

e-ISSN :

p-ISSN :

TEVA

Technology and Energy Innovation

A BOOK OF INERGCY SERIES



EDISI I • JILID B

Tahun 2022

PUBLISHED BY :
DEPARTMENT OF MARINE ELECTRICAL ENGINEERING
SHIPBUILDING INSTITUTE OF POLYTECHNIC SURABAYA

BUNGA RAMPAI
TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM
KENDALI

Edisi 1 — Jilid B (2022)

Pengarah

Anggara Trisna Nugraha

Editor

Tim Penyunting TEVA

Penyusun

Muhammad Rizki Mubarrok • Mujtaba Fa'akuli Zazila1 • Novalliansyah Ramadhan1 • Novaly
Arya Pratama • Nur Hasyim As'ari • Dan Linear Quadratic Tracking (LQT) • Nurahmad Hadi
Cahyadi1 • Perdinan Setia Budi1 • Rafli Darrylivan Putra Hadisyah

Penerbit TEVA — Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

BUNGA RAMPAI TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM KENDALI

Edisi 1, Jilid B (Tahun 2022)

Hak cipta © 2022 pada penulis.

Diterbitkan oleh TEVA (Technology and Energy Innovation), Himpunan Mahasiswa Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Alamat: Jalan Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia.

Karya tulis dalam buku ini merupakan hasil kegiatan ilmiah INERGYC (Lomba Karya Tulis Ilmiah) yang diselenggarakan oleh TEVA.

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

Cetakan Pertama, 2022.

Ukuran: 21 × 29,7 cm (A4).

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas selesainya penyusunan buku bunga rampai ini. Buku ini menghimpun karya tulis ilmiah mahasiswa di bidang elektronika daya dan sistem kendali yang dikembangkan melalui kegiatan INERGYC.

Edisi 1 Jilid B tahun 2022 ini memuat 11 bab yang membahas beragam topik, mulai dari pengaturan tegangan AC, rangkaian penyearah (rectifier), hingga penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID pada motor listrik.

Kami menyampaikan terima kasih kepada Bapak Anggara Trisna Nugraha selaku pengarah, para penyunting, serta seluruh penulis yang telah berkontribusi. Semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa dan praktisi di bidang teknik kelistrikan.

Surabaya, 2022

Tim Penyusun

PRAKATA

Perkembangan teknologi elektronika daya dan sistem kendali menuntut pemahaman yang kuat terhadap konsep dasar sekaligus kemampuannya menerapkannya pada permasalahan nyata. Bunga rampai ini disusun sebagai wadah bagi mahasiswa untuk menuangkan gagasan dan hasil kajian mereka.

Setiap bab ditulis oleh penulis yang berbeda dengan gaya dan pendekatan masing-masing, namun tetap berada dalam payung tema besar elektronika daya dan kendali sistem. Pembaca dapat menelusuri setiap bab secara mandiri sesuai kebutuhan.

Kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan demi penyempurnaan edisi-edisi berikutnya.

DAFTAR ISI

Kata Pengantar.....	4
Prakata	5
Daftar Isi	6
Daftar Gambar	7
Daftar Tabel.....	12
Daftar Singkatan	13
BAB I Perbandingan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Respons Keluaran Motor DC Maxon Ec-i.....	14
BAB II Kajian Pemodelan Motor DC 42D29Y401 pada Optimalisasi Sistem dengan Pendekatan LQR dan LQT	26
BAB III Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) Motor DC MY1016Z2.....	37
BAB IV Perbandingan Kontrol Optimalisasi pada Motor DC MG-16 pada Sirkuit LQR dan LQT.....	48
BAB V Respons Keluaran Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 417-9661.....	59
BAB VI Rangkaian Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) pada Motor DC.....	71
BAB VII Implementasi Pendekatan LQR dan LQT pada Kajian Pemodelan Optimalisasi Sistem pada Plant Motor DC IG-22GM.....	81
BAB VIII Single-Phase Uncontrolled Full-Wave Rectifier in a Three-Phase AC Motor	92
BAB IX Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) Motor DC VD-49.15-K1-B00	100
BAB X Perbandingan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Respons Keluaran Motor DC Maxon Ec-i.....	110
BAB XI Pemodelan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) pada Motor DC.....	121
Glosarium.....	131
Indeks	132
Biografi Penulis	134

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Datasheet Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt	16
Gambar 1.2	Diagram Blok LQR	18
Gambar 1.3	Diagram Blok LQR	20
Gambar 1.4	Diagram Blok Orde Dua Motor DC	20
Gambar 1.5	Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt	21
Gambar 1.6	Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise	21
Gambar 1.7	Diagram Blok LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt.....	21
Gambar 1.8	Diagram Blok LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise.....	21
Gambar 1.9	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt pada Permodelan Matematis Orde Dua.....	21
Gambar 1.10	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR	22
Gambar 1.11	Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR dan Tidak	22
Gambar 1.12	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Metode LQR Saat Diberikan Noise	23
Gambar 1.13	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Metode LQT	23
Gambar 1.14	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Metode LQT Saat Diberikan Noise	23
Gambar 1.15	Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQT dan Tidak	23
Gambar 2.1	Bagian-Bagian Motor DC	27
Gambar 2.2	Sistem Kendali Loop Terbuka	27
Gambar 2.3	Sistem Kendali Loop Tertutup.	28
Gambar 2.4	Flowchart Tahapan Simulasi	28
Gambar 2.5	.....	29
Gambar 2.6	.....	29
Gambar 2.7	Blok Fungsi Alih Sensor Arus.....	30
Gambar 2.8	Blok Fungsi Alih Sensor Kecepatan	30
Gambar 2.9	Rangkaian Motor DC 42D29Y401 Orde 1	32
Gambar 2.10	Rangkaian LQR	32
Gambar 2.11	Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise	32
Gambar 2.12	Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise.....	32
Gambar 2.13	Rangkaian LQT.....	33
Gambar 2.14	Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise	33
Gambar 2.15	Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise.....	33
Gambar 2.16	Tampilan Step Response SISO	33
Gambar 2.17	Tampilan Step Response LQR tanpa Noise	33
Gambar 2.18	Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	34

Gambar 2.19	Tampilan Step Response LQT tanpa Noise	34
Gambar 2.20	Tampilan Step Response LQT dengan Noise.....	34
Gambar 3.1	Motor DC MY1016Z2.....	40
Gambar 3.2	Tampilan MATLAB.....	40
Gambar 3.3	Tampilan Simulink MATLAB	41
Gambar 3.4	Datasheet Motor DC MY1016Z2	41
Gambar 3.5	.....	43
Gambar 3.6	.....	43
Gambar 3.7	.....	43
Gambar 3.8	.....	43
Gambar 3.9	.....	44
Gambar 3.10	.....	44
Gambar 3.11	.....	44
Gambar 3.12	.....	44
Gambar 3.13	Tampilan Step Response.....	44
Gambar 3.14	Tampilan Step Response LQR tanpa Noise	44
Gambar 3.15	Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	45
Gambar 3.16	.....	45
Gambar 4.1	Datasheet Motor DC MG-16B	50
Gambar 4.2	Diagram Blok LQR	51
Gambar 4.3	Diagram Blok LQT	53
Gambar 4.4	Diagram Blok Orde Dua Motor DC.....	54
Gambar 4.5	Diagram Blok LQR Motor DC MG-16B.....	54
Gambar 4.6	Diagram Blok LQR Motor DC MG-16B dengan Noise.....	54
Gambar 4.7	Diagram Blok LQT Motor DC MG-16B.....	55
Gambar 4.8	Diagram Blok LQT Motor DC MG-16B dengan Noise.....	55
Gambar 4.9	Hasil Respon Motor DC MG-16B pada Permodelan Matematis Orde Dua	55
Gambar 4.10	Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQR	55
Gambar 4.11	Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQR Saat Diberikan Noise	56
Gambar 4.12	Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQT.....	56
Gambar 4.13	Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQT Saat Diberikan Noise	56
Gambar 5.1	Diagram Blok Sistem	61
Gambar 5.2	Datasheet Motor DC RS PRO 417-9661	62
Gambar 5.3	Diagram Blok Linear Quadratic Regulation (LQR).....	64
Gambar 5.4	Rangkaian Orde Satu Motor DC.....	66
Gambar 5.5	Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 417-9661.....	66
Gambar 5.6	Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Noise.....	66
Gambar 5.7	Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 417-9661	66
Gambar 5.8	Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Noise.....	67

