

Analisa Sistem *Load Frequency Control* dengan Metoda Linear Quadratic Gaussian (LQG) dan Linear Quadratic Gaussian-Loop Transfer Recovery (LQG-LTR)

Heru Dibyo Laksono¹, Novizon², Anissa Widi Adriana³,
^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas
herudibyoalaksono@eng.unand.ac.id

ABSTRAK

Artikel ini mendeskripsikan perancangan dan analisa sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe non reheat tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dan metoda *Linear Quadratic Gaussian – Loop Transfer Recovery* (LQG – LTR). Sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe non reheat dinyatakan dalam bentuk persamaan keadaan. Pengendali dirancang dengan metoda LQG dan metoda LQG – LTR dengan bantuan perangkat lunak Matlab serta berdasarkan kriteria perancangan tertentu. Analisa yang dilakukan meliputi analisa tanggapan peralihan, analisa tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka, analisa tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup dan analisa kekokohan. Untuk analisa tanggapan peralihan, parameter yang diamati waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap dan nilai lewatan maksimum. Untuk analisa tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka, parameter yang diamati adalah margin penguatan. Untuk analisa tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup, parameter yang diamati adalah lebar pita. Untuk analisa kekokohan, parameter yang diamati adalah nilai puncak sensitivitas dan nilai puncak sensitivitas komplementer. Hasil perancangan memperlihatkan bahwa dengan pengendali LQG – LTR, sistem *Load Frequency Control* (LFC) memenuhi kriteria perancangan. Adapun nilai parameter yang diperoleh dari tanggapan peralihan meliputi waktu naik sebesar 0.1002 detik, waktu puncak sebesar 0.5086 detik, waktu keadaan mantap sebesar 1.6343 detik dan nilai lewatan maksimum sebesar 17.9010 %. Nilai parameter yang diperoleh dari tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka yaitu margin penguatan sebesar tidak terhingga dan nilai parameter yang diperoleh dari tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup yaitu lebar pita sebesar 19.7040 rad/detik dan nilai parameter yang diperoleh dari analisa kekokohan yaitu nilai puncak sensitivitas sebesar 1.1591 dan nilai puncak sensitivitas komplementer sebesar 0.9160.

kata kunci : *Load Frequency Control* (LFC), *Linear Quadratic Gaussian* (LQG), *Linear Quadratic Gaussian – Loop Transfer Recovery* (LQG – LTR)

1. PENDAHULUAN

Sistem kendali frekuensi tenaga listrik merupakan suatu sistem yang digunakan untuk menjaga fluktuasi frekuensi yang ditimbulkan oleh perubahan beban. Sistem kendali frekuensi pada sistem tenaga listrik memiliki tujuan untuk menjaga variasi frekuensi sistem dalam 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 dikonsumsi oleh pemakai tenaga listrik. Kestabilan frekuensi ini dilakukan untuk mengetahui dan mempelajari tanggapan frekuensi sistem di daerah titik kerja. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan sebuah analisa dan tanggapan yang mampu mengatur kestabilan penggunaan beban, yaitu dengan cara menggunakan sistem kendali frekuensi secara otomatis. Sistem tenaga listrik harus mampu menyediakan tenaga listrik bagi pelanggan dengan frekuensi yang praktis konstan. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan yaitu $\pm 2\%$ dari 50 Hz. Frekuensi sistem tergantung pada keseimbangan daya aktif. Penyesuaian daya aktif dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator.

Ada beberapa metoda sistem pengendalian frekuensi diantaranya adalah metoda *Tyrees* dan *Luyben* [1], metoda ini memiliki tanggapan terhadap gangguan yang sangat baik tetapi memberikan kinerja yang buruk untuk proses dengan penundaan yang dominan. Metoda *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dan *Predictive Control* [2], metoda ini menjelaskan pengendalian *Load Frequency Control* (LFC) terhadap

