

PENERAPAN METODA LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) UNTUK ANALISA PERALIHAN DEVIASI FREKUENSI SISTEM KENDALI FREKUENSI TENAGA LISTRIK

Heru Dibyo Laksono¹
Anissa Widi Adriana²

ABSTRACT

This journal discusses the application of the method of Linear Quadratic Gaussian (LQG) for the analysis of the transition frequency deviation of frequency control electrical power system. Electrical power frequency control system is a system used to maintain the frequency deviation caused by load changes, especially at the time of the division of burden to be borne by a generator. Parameters were observed in the analysis of this shift is the rise time, the peak time, settling time, the peak value and the value of maximum throughput. Analysis transitional done without and with methods of Linear Quadratic Gaussian (LQG) on the electric power system frequency control type of Non - Reheat, Reheat and Hydraulics based on certain design criteria. Results of analysis showed the power system frequency control Reheat type of performance analysis and Hydraulics have a better transition and meet the design criteria. For the type obtained Reheat time rose by 0.8557 seconds, the peak time of 2.9815 seconds, settling time of 1.6838 seconds, the peak value of 0.0088 and a maximum throughput value of 0.5845%.

Keywords: frequency deviation, transition, Linear Quadratic Gaussian (LQG), non-reheat, reheat, hydraulic

INTISARI

Jurnal ini membahas penerapan metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG) untuk analisa peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Sistem kendali frekuensi tenaga listrik merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menjaga deviasi frekuensi yang ditimbulkan oleh perubahan beban terutama pada saat pembagian beban yang harus dipikul oleh sebuah generator. Paramater yang diamati dalam analisa peralihan ini adalah waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan nilai lewatan maksimum. Analisa peralihan yang dilakukan tanpa dan dengan metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG) pada sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe Non – Reheat, Reheat dan Hidraulik berdasarkan kriteria perancangan tertentu. Hasil analisa memperlihatkan sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe Reheat dan Hidraulik memiliki performansi analisa peralihan yang lebih baik dan memenuhi kriteria perancangan. Untuk tipe Reheat diperoleh waktu naik sebesar 0.8557 detik, waktu puncak sebesar 2.9815 detik, waktu keadaan mantap sebesar 1.6838 detik, nilai puncak sebesar 0.0088 dan nilai lewatan maksimum sebesar 0.5845 %.

Kata Kunci: deviasi frekuensi, peralihan, Linear Quadratic Gaussian (LQG), non-reheat, reheat, hidraulik

¹ Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UNAND

² Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik UNAND

PENDAHULUAN

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menjaga deviasi frekuensi yang ditimbulkan oleh perubahan beban terutama pada saat pembagian beban yang harus dipikul oleh sebuah generator. Kebutuhan beban yang berubah-ubah harus dapat dipenuhi oleh pusat-pusat pembangkit listrik serta daya yang tersedia dalam sistem tenaga listrik harus cukup untuk memenuhi kebutuhan. Permasalahan yang timbul pada operasi sistem tenaga listrik adalah terdapatnya beban sistem, dimana daya yang dibangkitkan atau yang diproduksi harus selalu sama dengan daya yang dikosumsi oleh pemakai tenaga listrik [1]. Perubahan beban yang mendadak ini bisa menyebabkan performansi sistem tenaga listrik menjadi terganggu. Salah satu indikator performansi sistem tenaga listrik adalah tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik. Jika terjadi perubahan beban maka akan mempengaruhi tanggapan peralihan dari deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tersebut.

Usaha untuk memperbaiki tanggapan peralihan deviasi frekuensi pada sistem tenaga listrik akibat perubahan beban sudah dilakukan dengan berbagai metoda diantaranya metoda logika fuzzy dan kendali konvensional dengan pengendali Integral [2]. Jurnal ini membahas tentang analisa performansi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe satu masukan satu keluaran dalam domain waktu untuk tipe *Non-Reheat*. Metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) [3]. Pembahasan pada jurnal ini meliputi analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Non -Reheat*. Dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial

(PID) Optimal [4]. Adapun pembahasan dalam jurnal ini ditekankan pada analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dalam domain waktu untuk tipe *Non-Reheat*. Dengan pengendali Integral (I), pengendali Proporsional Integral (PI) dan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) [5]. Pembahasan pada jurnal ini juga ditekankan pada analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dalam domain waktu untuk tipe *Non – Reheat*. Dengan metoda optimal [6]. Pembahasan pada jurnal ini meliputi analisa peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) dan metoda Linear Quadratic Regulator dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) untuk tipe *Non Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik*.

Selanjutnya pada penelitian ini akan dilakukan analisa peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Non Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik*. Hasil analisa pendahuluan memperlihatkan untuk tipe *Hidraulik* mempunyai waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap dan nilai puncak yang cukup besar sedangkan nilai lewatan maksimum kecil. Untuk tipe *Non Reheat* memperlihatkan waktu keadaan mantap dan lewatan maksimum yang cukup besar. Untuk tipe *Reheat* memperlihatkan waktu naik, waktu keadaan mantap, waktu puncak dan nilai puncak yang cukup besar sedangkan nilai lewatan maksimum cukup kecil. Dengan menggunakan metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG) akan dilakukan perancangan pengendali untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik agar tanggapan peralihan dari deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik lebih baik. Alasan digunakan

metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG) ini dikarenakan metoda ini mempunyai kemampuan untuk meredam derau pada frekuensi tinggi, menghilangkan gangguan dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu [7].