Gambar 5.9 Hasil Respon Motor DC 37-GB500 Orde Satu	67
Gambar 5.10 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQR	67
Gambar 5.11 Hasil Perbandingan Respon Motor DC 37-GB500 dengan Metode LQR dan Tidak Menggunakan Metode.....	68
Gambar 5.12 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQR saat Diberikan Noise	68
Gambar 5.13 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQT	68
Gambar 5.14 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQT dan Tidak Menggunakan Metode	68
Gambar 5.15 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQT saat Diberikan Noise	69
Gambar 6.1 Blok diagram proses identifikasi suatu sistem.	73
Gambar 6.2 Diagram blok identifikasi plant dengan metode open loop [8]	73
Gambar 6.3.....	75
Gambar 6.4.....	75
Gambar 6.5.....	75
Gambar 6.6.....	75
Gambar 6.7.....	75
Gambar 6.8.....	76
Gambar 6.9.....	76
Gambar 6.10.....	76
Gambar 6.11.....	76
Gambar 6.12.....	76
Gambar 6.13.....	77
Gambar 6.14.....	77
Gambar 6.15.....	77
Gambar 6.16.....	77
Gambar 6.17.....	77
Gambar 6.18.....	77
Gambar 6.19.....	77
Gambar 6.20.....	77
Gambar 6.21.....	78
Gambar 6.22.....	78
Gambar 6.23.....	78
Gambar 6.24.....	78
Gambar 6.25.....	78
Gambar 6.26.....	78
Gambar 6.27.....	78
Gambar 6.28.....	78
Gambar 6.29.....	78

Gambar 7.1	Bagian-Bagian Motor DC [5].....	82
Gambar 7.2	Sistem Kendali Loop Terbuka [9].....	82
Gambar 7.3	Sistem Kendali Loop Tertutup [11].	83
Gambar 7.4	Flowchart Tahapan Simulasi	84
Gambar 7.5	Datasheet Motor DC tipe IG 22GM [18].....	84
Gambar 7.6	Rangkaian Motor DC IG 22GM Orde 1	87
Gambar 7.7	Rangkaian LQR	87
Gambar 7.8	Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise	87
Gambar 7.9	Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise	87
Gambar 7.10	Rangkaian LQR	87
Gambar 7.11	Rangkaian LQR	87
Gambar 7.12	Rangkaian LQR	87
Gambar 7.13	Tampilan Step Response Motor DC EC-i 40 Orde 1	88
Gambar 7.14	Tampilan Step Response LQR tanpa Noise	88
Gambar 7.15	Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	88
Gambar 7.16	Simulasi Rangkaian LQT.....	89
Gambar 7.17	Rangkaian LQT dengan noise	89
Gambar 8.1	.....	94
Gambar 8.2	.....	94
Gambar 8.3	.....	95
Gambar 8.4	.....	95
Gambar 8.5	.....	95
Gambar 8.6	.....	95
Gambar 8.7	.....	95
Gambar 8.8	.....	95
Gambar 8.9	.....	96
Gambar 8.10	.....	97
Gambar 8.11	Graph of Input Frequency Against V/f Ratio Constant FIGURE 4.7. Graph of Input Frequency to Output Voltage in Single Value In Testing Single Phase Inverter Without Load Phase Inverter Testing with Load.....	97
Gambar 8.12	.....	98
Gambar 8.13	.....	98
Gambar 8.14	.....	98
Gambar 9.1	Blok diagram proses identifikasi suatu sistem.	102
Gambar 9.2	Diagram blok identifikasi plant dengan metode open loop	102
Gambar 9.3	Datasheet Motor DC tipe VD-49.15-K1-B00	103
Gambar 9.4	Tampilan MATLAB.....	104
Gambar 9.5	Tampilan Simulink MATLAB	104
Gambar 9.6	rangkaian simulink LQR motor DC	106

Gambar 9.7	rangkaian simulink LQR motor DC tanpa noise	106
Gambar 9.8	rangkaian Simulink LQR motor DC dengan noise	106
Gambar 9.9	rangkaian Simulink LQT motor DC tanpa noise	106
Gambar 9.10	rangkaian Simulink LQT motor DC dengan noise.....	106
Gambar 9.11	Grafik Output Rangkaian LQR Tanpa Noise	106
Gambar 9.12	Grafik Output Rangkaian LQR dengan Noise.....	106
Gambar 9.13	Grafik Output Rangkaian LQT Tanpa Noise	106
Gambar 9.14	Grafik Output Rangkaian LQT dengan Noise	106
Gambar 10.1	Datasheet Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt	112
Gambar 10.2	Diagram Blok LQR	114
Gambar 10.3	Diagram Blok Orde Satu Motor DC.....	116
Gambar 10.4	Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt.....	116
Gambar 10.5	Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan noise	117
Gambar 10.6	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt pada Permodelan Matematis Orde Satu	117
Gambar 10.7	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR	117
Gambar 10.8	Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR dan Tidak	118
Gambar 10.9	Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Mtode LQR Saat Diberikan Noise	118
Gambar 11.1	.....	123
Gambar 11.2	.....	126
Gambar 11.3	.....	126
Gambar 11.4	.....	127
Gambar 11.5	.....	127
Gambar 11.6	.....	128

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Spesifikasi Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt.....	16
Tabel 2.1	Daftar Komponen Simulink.....	32
Tabel 2.2	Data Hasil Simulasi	34
Tabel 3.1	Metode Penyelesaian Masalah Motor DC.....	39
Tabel 3.2	.....	43
Tabel 3.3	.....	44
Tabel 5.1	.....	61
Tabel 7.1	Spesifikasi Motor DC EC-i 40.....	84
Tabel 7.2	Daftar Komponen	86
Tabel 7.3	Data Simulasi Optimasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC IG 22GM.....	89
Tabel 9.1	.....	104
Tabel 10.1	Spesifikasi Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt.....	112

DAFTAR SINGKATAN

AC	Alternating Current (arus bolak-balik)
DC	Direct Current (arus searah)
LQR	Linear Quadratic Regulator
LQT	Linear Quadratic Tracking
PID	Proportional Integral Derivative
PWM	Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distortion
SCR	Silicon Controlled Rectifier
RMS	Root Mean Square
RPM	Rotation Per Minute
SISO	Single Input Single Output
PSIM	Power Simulation (perangkat lunak simulasi elektronika daya)
MATLAB	Matrix Laboratory
PPNS	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
TEVA	Technology and Energy Innovation
INERGYC	Kompetisi Karya Tulis Ilmiah yang diselenggarakan TEVA
LKTI	Lomba Karya Tulis Ilmiah

BAB I

Perbandingan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Respons Keluaran Motor DC Maxon Ec-i

Oleh: **Muhammad Rizki Mubarrok**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: LQR, LQT, Motor DC, Noise, Optimasi

DC motor is an electronic component that is very common in everyday life. In general, DC motors slow down under load, slow down, and don't run at a constant speed. DC motor speed can be controlled by changing the input voltage. Therefore, a controller is needed to maintain the speed of the DC motor so that it remains stable along with changes in load. One of the methods used to control DC motors so that the motor output becomes better is LQR (Linear Quadratic Regulator) and LQT (Linear Quadratic Tracker). The function of LQR is to make the response of the motor closer to the desired set point and reduce the overshoot and undershoot that occur in the system. LQT is a linear control system whose system output follows the desired reference. The LQR method has the same response results as the desired set point without overshoot and undershoot. When without using the LQR method, the motor response is far from the desired set point value and the response takes quite a long time. The motor response with the LQT method is faster, namely ± 0.5 seconds, but there is an overshoot and the response experiences a small ripple. The LQT method is considered better than the LQR method because the response is faster than the LQR method to achieve set points on the Maxon EC-I 40 70Watt DC motor.

