

Studi Metoda Kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan Aplikasinya pada Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

Olivia Fernaza

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas teknik
Universitas Andalas

Olivia.Fernaza@yahoo.com

ABSTRAK

Automatic Voltage Regulator (AVR) memegang peranan penting pada proses pembentukan profil tegangan terminal suatu generator. Perubahan kondisi beban sebagai perilaku dinamis sistem akan menyebabkan perubahan arus yang mengalir dalam sistem generator yang menyebabkan perubahan tegangan armatur dan terminal generator tersebut. Pengontrolan stabilitas profil tegangan generator pada *Automatic Voltage Regulator* (AVR) yang bertujuan untuk menjaga kestabilan sistem. Respon sistem yang lambat sebelum menggunakan pengendali. Oleh karena itu, diperlukan adanya pengendalian optimal agar respon sistem menjadi lebih baik. Tugas akhir ini membuat suatu mekanisme kontrol profil tegangan terminal generator dengan menggunakan metode *Linear Quadratic Regulator*. Metode ini akan diimplementasikan bersama dalam model sistem AVR. Model ini sistem kontrol ini sangat murah karena tidak dibutuhkan suatu mekanisme kontrol yang cenderung kompleks seperti PID. Pada metode LQR akan ditentukan matrik bobot Q dan R untuk memperoleh sinyal kendali optimal dari umpan balik keadaan yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja AVR dalam menjaga kestabilan sistem

Kata Kunci : AVR, LQR, Kestabilan, Bandwidth, Settling Time.

I. Pendahuluan

Dalam pembangkitan tenaga listrik, kestabilan tegangan merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi sistem tegangan. Ketidakstabilan tegangan akan menyebabkan ketidakstabilan sistem tenaga secara keseluruhan, terutama kualitas dan kemampuan pengiriman daya dari pembangkit ke konsumen, kondisi terparah terjadinya mekanisme pelepasan beban. Kestabilan tegangan sistem praktis ditentukan oleh kestabilan sistem regulasi tegangan yang dilakukan oleh sistem eksitasi yang terdapat dalam generator dan beberapa rangkaian pengendali lain yang terintegrasi dalam suatu sistem. Dalam sistem AVR, terdapat banyak gangguan yang memungkinkan sehingga perlu studi kestabilan dinamik di sekitar titik

operasinya, sehingga dilakukan analisa terhadap tingkah laku kestabilan sistem AVR menggunakan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Karena menggunakan LQG-LTR ini sistem kendali AVR akan bersifat kokoh terhadap gangguan, mampu meredam gangguan pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan tertentu.

Penelitian ini merupakan perancangan tahap mula sistem kendali linier untuk mengendalikan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dalam bentuk simulasi. Syarat menggunakan hal yang diatas adalah model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) harus bersifat linier. Untuk mendapatkan model linier tersebut, model sistem dilinierisasi di titik operasi tertentu. Syarat menggunakan hal yang

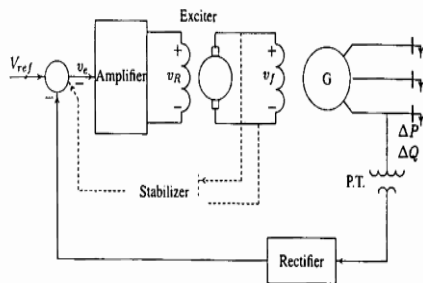
diatas adalah model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) harus bersifat linier. Untuk mendapatkan model linier tersebut, model sistem dilinierisasi di titik operasi tertentu. Penelitian ini dilakukan dengan asumsi :

1. Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) yang akan dikendalikan adalah sistem yang bersifat linier dan kontinu.
2. Analisa performansi dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi.
3. Penentuan fungsi bobot Q dan R dilakukan secara coba-coba.
4. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat MATLAB 2010.

II. Tinjauan Pustaka

A. Pemodelan Sistem

Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) generator adalah suatu peralatan yang bertugas menjaga kestabilan dan daya reaktif generator agar tetap pada nilai kerja yang diinginkan. Pada gambar 2.5 dibawah dapat dilihat diagram skematik dari sederhana dari AVR.