Dengan penelitian ini diharapkan nantinya diperoleh informasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Non – Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik* dengan menggunakan metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG). Agar tercapai hasil penelitian yang efektif dan efisien maka penelitian ini dibatasi sebagai berikut

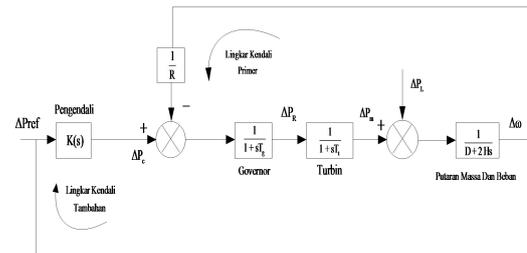
1. Model sistem kendali frekuensi tenaga listrik bersifat linier, tak berubah terhadap waktu dan kontinu.
2. Sistem kendali frekuensi tenaga listrik bersifat satu masukan satu keluaran.
3. Analisa dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab.

PENDEKATAN PEMECAHAN MASALAH

Pada bagian ini dibahas tentang pemodelan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dan metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG). Untuk pemodelan tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik terdiri dari tipe *Non – Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik*.

Pemodelan Tipe–Tipe Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik

Pada bagian ini membahas tentang pemodelan tipe – tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Pemodelan tipe – tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik ini dinyatakan dalam bentuk diagram blok serta direpresentasikan dalam bentuk persamaan keadaan. Untuk diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Non – Reheat* diperlihatkan pada Gambar 1 berikut



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Tipe Non – Reheat [1]

Untuk penjelasan masing–masing blok pada Gambar 1 bisa dilihat pada referensi [1]. Untuk parameter–parameter dari diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Non – Reheat* diperlihatkan pada Tabel 1 berikut [1]

Tabel 1. Parameter–Parameter Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Model *Non-Reheat*

Parameter	Nilai
T_g	0.2000 detik
T_t	0.5000 detik
H	5.0000 detik
R	0.0500 Hz/pu (MW)
D	0.8000 pu MW/Hz

Dengan bantuan perangkat lunak Matlab, nilai – nilai parameter sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Non – Reheat* pada Tabel 1 disubstitusi ke diagram blok pada Gambar 1 dan diperoleh persamaan keadaan (1) dan (2) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

dimana

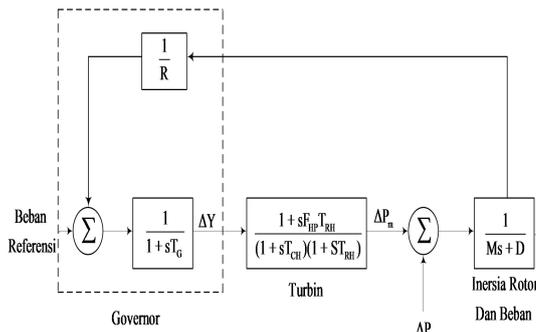
$$A = \begin{bmatrix} -5.0000 & 0.0000 & -100.0000 \\ 2.0000 & -2.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.1000 & -0.0800 \end{bmatrix}$$

(3)

$$B = \begin{bmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ -0.1000 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = [0.0000 \quad 0.0000 \quad 0.0000] \quad (5)$$

Untuk diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Reheat* diperlihatkan pada Gambar 2 berikut



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Tipe *Reheat* [1]

Untuk penjelasan masing – masing blok pada Gambar 2 bisa dilihat pada referensi [1]. Untuk parameter–parameter dari diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Reheat* diperlihatkan pada Tabel 2 berikut [1]

Tabel 2. Parameter – Parameter Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Model *Reheat*

Parameter	Nilai
T_g	0.2000 detik
F_{HP}	0.3000 detik
T_{RH}	7.0000 detik
T_{CH}	0.3000 detik
F_{LP}	0.7000
R	0.0500 Hz/pu (MW)
D	1.0000 pu MW/Hz
M	10.0000 detik

Dengan bantuan perangkat lunak Matlab, nilai – nilai parameter sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Reheat* pada Tabel 2 disubstitusi ke

diagram blok pada Gambar 2 dan diperoleh persamaan keadaan (6) dan (7) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (6)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (7)$$

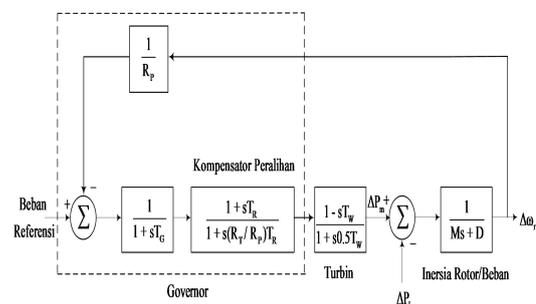
dimana

$$A = \begin{bmatrix} -8.5762 & -4.6762 & -1.7708 & -0.6250 \\ 4.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 2.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = [0.1000 \quad 0.2119 \quad 0.2232 \quad 0.0298] \quad (10)$$