Abstrak

Motor DC merupakan suatu komponen elektronika yang sangat banyak ditemui pada kehidupan sehari-hari. Secara umum, motor DC melambat di bawah beban, melambat, dan tidak berjalan pada kecepatan konstan. Kecepatan motor DC dapat dikontrol dengan mengubah tegangan input. Oleh karena itu, diperlukan pengontrol untuk menjaga kecepatan motor DC agar tetap stabil seiring dengan perubahan beban. Salah satu metode yang digunakan untuk pengontrolan motor DC agar output motor menjadi lebih baik yaitu LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracker). Fungsi dari LQR yaitu agar respon dari motor lebih mendekati set poin yang diinginkan serta mengurangi overshoot dan undershoot yang terjadi pada sistem. LQT merupakan sistem pengaturan linear yang output sistem mengikuti referensi yang diinginkan. Metode LQR memiliki hasil respon yang

sama dengan set poin yang diinginkan tanpa adanya overshoot dan undershoot. Saat tanpa menggunakan metode LQR, respon motor jauh dari nilai set poin yang diinginkan serta respon membutuhkan waktu yang cukup lama. Respon motor dengan metode LQT menjadi lebih cepat yaitu ± 0.5 detik, namun terdapat overshoot dan respon mengalami ripple kecil. Metode LQT dinilai lebih baik dibandingkan metode LQR karena respon yang lebih cepat daripada metode LQR untuk mencapai set poin pada motor DC Maxon EC-I 40 70Watt.

PENDAHULUAN

Motor DC merupakan suatu komponen elektronika yang sangat banyak ditemui pada kehidupan sehari-hari. Motor listrik adalah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau gerak. Prinsip kerja motor DC adalah berusaha agar arah medan magnet rotor selalu berlawanan dengan arah medan magnet *stator* yang saling tolak menolak. Kumparan ditolak oleh arus berenergi, menciptakan medan magnet dalam arah tertentu di sekitar kumparan jangkar. Secara umum, motor DC melambat di bawah beban, melambat, dan tidak berjalan pada kecepatan konstan. Kecepatan motor DC dapat dikontrol dengan mengubah tegangan *input*. Misalnya, jika beban bertambah dan motor DC melambat, solusinya adalah dengan menambah kecepatan lagi dengan meningkatkan nilai tegangan *input* ke motor DC. Oleh karena itu, diperlukan pengontrol untuk menjaga kecepatan motor DC agar tetap stabil seiring dengan perubahan beban. Fungsi dasar dari pengontrol adalah untuk membandingkan nilai sebenarnya dari output dari sebuah plant, dengan masukan referensi, (nilai yang diinginkan), tentukan kesalahan, dan hasilkan sinyal kontrol yang akan mengurangi kesalahan ke nilai yang mendekati nol.

Salah satu metode yang digunakan untuk pengontrolan motor DC agar *output* motor menjadi lebih baik yaitu LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracker*). Fungsi dari LQR yaitu agar respon dari motor lebih mendekati *set poin* yang diinginkan serta mengurangi *overshoot* dan *undershoot* yang terjadi pada sistem. Metode pengontrol LQR memiliki sifat-sifat seperti ketahanan, keandalan, pembangkitan penguatan statis, dll. Dengan menggunakan metode kontrol optimal ini dalam sistem besar dengan banyak input, kontrol efisien beberapa keluaran dicapai secara andal dan ekonomis. Teknik regulator kuadrat linier digunakan untuk merancang pengontrol optimal yang meminimalkan fungsi biaya yang diberikan, indeks kinerja.

LQT merupakan sistem pengaturan linear yang *output* sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang diinginkan (Akbar et al., 2016). *Linear quadratic tracker* (LQT) adalah mekanisme kontrol pelacakan berbasis model yang menggunakan *affine state-feedback*

untuk memberikan upaya pengendalian yang optimal. LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi (Saleem et al., 2018). Biasanya LQT digunakan untuk masalah optimasi pada sistem yang berkaitan dengan *tracking*.

Dengan dua metode optimasi tersebut, pada Mata Kuliah Optimasi Sistem Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dilakukan percobaan bagaimana pengaruh metode LQR dan LQT terhadap respon *output* yang dihasilkan oleh suatu motor DC. Percobaan juga dilakukan dengan menambahkan *noise* pada sistem untuk dilakukan pengamatan apakah penambahan metode LQR dan LQT respon motor tidak akan terpengaruh oleh *noise* yang diberikan atau respon motor tetap terpengaruh oleh *noise* yang diberikan. Serta bagaimana perbedaan antara metode optimasi LQR dengan LQT pada suatu jenis motor DC yang sama.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Identifikasi Motor DC

Pada tahapan ini dilakukan identifikasi mengenai spesifikasi Motor DC yang akan dilakukan penelitian. Bentuk Motor DC yang dilakukan penelitian yaitu berbentuk motor *brushless* dengan nama dan tipe Maxon EC-I 40 70 Watt. Berikut merupakan *datasheet* dari Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt.

		with Hall sensors	449469
Motor Data			
Values at nominal voltage			
1	Nominal voltage	V	18
2	No load speed	rpm	10100
3	No load current	mA	354
4	Nominal speed	rpm	8230
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	68.7
6	Nominal current (max. continuous current)	A	3.93
7	Stall torque ¹	mNm	876
8	Stall current	A	52.5
9	Max. efficiency	%	84
Characteristics			
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	0.343
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.18
12	Torque constant	mNm/A	16.7
13	Speed constant	rpm/V	572
14	Speed/torque gradient	rpm/mNm	11.7
15	Mechanical time constant	ms	2.98
16	Rotor inertia	gcm ²	24.2

Gambar 1.1 Datasheet Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Sumber gambar: Datasheet Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Dari Gambar 1 tersebut dapat diambil data mengenai spesifikasi dari Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt yang akan disajikan pada tabel 1.

Tabel 1.1 Spesifikasi Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Model	Data	Satuan
Nominal voltage	18	V
No load speed	10100	rpm
No load current	354	mA
Nominal speed	8230	rpm
Nominal torque	68.7	mNm
Nominal current	8.93	A
Stall torque	876	mNm
Stall current	52.5	A
Max efficiency	84	%
Terminal Resistance	0.343	ohm
Terminal inductance	0.18	mH
Torque constant	16.7	mNm/A
Speed constant	572	rpm/mNm
Rotor inertia	24.2	gcm ²

Dari tabel 1 diatas kemudian dilakukan identifikasi mengenai motor DC yang digunakan melalui perhitungan matematis yang membutuhkan nilai-nilai variabel yang di dapatkan dari data tabel spesifikasi motor DC.