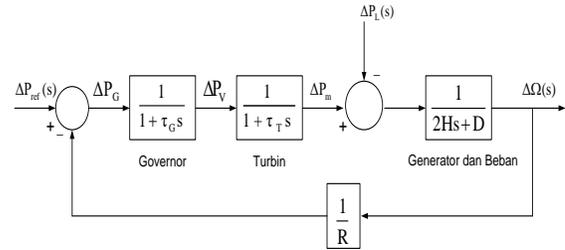
efek ketidakpastian terhadap perubahan parameter. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa metoda tersebut menghasilkan kekokohan yang baik terhadap ketidakpastian akibat perubahan parameter. Metoda *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dan algoritma genetika [3], metoda ini mendeskripsikan pengendalian *Load Frequency Control* (LFC) dengan metoda *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) untuk mengurangi penyimpangan frekuensi dari titik referensi. Selain itu metoda algoritma genetika digunakan untuk penentuan nilai elemen – elemen matrik Q dan matrik R yang optimal. Metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan Integral (I) [4], metoda ini menjelaskan pengendalian *Load Frequency Control* (LFC) dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan Integral (I) untuk satu area sistem tenaga yang terdiri dari thermal, hydro, gas dan pembangkit listrik tenaga angin berbasis generator induksi. Metoda *Linear Quadratic Gaussian* berbasis Filter Kalman [5]. Metoda ini menjelaskan pengendalian variasi frekuensi sistem tenaga listrik yang disebabkan oleh perubahan beban dalam jaringan sistem tenaga listrik. Metoda *Robust PID* [6], metoda ini mendeskripsikan usulan baru pengendali yang bersifat kokoh untuk stabilisasi frekuensi sistem tenaga listrik yang diambil dari penetrasi sumber energi terbarukan yang tinggi. Pengendali yang diusulkan adalah kombinasi pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) dan metoda *Linear Quadratic Gaussian* (LQG).

Berdasarkan kajian dari beberapa referensi diatas maka dalam penelitian ini dilakukan analisa *Load Frequency Control* (LFC) tanpa dan dengan metoda *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dan metoda *Linear Quadratic Gaussian – Loop Transfer Recovery* (LQG – LTR). Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi tanggapan peralihan, tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka, tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup dan kekokohan terhadap gangguan, mampu meredam derau pada frekuensi tinggi serta mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu. Agar tercapai hasil penelitian yang diinginkan maka batasan dalam penelitian ini adalah model sistem yang digunakan dalam bentuk persamaan keadaan serta bersifat linear dan tidak berubah terhadap waktu. Penelitian ini dilakukan dalam bentuk simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Matlab.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini menjelaskan pemodelan matematis sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe non reheat, metoda LQG, metoda LQG – LTR, analisa tanggapan peralihan, analisa tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka, analisa tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup dan analisa kekokohan.

Untuk model sistem sistem *load frequency control* (LFC) tipe non reheat diperlihatkan pada Gambar 1 berikut



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Load Frequency Control Tipe Non Reheat

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 2 diperoleh persamaan keadaan dari sistem *load frequency control* (LFC) tipe non reheat yang diperlihatkan pada persamaan (1) dan (2) berikut

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_v \\ \Delta \dot{P}_m \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_g} & 0 & -\frac{1}{R\tau_g} \\ \frac{1}{\tau_T} & -\frac{1}{\tau_T} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H} & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_v \\ \Delta P_m \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{2H} \end{bmatrix} \Delta P_L \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_v \\ \Delta P_m \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

Metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) menggabungkan metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan Filter Kalman dengan model persamaan keadaan sistem yang dinyatakan persamaan (3) dan (4) berikut

$$\dot{x} = Ax + Bx + w \quad (3)$$

$$y = Cx + v \quad (4)$$

Dengan pengendali dinyatakan dalam bentuk persamaan (5) sd (7) berikut

$$u = -K\hat{x} \quad (5)$$

$$K = R^{-1}B'P \quad (6)$$

$$A'P + PA + Q - PBR^{-1}B'P = 0 \quad (7)$$

Observer dinyatakan dalam bentuk persamaan (8) s/d (10) berikut

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - c\hat{x}) \quad (8)$$

$$L = \Sigma C'R_0^{-1} \quad (9)$$

$$A\Sigma + \Sigma A' + Q_0 - \Sigma C'R_0^{-1}C\Sigma = 0 \quad (10)$$

Metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR) mengakibatkan sistem lingkaran tertutup bersifat stabil asimtotik. Fungsi alih pengendali *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dinyatakan oleh persamaan (11) berikut