Untuk diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe Hidraulik diperlihatkan pada Gambar 3 berikut



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Tipe Hidraulik [1]

Untuk penjelasan masing – masing blok pada Gambar 3 bisa dilihat pada referensi [1]. Untuk parameter–parameter dari diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe Hidraulik diperlihatkan pada Tabel 3 berikut [1]

Tabel 3. Parameter – Parameter Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Model Hidraulik

Parameter	Nilai
R_p	0.0500
T_{eg}	0.2000 detik
M	6.0000 detik
D	1.0000 pu MW/Hz
T_w	1.0000 detik
R_t	0.3800 detik
T_r	5.0000 detik

Dengan bantuan perangkat lunak Matlab, nilai – nilai parameter sistem kendali frekuensi tenaga listrik model Hidraulik pada Tabel 3 disubstitusikan ke diagram blok pada Gambar 3 dan diperoleh persamaan keadaan (11) dan (12) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (11)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (12)$$

dimana

$$A = \begin{bmatrix} -7.1930 & -1.7423 & -0.6837 & -0.2303 \\ 4.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 2.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.5000 & 0.0000 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C = [0.1667 \quad 0.2928 \quad 0.2122 \quad 0.0110] \quad (15)$$

Metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG)

Metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) merupakan gabungan metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) dengan Filter Kalman [7]. Metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah sebuah teknik kendali modern yang menggunakan pendekatan persamaan keadaan. Sistem kendali frekuensi tenaga listrik yang ditinjau dinyatakan dengan persamaan

keadaan dalam bentuk persamaan (16) dan (17) berikut

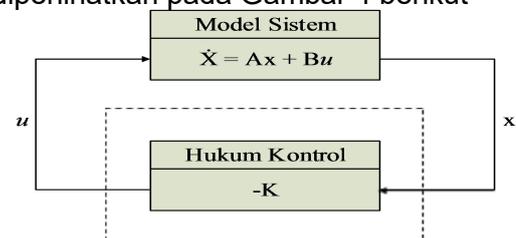
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (16)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (17)$$

di mana akan ditentukan matrik K dari vektor kendali optimal pada persamaan (18) berikut

$$u(t) = -Kx(t) \quad (18)$$

Adapun diagram blok dari metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) diperlihatkan pada Gambar 4 berikut



Gambar 4. Diagram Blok Sistem Umpan Balik [8]

dengan meminimumkan indeks performansi dalam bentuk persamaan (19) dan (20) berikut :

$$J = \int_0^{\infty} (x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)) dt \quad (19)$$

$$J = \int_0^{\infty} (y'(t)Qy(t) + u'(t)Ru(t)) dt \quad (20)$$

di mana Q adalah matrik simetrik nyata definite positif (atau semidefinite positif) dan R adalah matrik simetrik nyata definite positif. Matrik Q dan matrik R menentukan kepentingan relatif dari kesalahan dan kebutuhan energi. Dengan mensubstitusikan persamaan (18) ke dalam persamaan (16) diperoleh persamaan (21) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = (A - BK)x(t) \quad (21)$$

Pada penurunan persamaan berikut, dianggap matrik $(A - BK)$ adalah stabil. Dengan mensubstitusikan (18) ke dalam persamaan (19) diperoleh persamaan (22) s/d (24) berikut

$$J = \int_0^{\infty} (x'(t)Qx(t) + (Kx(t))'RKx(t)) dt \quad (22)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x'(t)Qx(t) + x'(t)K'RKx(t)) dt \quad (23)$$

$$J = \int_0^{\infty} x'(t)(Q + K'RK)x(t) dt \quad (24)$$

Berdasarkan penyelesaian optimasi parameter diperoleh persamaan (25) berikut

$$x'(t)(Q + K'RK)x(t) = -\frac{d}{dt}(x'(t)Px(t)) \quad (25)$$

Berdasarkan persamaan (25) diperoleh persamaan (26) dan (27) berikut

$$x'(t)(Q + K'RK)x(t) = -\dot{x}'(t)Px(t) - x'(t)P\dot{x}(t) \quad (26)$$

$$x'(t)(Q + K'RK)x(t) = -\dot{x}'(t)Px(t) - x'(t)P\dot{x}(t) = x'(t)[(A - BK)'P + P(A - BK)] \quad (27)$$

