

---

# **Jurnal** ***Rekayasa Elektrika***

---

VOLUME 12 NOMOR 1

APRIL 2016

---

**Analisa Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem Kendali Frekuensi Tenaga  
Listrik dengan Metoda Kendali Optimal**

1-9

*Heru Dibyo Laksono*

---

JRE	Vol. 12	No. 1	Hal 1-40	Banda Aceh, April 2016	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	----------	---------------------------	--------------------------------------

# Analisa Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik dengan Metoda Kendali Optimal

Heru Dibyo Laksono<sup>1</sup>, M. Fajra<sup>1</sup>, Aidil Danas<sup>2</sup>, dan Wahyu Diafridho A<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas  
Kampus Limau Manis, Padang 25163

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Eka Sakti  
Jl. Veteran Dalam No.26 B, Padang 25115

<sup>3</sup>PT. PLN (Persero) Area Padang Sidempuan Sumatera Utara  
Jln. Sisingamangaraja (Jl SM Raja KM 4 No 11), Padang Sidempuan Timur 22721  
e-mail: heru\_dl@ft.unand.ac.id

**Abstrak**—Paper ini membahas tentang analisa peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda kendali Optimal. Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik merupakan salah satu indikator performansi sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan. Gangguan – gangguan ini mengakibatkan perubahan nilai parameter yang mengakibatkan sistem kendali frekuensi tenaga listrik akan terganggu dan berakibat sistem tidak mampu lagi bekerja secara normal setelah mengalami gangguan. Salah satu gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik adalah perubahan beban secara mendadak. Perubahan beban secara mendadak menyebabkan terjadinya penurunan maupun peningkatan nilai frekuensi disekitar titik operasinya. Dengan menggunakan metoda kendali optimal yang terdiri dari metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) dilakukan analisa peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik*. Hasil yang diperoleh untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR), sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat* memiliki nilai-nilai parameter peralihan yang paling kecil dibandingkan dengan nilai-nilai parameter peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Reheat* dan *Hidraulik*. Adapun nilai – nilai parameter peralihan untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat* diantaranya waktu naik sebesar 0,1266 detik, waktu keadaan mantap sebesar 0,3451 detik, waktu puncak sebesar 0,3451 detik, lewatan maksimum sebesar 3,1972 % dan nilai puncak sebesar 0,0069. Untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Hidraulik* memiliki nilai-nilai parameter peralihan yang paling kecil dibandingkan dengan nilai – nilai parameter peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat* dan *Reheat*. Adapun nilai – nilai parameter peralihan untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Hidraulik* diantaranya waktu naik sebesar 0,0451 detik, waktu keadaan mantap sebesar 0,0731 detik, waktu puncak sebesar 0,1300 detik, lewatan maksimum sebesar 0,0531 % dan nilai puncak sebesar 0,0032.

**Kata kunci:** *Linear Quadratic Regulator (LQR)*, *Linear Quadratic Regulator dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy)*, *Non-Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik*

**Abstract**—This journal discusses about the analysis of frequency transition deviation of power frequency control system with Optimal control methods. The response of frequency transition deviation of power frequency control system is one of indicator in the performance of the power system during disturbances. These disturbances cause changes in the parameters value which result in power frequency control system will be disrupted and resulted system is not able to work normally after the disturbances. One of disturbance often occurs in power system is a sudden load changes. Sudden load changes cause of decreasing or increasing in the value of frequencies around the center of its operations. By using the optimal control method consists of *Linear Quadratic Regulator* (LQR) method and *Linear Quadratic Regulator* with weights function on the output (LQRy) are analyzed frequency transition deviation of power frequency control system type of *Non-Reheat*, *Reheat* and *Hydraulic*. The results obtained for the *Linear Quadratic Regulator* (LQR) method, the power frequency control system type of *Non-Reheat* has the smallest values of the transition parameter at the values of the transition parameter power frequency control system type of *Reheat* and *Hydraulic*. The values of the transition parameter power frequency control system type of *Non-Reheat* are 0.1266 seconds in time rise, 0.3451 seconds in settling time, 0.3451 seconds in peak time, 3.1972% in maximum overshoot and 0.0069 in peak value. For the *Linear Quadratic Regulator* method with weights function on the output (LQRy) power frequency control system type of *Hydraulic* has the smallest values of the transition parameter compared with the values of the transition parameter power frequency control system type of *Non-Reheat* and *Reheat*. The values of the transition parameter power frequency control system type of *Hydraulic* are 0.0451 seconds in time rise, 0.0731 seconds in settling time, 0.1300 seconds in peak time, 0.0531% in maximum overshoot and 0.0032 in peak value.