$$H(s) = K(sI - A + BK + LC)^{-1}L \quad (11)$$

Metode *Linear Quadratic Gaussian Loop Transfer Recovery* (LQG-LTR) merupakan metode yang dapat digunakan untuk kebutuhan perancangan sistem kendali. Metode *Linear Quadratic Gaussian-Loop Transfer Recovery* (LQG-LTR) merupakan bentuk pengembangan dari metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dengan menambahkan elemen *Loop Transfer Recovery* (LTR) dalam sistem kendalinya dengan bentuk fungsi alih dinyatakan dengan persamaan (12) berikut

$$H(s) = K(sI - A + BK + LC)^{-1}LC(sI - A)^{-1}B \quad (12)$$

Untuk analisa tanggapan peralihan, diperoleh dari tanggapan peralihan sistem kendali terhadap masukan undak satuan. Adapun parameter yang dihitung waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap, nilai puncak dan nilai lewatan maksimum. Untuk pembahasan lebih lengkap ada pada [7]. Untuk analisa tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka diperoleh dari tanggapan sistem dalam domain frekuensi dengan menggunakan diagram Bode. Adapun parameter yang dihitung margin penguatan, margin fasa, frekuensi margin fasa dan frekuensi margin penguatan. Pembahasan yang lebih detail dari tanggapan sistem dalam domain frekuensi ada pada [8]. Analisa tanggapan sistem dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup dilakukan dengan menggunakan diagram magnitude Bode. Parameter yang dihitung meliputi lebar pita, nilai puncak resonansi dan frekuensi nilai puncak resonansi. Detail lebih lengkap untuk tanggapan sistem dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup ada pada [9]. Untuk analisa kekokohan dilakukan dengan menggunakan diagram Bode. Parameter yang dihitung adalah nilai puncak sensitivitas dan nilai puncak sensitivitas komplementer. Pembahasan lebih lengkap dari analisa kekokohan ini ada pada [10].

3. METODA PENELITIAN

Dibagian ini ditampilkan data – data parameter sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe non reheat, kriteria perancangan dan prosedur analisa tanpa dan dengan metoda LQG serta metoda LQG – LTR.

A. Data-Data Parameter Sistem *Load Frequency Control* (LFC) Non Reheat

Parameter dari sistem *load frequency control* tipe non reheat diperlihatkan pada Tabel 1. berikut [11]

Tabel 1. Nilai Parameter Sistem Kendali Frekuensi

Parameter	Nilai
Konstanta Waktu Turbin (T_T)	0.5000 detik
Konstanta Waktu Governor (T_g)	0.2000 detik
Konstanta Inersia Generator (H)	5
Koefesien Sensitivitas Frekuensi (D)	0.8000
Karakteristik <i>Droop</i> (R)	0.0500

Nilai parameter pada Tabel 1 disubstitusikan ke persamaan (1) s/d (2) dan diperoleh persamaan keadaan dari sistem *load frequency control* tipe non reheat terhadap perubahan beban yang dinyatakan dalam bentuk persamaan (13) dan (14) berikut

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_v \\ \Delta \dot{P}_m \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.00 & 0 & -100.00 \\ 2.00 & -2.00 & 0 \\ 0 & 0.10 & -0.08 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_v \\ \Delta P_m \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.10 \end{bmatrix} \Delta P_L \quad (13)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_v \\ \Delta P_m \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (14)$$

B. Kriteria Desain

Untuk kriteria desain pengendali dengan metoda LQG dan metoda LQG – LTR sebagai berikut

1. Waktu naik kecil dari 0.5000 detik
2. Waktu puncak kecil dari 1.2500 detik.
3. Waktu keadaan mantap kecil dari 5 detik
4. Lewatan maksimum kecil dari 20 %.
5. Margin penguatan besar dari 6 dB.
6. Lebar Pita besar dari 10 rad/detik
7. Nilai puncak maksimum sensitivitas kurang 2
8. Nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer kurang dari 1.25

C. Tahapan Analisa Sistem *Load Frequency Control* (LFC) Tipe Non Reheat Dengan Metoda LQG dan Metoda LQG – LTR

Penelitian ini diawali dengan pemodelan matematis dari sistem *Load Frequency Control* (LFC) tipe non reheat dengan menggunakan persamaan linear diferensial dan transformasi Laplace. Hasil dari pemodelan matematis yang dihasilkan dalam bentuk persamaan keadaan dengan masukan beban dan keluaran perubahan frekuensi.