Dengan membandingkan kedua ruas persamaan (27) dan mengingat bahwa persamaan ini harus berlaku untuk setiap x maka diperoleh persamaan (28) berikut

$$(A - BK)'P + P(A - BK) = -(Q + K'RK) \quad (28)$$

Berdasarkan metode kedua Liapunov jika $(A - BK)$ merupakan matrik stabil, maka ada matrik definite positif P yang memenuhi persamaan (28). Selanjutnya

dengan mengingat bahwa $x(\infty) = 0$ maka indeks performansi dinyatakan pada persamaan (29) berikut

$$J = x'(0)Px(0) \quad (29)$$

Perancangan sistem dengan menggunakan Linear Quadratic Regulator (LQR) belum mampu menganalisa derau yang berasal dari sensor umpan balik. Solusi Linear Quadratic Regulator (LQR) pada dasarnya merupakan tipe *feedback state* kendali yang berarti bahwa semua *state* bisa digunakan untuk umpan balik. Kondisi ini biasanya tidak logis dan beberapa bentuk estimasi *state* dibutuhkan untuk kasus seperti ini. Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan ini digunakan suatu nilai estimasi. Filter Kalman merupakan metode yang banyak digunakan untuk pengestimasi tersebut. Model persamaan keadaan sistem yang dinyatakan persamaan (30) dan (31) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \Gamma\omega \quad (30)$$

$$y(t) = Cx(t) + v \quad (31)$$

di mana

ω : masukan gangguan yang bersifat random

v : gangguan pengukuran yang bersifat random

Diasumsikan masukan gangguan dan gangguan pengukuran ini bersifat derau putih dengan kovarian yang dinyatakan dengan persamaan (32) s/d (36) berikut :

$$E\{\omega(t)\} = 0 \quad (32)$$

$$E\{v(t)\} = 0 \quad (33)$$

$$E\{\omega(t)\omega(t+\tau)\} = W\delta(t-\tau) \quad (34)$$

$$E\{v(t)v(t+\tau)\} = V\delta(t-\tau) \quad (35)$$

$$E\{\omega(t)v(t+\tau)\} = 0 \quad (36)$$

Adapun fungsi yang akan meminimasi kesalahan dinyatakan oleh persamaan (37) berikut

$$J_0 = E\{\tilde{x}(t)\tilde{x}(t)\} \quad (37)$$

dengan

$$\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (38)$$

di mana

$\hat{x}(t)$: estimasi dari $x(t)$

$\tilde{x}(t)$: kesalahan estimasi dari $x(t)$

dengan asumsi

- o Pasangan matrik (A,C) harus bersifat *detectable*
- o Matrik R_0 bersifat definite positif
- o Adanya matrik H_0 sehingga terbentuk matrik $Q = H_0H_0'$
- o Pasangan matrik (A, H_0) harus bersifat *stabilizable*

Berdasarkan asumsi-asumsi diatas didapatkan solusi dari Filter Kalman yang dinyatakan oleh persamaan (39) dan (40) berikut

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y - C\hat{x}) \quad (39)$$

$$L = PC'R_0^{-1} \quad (40)$$

dengan P adalah salusi dari persamaan riccati.

Metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) dianggap sebagai metoda kendali kokoh karena noise dinyatakan dalam *state* dan persamaan keluaran secara eksplisit. Metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) ini diturunkan berdasarkan

persamaan keadaan dari *plant* yang dinyatakan dalam bentuk persamaan (41) dan (42) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \quad (41)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (42)$$

Untuk pengendali dinyatakan dalam bentuk persamaan (43) s/d (45) berikut

$$u = -K\hat{x} \quad (43)$$

$$K = R^{-1}B'P \quad (44)$$

$$0 = A'P + PA + Q - PBR^{-1}B'P \quad (45)$$

Untuk observer dinyatakan dalam bentuk persamaan (46) s/d (48) berikut

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (46)$$

$$L = \Sigma C'R_0^{-1} \quad (47)$$

$$0 = A\Sigma + \Sigma A' + Q_0 - \Sigma C'R_0^{-1}C\Sigma \quad (48)$$

Metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) ini mengakibatkan sistem stabil asimptotik lingkaran tertutup. Pengendalian minimum rata-rata fungsi pembebanan pada Linear Quadratic Regulator (LQR) dinyatakan dalam bentuk persamaan (49) berikut

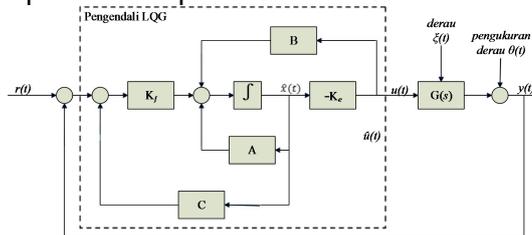
$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} x'Qx + u'Ru dt \quad (49)$$

akan menghasilkan sebuah solusi optimal. Fungsi alih untuk metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) sama dengan kompesator berdasarkan observer yang dinyatakan dalam bentuk (50) berikut

$$H(s) = K(sI - A + BK + LC)^{-1}L \quad (50)$$

Permasalahan utama dari sistem kendali dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) adalah tidak terdapat kepastian margin stabilitas seperti pada sistem kendali dengan metoda Linear Quadratic Regulator (LQR). Dalam kondisi nyata margin ini dapat membahayakan meskipun rendah. Perubahan parameter matrik Q, R

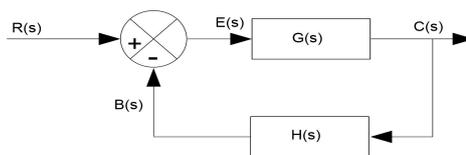
dan intensitas noise akan menghasilkan efek drastis pada properti sistem. Selain itu permasalahan sistem kendali dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) dapat dikelompokkan ke dalam dua bentuk yaitu sistem kendali umpan balik keadaan LQ optimal dan estimasi keadaan dengan banyak disturbansi. Selain itu diagram blok dari sistem kendali dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) diperlihatkan pada Gambar 5 berikut