**Keywords:** *Linear Quadratic Regulator (LQR)*, *Linear Quadratic Regulator with weights function on the output (LQRy)*, *Non-Reheat*, *Reheat* and *Hydraulic*

## I. PENDAHULUAN

Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik merupakan salah satu indikator performansi sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan. Usaha untuk memperbaiki tanggapan deviasi frekuensi pada sistem tenaga listrik akibat perubahan beban sudah dilakukan dengan berbagai metoda diantaranya metoda logika dan kendali konvensional dengan pengendali Integral [1]. Penelitian 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) [2]. Pembahasan pada analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk Tipe *Non-Reheat*. Dengan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) Optimal [3]. 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) [4]. Pembahasan pada jurnal ini juga ditekankan pada analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik dalam domain waktu untuk Tipe *Non-Reheat*. Berdasarkan kajian tersebut maka dilakukan analisa peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik untuk Tipe *Non-Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik* dengan menggunakan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy). Adapun alasan digunakan kedua metoda ini dikarenakan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) ini menjamin sistem kendali frekuensi tenaga listrik bersifat stabil.

Dengan penelitian ini diharapkan nantinya diperoleh informasi tanggapan peralihan deviasi frekuensi untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik*. 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.

## II. STUDI PUSTAKA

Pada bagian ini dibahas tentang pemodelan sistem kendali frekuensi tenaga listrik, metoda kendali optimal yang terdiri dari metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) dan analisa peralihan. Untuk pemodelan sistem kendali frekuensi tenaga listrik yang digunakan terdiri dari model sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat*, *Reheat* dan *Hidraulik*. Untuk diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik

Tipe *Non-Reheat* diperlihatkan pada Gambar 1.

Untuk penjelasan masing-masing blok pada Gambar 1. bisa dilihat pada referensi [5]. Untuk parameter-parameter dari diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Non-Reheat* diperlihatkan pada Tabel 1.

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 1 dan Persamaan 2 berikut,

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

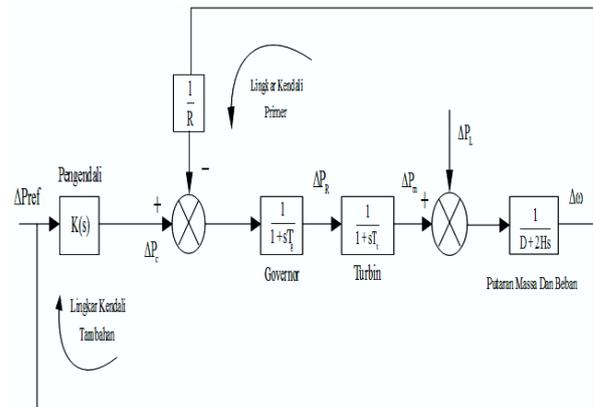
$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

dimana,

$$A = \begin{bmatrix} -5.0000 & 0.0000 & -100.0000 \\ 2.0000 & -2.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.1000 & -0.0800 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

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



Gambar 1. Diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik Model *Non-Reheat* [5]

Tabel 1. Parameter-parameter sistem kendali frekuensi tenaga listrik Model *Non-Reheat* [5]

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

Untuk diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Reheat* diperlihatkan pada Gambar 2.

Untuk penjelasan masing – masing blok pada Gambar 2. bisa dilihat pada referensi [6]. Untuk parameter–parameter dari diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Reheat* diperlihatkan pada Tabel 2.

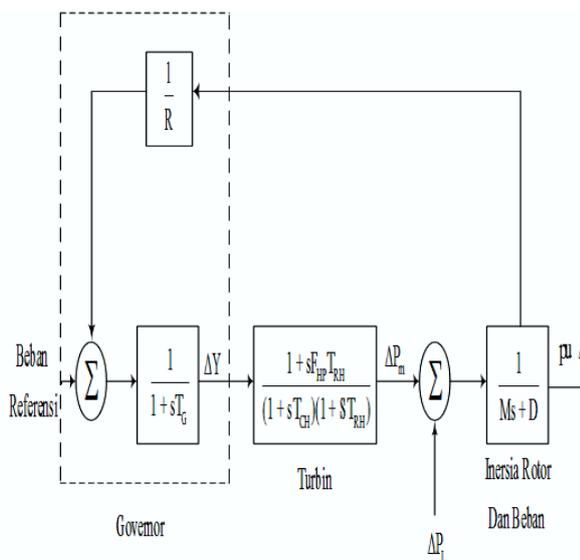
Dengan bantuan perangkat lunak Matlab, nilai – nilai parameter sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Reheat* pada Tabel 2 disubstitusi ke diagram blok pada Gambar 2 dan diperoleh Persamaan 6 dan Persamaan 7 berikut,

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

$$y(t) = Cx(t) \tag{7}$$

dimana,

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



Gambar 2. Diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik Model *Reheat* [6]