2.2 Permodelan Motor DC Orde 2

Model motor DC orde dua secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (1)$$

Keterangan :

ζ = Rasio Redaman (dB)

ω_n = Frekuensi Alami (rad/s)

Dimana :

$$\omega_n = 2\pi f \quad (2)$$

$$\omega_n = 2 \times 3,14 \times 50 = 314 \text{ rad/s} \quad (3)$$

Sehingga perhitungan pada motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt berdasarkan spesifikasi dari *datasheet* yang diperoleh adalah :

$$G(s) = 3142s^2 + 2 \times 0.1 \times 314s + 3142 \quad (4)$$

(3)

$$Gs = 98596s^2 + 62.8s + 98596 \quad (5)$$

(4)

2.3 Kendali Optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-keadaan (*state space*). Karena pendekatan sederhana dari metode ruang keadaan, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini. Persamaan ruang keadaan untuk sistem secara umum ditulis sebagai:

$$X = AX + Bu \quad (6)$$

(5)

Pada prinsipnya, metode LQR mencari suatu sinyal control u yang meminimumkan indeks performansi J .

$$J = XTQx + uTRadt \quad (7)$$

(6)

LQR menemukan hukum input kontrol optimal u^* . Kendala yang disebabkan oleh matriks Q dan R meminimalkan indeks kinerja. Hukum kontrol optimal loop tertutup didefinisikan sebagai:

$$u^* = -Kx \quad (8)$$

(7)

Di mana K mewakili matriks gain umpan balik yang optimal. Matriks gain bekerja untuk meminimalkan indeks kinerja. Ini menentukan penempatan kutub loop tertutup yang tepat untuk meminimalkannya. Matriks penguatan umpan balik K bergantung pada matriks A , B , Q dan R . Umpan balik gainmatrix k diperoleh dengan menyelesaikan Algebraic Riccati Equation (ARE), P mendefinisikan matriks simetris dan matriks definit positif yang diperoleh solusi dari ARE didefinisikan sebagai:

$$ATP + PA - PBR - 1BTP + Q = 0 \quad (9)$$

(8)

$$K = AX - BKx = A - BKx \quad (10)$$

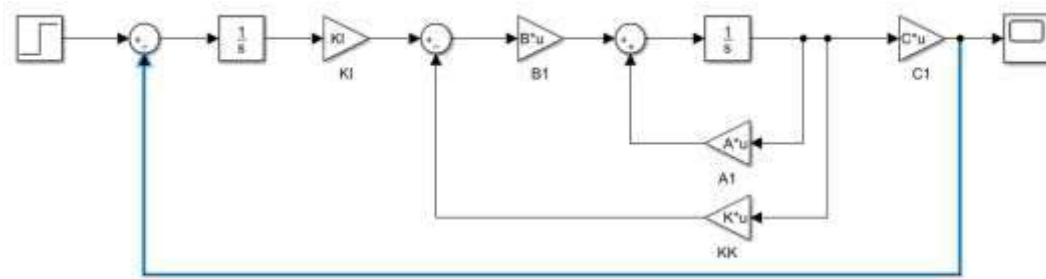
(9)

Substitusi persamaan (8) dan (9) menjadi

$$x = AX - BKx = A - BKx \quad (11)$$

(10)

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR di tunjukan oleh Gambar 2.



Gambar 1.2 Diagram Blok LQR

Sumber gambar: Penulis

2.4 Program Matlab LQR pada Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J=0.00000242 ; b=0.1 ; K=0.0167 ; R=0.343 ; L =0.00018 ;

% J = Momen inertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=

% Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

AA = [A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J)

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix};$$

$$R = [1];$$

$$K_{lqr} = \text{lqr}(AA, BB, Q, R)$$

$$KI2 = -K_{lqr}(3);$$

$$KK2 = [K_{lqr}(1) \ K_{lqr}(2)];$$

2.5 Kendali Optimal *Linear Quadratic Tracker* (LQT)

LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi, $r(t)$. Vektor $r(t)$ dinyatakan dalam :

$$r(t) = [V_{ref} \ 0]^T \quad (12)$$

$$V_{ref} \quad (13)$$

Dimana, adalah sinyal tegangan referensi yang bervariasi terhadap waktu. Skema LQT meminimalkan indeks kinerja kuadrat untuk menghasilkan keputusan kontrol yang optimal yang dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut (Saleem et al., 2018).

$$J = \int_0^T [(x^T - r^T)TQ(x - r) + dt]TR dt \quad (14)$$

Dimana, Q dan R adalah keadaan antara dan control matriks pembobotan, masing-masing. Mereka dipilih sedemikian rupa; $Q = Q^T \geq 0$ dan $R = R^T > 0$. Karena sifat kuadrat dari fungsi *cost*, sinyal kontrol sebanding dengan variasi kuadrat persamaan. Jadi, jika *state-variations* besar; minimalisasi dan, karenanya, tingkat konvergensi lebih cepat.

Keputusan kontrol affine yang optimal dievaluasi melalui ekspresi matematika yang ditunjukkan pada (Saleem et al., 2018),

$$\dot{x} = -Kx + K_{ff}v_{ref}(t) \quad (15)$$

Dimana,

$$K = R^{-1}B^T P \quad (16)$$

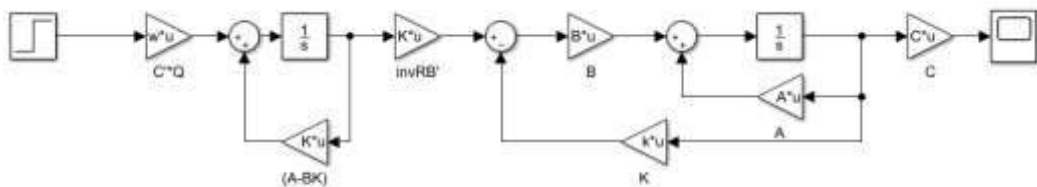
$$K_{ff} = R^{-1}B^T((A - BK)^T)^{-1}HTQ \quad (17)$$

Vektor penguatan, K , membantu merelokasi kutub sistem untuk mensintesis kontroler yang optimal. Perolehan optimal vektor bergantung pada matriks definit positif simetris, P , ditunjukkan pada persamaan (14). Matriks, P , untuk sistem yang diberikan dapat diperoleh dengan memecahkan Persamaan Aljabar Riccati, ditunjukkan pada.

$$ATP+PA-PBR-1BTP+HTQH=0 \quad (18)$$

(16)

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR di tunjukan oleh Gambar 3.



Gambar 1.3 Diagram Blok LQR

Sumber gambar: Penulis

2.6 Program Matlab LQT pada Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J=0.00000242 ; b=0.1 ; K=0.0167 ; R=0.343 ; L =0.00018 ;

% J = Momeninertia , b =Rasio redam, K=konstanta, R=resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

D = 0;

Q=10000;

R=0.001;

%Perhitungan Ricatti

%S=P

[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R);

k = inv(R)*B'*S

w = C'*Q;

$$AB = (A - B * k)';$$

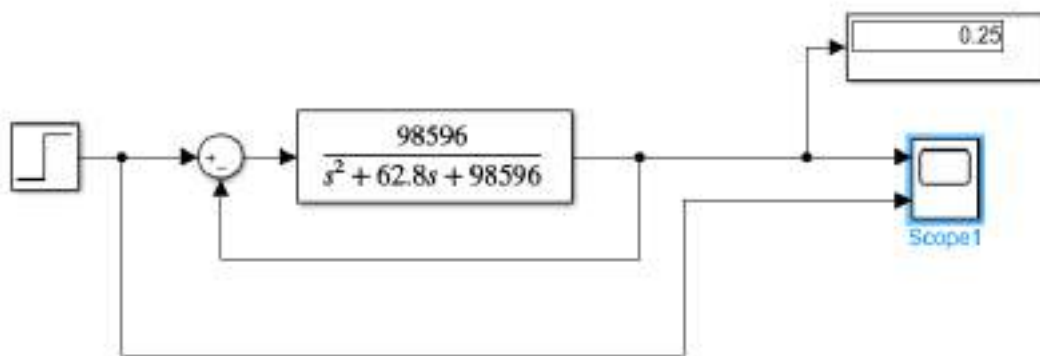
$$ABT = AB';$$

$$RB = \text{inv}(R) * B';$$

2.7 Blok Diagram Sistem

2.7.1 Blok Diagram Orde Dua Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Pada blok diagram orde satu motor bertujuan untuk mengetahui hasil respon asli dari motor DC jika motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt tanpa ditambahkan metode yang dilakukan pada *software simulink*.