Gambar 5. Diagram Blok Kendali Linier Quadratic Gaussian (LQG) [8]

Analisa Peralihan

Untuk analisa peralihan, parameter yang diamati adalah waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan lewatan maksimum [9]. Untuk penentuan parameter – parameter tanggapan peralihan ini ditinjau sistem yang diperlihatkan pada Gambar 6 berikut



Gambar 6. Diagram Blok Sistem Kendali [9]

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 6 diperoleh persamaan (51) berikut

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (51)$$

Pada umumnya $G(s)$ dan $H(s)$ diberikan sebagai rasio polinomial

dalam s yang diperlihatkan pada persamaan (52) dan (53) berikut

$$G(s) = \frac{p(s)}{q(s)} \quad (52)$$

$$H(s) = \frac{n(s)}{d(s)} \quad (53)$$

dimana $p(s)$, $q(s)$, $n(s)$ dan $d(s)$ adalah polinomial dalam s . Fungsi alih lingkaran tertutup yang diberikan oleh persamaan (52) selanjutnya dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (54) dan (55) berikut

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{p(s)d(s)}{q(s)d(s) + p(s)n(s)} \quad (54)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad (55)$$

Untuk menentukan tanggapan peralihan sistem pada persamaan (54) atau persamaan (55) terhadap setiap masukan yang diberikan perlu diuraikan persamaan polinomial tersebut atas faktor-faktornya. Setelah persamaan polinomial diuraikan atas faktor-faktornya maka persamaan (54) atau (55) dapat ditulis dalam bentuk persamaan (56) berikut

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k(s + z_1)(s + z_2) \dots (s + z_m)}{(s + p_1)(s + p_2) \dots (s + p_n)} \quad (56)$$

Selanjutnya akan diuji perilaku tanggapan sistem ini terhadap masukan undak satuan. Diasumsikan bahwa pole-pole lingkaran tertutup berbeda satu sama lain. Untuk masukan undak satuan persamaan (56) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (57) berikut

$$C(s) = \frac{a}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{s + p_i} \quad (57)$$

dimana a_i adalah residu dari pole di $s = -p_i$. Jika semua pole lingkaran tertutup terletak disebelah kiri sumbu khayal bidang s maka besar relatif dari residu menentukan kepentingan relatif dari komponen-komponen $C(s)$ dalam bentuk uraian tersebut. Jika ada suatu zero lingkaran tertutup mempunyai harga yang hampir sama dengan suatu pole lingkaran tertutup maka residu pada pole ini adalah kecil dan koefisien suku tanggapan peralihan yang berkaitan dengan pole ini menjadi kecil. Sepasang pole dan zero yang letaknya berdekatan secara efektif akan saling menghilangkan. Jika suatu pole terletak sangat jauh dari titik asal maka residu pada pole ini mungkin kecil. Tanggapan peralihan yang ditimbulkan oleh pole yang jauh ini adalah kecil dan berlangsung dalam waktu yang singkat. Suku-suku $C(s)$ dalam bentuk uraian yang mempunyai residu sangat kecil memberikan kontribusi yang kecil pada tanggapan peralihan sehingga suku-suku ini dapat diabaikan. Jika ini dilakukan maka sistem orde tinggi dapat didekati dengan sistem berorde rendah. Pole-pole dari $C(s)$ terdiri dari pole-pole nyata dan pasangan-pasangan pole konjugasi kompleks. Sepasang pole konjugasi kompleks menghasilkan bentuk orde kedua dalam s . Bentuk uraian faktor dari persamaan karakteristik orde tinggi terdiri dari bentuk orde pertama dan orde kedua diperlihatkan pada persamaan (58) berikut

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K \prod_{i=1}^m (s + z_i)}{s \prod_{j=1}^q (s + p_j) \prod_{k=1}^r (s^2 + 2\zeta_k \omega_k s + \omega_k^2)} \quad (58)$$

Dimana $q + 2r = n$. Jika pole-pole lingkaran tertutup mempunyai harga yang berbeda-beda satu sama lain maka persamaan (59) dapat

diuraikan menjadi pecahan parsial yang dinyatakan dalam bentuk persamaan (59) berikut

$$C(s) = \frac{a}{s} + \sum_{j=1}^q \frac{a_j}{s + p_j} + \sum_{k=1}^r \frac{b_k (s + \zeta_k \omega_k) + c_k \omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2}}{s^2 + 2\zeta_k \omega_k s + \omega_k^2} \quad (59)$$