Gambar 2.5. Diagram skematik sederhana sistem AVR.^[12]

Parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam perancangan Automatic Voltage Regulator meliputi antara lain Gain amplifier, Gain Eksiter, Gain sensor, Gain Generator, dan Gain Stabilizer^[12]. Dari parameter tersebut dapat ditentukan model-model untuk masing-masing parameter, yaitu pemodelan untuk amplifier, pemodelan untuk eksiter, pemodelan untuk

generator, pemodelan untuk sensor, dan pemodelan untuk stabilizer.

1. Model Amplifier

Dalam sistem eksitasi, *amplifier* dapat berupa *magnetic amplifier*, *rotating amplifier* atau sistem *amplifier* elektronik. Model *amplifier* direpresentasikan dalam sebuah *sistem orde satu* dengan sebuah faktor penguatan dan konstanta waktu. Fungsi alih *amplifier* dapat dilihat pada persamaan (1)

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s}$$

Nilai K_A memiliki rentang dari 10-400, sedangkan untuk konstanta waktu *amplifier* memiliki nilai yang sangat kecil yaitu 0,02 s – 0,1 s.^[16]

2. Model Eksiter

Pada gambar 2.5 diatas terlihat bahwa sumber eksitasi yang digunakan adalah sumber dari keluaran generator utama yang kemudian diubah dengan menggunakan rangkaian *rectifier*. Tegangan keluaran sistem *exciter* adalah non-linier dan merupakan fungsi dari tegangan medan disebabkan efek saturasi inti magnet, sehingga dapat dilihat bahwa hubungan antara tegangan terminal dan tegangan medan *exciter* adalah sangat kompleks. Banyak sekali model yang tersedia dengan berbagai level keakuratan tersedia dalam publikasi IEEE. Model *exciter* yang modern dapat didekati dengan mengeliminasi efek saturasi tetapi dengan sangat memperhatikan konstanta waktu^[12]. Untuk fungsi alih *amplifier* dapat dilihat pada persamaan (2) berikut.

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s}$$

3. Model Generator

Emf yang dibangkitkan oleh generator sinkron merupakan fungsi dari proses magnetisasi, sedangkan tegangan terminal tergantung dari beban. Untuk model yang linier sebuah generator dapat

didekati dengan sebuah sistem orde satu, dimana memiliki faktor penguatan K_G dan konstanta waktu T_G [16]. Model generator dinyatakan pada persamaan (3) berikut.

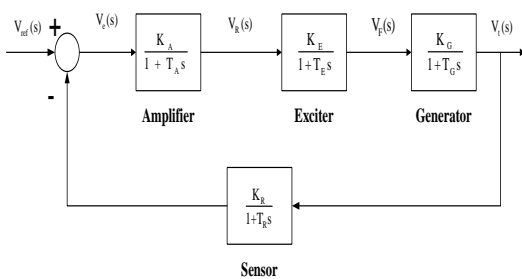
$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \quad (2.3)$$

4. Model Sensor

Suatu kenaikan daya reaktif disisi beban akan berakibat penurunan magnitudo tegangan terminal. Penurunan tegangan terminal ini kemudian akan disensor oleh suatu potensial transformator. Selanjutnya tegangan terminal akan disearahkan dan dibandingkan dengan suatu titik nilai acuan. Pengatur sinyal kesalahan penguat akan mengatur tegangan eksitasi sehingga tegangan eksitasi generator akan meningkat. Jika tegangan eksitasi meningkat maka daya yang dibangkitkan oleh generator akan meningkat pula. Untuk fungsi alih dari model sensor dapat dilihat dari persamaan (4) berikut.

$$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s}$$

Dan dari pemodelan untuk masing-masing parameter diatas dan dari diagram skematik sederhana yang terdapat pada gambar 2.5 diatas, maka didapat model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) tanpa stabilizer diperlihatkan pada Gambar 2.6 berikut [10],[16]

