\Delta P_T = \Delta P_G$$

Karakteristik turbin uap dipengaruhi faktor gain turbin  $K_T$  dan konstanta waktu  $T_T$ , sehingga persamaanya dinyatakan :

$$G_T (s) = \frac{\Delta P_G (s)}{xC (s)} = \frac{k_T}{1+sT_T} \dots\dots\dots(12)$$

- $\Delta P_G$  = Kenaikan daya yang dibangkitkan
  - $xC$  = Perpindahan titik C atau penyimpangan posisi katub uap
  - $K_T$  = Konstanta gain turbin
  - $T_T$  = Konstanta waktu turbin (0,2 – 2 dt)
- Diagram blok model turbin uap adalah :



**Gambar 5 .** Blok diagram turbogenerator

**2.3. Model Beban Area Generator**

Pada kondisi operasi keadaan mantap kecepatan sudut ( $\omega_s$ ) dinyatakan :

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (Fs = \text{rutin frekuensi})$$

Jika  $\Delta\delta$  adalah perubahan posisi sudut dari ekivalen generator sesuai dengan kenaikan beban dalam sistem, maka :

$$\delta = \delta_s = \Delta\delta \text{ rad}$$

kemudian :

$$\omega = \frac{d}{dt} (\delta) = \frac{d}{dt} (\delta_s + \Delta\delta) \text{ rad/dt.} \dots(13)$$

$$= \omega_s + \frac{d \Delta\delta}{dt} = \omega_s + \Delta\omega$$

misal :

$$f = f_s + \Delta f$$

dimana :

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta\delta \text{ Hz} \dots\dots\dots(14)$$

Energi kinetik area :

$$W = 1/2 \cdot I \cdot \omega^2 = 1/2 \cdot I (2\pi f)^2 \text{ MJ}$$

Energi kinetik kecepatan sinkraon  $\omega_s$  adalah:

$$W_s = 1/2 \cdot I \cdot \omega_s^2 = 1/2 \cdot I (2\pi f_s)^2 \text{ MJ}$$

Sehingga :

$$W = W_s \left( \frac{f}{f_s} \right)^2 = W_s \cdot \left( \frac{f_s + \Delta f}{f_s} \right)^2$$

$$W = W_s \left( 1 + 2 \frac{\Delta f}{f_s} \right)^2 \text{ atau } \frac{\Delta f}{f_s} \dots\dots\dots(15)$$

Laju perubahan energi kinetik adalah kenaikan daya dalam area yang dinyatakan oleh

$$\frac{d}{dt} (W) = \frac{2W_s}{f_s} \frac{d}{dt} (\Delta f)$$

Didefinisikan konstanta inersia perunit

$$M = W_s / P_{tr}$$

$$\frac{d}{dt} (W) = \frac{2W_s}{f_s} \frac{d}{dt} (\Delta f) \text{ p.u.} \dots\dots\dots(16)$$

Dengan menaikkan konsumsi beban, semua kenaikan akan dipengaruhi oleh kenaikan frekuensi yang dapat dinyatakan oleh faktor damping beban (B) :

$$B = \frac{\partial P_D}{\partial f} \cdot \text{p.u.MW} / \text{Hz} \dots\dots\dots(17)$$

Untuk tahap perubahan kebutuhan beban  $\Delta P_D$  dan perubahan daya turbin akibat perubahan putaran guvenor ( $\Delta P_C$ ) dapat dinyatakan :

$$\Delta P_C - \Delta P_D = B \cdot \Delta f + \frac{d}{dt} (W)$$

$$\Delta P_C - \Delta P_D = \Delta f + \frac{2M}{fs} \frac{d}{dt} (\Delta f)$$

Dalam bentuk transformator laplace :

$$[\Delta P_C(s) - \Delta P_D(s)] = B \cdot \Delta F(s) + \frac{2M}{fs} \cdot s \cdot \Delta F(s)$$

$$\Delta F(s) = [\Delta P_C(s) - \Delta P_D(s)] \frac{1}{\left[ B + \frac{2.M.s}{fs} \right]}$$

$$\Delta F(s) = [\Delta P_C(s) - \Delta P_D(s)] \frac{1/B}{\left[ 1 + \frac{2.M.s}{fs.D} \right]}$$