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

$$B = \begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{bmatrix} \tag{9}$$

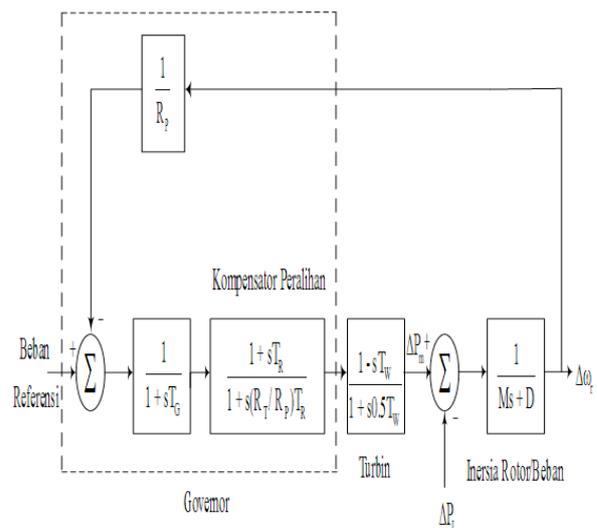
$$C = [0.1000 \quad 0.2119 \quad 0.2232 \quad 0.0298] \tag{10}$$

Untuk diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Hidraulik* diperlihatkan pada Gambar 3. Untuk penjelasan masing–masing blok pada Gambar 3, bisa dilihat pada referensi [6]. Untuk parameter–parameter dari diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Hidraulik* diperlihatkan pada Tabel 3.

Dengan bantuan perangkat lunak Matlab, nilai–nilai parameter sistem kendali frekuensi tenaga listrik model *Reheat* pada Tabel 3 disubstitusi ke diagram blok pada Gambar 3 dan diperoleh Persamaan 11 dan 12 berikut,

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

$$y(t) = Cx(t) \tag{12}$$



Gambar 3. Diagram blok sistem kendali frekuensi tenaga listrik Model *Hidraulik* [6]

Tabel 3. Parameter–parameter sistem kendali frekuensi tenaga listrik Model *Hidraulik* [6]

Parameter	Nilai
$R_p$	0,0500
$T_g$	0,2000 detik
$M$	6,0000 detik
$D$	1,0000 pu MW/Hz
$T_w$	1,0000 detik
$R_l$	0,3800 detik
$T_r$	5,0000 detik

dimana,

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

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

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

Menurut [7], Metoda Linier Quadratic Regulator (LQR) dan metoda Linear Quadratic dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) adalah sebuah teknik kendali modern yang menggunakan pendekatan persamaan keadaan Sistem kendali yang akan ditinjau dinyatakan dengan Persamaan 16

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

dimana akan ditentukan matrik K dari vektor kendali dalam bentuk Persamaan 17

$$u(t) = -Kx(t), \quad (17)$$

dengan meminimumkan indeks performansi yang dinyatakan dalam bentuk Persamaan 18 untuk metoda *Linier Quadratic Regulator* (LQR),

$$J = \int_0^{\infty} (x'(t)Qx(t) + u'(t)Ru(t)) dt, \quad (18)$$

persamaan (19) untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy)

$$J = \int_0^{\infty} (y^T(t)Qy(t) + u^T(t)Ru(t) + 2y^T(t)Nu(t)) dt, \quad (19)$$

dimana  $Q$  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. Selain itu dianggap bahwa vektor kendali  $u(t)$  tanpa kendala. Dengan mensubstitusikan persamaan 17 ke Persamaan 16 diperoleh Persamaan 20,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = (A - BK)x(t). \quad (20)$$

Pada penurunan persamaan berikut, dianggap matrik adalah stabil. Dengan mensubstitusikan Persaman 20 ke

Persamaan 19 dan diperoleh Persamaan 21 sampai dengan Persamaan 23,

$$J = \int_0^{\infty} (x'(t)Qx(t) + (Kx(t))'RKx(t)) dt, \quad (21)$$

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

$$J = \int_0^{\infty} x'(t)(Q + K'RK)x(t) dt. \quad (23)$$

Berdasarkan penyelesaian persoalan optimasi parameter diperoleh Persamaan 24,

$$x'(t)(Q + K'RK)x(t) = -\frac{d}{dt}(x'(t)Px(t)) \quad (24)$$

Berdasarkan Persamaan 24 diperoleh Persamaan 25 dan 26,

$$x'(t)(Q + K'RK)x(t) = -\dot{x}'(t)Px(t) - x'(t)P\dot{x}(t) \quad (25)$$

$$\begin{aligned} x'(t)(Q + K'RK)x(t) &= -\dot{x}'(t)Px(t) - x'(t)P\dot{x}(t) \\ &= x'(t)[(A - BK)'P + P(A - BK)]x(t) \end{aligned} \quad (26)$$