Gambar 1.4 Diagram Blok Orde Dua Motor DC

Sumber gambar: Penulis

Pada gambar 3 merupakan diagram blok orde dua suatu motor DC yang terdiri dari sebuah input dan sebuah *output*. *Input* yang digunakan berjenis *step response*. *Transfer function* pada diagram tersebut dapat berisikan permodelan motor DC orde kedua. Hasil respon akan ditampilkan pada *scope* dan *display* untuk mengetahui berapa nilai maksimal respon yang dihasilkan.

A. 2.7.2 Blok Diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Pada blok diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada *software simulink*.

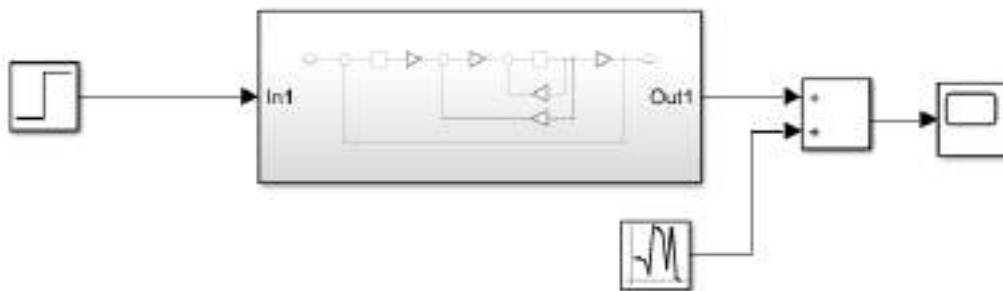


Gambar 1.5 Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Sumber gambar: Penulis

B. 2.7.3 Blok Diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise

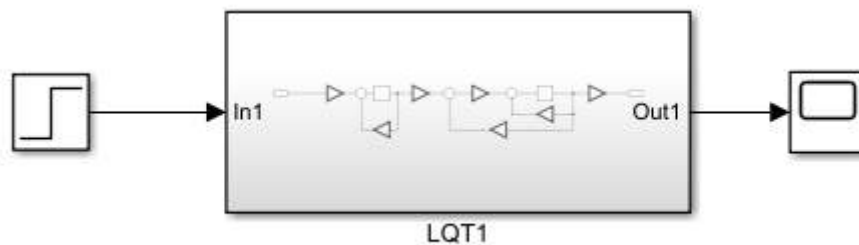
Pada blok diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan *noise* bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada *software simulink*.



Gambar 1.6 Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise

Sumber gambar: Penulis

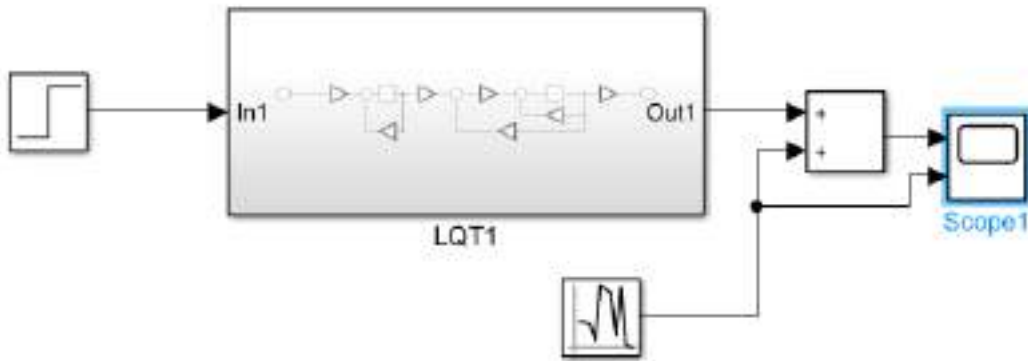
C. 2.7.4 Blok Diagram LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt



Gambar 1.7 Diagram Blok LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Sumber gambar: Penulis

D. 2.7.5 Blok Diagram LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise



Gambar 1.8 Diagram Blok LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise

Sumber gambar: Penulis

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dibahas mengenai hasil dari respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt pada model matematis orde pertama dan saat diberikan metode LQR dan LQT dengan dan tanpa *noise*. Hasil respon didapatkan dengan menggunakan simulasi pada *software* Simulink Matlab.

3.1. Hasil Respon Orde Dua Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt



Gambar 1.9 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt pada Permodelan Matematis Orde Dua

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon permodelan orde kedua yang terlihat pada gambar 9, terlihat grafik respon motor pada orde dua memiliki keluaran yang sangat jauh dari set poin yang

diinginkan. Gelombang berwarna kuning merupakan hasil respon motor sedangkan yang berwarna biru merupakan set poin yang diinginkan. Set poin yang diinginkan yaitu 0,5 sedangkan respon motor hanya berada pada nilai 0.25 dengan riak yang tinggi pada *rise time* respon motor. Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt yang diamati memiliki karakteristik linier yang ditunjukkan dengan bentuk sinyal yang tidak terdapat riak. Respon motor berada pada kondisi *steady state* pada detik ke $\pm 0,27$.

3.2. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQR



Gambar 1.10 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon permodalan gambar 11, terlihat grafik respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan menggunakan LQR memiliki keluaran yang sama dengan nilai set poin yang diinginkan. Set poin yang diinginkan yaitu 0,5, respon motor berhasil mencapai nilai set poin pada detik ke $\pm 1,2$ tanpa adanya nilai *overshoot* dan *undershoot*. Respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt menggunakan metode LQR menjadi lebih baik dibanding tanpa menggunakan metode LQR.