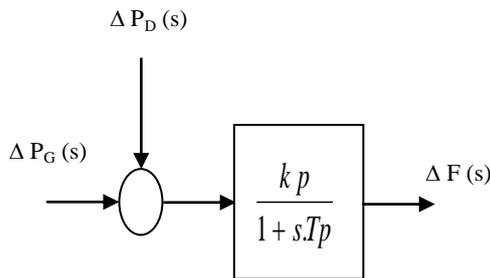
$$\Delta F(s) = [\Delta P_C(s) - \Delta P_D(s)] \frac{kp}{[1 + s.Tp]} \dots \dots \dots (18)$$

Dimana :  $kp = 1/D \text{ Hz/P.U MW}$

$$Tp = \frac{2.M}{fs.B}$$

Maka fungsi transfer hubungan perubahan frekuensi terhadap perubahan input- output daya dinyatakan oleh  $Gp(s)$

$$Gp(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta P_C(s) - \Delta P_D(s)} = \left[ \frac{kp}{1 + s.Tp} \right] \dots \dots \dots (19)$$



**Gambar 6.** Blok diagram power sistem

#### 2.4. Persamaan State Sistem

Dengan menggabungkan model governor, model turbin dan model beban, akan diperoleh diagram blok sistem pengatur frekuensi, PLTU. Perlu diingatkan bahwa

sinyal umpan balik perubahan frekuensi untuk menentukan aksi governor.

Terlebih dahulu harus dikalikan dengan konstanta steady state speed regulation governor, gambar (6). Untuk menentukan persamaan state dari sistem, dilakukan pemisahan :

- $x_1 = \Delta f$  : perubahan frekuensi
- $x_2 = \Delta P_G$  : perubahan daya yang dibangkitkan
- $x_3 = x_C$  : penyimpangan posisi katub uap
- $u = \Delta P_C$  : penambahan daya oleh perubahan putaran governor
- $d = \Delta P_D$  : perubahan beban

untuk power sistem :

$$x_1 + x_1 T_p = K_p (x_2 - d)$$

atau  $x_1 = -\frac{x_1}{T_p} + \frac{K_p}{T_p} x_2 - \frac{K_p}{T_p} d$

untuk turbo generator ,

$$x_2 + \dot{x}_2 T_T = K_T x_3$$

atau  $\dot{x}_2 = -\frac{x_2}{T_T} + \frac{K_T}{T_T} x_3$

untuk kecepatan governor;

$$x_3 + \dot{x}_3 T_G = K_G \left( -\frac{1}{R} x_1 + u \right)$$

atau  $\dot{x}_3 = -\frac{K_G}{RT_G} x_1 - \frac{1}{T_G} x_3 + \frac{K_G}{T_G} u$

berdasarkan bentuk umum persamaan state:

$$\dot{X} = AX + BU + FW$$

dengan :