Berdasarkan persamaan (59) dapat dilihat bahwa tanggapan sistem orde tinggi tersusun dari beberapa bentuk yang melibatkan fungsi-fungsi sederhana yang dijumpai pada tanggapan sistem orde pertama dan kedua. Selanjutnya tanggapan sistem terhadap undak satuan $c(t)$ didapatkan dengan menggunakan transformasi Laplace balik dari $C(s)$ dalam bentuk persamaan (60) berikut

$$c(t) = a + \sum_{j=1}^q a_j e^{-p_j t} + \sum_{k=1}^r b_k e^{-\zeta_k \omega_k t} \cos \omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} t + \sum_{k=1}^r c_k e^{-\zeta_k \omega_k t} \sin \omega_k \sqrt{1 - \zeta_k^2} t \quad (60)$$

untuk $t \geq 0$. Jika semua pole-pole lingkaran tertutup berada disebelah kiri sumbu khayal bidang s maka suku-suku eksponensial dan suku-suku eksponensial teredam pada persamaan (61) mendekati nol dengan membesarnya waktu t . Selanjutnya keluaran keadaan mantapnya adalah $c(\infty) = a$.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pemodelan matematis sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Model sistem kendali frekuensi tenaga listrik yang dibahas model sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Non – Reheat, Reheat* dan Hidraulik. Dalam pemodelan matematis sistem kendali frekuensi tenaga listrik ini yang dibahas meliputi pemodelan turbin, pemodelan governor, pemodelan beban dan pemodelan generator. Selain itu pemodelan matematis sistem kendali frekuensi tenaga listrik ini dilakukan dengan menggunakan persamaan linear diferensial dan

transformasi Laplace. Hasil pemodelan masing – masing komponen ini berupa fungsi alih orde satu. Fungsi alih dari masing-masing komponen ini kemudian digabungkan dan diperoleh fungsi alih sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Fungsi alih sistem kendali frekuensi tenaga listrik ini kemudian diubah menjadi persamaan keadaan dengan bantuan perangkat lunak Matlab. Untuk persamaan keadaan sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Non – Reheat* diperlihatkan pada persamaan (1) s/d (5), persamaan keadaan sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Reheat* diperlihatkan pada persamaan (6) s/d (10) dan persamaan keadaan sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe Hidraulik diperlihatkan pada persamaan (11) s/d (15). Adapun keluaran dari sistem kendali frekuensi tenaga listrik adalah deviasi frekuensi dan masukannya adalah perubahan beban. Selanjutnya dilakukan analisa peralihan dari tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Analisa peralihan dilakukan untuk semua tipe *Non – Reheat*, *Reheat* dan Hidraulik dengan menggunakan persamaan keadaan yang dinyatakan oleh persamaan (1) s/d (15). Informasi yang diperoleh dari analisa peralihan ini adalah waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan lewatan maksimum. Berdasarkan hasil analisa peralihan ini kemudian ditentukan kriteria perancangan pengendali dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG). Adapun kriteria perancangan pengendali ini meliputi waktu naik kurang dari 1.0000 detik, waktu keadaan mantap kurang dari 5.0000 detik, waktu puncak kurang dari 3.0000 detik dan lewatan maksimum kurang dari 20.0000%.

Selanjutnya dilakukan perancangan pengendali untuk

sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan menggunakan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG). Untuk metoda Linier Quadratic Gaussian ini merupakan gabungan dari metoda Linier Quadratic Regulator (LQR) dan metoda Filter Kalman. Prosedur perancangan pengendali dengan menggunakan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) ini diperlihatkan pada persamaan (16) s/d (50) dengan menggunakan persamaan keadaan dari masing – masing tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Perancangan pengendali ini dilakukan untuk ketiga tipe dari sistem kendali frekuensi tenaga listrik secara terpisah dan hasil perancangan pengendali berupa persamaan keadaan pengendali. Persamaan keadaan pengendali untuk masing – masing tipe ini kemudian digabungkan dengan masing – masing persamaan keadaan sehingga diperoleh persamaan keadaan baru untuk masing – masing tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Selanjutnya dilakukan analisa peralihan dari tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG). Informasi yang diperoleh dari analisa peralihan sama dengan informasi analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tanpa metoda metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian dibahas tentang analisa peralihan dari tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tanpa dan dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG). Informasi analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Non – Reheat* diperlihatkan pada Tabel 4 berikut

Tabel 4. Informasi Analisa Peralihan Untuk Tipe *Non – Reheat*

Parameter	Nilai
Waktu Naik	0.4135 detik
Waktu Keadaan mantap	6.8143 detik
Waktu Puncak	1.2345 detik
Lewatan Maksimum	54.7868 %
Nilai Puncak	1.2345

Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Non – Reheat* diperlihatkan pada Gambar 7 berikut



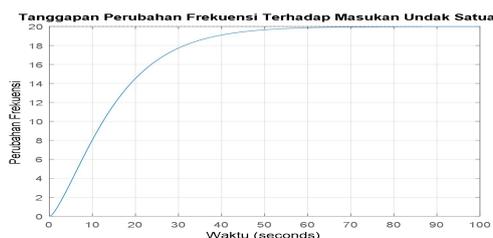
Gambar 7. Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Untuk Tipe *Non – Reheat*

Hasil analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Reheat* diperlihatkan pada Tabel 5 berikut

Tabel 5. Informasi Analisa Peralihan Untuk Tipe *Reheat*

Parameter	Nilai
Waktu Naik	28.2268 detik
Waktu Keadaan mantap	48.4841 detik
Waktu Puncak	110.0636 detik
Lewatan Maksimum	0.0000 %
Nilai Puncak	19.9991

Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Reheat* diperlihatkan pada Gambar 8 berikut



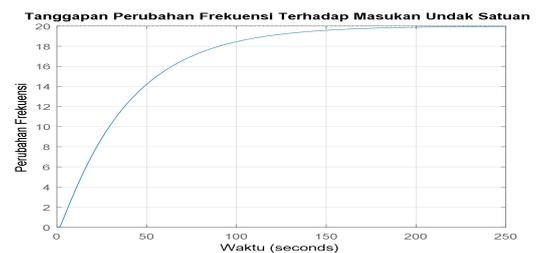
Gambar 8. Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Untuk Tipe *Reheat*

Hasil analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe Hidraulik diperlihatkan pada Tabel 6 berikut

Tabel 6. Informasi Analisa Peralihan Untuk Tipe *Reheat*

Parameter	Nilai
Waktu Naik	84.1075 detik
Waktu Keadaan mantap	151.5269 detik
Waktu Puncak	278.2444 detik
Lewatan Maksimum	0.0000 %
Nilai Puncak	19.9858

Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe Hidraulik diperlihatkan pada Gambar 9 berikut



Gambar 9. Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Untuk Tipe Hidraulik

Selanjutnya dilakukan perancangan pengendali dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) untuk ketiga tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Hasil dari perancangan diperolehnya matrik keadaan pengendali. Adapun persamaan keadaan pengendali untuk tipe *Non – Reheat*, *Reheat* dan Hidraulik diperlihatkan pada persamaan (61) dan (62) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (61)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (62)$$

Untuk elemen A, B, C dan D untuk tipe *Non – Reheat* dinyatakan dalam

bentuk persamaan (63) s/d (66) berikut

$$A = \begin{bmatrix} -5.0000 & 0.0000 & -92.4000 \\ 2.0000 & -2.0000 & -92.4000 \\ 9.8360 \times 10^8 & 5.0830 \times 10^{-5} & -4.4350 \times 10^5 \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$B = \begin{bmatrix} -7.6040 \\ 32.5400 \\ 2.4720 \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$C = [9.8360 \times 10^9 \quad -0.9995 \quad -4.4350 \times 10^6] \quad (65)$$

$$D = 0.0000 \quad (66)$$

serta matrik W dan matrik V dinyatakan dalam bentuk persamaan (67) dan (68) berikut

$$W = \begin{bmatrix} 9.6750 \times 10^{12} & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.2000 \times 10^{-4} & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \quad (68)$$

Untuk elemen A, B, C dan D untuk tipe *Reheat* dinyatakan dalam bentuk persamaan (69) s/d (72) berikut

$$A = \begin{bmatrix} -8.6900 & -4.6830 & 2.3500 & 6.2230 \\ 4.0000 & 0.0000 & -19.4500 & -37.0500 \\ 0.0000 & 1.0000 & -6.2310 & -11.8700 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0061 & -0.4646 \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$B = \begin{bmatrix} -2.7140 \\ 15.5600 \\ 4.9850 \\ 0.1951 \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$C = [0.0571 \quad 0.0033 \quad 0.0002 \quad 2.6250 \times 10^0] \quad (71)$$

$$D = 0.0000 \quad (72)$$

serta matrik W dan matrik V dinyatakan dalam bentuk persamaan (73) dan (74) berikut

$$W = \begin{bmatrix} 0.4800 \times 10^4 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 10^4 \end{bmatrix} \quad (73)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.9000 \times 10^{-5} & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0003 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (74)$$

Untuk elemen A, B, C dan D untuk tipe Hidraulik dinyatakan dalam bentuk persamaan (75) s/d (78) berikut

$$A = \begin{bmatrix} -8.4490 & -19.5500 & 12.8300 & 26.5600 \\ 4.0000 & 2.6510 & -2.1210 & -4.2420 \\ 0.0000 & 15.4200 & -11.5400 & -23.0800 \\ 0.0000 & 1.9260 & -1.4160 & -3.0820 \end{bmatrix} \quad (75)$$

$$B = \begin{bmatrix} -30.3800 \\ 4.8360 \\ 26.3100 \\ 3.5130 \end{bmatrix} \quad (76)$$

$$C = [0.6278 \quad 0.0275 \quad 0.0009 \quad 7.1250 \times 10^9] \quad (77)$$

$$D = 0.0000 \quad (78)$$

serta matrik W dan matrik V dinyatakan dalam bentuk persamaan (79) dan (80) berikut

$$W = \begin{bmatrix} 0.4800 \times 10^4 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 10^4 \end{bmatrix} \quad (79)$$

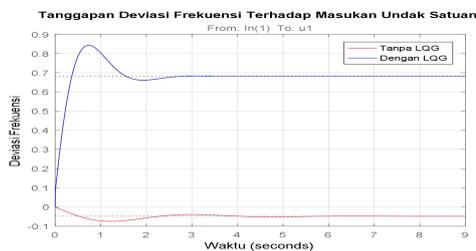
$$V = \begin{bmatrix} 0.9000 \times 10^{-5} & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0003 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (80)$$

Selanjutnya dilakukan analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG). Adapun informasi analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Non – Reheat* dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) diperlihatkan pada Tabel 7 berikut