Dengan membandingkan kedua ruas persamaan (26) dan mengingat bahwa persamaan ini harus berlaku untuk setiap  $x$ , maka diperoleh Persamaan 27,

$$(A - BK)'P + P(A - BK) = -(Q + K'RK) \quad (27)$$

Berdasarkan metoda kedua Lyapunov jika merupakan matrik stabil, maka ada matrik definite positif  $P$  yang memenuhi Persamaan 27. Selanjutnya dengan mengingat bahwa  $x(\infty)=0$  maka indeks performansi untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dinyatakan pada Persamaan 28,

$$J = x'(0)Px(0) \quad (28)$$

hal yang sama dilakukan untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy). Untuk analisa peralihan dilakukan dengan menggunakan tanggapan peralihan dari deviasi frekuensi sistem tenaga listrik. Adapun parameter yang diamati terdiri dari waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, lewatan maksimum dan nilai puncak. Perhitungan parameter-parameter tersebut diturunkan berdasarkan fungsi alih lingkaran tertutup yang dinyatakan dalam bentuk Persamaan 29 berikut [8],

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (29)$$

Berdasarkan persamaan (29) ini diperoleh informasi nilai-nilai dari parameter untuk analisa peralihan dari tanggapan peralihan. Untuk waktu naik yaitu waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari 10 % sampai 90 %, 5 % sampai 95 % atau 0 sampai 100 % dari harga akhirnya. Perhitungan waktu naik ini dinyatakan dalam bentuk Persamaan 30,

$$t_r = \frac{1 + 1.1000\zeta + 1.4000\zeta^2}{\omega_n} \quad (30)$$

Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak lewatan pertama kali. Untuk perhitungan waktu keadaan mantap dinyatakan dalam bentuk Persamaan 31,

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (31)$$

Waktu penetapan adalah waktu yang diperlukan kurva tanggapan untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir biasanya 5 %, 2% atau 0.5 %. Waktu penetapan ini dihitung dengan Persamaan 32, 33 dan 34 untuk kriteria 2% , waktu keadaan mantap dihitung dengan Persamaan 32,

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (32)$$

untuk kriteria 5%, waktu keadaan mantap dihitung dengan Persamaan 33,

$$t_s \approx \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad (33)$$

untuk kriteria 0,5% , waktu keadaan mantap dihitung dengan Persamaan 34,

$$t_s \approx \frac{5}{\zeta\omega_n} \quad (34)$$

Lewatan maksimum adalah harga puncak maksimum dari kurva tanggapan yang diukur dari satu. Jika harga keadaan mantap tanggapan tidak sama dengan satu maka biasa digunakan persentase lewatan maksimum yang dinyatakan dengan Persamaan 35,

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (35)$$

dimana  $\zeta$  adalah rasio redaman dan  $\omega_n$  adalah frekuensi tidak teredam atau frekuensi alami. Untuk penjelasan lebih lanjut bisa dilihat pada referensi [8].

### III. METODE

Bagian ini terdiri dari metodologi penelitian dan kriteria perancangan pengendali.

#### A. Metodologi Penelitian

Penelitian akan dimulai dengan pemodelan matematis komponen-komponen sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Tipe-tipe model sistem kendali frekuensi tenaga listrik yang digunakan terdiri dari Tipe *Non-Reheat* yang diperlihatkan pada Gambar 1, Tipe *Reheat* yang diperlihatkan pada Gambar 2 dan Tipe *Hidraulik* yang diperlihatkan pada Gambar 3. Pemodelan matematis sistem kendali frekuensi tenaga listrik ini dilakukan dengan menggunakan persamaan linear diferensial dan transformasi Laplace. Adapun komponen – komponennya terdiri dari pemodelan generator, pemodelan beban, pemodelan penggerak mula dan pemodelan governor. Hasil dari pemodelan dari masing–masing komponen ini berupa fungsi alih orde satu atau orde dua. Masing–masing komponen ini digabungkan dan diperoleh persamaan keadaan dari sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan deviasi frekuensi sebagai keluaran dan deviasi perubahan beban sebagai masukan. Untuk nilai parameter masing–masing tipe kendali sistem frekuensi tenaga listrik di perlihatkan pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 3. Dengan mensubstitusi nilai masing–masing parameter ke masing–masing tipe maka diperoleh persamaan keadaan. Adapun persamaan keadaan dari masing–masing tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik ini diperlihatkan pada Persamaan 1 sampai dengan 15.