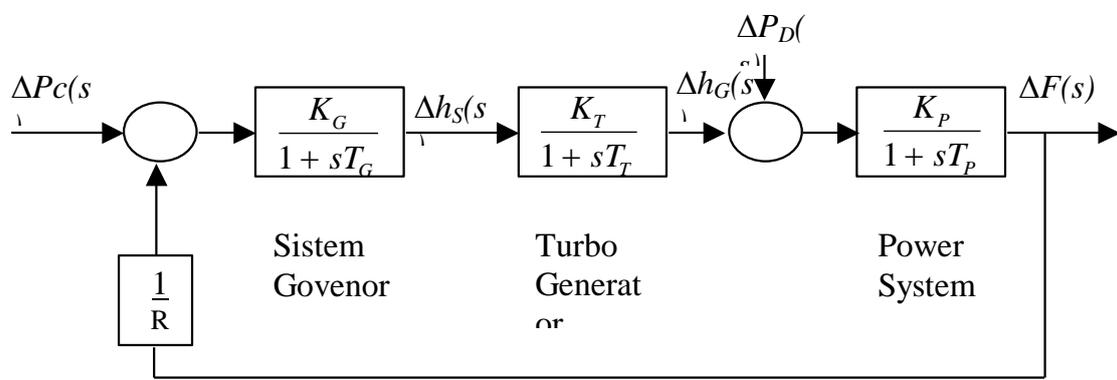
- $X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  : variabel state
- $U = u$  : vektor input (vektor beda)
- $W = \Delta P_D$  : vektor gangguan

Sedangkan bentuk persamaan input matrik A, B dan F adalah :

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_P} & \frac{K_P}{T_P} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_T} & \frac{K_T}{T_T} \\ -\frac{K_G}{RT_G} & 0 & \frac{K_G}{T_G} \end{pmatrix} ; \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_G}{T_G} \end{pmatrix} \text{ Dan } F = \begin{pmatrix} \frac{K_P}{T_P} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(21)$$

Persamaan output :  
 $Y = c X \dots\dots\dots(22)$   
 $C = [1 \ 0 \ 0]$

Nilai C diambil dari [1 0 0] yang merupakan perubahan frekuensi (x<sub>1</sub>) karena perubahan beban.



Gambar 7. Blok diagram dari sistem pengatur frekuensi PLTU

**3. Metodologi**

**3.1. Teori Kontrol Optimal**

Secara umum suatu sistem pengendali putaran turbin (frekuensi generator) dapat dibagi menjadi dua unsur utama :

- a. Unsur yang dikendalikan, yaitu putaran turbin.
- b. Unsur pengendali, yaitu meliputi pengeindraan informasi (sensor), pengolahan informasi dan pemberi perintah (aktuator).

Adapun model persamaan dinamik unsur yang dikendalikan dapat ditulis dalam bentuk persamaan state :

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t) \rightarrow \text{dengan, } x(0) = x(t_0)$$

$$y(t) = Cx(t) \dots\dots\dots(23)$$

Jika peralatan kendali dianggap sempurna, maka diagram blok persamaan (23) dapat digambarkan seperti gambar 8, dengan u adalah sinyal kontrol, penguat regulator dan y adalah keluaran.

Dengan memberikan umpan balik pengendali optimal yang didefenisikan :

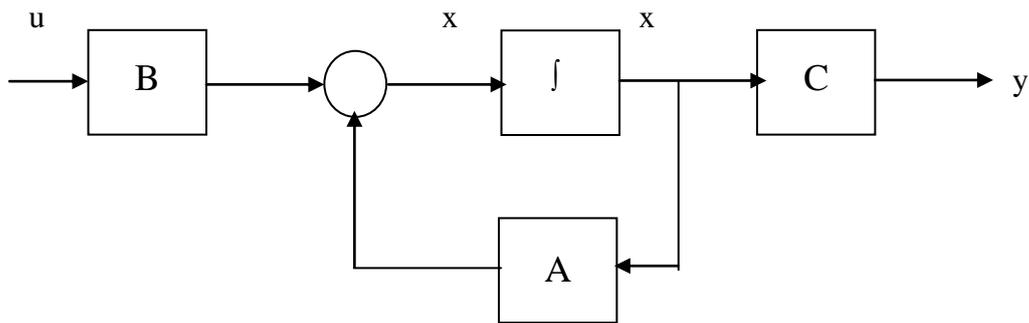
$$u(t) = -K x(t) \dots\dots\dots(23a)$$

dapat dilihat pada gambar. 9 sehingga persamaan (23) menjadi :