Dengan menggunakan persamaan keadaan kemudian dilakukan analisa peralihan, analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka, analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup dan analisa kekokohan. Untuk analisa peralihan, parameter yang diamati adalah waktu naik, waktu puncak, waktu keadaan mantap dan lewatan maksimum. Untuk analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka parameter yang diamati margin penguatan, frekuensi margin penguatan, margin fasa dan frekuensi margin fasa. Untuk analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup parameter yang diamati lebar pita, nilai puncak resonansi dan nilai frekuensi puncak resonansi. Untuk analisa kekokohan, parameter yang diamati adalah nilai puncak sensitivitas dan nilai puncak sensitivitas komplementer.

Berdasarkan hasil analisa ini kemudian ditentukan kriteria perancangan pengendali untuk metoda LQG dan metoda LQG – LTR. Selanjutnya dilakukan perancangan pengendali dengan metoda LQG. Pada perancangan pengendali dengan metoda LQG ini dilakukan penentuan matrik bobot Q, konstanta R, konstanta ψ dan konstanta Θ . Penentuan nilai dilakukan secara coba – coba sesuai dengan kriteria perancangan. Dengan substitusi pengendali LQG ke persamaan keadaan awal sehingga diperoleh persamaan keadaan yang diperluas. Dengan menggunakan persamaan keadaan yang diperluas kemudian dilakukan analisa yang sama seperti analisa yang dilakukan pada persamaan keadaan awal. Langkah – langkah analisa yang sama dilakukan juga untuk perancangan pengendali dengan metoda LQG – LTR. Terakhir hasil analisa dengan metoda LQG dan metoda LQG – LTR ini dibandingkan satu sama lain sehingga nantinya akan diperoleh informasi pengendali yang mempunyai performansi yang lebih baik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

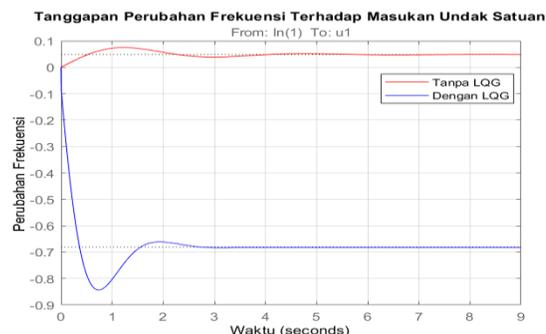
Bagian ini membahas hasil analisa perubahan frekuensi *load frequency control* tipe non reheat tanpa dan dengan metoda LQG serta metoda LQG – LTR terhadap perubahan. Analisa yang dilakukan meliputi analisa alih lingkaran terbuka, analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup, analisa kestabilan dan analisa kekokohan.

Hasil analisa peralihan tanggapan peralihan perubahan frekuensi *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG diperlihatkan pada Tabel 2 berikut

Tabel 2. Hasil Analisa Peralihan Sistem *Load Frequency Control* Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG
Waktu Naik	0.4135 detik	0.3025 detik
Waktu Puncak	1.2345 detik	0.7363 detik
Lewatan Maksimum	54.7868 %	23.7727 %
Waktu Keadaan Mantap	6.8143 detik	2.2425 detik

Untuk tanggapan peralihan perubahan frekuensi sistem *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 2 berikut



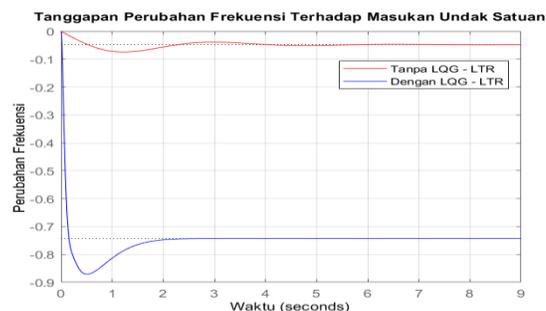
Gambar 2. Tanggapan Peralihan Perubahan Frekuensi Tanpa dan Dengan Metoda LQG

Hasil analisa peralihan tanggapan peralihan perubahan frekuensi *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG-LTR diperlihatkan pada Tabel 3 berikut