3.3. Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQR dan Tanpa Metode

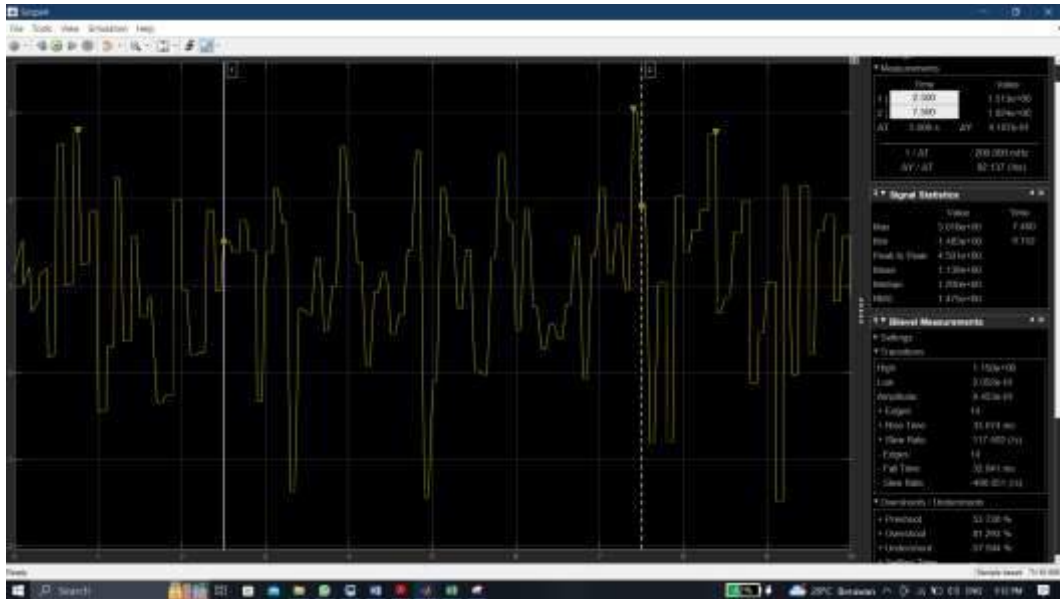


Gambar 1.11 Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR dan Tidak

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon perbandingan permodalan gambar 11, terlihat grafik respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan menggunakan LQR dan tidak menggunakan metode memiliki keluaran respon yang berbeda. Gelombang berwarna oranye merupakan set poin yang diinginkan, berwarna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQR, dan gelombang berwarna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQR. Pada gambar 11 tersebut terlihat dengan jelas respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan metode LQR memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa metode LQR. Disamping respon yang memiliki nilai sesuai dengan set poin yang diinginkan tanpa adanya *overshoot* dan *undershoot*.

3.4. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQR dengan Noise



Gambar 1.12 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Metode LQR Saat Diberikan Noise

Sumber gambar: Penulis

Dari hasil gambar 12 terlihat sinyal kuning yang merupakan hasil respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan metode LQR mengalami perubahan bentuk dari sebelum diberikan noise. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali ripple serta meniru bentuk dari sinyal noise yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linier dan jauh dari kondisi stabil atau steady state pada set poin yang telah diberikan.

3.5. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQT

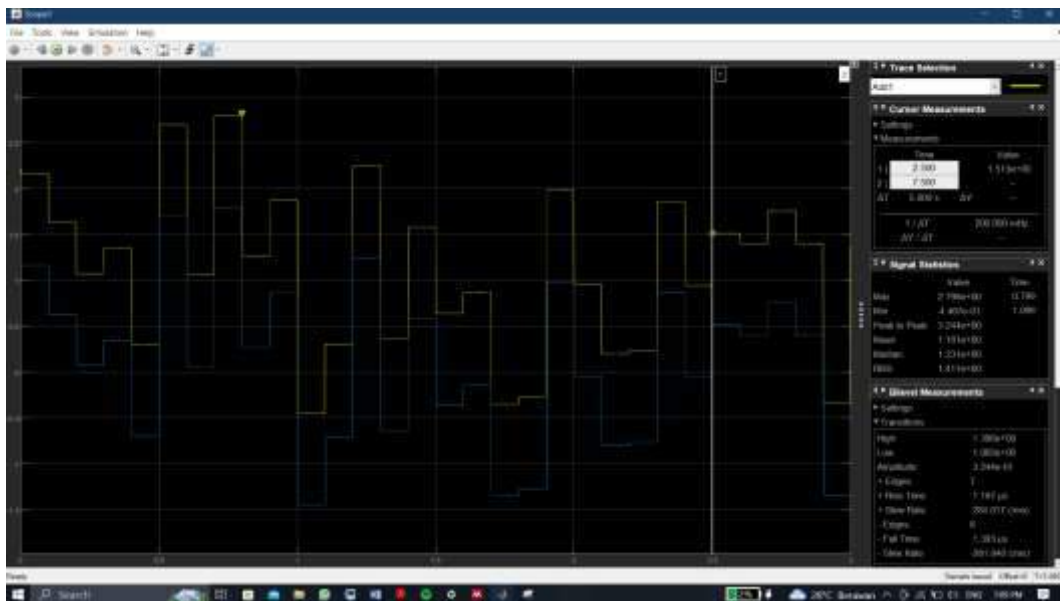


Gambar 1.13 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Metode LQT

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon permodalan gambar 13, terlihat grafik respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan menggunakan LQT memiliki keluaran yang sama dengan nilai set poin yang diinginkan yaitu 0,5 dengan waktu respon menuju *steady state* sangat cepat yaitu 8.364us. Namun, respon yang dihasilkan mengalami overshoot 4.7% dan *undershoot* 0.8%.

3.6. Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQT dan Tanpa Metode



Gambar 1.14 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Metode LQT Saat Diberikan Noise

Sumber gambar: Penulis

Dari hasil gambar 14 terlihat sinyal kuning yang merupakan hasil respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan metode LQT mengalami perubahan bentuk dari sebelum diberikan noise. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* serta meniru bentuk dari sinyal noise yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linier dan jauh dari kondisi stabil atau *steady state* pada set poin yang telah diberikan.

3.7. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQT dengan Noise



Gambar 1.15 Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQT dan Tidak

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon perbandingan permodalan gambar 15, terlihat grafik respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan menggunakan LQT dan tidak menggunakan metode memiliki keluaran respon yang berbeda. Gelombang berwarna oranye merupakan set poin yang diinginkan, berwarna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQT, dan gelombang berwarna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQT. Pada gambar 15 tersebut terlihat dengan jelas respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan metode LQT memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa metode LQT.

E. Kesimpulan

Dari hasil percobaan terhadap motor DC Maxon EC-I 40 70Watt didapatkan hasil bahwa penggunaan metode LQR memiliki hasil respon yang sama dengan *set poin* yang diinginkan tanpa adanya *overshoot* dan *undershoot*. Waktu untuk mencapai *steady state* $\pm 1,2$ lebih cepat dibandingkan tanpa metode. Saat tanpa menggunakan metode LQR, respon motor jauh dari nilai set poin yang diinginkan dan untuk mencapai nilai *steady state* membutuhkan waktu yang cukup lama. Hasil respon motor DC Maxon EC-I 40 70Watt menggunakan LQR saat diberikan noise menghasilkan respon yang mengikuti sinyal noise yang diberikan pada sistem sehingga respon yang dihasilkan tidak lagi linier. Pada saat motor DC Maxon EC-I 40 70Watt diberikan metode LQT, dengan waktu mencapai nilai *steady state* sangat cepat yaitu 8.364us. Namun, respon yang dihasilkan mengalami overshoot 4.7% dan *undershoot* 0.8%. Hasil respon motor DC Maxon EC-I 40 70Watt menggunakan LQT saat diberikan

noise menghasilkan respon yang mengikuti sinyal noise yang diberikan pada sistem sehingga respon yang dihasilkan tidak lagi linier. Metode LQT dinilai lebih baik dibandingkan metode LQR karena respon yang lebih cepat daripada metode LQR untuk mencapai set poin pada motor DC Maxon EC-I 40 70Watt.