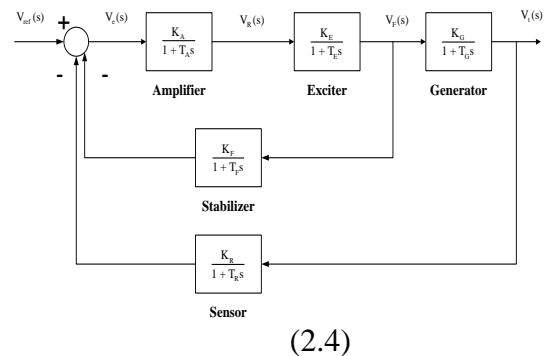


Gambar 2.6. Model Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) Konvensional

Fungsi alih lingkaran tertutup yang menghubungkan tegangan terminal (V_t) dan tegangan referensi (V_{ref}) dinyatakan dengan persamaan (5) berikut

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G (1 + T_R s)}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s)(1 + T_R s) + K_A K_E K_G K_R} \quad (2.4)$$

Selanjutnya akan diperlihatkan model sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) generator konvensional yang lain dimana terdiri dari potensial transformator berfungsi sebagai alat sensor tegangan terminal, penyearah dan penguat tegangan eksitasi yang dilengkapi dengan *stabilizer* yang diperlihatkan pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7. Model Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) Konvensional Dengan Stabilizer [16]

Untuk stabilizer dinyatakan dengan fungsi alih pada persamaan (6) berikut

$$\frac{V_F(s)}{V_T(s)} = \frac{K_F}{1 + \tau_F s} \quad (2.5)$$

Fungsi alih lingkaran tertutup yang menghubungkan tegangan terminal (V_t) dan tegangan referensi (V_{ref}) dinyatakan dengan persamaan (7) berikut

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G (1 + T_R s)(1 + T_F s)}{(1 + T_A s)(1 + T_E s)(1 + T_G s)(1 + T_R s)(1 + T_F s) + K_A K_E K_G K_R (1 + T_R s) + K_A K_E K_G K_R (1 + T_F s)} \quad (7)$$

B. Linear Quadratic Regulator (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah sebuah teknik kendali modern yang menggunakan pendekatan persamaan keadaan (*state space*). Sistem kendali yang akan ditinjau dinyatakan dengan persamaan (45) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (8)$$

dimana akan ditentukan matrik K dari vektor kendali optimal pada persamaan (46) berikut

$$u(t) = -Kx(t) \quad (9)$$

dengan meminimumkan indeks performansi pada persamaan (10) dan (11) berikut

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

atau

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

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 (11) ke dalam persamaan (10) diperoleh persamaan (12) berikut

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = (A - BK)x(t) \quad (12)$$

Pada penurunan persamaan berikut, dianggap matrik $(A - BK)$ adalah stabil.

$$J = \int_0^{\infty} \left(x'(t)Qx(t) + (Kx(t))'RKx(t) \right) dt \quad (13)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x'(t)Qx(t) + x'(t)K'RKx(t)) dt \quad (14)$$

$$J = \int_0^{\infty} x'(t)(Q + K'RK)x(t) dt \quad (15)$$

Berdasarkan penyelesaian persoalan optimasi parameter diperoleh persamaan (16) berikut

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

Akhirnya diperoleh persamaan berikut:

$$(A - BK)'P + P(A - BK) = -(Q + K'RK) \quad (17)$$

Berdasarkan metoda kedua Liapunov jika $(A - BK)$ merupakan matrik stabil, maka ada matrik definite positif P yang memenuhi persamaan (17). Selanjutnya dengan mengingat bahwa $x(\infty) = 0$ maka indeks performansi dinyatakan pada persamaan (18) berikut

$$J = x'(0)Px(0) \quad (18)$$

C. Kriteria Perancangan

Pada perancangan sistem kendali dengan menggunakan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) harus memenuhi kriteria perancangan yang telah ditetapkan sebelumnya. Kriteria perancangan untuk sistem kendali dengan metoda *Linear Quadratic Regulator* (LQR) sebagai berikut :

Untuk performansi sistem dalam domain waktu adalah

- Lewatan maksimum (*maximum overshoot*) (M_p) kurang dari 5 %
- Nilai puncak untuk masukan undak satuan kurang dari 1 detik
- Waktu naik (*rise time*) (T_r) kurang 0.500 detik

Untuk performansi sistem dalam domain Frekuensi adalah

- Sistem bersifat kokoh (*robust*) terhadap gangguan yang ditunjukkan dengan besarnya nilai puncak maksimum sensitivitas (*sensitivity*) (M_s) kecil dari 2.
- Sistem mempunyai kemampuan untuk meredam derau (*noise*) pada frekuensi tinggi dan mempunyai tanggapan yang cepat terhadap masukan yang ditunjukkan dengan besarnya nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer (*complementary sensitivity*) (M_T) kecil dari 1.25.
- Sistem lingkaran tertutup (*close loop system*) mempunyai lebar pita (*bandwidth*) kurang dari 15 rad/detik.