Tabel 7. Informasi Analisa Peralihan Untuk Tipe *Non – Reheat*

Parameter	Nilai
Waktu Naik	0.3025 detik
Waktu Keadaan mantap	2.2425 detik
Waktu Puncak	0.7363 detik
Lewatan Maksimum	23.7727 %
Nilai Puncak	0.8431

Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Non – Reheat* dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) diperlihatkan pada Gambar 10 berikut



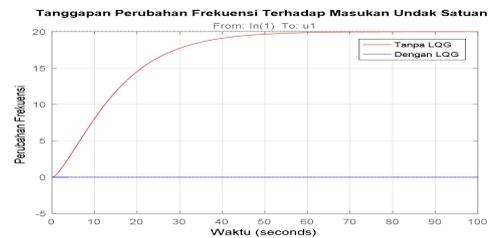
Gambar 10. Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Untuk Tipe *Non-Reheat*

Untuk informasi analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Reheat* dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) diperlihatkan pada Tabel 8 berikut

Tabel 8. Informasi Analisa Peralihan Untuk Tipe *Reheat*

Parameter	Nilai
Waktu Naik	0.8557 detik
Waktu Keadaan mantap	1.6838 detik
Waktu Puncak	2.9815 detik
Lewatan Maksimum	0.5845 %
Nilai Puncak	0.0088

Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe *Reheat* dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) diperlihatkan pada Gambar 11 berikut



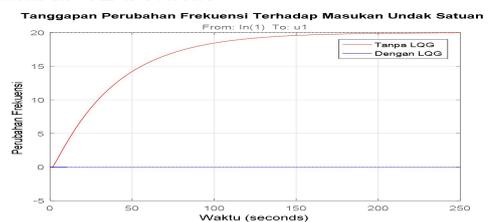
Gambar 11. Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Untuk Tipe *Reheat*

Untuk informasi analisa peralihan tanggapan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe Hidraulik dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) diperlihatkan pada Tabel 9 berikut

Tabel 9. Informasi Analisa Peralihan Untuk Tipe Hidraulik

Parameter	Nilai
Waktu Naik	0.9439 detik
Waktu Keadaan mantap	3.7619 detik
Waktu Puncak	3.2916 detik
Lewatan Maksimum	4.2009 %
Nilai Puncak	0.0468

Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk tipe Hidraulik dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) diperlihatkan pada Gambar 12 berikut



Gambar 12. Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Untuk Tipe Hidraulik

Berdasarkan kriteria perancangan terlihat bahwa tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Non – Reheat* dengan metoda Linier

Quadratic Gaussian (LQG) belum memenuhi kriteria perancangan terutama untuk lewatan maksimum yang masih besar dari 20.0000 % sedangkan untuk waktu naik, waktu keadaan mantap dan waktu puncak sudah memenuhi kriteria perancangan. Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Reheat* dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) sudah memenuhi kriteria perancangan dimana waktu naik kurang dari 1.0000 detik, waktu keadaan mantap kurang dari 5.0000 detik, waktu puncak kurang dari 3.0000 detik dan lewatan maksimum kurang dari 20.0000%. Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe Hidraulik dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) belum memenuhi kriteria perancangan terutama untuk waktu puncak masih besar dari 3.0000 detik.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Reheat* dengan metoda Linier Quadratic Gaussian (LQG) memiliki performansi tanggapan peralihan yang lebih baik dan memenuhi kriteria perancangan sedangkan tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tipe *Non – Reheat* dan Hidraulik belum memenuhi kriteria perancangan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bevrani, Hassan. 2009, *Robust Power System Frequency Control*, New York : Springer
- [2] Shah, N. N., Chafekar, A. D., Mehta, D. N. & Suthar , A. R., 2012, *Automatic Load*

Frequency Control of Two Area Power System With Conventional dan Fuzzy Logic Control. IJRET, 1(3), pp. 343 – 347.

- [3] Parmar, K. S., S. M. & D. K., 2012, *Improvement of Dynamic Performance of LFC of The Two Area Power System : An Analysis Using Matlab*, International Journal of Computer Applications, 40(10), pp. 28 – 32.
- [4] Shanmugasundaram, V., A. R. & T. J., 2012, *Load Frequency Control Using Optimal PID Controller For Non-Reheat Thermal Power System With Tcps Uni*, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) , 1(5), pp. 414 – 417.
- [5] Ikhe, A. & A. K., 2013, *Load Frequency Control For Interconnecte Power System Using Different Controllers*, International Journal of Advances in Engineering & Technology, pp. 85 – 89.
- [6] Laksono, H.D, M. Fajra, Danas, A & Diafridho, 2016, *Analisa Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Dengan Metoda Kendali Optimal*, Jurnal Rekayasa Elektrika, 1(12).
- [7] Skogestad, S. & Postlethwaite, I, 1996. *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*. New York : McGraw Hill.
- [8] Xue, Dingyu, Chen and D.P Atherton, 2007, *Linear Feedback Control : Analysis and Design With Matlab*, Philadelphia : SIAM.
- [9] Laksono, H.D, 2014, *Sistem Kendali*, Jogjakarta: Graha Ilmu.