Tabel 3. Hasil Analisa Peralihan Sistem *Load Frequency Control* Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG - LTR
Waktu Naik	0.4135 detik	0.1002 detik
Waktu Puncak	1.2345 detik	0.5086 detik
Lewatan Maksimum	54.7868 %	17.1901 %
Waktu Keadaan Mantap	6.8143 detik	1.6343 detik

Untuk tanggapan peralihan perubahan frekuensi sistem *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG-LTR terhadap masukan undak satuan diperlihatkan pada Gambar 3 berikut



Gambar 3. Tanggapan Peralihan Perubahan Frekuensi Tanpa dan Dengan Metoda LQG-LTR

Berdasarkan kriteria perancangan, hasil analisa tanggapan peralihan perubahan frekuensi sistem *load frequency control* yang memenuhi kriteria perancangan adalah pengendali dengan metoda LQG – LTR dengan waktu keadaan naik sebesar 0.1002 detik, waktu puncak sebesar 0.5086 detik, waktu keadaan mantap sebesar 1.6343 detik dan waktu lewatan maksimum sebesar 17.1901 %. Untuk pengendali yang dirancang dengan metoda LQG tidak memenuhi kriteria perancangan terutama untuk kriteria lewatan maksimum. Adapun nilai lewatan maksimum yang

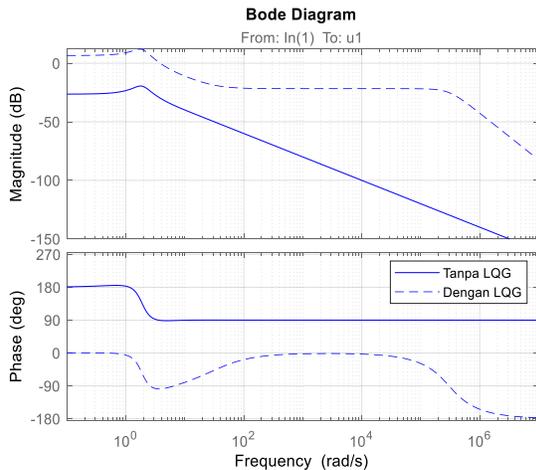
diperoleh sebesar 23.7727 % sedangkan kriteria yang diinginkan kurang dari 20 %.

Untuk analisa domain frekuensi untuk fungsi alih terbuka sistem *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG diperlihatkan pada Tabel 4 berikut

Tabel 4. Hasil Analisa Domain Frekuensi Sistem *Load Frequency Control* Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG
Margin Penguatan	13.2010	Inf
Margin Penguatan (dB)	22.4120	Inf
Margin Fasa	Inf	81.5540
Frekuensi Margin Penguatan	1.1486 rad/detik	Inf
Frekuensi Margin Fasa	NaN	3.8170 rad/detik

Tanggapan sistem *load frequency control* dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka tanpa dan dengan metoda LQG diperlihatkan oleh diagram Bode pada Gambar 4 berikut



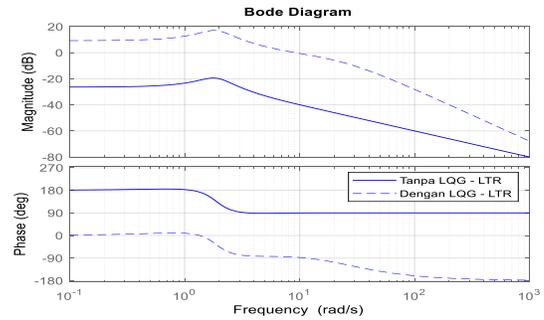
Gambar 4. Diagram Bode Untuk Perubahan Frekuensi Tanpa dan Dengan Metoda LQG

Untuk analisa domain frekuensi untuk fungsi alih terbuka sistem *load frequency control* tipe non reheat tanpa dan dengan metoda LQG - LTR diperlihatkan pada Tabel 5 berikut

Tabel 5. Hasil Analisa Domain Frekuensi Sistem *Load Frequency Control* Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG - LTR
Margin Penguatan	13.2010	Inf
Margin Penguatan (dB)	22.4120	Inf
Margin Fasa	Inf	81.5540
Frekuensi Margin Penguatan	1.1486 rad/detik	Inf
Frekuensi Margin Fasa	NaN	3.8170 rad/detik

Tanggapan sistem *load frequency control* tipe non reheat dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka tanpa dan dengan metoda LQG - LTR diperlihatkan oleh diagram Bode pada Gambar 5 berikut