Selanjutnya dilakukan analisa peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Adapun parameter yang diamati dalam analisa peralihan ini terdiri dari waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, lewatan maksimum dan nilai puncak dari tanggapan peralihan deviasi frekuensi terhadap masukan undak satuan. Setelah itu dilanjutkan perancangan pengendali untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik menggunakan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan terlebih dahulu menentukan bobot Q dan bobot R. Penentuan bobot Q dan bobot R ini dilakukan secara coba–coba berdasarkan kriteria perancangan. Adapun hasil yang diperoleh setelah coba–coba bobot Q berbentuk matrik dan bobot R dalam bentuk vektor. Adapun bobot Q dan bobot R untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk Tipe *Non-Reheat* diperlihatkan pada Persamaan 36 dan 37 berikut,

$$Q = \begin{bmatrix} 120.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0100 \\ 0.0000 & 0.0000 & 250000.0000 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$R = 13.7500, \quad (37)$$

untuk bobot  $Q$  dan bobot  $R$  untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk Tipe *Reheat* diperlihatkan pada Persamaan 38 dan 39 berikut,

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0100 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 5.0000 \times 10^{-8} & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 65.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.1550 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$R = 0.6495, \quad (39)$$

Untuk bobot  $Q$  dan bobot  $R$  untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk Tipe *Hidraulik* diperlihatkan pada Persamaan 40 dan 41 berikut,

$$Q = \begin{bmatrix} 59.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.1000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 45.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0990 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$R = 0.4900, \quad (41)$$

selanjutnya dilakukan perancangan pengendali untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk setiap tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik. Perancangan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab. Hasil dari perancangan ini diperolehnya vektor penguatan, solusi persamaan riccati dan nilai eigen lingkaran tertutup sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk setiap tipe sistem kendali frekuensi. Untuk vektor penguatan setiap tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan keadaan masing – masing tipe yang direpresentasikan pada Persamaan 1-15 dan diperoleh persamaan keadaan yang baru untuk setiap tipe dalam bentuk Persamaan 20. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan keadaan yang baru ini dilakukan analisa dan perbandingan tanggapan peralihan untuk deviasi frekuensi pada sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan masukan undak satuan. Adapun parameter yang diamati sama dengan analisa peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR).

Langkah–langkah yang sama dilakukan untuk analisa peralihan deviasi frekuensi pada sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy). Untuk bobot  $Q$  dan bobot  $R$  diperoleh dalam bentuk vektor. Untuk kendali frekuensi sistem tenaga listrik Tipe *Non-Reheat*, bobot  $Q$  dan bobot  $R$  diperlihatkan pada Persamaan 42 dan 43 berikut,

$$Q = 2.5000 \quad (42)$$

$$R = 0.4900, \quad (43)$$

untuk kendali frekuensi sistem tenaga listrik Tipe *Reheat*, bobot  $Q$  dan bobot  $R$  diperlihatkan pada Persamaan 44 dan 45 berikut,

$$Q = 10.0000 \quad (44)$$

$$R = 0.0001, \quad (45)$$

untuk kendali frekuensi sistem tenaga listrik Tipe *Hidraulik*, bobot  $Q$  dan bobot  $R$  diperlihatkan pada Persamaan 46 dan 47 berikut,

$$Q = 10.0000 \quad (46)$$

$$R = 0.0001, \quad (47)$$

matrik bobot  $Q$  dan vektor bobot  $R$  diperlihatkan pada Persamaan 36-47 diperoleh dari coba–coba tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) berdasarkan kriteria perancangan.

## B. Kriteria Perancangan

Agar tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) menghasilkan performansi tanggapan peralihan yang baik maka perlu ditentukan kriteria tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik sebagai berikut

- Waktu naik kurang dari 0,2500 detik
- Waktu keadaan mantap kurang 1,7500 detik
- Waktu puncak kurang dari 1,000 detik
- Lewatan maksimum kurang dari 20,0000 %
- Nilai puncak kurang dari 0,0250.

Kriteria perancangan ini diperoleh berdasarkan hasil analisa tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tanpa metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) dan referensi [8]. Menurut [8], untuk waktu naik, waktu keadaan mantap, waktu puncak dan nilai puncak tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) harus mempunyai nilai yang lebih kecil dari nilai waktu naik, waktu keadaan mantap, waktu puncak dan nilai puncak tanpa metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy). Untuk lewatan maksimum tanggapan peralihan deviasi