III. Metodologi Penelitian

A. Data-data Parameter Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

Parameter	Nilai
Ka	10.0000
Ta	0.1000
Ke	1.0000
Te	0.4000
Kg	1.0000
Tg	1.0000
Kr	1.0000

B. Fungsi Alih (*Transfer Function*) Sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

Dengan memasukkan nilai-nilai pada bagian (a) ke dalam persamaan 2.4 maka diperoleh fungsi alih lingkaran terbuka yang dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\frac{V_t}{V_{ref}} = \frac{10}{0.04s^3 + 0.54s^2 + 1.50s + 1}$$

Untuk fungsi alih lingkaran tertutup dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\frac{V_t}{V_{ref}} = \frac{0.5000s + 10}{0.002s^4 + 0.067s^3 + 0.615s^2 + 1.550s + 11}$$

C. Prosedur Perancangan Pengendali (*controller*)

Prosedur perancangan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) adalah sebagai berikut :

1. Masukkan nilai matriks nominal objek kendali A, B, C dan D.
2. Selanjutnya akan diperiksa apakah sistem bersifat terkendali (*controllability*) dan teramati (*observability*).
3. Selanjutnya dipilih matriks Q dan R dengan cara coba-coba,, yang berguna untuk mendapatkan nilai umpan balik (K) yang mampu meminimumkan *cost function J*.
4. Kinerja dari pengendali yang dirancang harus diuji dalam berbagai kondisi baik dalam kawasan frekuensi maupun waktu.

IV. Hasil dan Pembahasan

Hasil Perbandingan Perancangan Sistem Kendali *Automatic Voltage Regulator* (AVR)

Berdasarkan analisa sistem AVR tanpa metoda LQR, sistem AVR dengan menggunakan metoda LQR, dan sistem AVR dengan penambahan *stabilizer*, maka dapat dibandingkan tanggapan sistem dalam domain waktu, domain frekuensi, dalam analisa kekokohan untuk ketiga sistem tersebut.

1. Analisa dalam Domaiian Waktu.

Analisa domain waktu terbagi atas performansi lingkaran terbuka dan performansi dalam lingkaran tertutup. Berdasarkan analisa sistem AVR tanpa metoda LQR, analisa sistem dengan metoda LQR, dan analisa sistem AVR dengan penambahan *stabilizer* dalam

domain waktu, maka dapat dilihat perbandingannya untuk sistem lingkaran terbuka pada table 1 berikut.

Tabel 1. Perbandingan Performansi Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Waktu.

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR
Tipe Sistem	0 (nol)	0 (nol)
Konstanta Kesalahan Posisi (Kp)	10.0000	0.3903
Konstanta Kesalahan Kecepatan (Kv)	0.0000	0.0000
Konstanta Kesalahan Percepatan (Ka)	0.0000	0.0000
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak Satuan	0.0909	0.7193
Konstanta Kesalahan Posisi (Kp)	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Parabolik Satuan	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga

perbandingan antara sistem tanpa metoda LQR, sistem metoda LQR, dan sistem dengan penambahan *stabilizer* pada performansi lingkaran tertutup.

Tabel 2. Perbandingan Performansi Sistem Lingkaran Tertutup dalam Domain Waktu.