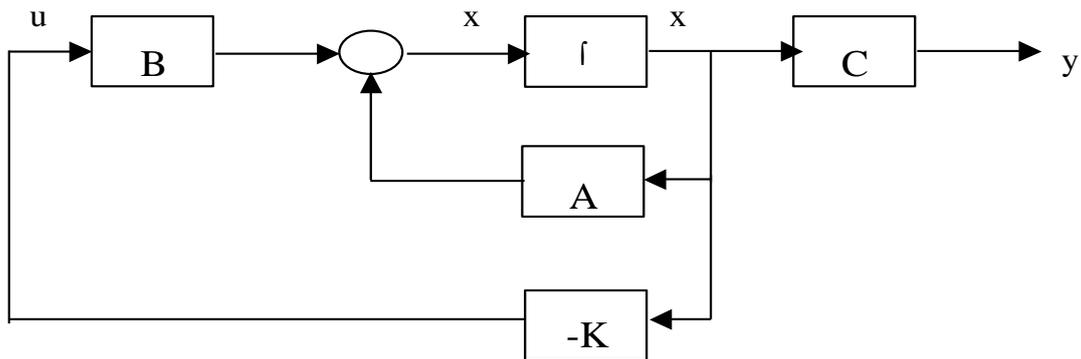
$$x(t) = Ax(t) - BKx = (A - BK)x \dots\dots\dots(24)$$

yang jadi permasalahan disini adalah bagaimana menentukan nilai K untuk memperoleh sistem pengontrolan optimal.

Oleh karena itu diperlukan suatu tolak ukur yang mesti dicapai agar sistem pengontrolan optimal. Tolak ukur ini dikenal dengan Indek Performasi (J).



**Gambar 8.** Diagram blok sistem persamaan 23



**Gambar 9.** Diagram blok sistem dengan umpan balik

Indek performansi dapat dinyatakan dalam bentuk :

1. Integral

$$J = \int_{t_0}^{t_a} e(t) dt$$

2. Integral Square Error (ISE)

$$J = \int_{t_0}^{t_a} e(t)^2 dt$$

3. Intergral Absolute Error (IAE)

$$J = \int_{t_0}^{t_a} |e(t)| dt$$

4. Integral Time square Error (ITSE)

$$J = \int_{t_0}^{t_a} t.e(t)^2 dt$$

5. Integral Time Absolute Error (ITAR)

$$J = \int_{t_0}^{t_a} t|e(t)| dt$$

dalam pembahasan ini dipakai persamaan indek performansi kuadratik, dengan pertimbangan :

- Fungsi kudratik menggambarkan bentuk fisis sebenarnya, karena penyimpangan umum dalam bentuk energi.
- Perhitungan lebih mudah. Indek performansi kuadratik untuk sistem linier adalah :

$$J = \int_0^{\omega} (X^T Q X + U^T r U) dt \dots\dots\dots(25)$$

Dengan Q adalah matrik simetrik nyata definit positif (semi definit positif) dan R adah matrik simetrik nyata definit positif. Suku kedua dari persamaan (25) menyatakan kebutuhan energi dari sinyal kontrol. Matrik Q dan R menentukan kepentingan relatif dari kesalahan dan kebutuhan energi ini. Pada

persoalan ini dianggap bahwa vektor  $u(t)$  tanpa kendala.