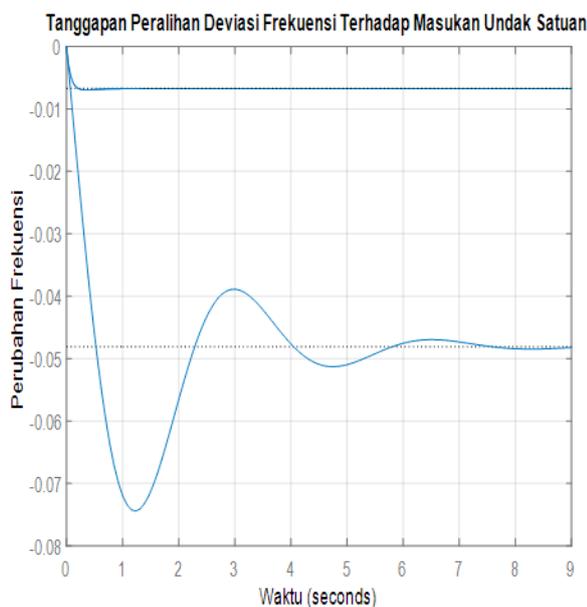
frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) harus kurang dari 20,0000 %.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dibahas analisa peralihan dari deviasi frekuensi sistem kendali frekuensi tenaga listrik tanpa dan dengan metoda kendali optimal. Untuk metoda kendali optimal yang digunakan terdiri dari metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy). Untuk tipe sistem kendali frekuensi yang dibahas meliputi sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat*, Tipe *Reheat* dan Tipe *Hidraulik*. Untuk parameter dari tanggapan peralihan yang diamati meliputi waktu naik, waktu keadaan mantap, waktu puncak, nilai puncak dan lewatan maksimum.

Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) Tipe *Non-Reheat* terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 4.

Untuk parameter tanggapan peralihan deviasi frekuensi



Gambar 4. Tanggapan Peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik Tipe *Non-Reheat*

Tabel 4. Parameter tanggapan peralihan untuk Tipe *Non-Reheat*

Parameter	Tanpa LQR	Dengan LQR
Waktu Naik (detik)	0,4135	0,1266
Waktu Keadaan Mantap (detik)	6,8143	0,5814
Waktu Puncak (detik)	1,2345	0,3451
Lewatan Maksimum (%)	54,7868	3,1972
Nilai Puncak	0,0744	0,0069

sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic* (LQR) Tipe *Non-Reheat* diperlihatkan pada Tabel 4.

Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) Tipe *Reheat* terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 5.

Untuk parameter tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic* (LQR) Tipe *Reheat* diperlihatkan pada Tabel 5.

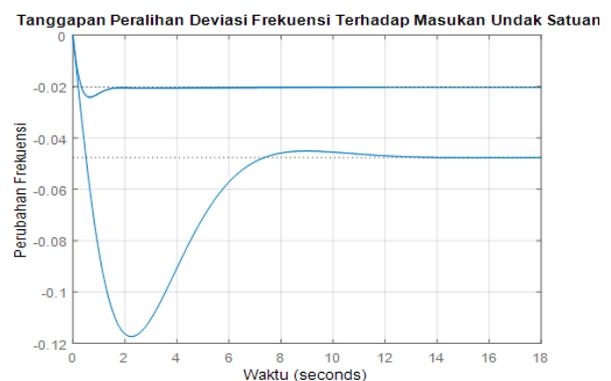
Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) Tipe *Hidraulik* terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 6.

Untuk parameter tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) Tipe *Hidraulik* diperlihatkan pada Tabel 6.

Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) Tipe *Non-Reheat* terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 7.

Untuk parameter tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) Tipe *Non-Reheat* diperlihatkan pada Tabel 7.

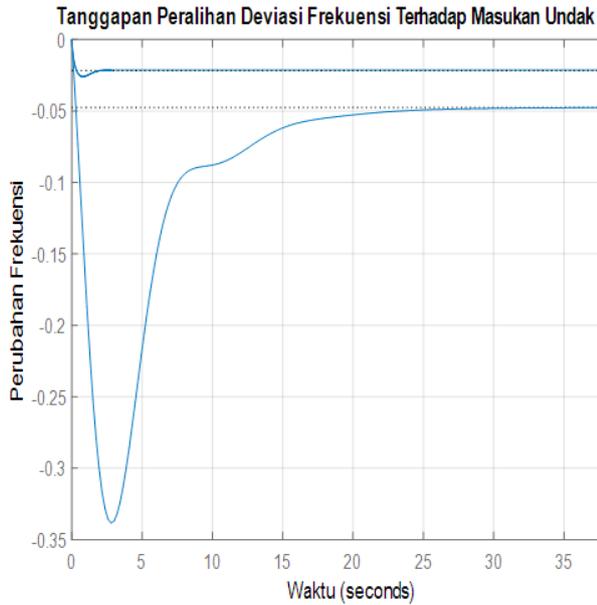
Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy)