Kriteria	Tanpa Metoda LQG-LTR	Dengan Metoda LQG-LTR	Dengan penambahan <i>Stabilizer</i>
Waktu Naik (Tr)	0.2534 detik	0.3166 detik	1.0115 detik
Waktu		0.8866	1.9127 detik

Keadaan Mantap (Ts)	19.0812 detik	detik	
Lewatan maksimum	82.7892 %	0.0000 %	0.0000 %

Berdasarkan perbandingan sistem lingkaran tertutup pada tabel 4.14, terlihat bahwa waktu keadaan mantap (Ts) mengalami perubahan yaitu 19.0812 detik untuk sistem tanpa metoda LQR menjadi 0.8866 detik untuk sistem menggunakan metoda LQR dan 1.9127 detik untuk sistem dengan penambahan *stabilizer*. Waktu keadaan mantap merupakan waktu yang dibutuhkan untuk sistem mencapai keadaan stabilnya, sehingga dapat disimpulkan sistem yang menggunakan metoda LQR memiliki waktu keadaan mantap yang lebih cepat dibandingkan sistem lainnya.

Selain performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup, pada domain waktu juga dapat menganalisa kestabilan sistem menggunakan persamaan karakteristik dari fungsi alih sistem lingkaran tertutup. Pada tabel 4.13 memperlihatkan perbandingan sistem tanpa metoda LQR, sistem dengan metoda LQR, dan sistem dengan penambahan *stabilizer* berdasarkan analisa kestabilan menggunakan persamaan karakteristik.

Tabel 3. Analisa Kestabilan dalam Domain Waktu Menggunakan Persamaan Karakteristik.

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR	Dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>
Akar Persamaan Karakteristik	$S_1 = -0.2020 + i4.4800$ $S_2 = -0.2020 - i4.4800i$ $S_3 = -16.5000 + i0.4680$	$S_1 = -4.85 + 5.75i$ $S_2 = -4.85 - 5.75i$ $S_3 = -1.13$	$S_1 = -2.0800$ $S_2 = -4.6500 + i15.2000$ $S_3 = -4.6500 - i15.2000$ $S_4 = -$

	$S_4 = -16.5000 - i0.4680$		19.4000 $S_5 = -103.0000$
Faktor Redaman (ζ)	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 0.0451 Untuk akar s_3 dan s_4 sebesar 1.0000	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 0.644 Untuk akar s_3 dan s_4 sebesar 1.0000	Untuk akar $s_1, s_4,$ dan s_5 sebesar 1.0000 Untuk s_2 dan s_3 sebesar 0.2920
Nilai Frekuensi Alamiah Tidak Teredam (ω_n)	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 4.4800 rad/detik Untuk akar s_3 dan s_4 sebesar 16.6000 rad/detik	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 7.52 rad/detik Untuk akar s_3 sebesar 6.7300 rad/detik Untuk akar s_3 sebesar 1.13	Untuk s_1 sebesar 2.0800 rad/detik Untuk s_2 dan s_3 sebesar 15.9000 rad/detik Untuk s_4 dan s_5 masing-masing sebesar 19.4000 rad/detik dan 103.0000 rad/detik

2. Analisa dalam Domain Frekuensi
Analisa dalam domain ferkuensi juga terdiri atas performansi sistem dalam lingkaran terbuka dan performansi dalam lingkaran tertutup. Berdasarkan pembahasan analisa untuk sistem AVR tanpa menggunakan metoda LQR, analisa sistem AVR dengan menggunakan metoda LQR, dan analisa sistem AVR dengan penambahan *stabilizer* dalam domain frekuensi, maka dapat dibandingkan hasil tanggapan sistem lingkaran terbuka dan tanggapan sistem lingkaran tertutup dalam tabel 4.14 dan tabel 4.15 berikut.

Tabel 4. Tanggapan Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Frekuensi.

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR	Dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>
Margin Penguatan	1.9250 dB	11.4157 dB	11.2476 dB
Frekuensi Margin Penguatan	6.1238 rad/detik	12.8964 rad/detik	16.6823 rad/detik
Margin Fasa	18.5936 ⁰	Tak terdefinisi	Tak terdefinisi
Frekuensi Margin Fasa	4.4050 rad/detik	Tak terdefinisi	Tak terdefinisi

Berdasarkan hasil analisa pada tabel 4, margin penguatan mengalami perubahan dari 1.9250 dB untuk sistem tanpa metoda LQR, 6.0149 dB untuk sistem dengan metoda LQR, dan 11.2476 dB untuk sistem dengan penambahan *stabilizer*. Dengan demikian, performansi sistem dengan menggunakan metoda lebih baik karena memiliki margin penguatan yang melebihi 6 dB.