Daftar Pustaka

- [1] Shiddiq, MJ and Nugraha, AT. "Sistem monitoring detak jantung pada sepeda treadmill." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.2, 2022
- [2] Sa'diyah, A, Nugraha, AT, Indaryani, S, As'ad, RF and Shiddiq, MJ. "RANCANG BANGUN TRIPMETER DIGITAL MENGGUNAKAN SENSOR HALL EFFECT PADA SEPEDA TREADMILL." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 39-45.
- [3] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "ANALISIS KONTROL KECEPATAN PUTARAN MOTOR SATU FASA MENGGUNAKAN PARAMETER FREKUENSI." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 103-111.
- [4] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 29-38.
- [5] Purwanti, EP, Nugraha, AT, Sobhita, RA and Rivanda, DD. "PENGENDALI MOTOR DC INDUSTRI BERBASIS PSIM DAN PENYEARAH SATU FASA."
- [6] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP and Priyambodo, D. "Design of Charger Controller on Wind Energy Power Plant With Arduino Uno Based on Pi Controller." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2021
- [7] Elmi, H, Edy, S, Juniani, AI and Amelia, P. "Utilizing total dissolved solids (TDS) sensor for dissolved solids measurement in the water." *JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization* 7.1, 2024, pp. 22-30.
- [8] Nugraha, AT, Primaningtyas, WE, Abdullah, K, Wulandari, KD, Alfanda, BD and "Pelatihan manufaktur komposit sebagai produk kerajinan tangan pada industri rumahan." *Educivilia: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat* 1.2, 2020, pp. 119-129.
- [9] Nugraha, AT. "Penggunaan Algoritma Interferensi Dan Observasi Pada Sistem Pelacak Titik Daya Maksimum Pada Sel Surya Menggunakan Konverter DC-DC Photovoltaics." *Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi* 1.1, 2021, pp. 10-19.
- [10] Riyanto, DK, Asri, P and Nugraha, AT. "Monitoring akselerasi getaran dan suhu motor induksi." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 33-39.
- [11] Cahyono, L, Apriani, M, Nugraha, AT and Utomo, AP. "Potensi Risiko Waktu Pelaksanaan Proyek Swakelola di Kabupaten Pasuruan melalui Program Kotaku Kementerian PUPR." *Jurnal Spektran* 10.2, 2022, p. 118.
- [12] Nugraha, AT, Budi, PS, Yuniza, SI and Ivannuri, F. "Penyearah Tak Terkontrol Satu Fasa Setengah Gelombang Terhadap Generator AC Tiga Fasa." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 36-44.
- [13] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Konsep Dasar Elektronika Daya." *ID Patent* EC00,202,208,819, 2022
- [14] Kurniawan, RF, Mudhoffar, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 23-32.
- [15] Febrianto, R and Nugraha, AT. "Perancangan Battery Charger Menggunakan Energi Penggerak Mikro Hidro Berbasis Arduino Uno." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021

- [16] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1, 2025, pp. 10-19.
- [17] Mu'in, M, Poetro, JE, Darmajanti, P, Ainudin, FH and Nugraha, AT. "ANALISIS ALIRAN DAYA DAN CAPASITOR PLACEMENT PADA SISTEM KELISTRIKAN PT BLAMBANGAN BAHARI SHIPYARD DENGAN SOFTWARE ETAP." *Jurnal 7 Samudra* 8.1, 2023
- [18] Nugraha, AT, Sutrisna, VHK and Shiddiq, MJ. "Comparison Of LQR And PID Control Approaches In Enhancing Stability Of DC Motor Systems." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 1.2, 2023, pp. 1-6.
- [19] Handandi, ZZ, Putra, RAPA, Raihan, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 11-16.
- [20] Najmurrokhman, A, Nugraha, A, Kusnandar, UK and Wibowo, B. "Perancangan dan Realisasi Sistem Pendeteksi Objek menggunakan Perangkat Lunak Python 2.7." *LPPM UNJANI*, 2017

BAB II

Kajian Pemodelan Motor DC 42D29Y401 pada Optimalisasi Sistem dengan Pendekatan LQR dan LQT

Oleh: **Mujtaba Fa'akuli Zazila1**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *Motor DC, Noise, Overshoot, LQR, LQT*

The control system or control system is one of the tools to control, command, and regulate the state of a system. DC motor is a device that converts direct current electrical energy into kinetic energy (motion). DC motors have two terminals, namely positive and negative terminals that require voltage to work. The use of DC motors is widely used in various modern industrial systems with specifications that vary according to the needs of an industry. The reason that makes DC motors widely used in modern industry is because DC motors are easy to regulate in a wide speed range with various speed regulation methods that can be used. The method commonly used to regulate the rotational speed of a DC motor is to use a speed control device in order to be able to adjust the needs of a tool work system. Therefore, an experiment is needed to optimize the dc motor work system through mathematical modeling and control systems using MATLAB software. In this problem, the optimization system used is the LQR (Linear Quadratic Regulator) and LQT (Linear Quadratic Tracking) methods so that the system can work optimally. Therefore, in this study, modeling and simulation of DC motor models equipped with optimization circuits and not were carried out

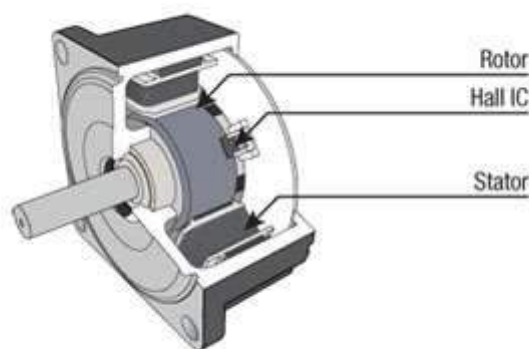
Abstrak

Sistem kendali atau sistem kontrol (*control system*) adalah salah satu alat untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan dari suatu sistem. Motor DC merupakan alat yang merubah energi listrik arus searah menjadi energi kinetik (*motion*). Motor DC memiliki dua terminal yaitu terminal positif dan negatif yang memerlukan tegangan untuk dapat bekerja. Penggunaan motor DC marak digunakan di berbagai sistem industri modern dengan spesifikasi yang bervariasi menyesuaikan kebutuhan pada suatu industri. Alasan yang menjadikan motor DC banyak digunakan pada industri modern karena motor DC mudah diatur dalam suatu rentang kecepatan yang luas dengan berbagai metode pengaturan kecepatan yang dapat digunakan. Metode yang biasa digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor DC yaitu menggunakan *speed control device* agar dapat menyesuaikan

kebutuhan suatu sistem kerja alat. Oleh karena itu, diperlukan percobaan untuk mengoptimalkan sistem kerja motor dc melalui pemodelan matematis dan sistem kendali dengan menggunakan bantuan software matlab. Pada permasalahan ini Sistem Optimasi Yang di gunakan yaitu metode LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) agar sistem dapat bekerja dengan optimal. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi pemodelan motor DC yang dilengkapi oleh rangkaian optimasi dan tidak..

PENDAHULUAN

Motor DC (*Direct Current*) atau motor arus searah merupakan motor yang mudah dalam pengaplikasiannya. Karena kemudahannya, motor DC sering digunakan untuk berbagai macam keperluan, seperti pada industri, peralatan rumah tangga, hingga ke mainan anak-anak maupun sebagai piranti pendukung sistem instrument elektronik. Motor DC merupakan motor dengan arus searah yang memiliki dua terminal dan memerlukan tegangan arus searah atau DC (*Direct Current*) untuk menggerakannya. Motor DC (*Direct Current*) dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Kebanyakan motor DC (*Direct Current*) beroperasi saat terjadi interaksi antara medan magnet dengan konduktor, pembawa arus untuk menghasilkan putaran motor. Motor DC sendiri memiliki komponen penyusun seperti rotor dan stator.



Gambar 2.1 Bagian-Bagian Motor DC

Dengan kebutuhan industri yang sangat tinggi terhadap motor DC maka diperlukan penerapan optimasi sistem kendali yang merupakan suatu proses analisis & perhitungan untuk mendapatkan solusi yang optimum. Sistem kendali merupakan suatu proses pengaturan/pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel, parameter) sehingga berada pada suatu harga atau dalam rangkuman harga. Dalam istilah lain disebut

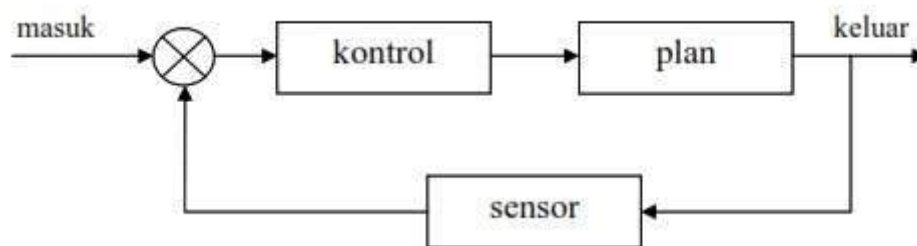
juga teknik pengaturan, sistem pengendalian atau sistem pengontrolan. Ditinjau dari segi peralatan dan Instrument yang digunakan, sistem kendali terdiri dari berbagai susunan komponen fisik yang digunakan untuk mengarahkan aliran energi ke suatu mesin atau proses agar mendapatkan hasil yang diinginkan.