Gambar 5. Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik Tipe *Reheat*

Tabel 5. Parameter tanggapan peralihan untuk Tipe *Reheat*

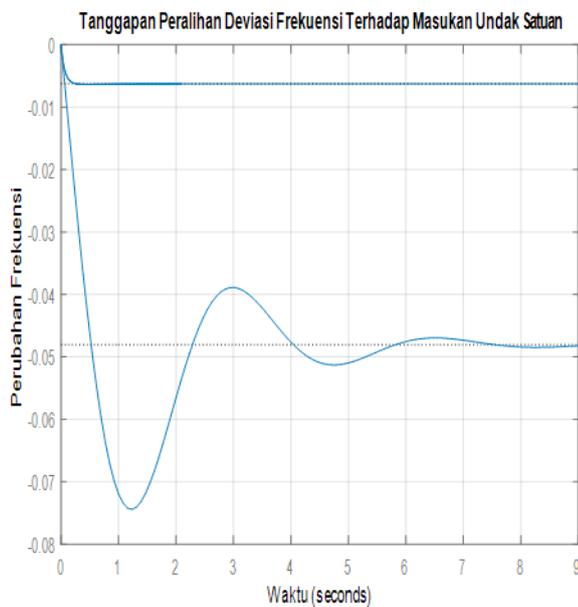
Parameter	Tanpa LQR	Dengan LQR
Waktu Naik (detik)	0,3993	0,2496
Waktu Keadaan Mantap (detik)	10,9046	1,5951
Waktu Puncak (detik)	2,2561	0,6460
Lewatan Maksimum (%)	146,4028	19,4214
Nilai Puncak	0,1173	0,0241



Gambar 6. Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tipe Hidraulik

Tabel 6. Parameter tanggapan peralihan untuk Tipe Hidraulik

Parameter	Tanpa LQR	Dengan LQR
Waktu Naik (detik)	0,2259	0,2496
Waktu Keadaan Mantap (detik)	19,3590	1,8436
Waktu Puncak (detik)	2,7922	0,7899
Lewatan Maksimum (%)	610,4521	19,8209
Nilai Puncak	0,3383	0,0260



Gambar 7. Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik Tipe Non-Reheat

Tabel 7. Parameter tanggapan peralihan untuk tipe Non-Reheat

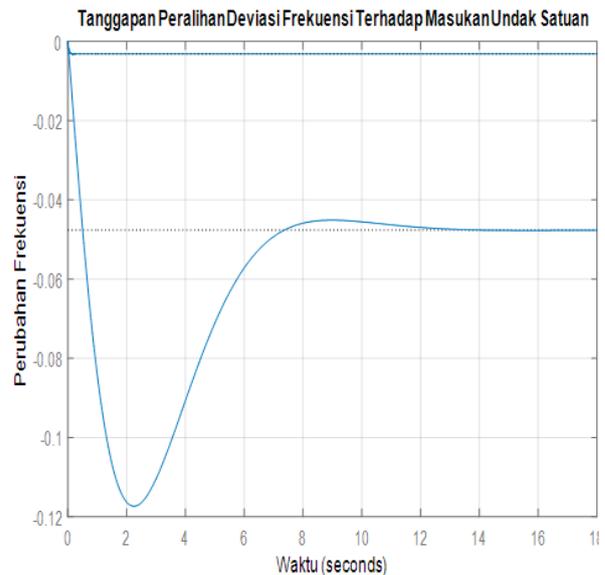
Parameter	Tanpa LQRy	Dengan LQRy
Waktu Naik (detik)	0.4135	0.1326
Waktu Keadaan Mantap (detik)	6.8143	0.2162
Waktu Puncak (detik)	1.2345	0.4561
Lewatan Maksimum (%)	54.7868	1.2002
Nilai Puncak	0.0744	0.0063

Tipe Reheat terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 8.

Untuk parameter tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) Tipe Reheat diperlihatkan pada Tabel 8.

Untuk tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) Tipe Hidraulik terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 9.

Untuk parameter tanggapan peralihan deviasi frekuensi



Gambar 8. Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik Tipe Reheat

Tabel 8. Parameter tanggapan peralihan untuk Tipe Reheat

Parameter	Tanpa LQRy	Dengan LQRy
Waktu Naik (detik)	0,3993	0,0688
Waktu Keadaan Mantap (detik)	10,9046	0,1198
Waktu Puncak (detik)	2,2561	0,2170
Lewatan Maksimum (%)	146,4028	0,1889
Nilai Puncak	0,1173	0,0241

sistem tenaga listrik tanpa dan dengan metoda Linear Quadratic Regulator dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) Tipe *Hidraulik* diperlihatkan pada Tabel 9.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa tanggapan peralihan dari ketiga tipe sistem kendali frekuensi tenaga listrik dengan metoda Linear Quadratic Regulator (LQR) dan metoda Linear Quadratic Regulator dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) sudah memenuhi kriteria perancangan untuk semua parameter peralihan. Untuk metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR), sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat* memiliki nilai – nilai parameter peralihan yang paling kecil dibandingkan dengan nilai–nilai parameter peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Reheat* dan *Hidraulik*. Adapun nilai–nilai parameter peralihan untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat* diantaranya waktu naik sebesar 0,1266 detik, waktu keadaan mantap sebesar 0,3451 detik, waktu puncak sebesar 0,3451 detik, lewatan maksimum sebesar 3,1972 % dan nilai puncak sebesar 0,0069. Untuk metoda *Linear*