Tabel 5. Tanggapan Sistem Lingkaran Tertutup.

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR	Dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>
Lebar Pita	0.9750 rad/detk	6.97 rad/detik	2.2700 rad/detik
Magnitude Puncak	----	----	----
Frekuensi Puncak	----	----	----

Tabel 5 merupakan perbandingan tanggapan sistem lingkaran tertutup dalam domain frekuensi. Berdasarkan tabel 4.15, terjadi perubahan pada nilai lebar pita (*bandwidth*) untuk sistem tanpa menggunakan metoda LQR yaitu 0.9750 rad/detik, untuk sistem menggunakan metoda LQR yaitu 8.7200 rad/detik, dan untuk sistem dengan penambahan *stabilizer* yaitu 2.2700 rad/detik. Dengan bertambahnya nilai lebar pita, maka akan mempercepat waktu naik (T_r) dan waktu

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR	Dengan Penambahan <i>Stabilizer</i>
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas (M_S)	9.9795	1.2420	1.1098
Nilai Puncak Maksimum Sensitivitas Komplementer (M_T)	9.6315	0.8321	0.4762

keadaan mantap (T_s) dari tanggapan sistem lingkaran tertutup dalam domain waktu, sehingga sistem menggunakan metoda akan mempercepat waktu naik (T_r) dan waktu keadaan mantap (T_s) dari sistem AVR.

Selain analisa performansi sistem lingkaran terbuka dan performansi sistem lingkaran tertutup, kestabilan sistem untuk domain frekuensi juga dapat dianalisa menggunakan kriteria Nyquist. Berdasarkan gambar 4.6, gambar 4.13, dan gambar 4.20 yang merupakan analisa kestabilan sistem menggunakan kriteria Nyquist untuk sistem tanpa metoda LQR, untuk sistem menggunakan metoda LQR, dan juga sistem dengan tambahan *stabilizer*, terlihat bahwa ketiga sistem tersebut stabil karena memenuhi syarat kestabilan untuk kriteria Nyquist, yaitu plot diagram Nyquist tidak melingkupi titik koordinat $(-1, j0)$. Untuk batas kestabilan ketiga sistem, dapat dilihat pada tabel 4.23 berikut.

Table 4.23. Nilai Batas Kestabilan Sistem dengan Kriteria Nyquist.

3. Analisa Kekokohan Sistem.

Analisa kekokohan sistem menggunakan kriteria puncak maksimum yang terbagi atas nilai puncak maksimum sensitivitas dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer. Pada tabel 6 memperlihatkan perbandingan kriteria puncak maksimum antara sistem tanpa menggunakan metoda LQR, sistem

menggunakan metoda LQR, dan sistem dengan penambahan *stabilizer*.

Tabel 6. Kriteria Puncak Maksimum.

Untuk sistem yang bersifat kokoh terhadap gangguan dan peredaman derau pada frekuensi tinggi, nilai puncak maksimum sensitivitas (M_S) kurang dari 2 (6 dB) dan nilai puncak maksimum sensitivitas komplementer (M_T) kurang dari 1.25 (2 dB), sehingga untuk sistem tanpa menggunakan metoda LQR melebihi nilai secara teori sehingga dapat dikatakan sistem tidak kokoh terhadap gangguan dan untuk sistem menggunakan metoda LQR dan menggunakan *stabilizer* memenuhi nilai secara teori sehingga sistem kokoh terhadap gangguan dan peredaman derau pada frekuensi tinggi. Berdasarkan analisa sistem AVR tanpa metoda LQR, sistem AVR dengan menggunakan metoda LQR, dan sistem AVR dengan penambahan *stabilizer*, maka dapat dibandingkan tanggapan sistem dalam domain waktu, domain frekuensi, dalam analisa kekokohan untuk ketiga sistem tersebut.

1. Analisa dalam Domain Waktu.

Analisa domain waktu terbagi atas performansi lingkaran terbuka dan performansi dalam lingkaran tertutup. Berdasarkan analisa sistem AVR tanpa metoda LQR, analisa sistem dengan metoda LQR, dan analisa sistem AVR dengan penambahan *stabilizer* dalam domain waktu, maka dapat dilihat perbandingannya untuk sistem lingkaran terbuka pada tabel 7 berikut.