Dengan mensubstitusi harga  $U = -Kx$ , ke persamaan (25)

$$J = \int_0^{\omega} (X^T Q X + x^T K, r K^T x) dt$$

atau

$$j = \int_0^{\omega} X^T ( Q + K^T r K^T x) x dt \dots\dots\dots(26)$$

Berdasarkan persoalan optimasi-para meter yang diselesaikan dengan metoda kedua Liapunov, sehingga persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$x^T (Q + K^T r K)x = -\frac{d}{dt} (x^T P x) \dots\dots\dots(27)$$

$$x^T (Q + K^T r K)x = -x^T P x - x^T P x \dots\dots\dots(28)$$

Dengan substitusi persamaan (24) ke dalam persamaan (28) diperoleh :

$$x^T (Q + K^T r K) x = -x^T [(A - BK)^T P x + P(A - BK)] x \dots\dots\dots(29)$$

dengan membandingkan kedua ruas persamaan (29) dan mengingat bahwa persamaan harus berlaku untuk setiap  $x$ , persamaan menjadi

$$(A - BK)^T P x + P(A - BK) = -(Q + K^T r K) \dots\dots\dots(30)$$

dengan Q adalah matrik simetrik nyata definit positif (semi definit positif) dan R adalah matrik simetrik nyata definit positif. Suku kedua dari persamaan (25) menyatakan kebutuhan energi dari sinyal kontrol.

Matrik Q dan R menentukan kepentingan relatif dari kesalahan dan kebutuhan energi ini. Pada persoalan ini dianggap bahwa fektor kontrol  $u(t)$  tanpa kendala.

Berdasarkan metoda kedua Liapunov, jika  $A - BK$  merupakan matrik stabil, maka ada matrik definit positif P yang memenuhi persamaan (30). Selanjutnya dengan mengingat bahwa  $x(0) = 0$ , maka indeks performansi dapat ditulis sebagai berikut :

$$J = X^T(0) P x(0) \dots\dots\dots(31)$$

Langkah disain dapat dinyatakan sebagai:

1. Menentukan matrik P yang memenuhi persamaan (30) sebagai fungsi dari K dengan menggunakan persamaan riccati.
2. Mensubstitusikan matrik P ke dalam persamaan (31) selanjutnya indeks performansi menjadi fungsi dari K.

Persamaan riccati dapat diturunkan dari persamaan indek performansi melalui teorama amilton Jacobi, sehingga diperoleh:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \dots(32)$$

Dalam pendekatan desain sistem kontrol optimal, r dianggap sebagai matriks simetrik nyata definit positif, sehingga dapat lihat pada gambar \*.

### 3.2. Menentukan Matrik Bobot

Indek Performansi yang telah didefinisikan persamaan (25) yaitu :

1. Bentuk kuadratik  $x^T Q x$ , yang menyatakan simpangan variabel keadaan  $x$  dari kondisi mula, disebut sebagai matrik bobot (Q).
2. Suku  $u^T R u$  yang menyatakan besarnya pengendalian, disebut matriks bobot pengendalian r.

Pada umumnya dilakukan pendekatan trial dan error untuk dibut simulasinya, dan pemilihan matrik bobot pengantung kepada keinginan perancang, secara matematis bila matrik bobot untuk pengubahan kondisi didefinisikan sebagai berikut :

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & q_{nn} \end{pmatrix} \dots\dots(33)$$

Besarnya masing masing elemen  $q_{11}$  sampai  $q_{nn}$  merupakan besar bobot relatif toleransi dari masing – masing kondisi. Menentukan matriks bobot R sama dengan membentuk matriks bobot Q.

#### 4. Kesimpulan

Model sistem pengendalian frekuensi pada sistem pembangkit ini dapat digunakan untuk melihat pengaruh perubahan frekuensi terhadap perubahan beban.

#### 5. Daftar Pustaka

1. Fachruddin. M, *Studi Perancangan Kontroller Pengatur Frekuensi Pada PLTU Tunggal dengan Metoda Linier Kuadratik Guassian (LQG)*, S2 ITB, 1997
2. Suwanto Edy, *Pengendalian Swatala Frekuensi – Beban Sistem Tenaga Listrik Area Jamak*, S2 ITB 1995
3. Murty, PSR, *Power System Operation and Control*, Mc Graw-Hill, 1984
4. Probha Kundur, *Power System Stability and Control*, Mc Graw-Hill, 1993