Gambar 5. Diagram Bode Untuk Perubahan Frekuensi Tanpa dan Dengan Metoda LQG - LTR

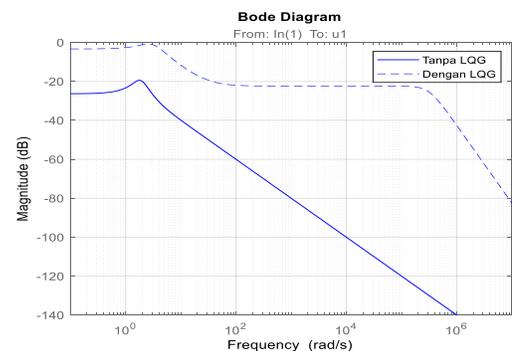
Untuk hasil analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka sistem *load frequency control* dengan metoda LQG dan metoda LQG - LTR sudah memenuhi kriteria perancangan. Adapun kriteria perancangan yang diinginkan adalah nilai margin penguatan dari tanggapan sistem *load frequency control* dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran terbuka besar dari 6 dB dan hasil analisa yang diperoleh bernilai tidak terhingga untuk kedua metoda.

Untuk analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup sistem *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG diperlihatkan pada Tabel 6 berikut

Tabel 6. Hasil Analisa Domain Frekuensi Sistem *Load Frequency Control* Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG
Lebar Pita (rad/detik)	3.6959	5.7426
Nilai Puncak Resonansi	0.1173	0.9141
Nilai Frekuensi Puncak Resonansi (rad/detik)	1.7461	2.6001

Tanggapan sistem *load frequency control* dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup tanpa dan dengan metoda LQG diperlihatkan oleh diagram magnitud Bode pada Gambar 6 berikut



Gambar 6. Diagram Magnitud Bode Untuk Perubahan Frekuensi Tanpa dan Dengan Metoda LQG

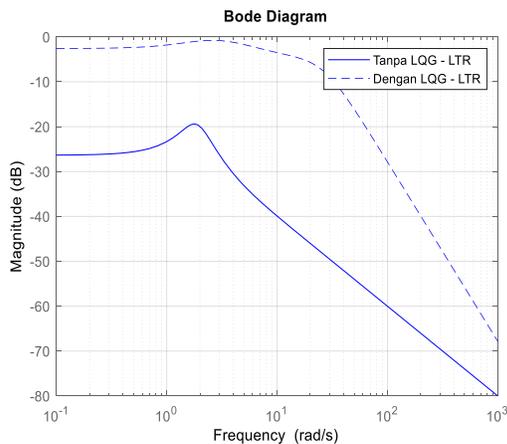
Untuk analisa domain frekuensi untuk fungsi alih tertutup sistem *load frequency control* tanpa dan

dengan metoda LQG - LTR diperlihatkan pada Tabel 7 berikut

Tabel 7. Hasil Analisa Domain Frekuensi Sistem Load Frequency Control Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG - LTR
Lebar Pita (rad/detik)	3.6959	19.7040
Nilai Puncak Resonansi	0.1173	0.9160
Nilai Frekuensi Puncak Resonansi (rad/detik)	1.7461	2.5733

Tanggapan sistem *load frequency control* dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup tanpa dan dengan metoda LQG – LTR diperlihatkan oleh diagram magnitudo Bode pada Gambar 7 berikut



Gambar 7. Diagram Magnitude Bode Untuk Perubahan Frekuensi Tanpa dan Dengan Metoda LQG - LTR

Hasil analisa domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup sistem *load frequency control* dengan metoda LQG belum memenuhi kriteria perancangan. Adapun kriteria perancangan yang diinginkan adalah nilai lebar pita dari tanggapan sistem *load frequency control* dalam domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup besar dari 10 rad/detik sedangkan lebar pita yang diperoleh dengan metoda LQG sebesar 5.7426 rad/detik. Untuk metoda LQG – LTR, lebar pita tanggapan domain frekuensi untuk fungsi alih lingkaran tertutup sistem *load frequency control* sudah memenuhi kriteria perancangan dengan nilai 19.7040 rad/detik.