Tabel 7. Perbandingan Performansi Sistem Lingkaran Terbuka dalam Domain Waktu.

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR	Dengan penambahan <i>Stabilizer</i>

Tipe Sistem	0 (nol)	0 (nol)	0 (nol)
Konstanta Kesalahan Posisi (Kp)	10.0000	4.6522	0.9091
Konstanta Kesalahan Kecepatan (Kv)	0.0000	0.0000	0.0000
Konstanta Kesalahan Percepatan (Ka)	0.0000	0.0000	0.0000
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Undak Satuan	0.0909	0.1769	0.5238
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Laju Satuan	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga	Tak Terhingga
Kesalahan Keadaan Mantap Untuk Masukan Parabolik Satuan	Tidak Terhingga	Tidak Terhingga	Tak Terhingga

Berdasarkan perbandingan antara ketiga sistem AVR untuk lingkaran tertutup dalam domain waktu, terlihat bahwa nilai konstanta kesalahan posisi (Kp) berubah dari 10.0000 untuk sistem tanpa metoda LQR menjadi 4.6522 untuk sistem dengan metoda LQR dan 0.9091 untuk sistem dengan penambahan *stabilizer*. Nilai kesalahan keadaan mantap masukan undak satuan adalah 0.9090 untuk sistem tanpa metoda LQR berubah menjadi 0.1769 untuk sistem dengan metoda LQR serta 0.5238 untuk sistem penambahan *stabilizer*. Perubahan konstanta kesalahan (Kp) dan koefisien kesalahan keadaan mantap pada sistem AVR dengan metoda

LQR akan meningkatkan ketelitian dan performansi sistem eksitasi.

Tabel 8 memperlihatkan perbandingan antara sistem tanpa metoda LQR, sistem metoda LQR, dan sistem dengan penambahan *stabilizer* pada performansi lingkaran tertutup.

Tabel. 8. Perbandingan Performansi Sistem Lingkaran Tertutup dalam Domain Waktu.

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR	Dengan penambahan <i>Stabilizer</i>
Waktu Naik	0.2534 detik	0.2722 detik	1.0115 detik
Waktu Keadaan Mantap (Ts)	19.0812 detik	0.6727 detik	1.9127 detik
Lewatan maksimum (Mp)	82.7892 %	0.0000 %	0.0000 %

Berdasarkan perbandingan sistem lingkaran tertutup pada tabel 7, terlihat bahwa waktu keadaan mantap (Ts) mengalami perubahan yaitu 19.0812 detik untuk sistem tanpa metoda LQR menjadi 0.6727 detik untuk sistem menggunakan metoda LQR dan 1.9127 detik untuk sistem dengan penambahan *stabilizer*. Waktu keadaan mantap merupakan waktu yang dibutuhkan untuk sistem mencapai keadaan stabilnya, sehingga dapat disimpulkan sistem yang menggunakan metoda LQR memiliki waktu keadaan mantap yang lebih cepat dibandingkan sistem lainnya.

Selain performansi lingkaran terbuka dan performansi lingkaran tertutup, pada domain waktu juga dapat menganalisa kestabilan sistem menggunakan persamaan karakteristik dari fungsi alih sistem lingkaran tertutup. Pada tabel 4.20 memperlihatkan perbandingan sistem tanpa metoda LQR, sistem dengan metoda LQR, dan sistem dengan penambahan *stabilizer*

berdasarkan analisa kestabilan menggunakan persamaan karakteristik. Tabel 8. Analisa Kestabilan dalam Domain Waktu Menggunakan Persamaan Karakteristik.