*Quadratic Regulator* dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy) sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Hidraulik* memiliki nilai–nilai parameter peralihan yang paling kecil dibandingkan dengan nilai–nilai parameter peralihan sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat* dan *Reheat*. Adapun nilai–nilai parameter peralihan untuk sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Hidraulik* diantaranya waktu naik sebesar 0,0451 detik, waktu keadaan mantap sebesar 0,0731 detik, waktu puncak sebesar 0,1300 detik, lewatan maksimum sebesar 0,0531 % dan nilai puncak sebesar 0,0032.

V. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan dari penelitian ini bahwa untuk metoda Linear Quadratic Regulator (LQR), sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Non-Reheat* memiliki performansi peralihan yang paling baik dibandingkan dengan Tipe *Reheat* dan Tipe *Hidraulik*. Untuk metoda Linear Quadratic Regulator dengan fungsi bobot pada keluaran (LQRy), sistem kendali frekuensi tenaga listrik Tipe *Hidraulik* memiliki performansi peralihan yang paling baik dibandingkan dengan Tipe *Non-Reheat* dan Tipe *Reheat*.

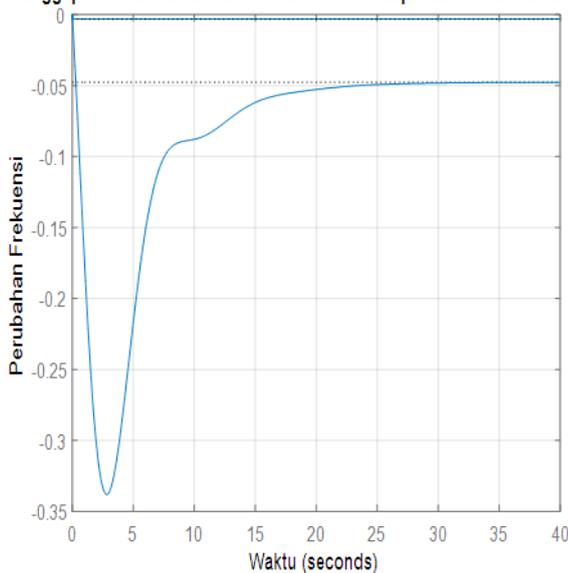
UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Dana DIPA Fakultas Teknik Universitas Andalas dengan No Kontrak : 001/UN.16.09.D/PL/2015.

REFERENSI

- [1] Shah, N. N., Chafekar, A. D., Mehta, D. N. & Suthar , A. R., “Automatic Load Frequency Control of Two Area Power System With Conventional dan Fuzzy Logic Control”. IJRET, 1(3), pp. 343 – 347, 2012.
- [2] Parmar, K. S., S. M. & D. K., “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., 2012
- [3] Shanmugasundaram, V., A. R. & T. J., “Load Frequency Control Using Optimal PID Controller For Non - Reheat Thermal Power System With Tcps Unit”, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) , 1(5), pp. 414 – 417, 2012.
- [4] Ikhe, A. & A. K., “Load Frequency Control For Interconnecte Power System Using Different Controllers”, International Journal of Advances in Engineering & Technology, pp. 85 – 89, 2013.
- [5] Bevrani, Hasan., “Robust Power System Frequency Control”, New York: Springer, 2009.
- [6] Kundur, Prabha., “ Power System Stability and Control”, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [7] D. Kothari & Mahalanabis, A., “Computer Aided Power System Analysis and Control“, New Delhi : McGraw-Hill, 1999
- [8] H.D Laksono, “Sistem Kendali“, Jogjakarta : Graha Ilmu, 2014.

Tanggapan Peralihan Deviasi Frekuensi Terhadap Masukan Undak Satuan



Gambar 9. Tanggapan peralihan deviasi frekuensi sistem tenaga listrik Tipe *Hidraulik*

Tabel 9. Parameter tanggapan peralihan untuk Tipe *Hidraulik*

Parameter	Tanpa LQRy	Dengan LQRy
Waktu Naik (detik)	0,2259	0,0415
Waktu Keadaan Mantap (detik)	19,3590	0,0731
Waktu Puncak (detik)	2,7922	0,1300
Lewatan Maksimum (%)	610,4521	0,0531
Nilai Puncak	0,3383	0,0032

**Penerbit:**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: [rekayasa.elektrika@unsyiah.net](mailto:rekayasa.elektrika@unsyiah.net)

Telp/Fax: (0651) 7554336