Untuk analisa sensitivitas sistem *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG diperlihatkan pada Tabel 8 berikut

Tabel 8. Nilai Puncak Sensitivitas Sistem Load Frequency Control Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas	1.1048	1.0161
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer	0.1173	0.9141

Untuk analisa sensitivitas sistem *load frequency control* tanpa dan dengan metoda LQG – LTR diperlihatkan pada Tabel 9 berikut

Tabel 9. Nilai Puncak Sensitivitas Sistem Load Frequency Control Tipe Non Reheat

Kriteria	Tanpa Pengendali	LQG - LTR
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas	1.1048	1.1591
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer	0.1173	0.9160

Hasil analisa kekokohan tanggapan sistem *load frequency control* dengan metoda LQG dan metoda LQG – LTR sudah memenuhi kriteria perancangan. Adapun kriteria perancangan yang diinginkan adalah nilai puncak sensitivitas kurang dari 2 dan nilai puncak sensitivitas komplementer kurang dari 1.25. Adapun nilai puncak sensitivitas dan nilai puncak sensitivitas komplementer dari tanggapan sistem *frequency control* dengan metoda LQG sebesar 1.0161 dan 0.9141. Untuk nilai puncak sensitivitas dan nilai puncak sensitivitas komplementer dari tanggapan sistem *frequency control* dengan metoda LQG - LTR sebesar 1.1591 dan 0.9160.

5. PENUTUP

A. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini dimana tanggapan sistem *load frequency control* dengan metoda LQG – LTR yang memenuhi kriteria perancangan yang ditentukan.

B. Saran

Beberapa saran yang dapat dilakukan dalam penelitian selanjutnya adalah

1. Untuk penelitian selanjutnya, analisa peralihan yang dilakukan pada banyak titik operasi sehingga performansi tanggapan sistem *load frequency control* terhadap perubahan parameter dapat diketahui.
2. Pada analisa kekokohan, pengaruh ketidakpastian hendaknya juga dimasukkan sehingga nantinya respon tanggapan sistem *load frequency control* memiliki informasi performansi nominal, kestabilan nominal, performansi kokoh dan kestabilan kokoh yang lebih yang baik.

REFERENSI

- [1] Tyreus, B.D. and W.L. Luyben, "Tuning PI Controllers For Integrator/Dead Time Processes", Ind. Eng. Chem. Res. pp. 2628–2631, 1992.
- [2] Mohamed, T.H, Shabib G, Abdelhameed E. H and Khamies, Mohammed "Load Frequency Control in Single Area System Using Model Predictive Control and Linear Quadratic Gaussian

- Techniques*“, International Journal of Electrical Energy, Vol. 03 No. 03, pp 141 – 144, 2015.
- [3] Ali M, Zahra S.T, Jalal K, Shaddiga A and Faisal, M.H, “*Design of Optimal Linear Quadratic Gaussian (LQG) Controller for Load Frequency Control (LFC) using Genetic Algorithm (GA) in power System*“, International Journal of Engineering Works, Vol. 05 No. 03, pp 40 – 49, 2018.
- [4] Mandal R, Chartterjee K, Patil, B.K, “*Load Frequency Control (LFC) of a Single Area Hybrid Power System by using Integral and LQR Based Integral Controller*“, Inda : Proceeding of The National Power System Conference (NPSC), December, 2018.
- [5] Hossain, Alamgir MD , “*Linear Quadratic Gaussian Regulator Based Frequency Control of Power Systems to Enhance The Continuity of Power Flow*“, American Journal of Engineerring Research (AJER), Vol. 05 No. 03, pp 40 – 49, 2019.
- [6] Khamies K, Magdy G, Ebeed M, Kamel S, “*A Robust PID Controller Based on Linear Quadratic Gaussian Approach For Improving Frequency Stability of Power Considering Renewables*“, ISA Transactions, pp 1-21, 2018.
- [7] Ogata K. “*Modern Control Engineering*“, New York : Prentice – Hall, 2018.
- [8] Franklin, G., Powell , J., & Naeini , A. E, *Feedback Control of Dynamics Systems* . New York : Addison - Wesley Publishing Company, 1986.
- [9] B. Fiendland, *Control System Design* , New York : McGraw Hill, 1986.
- [10] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*, New York : McGraw Hill : Addison - Wesley Publishing Company, 1996.
- [11] Saadat H, *Power System Analysis*, New York : McGrawHill,1999