Kriteria	Tanpa Metoda LQR	Dengan Metoda LQR	Dengan Penambahan Stabilizer
Akar Persamaan Karakteristik	$S_1 = -0.2020 + i4.4800$ $S_2 = -0.2020 - i4.4800i$ $S_3 = -16.5000 + i0.4680$ $S_4 = -16.5000 - i0.4680$	$S_1 = -4.85 + 5.75i$ $S_2 = -4.85 - 5.75i$ $S_3 = -1.13$	$S_1 = -2.0800$ $S_2 = -4.6500 + i15.2000$ $S_3 = -4.6500 - i15.2000$ $S_4 = 19.4000$ $S_5 = -103.0000$
Faktor Redaman (ζ)	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 0.0451 Untuk akar s_3 dan s_4 sebesar 1.0000	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 0.644 Untuk akar s_3 dan s_4 sebesar 1.0000	Untuk akar $s_1, s_4,$ dan s_5 sebesar 1.0000 Untuk s_2 dan s_3 sebesar 0.2920
Nilai Frekuensi Alamiah Tidak Teredam (ω_n)	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 4.4800 rad/detik Untuk akar s_3 dan s_4 sebesar 16.6000 rad/detik	Untuk akar s_1 dan s_2 sebesar 7.52 rad/detik Untuk akar s_3 sebesar 6.7300 rad/detik Untuk akar s_3 sebesar 1.13	Untuk s_1 sebesar 2.0800 rad/detik Untuk s_2 dan s_3 sebesar 15.9000 rad/detik Untuk s_4 dan s_5 masing-masing sebesar 19.4000 rad/detik dan 103.0000 rad/detik

V. Kesimpulan dan saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan keseluruhan hasil analisa yang telah dilakukan pada skripsi ini, maka dapat disimpulkan bahwa penerapan kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) terhadap sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan baik. Dengan melihat hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil optimasi dengan menggunakan metode LQR memiliki respon yang paling optimal pada nilai bobot matrik $Q = [0.1 \ 0.01 \ 100]$ dan $R = 1$
2. Pengaruh pengendalian optimal dengan metode LQR pada pengontrolan sistem *Automatic Voltage Regulator* (AVR) menghasilkan respon waktu yang lebih cepat. Perbandingan waktu pencapaian keadaan mantap (*time settling*) sebelum dan sesudah menggunakan umpan balik LQR, dapat dilihat pada table 9.

	T_s (<i>time settling</i>)
Tanpa metode LQR	19.0812 detik
Dengan metode LQR	0.8866 detik
Dengan <i>stabilizer</i>	1.9127 detik

5.2 Saran

1. Pemilihan matrik bobot Q dan R pada skripsi ini dilakukan dengan cara coba-coba (*trialand error*), yang membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mendapatkan hasilnya. Oleh sebab itu, perlu dikembangkan metode yang lebih baik untuk mendapatkan nilai matrik Q dan R tersebut.

VI. Referensi

1. Anggraini, Novi, " *Desain Kontroler Menggunakan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR) untuk Pengontrolan Suhu Uap pada Solar Boiler Once Trough Mode* ", Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, 2005.
2. Amin Setiadji, " *Implementasi Kontroler PID Pada AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Pengaturan Tegangan Eksitasi Generator Sinkron 3 Fasa* ", Politeknik Elektronika Negeri Surabaya - Institute Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
3. Aisjah, Aulia S, " *A Study of Axtended Fuzzy Logic Control for Ship Manouvering Based on Tracking LQG/LTR Control* ", digilib.its.ac.id, 2010.
4. Dukupati R.V, " *Analysis and Design of Control System Using Matlab* ", New Age International Publishers, India, 2006
5. Dibyo Laksono, Heru, " *Analisa dan Perancangan Sistem Kendali Dengan Matlab* ", CV Ferila, Padang, 2011
6. Kundur, Prabha, " *Power System Stability and Control* ", Prentice Hall, New Jersey, 1993.
7. Karnoto, Muhammad Facta, Aris Triwiyatno, " *Perbandingan Pengaruh Sistem Eksitasi Konvensional dan Non Konvensional Terhadap Kestabilan Generator Untuk Meningkatkan Keandalan Sistem Kelistrikan* ", Proceedings Seminar Sistem Tenaga Elektrik, Bandung, ITB, 2000.
8. NW, Endriyanto, " *Perencanaan Optimal Sistem Kontrol AVR (Automatic Voltage Regulator) untuk Memperbaiki Kestabilan Tegangan dengan Menggunakan Algoritma Genetik* ", Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.
9. Ogata, Katsuhiko, " *Modern Control Engineering* ", Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2002.