Dalam sistem kendali dapat dibagi menjadi dua yaitu sistem kendali *loop* terbuka atau *open-loop control system* dan sistem kendali *loop* tertutup atau *closed-loop control system*. Sistem kendali *loop* terbuka atau *open-loop control system* yaitu sistem kendali yang sinyal luaran tidak berpengaruh terhadap aksi pengendalian. Hal tersebut dikarenakan didalam sistem kendali terbuka atau *open-loop control system* tidak terdapat proses umpan balik sinyal output yang menuju ke sinyal input. Model sistem kendali *loop* terbuka atau *open-loop control system* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2.2 Sistem Kendali Loop Terbuka

Sistem kendali *loop* tertutup atau *closed-loop control system* merupakan suatu sistem kendali dimana sinyal keluaran mempunyai pengaruh langsung terhadap aksi kontrol pada suatu sistem. Hal tersebut dikarenakan pada sistem ini terdapat jaringan umpan balik. Model sistem kendali *loop* tertutup atau *close-loop control system* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 2.3 Sistem Kendali Loop Tertutup.

Pada penelitian ini, penulis menggunakan sistem kendali *loop* tertutup untuk mengetahui bagaimana respon motor DC tipe IG 22GM dengan pemodelan matematis orde 1 bila menjadi plant pada suatu sistem. Penulis melakukan simulasi menggunakan metode LQR dan LQT pada motor DC tipe IG 22GM. LQR (*Linear-Quadratic Regulator*) merupakan salah satu metode kendali state space yang memerlukan informasi dari keseluruhan sistem. Untuk mencapai nilai gain optimal maka perlu melakukan pembobotan untuk nilai Q dan R pada LQR. LQT (*Linear-Quadratic Tracker*) merupakan metode utama untuk kelas masalah

tracking dalam sistem linier. LQT di desain untuk merancang kontrol optimal sedemikian rupa sehingga sistem kontrol linier dapat melacak lintasan referensi yang ditentukan. Kontrol optimal dapat dicapai dengan meminimalkan fungsi nilai kuadrat yang ditentukan. LQT terdiri dari bagian *feedback* dan *feed-forward* yang dihitung dengan *Algebraic Riccati Equation* (ARE).

Pada penelitian ini penulis menggunakan *Simulink* untuk mensimulasikan sistem yang dibuat menggunakan metode LQR dan LQT. *Simulink* adalah *graphical Extension Matlab* untuk memodelkan dan mensimulasikan sebuah sistem. Dalam *simulink*, sistem digambarkan sebagai sebuah *block diagram*, diantaranya *transfer function*, *summing junction*, di dalamnya terdapat pula *virtual input* dan *output device* seperti *function generator* dan *oscilloscope*.

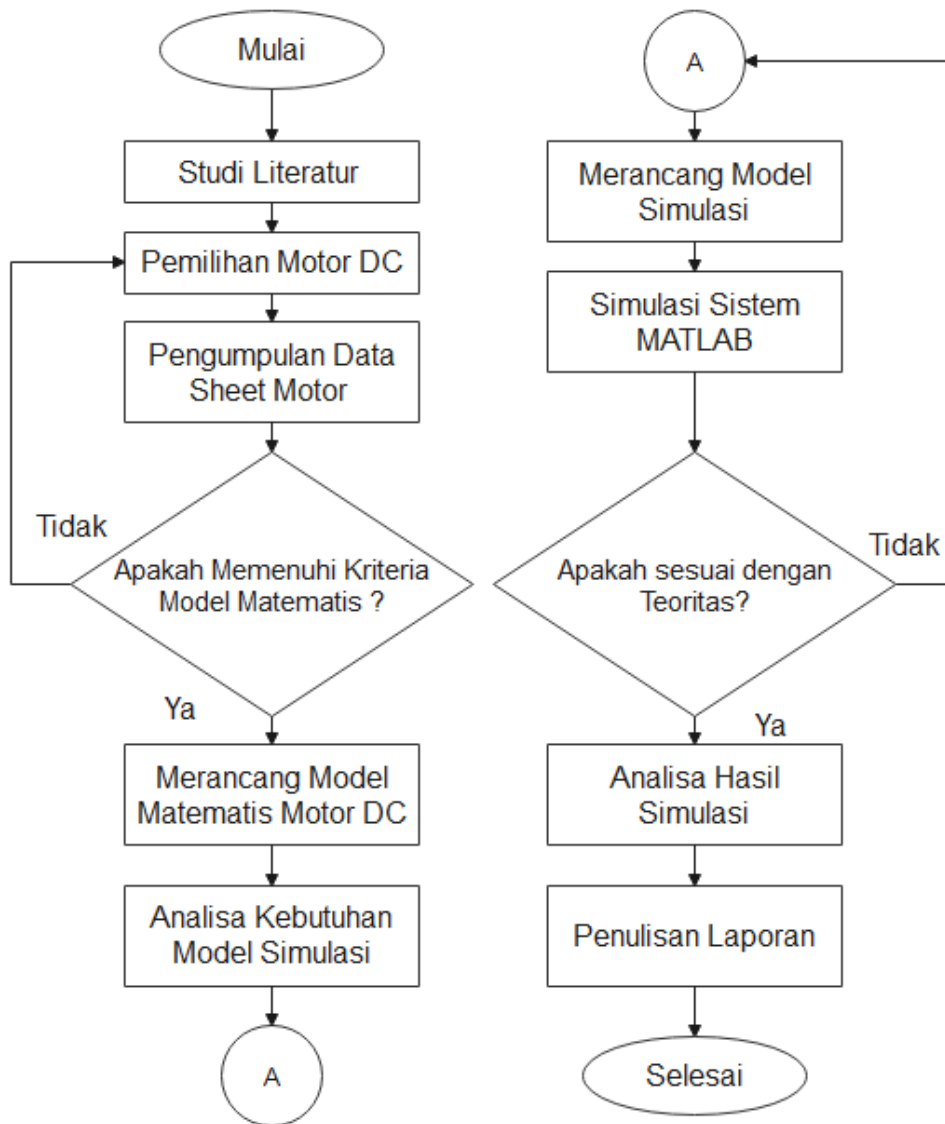
Pemodelan matematis merupakan teknik untuk mempresentasikan suatu sistem yang kompleks ke dalam model matematika. Dengan demikian, model matematika yang diformulasi diharapkan mampu menjelaskan situasi kompleks yang sedang diamati. Penulis melakukan perhitungan mengacu pada *datasheet* motor DC 42D29Y401 untuk mendapatkan pemodelan matematis orde 1 yang digunakan sebagai fungsi transfer (*transfer function*) *plant* yang merupakan suatu hubungan matematis antara *input* dan *output* dari komponen sistem kontrol.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa *step response* atau perubahan perilaku *output* terhadap perubahan sinyal *input* dari motor DC tipe 42D29Y401 dengan perlakuan tanpa diberi *noise* dan diberi *noise* pada *output* sistem.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan pada diagram alir:

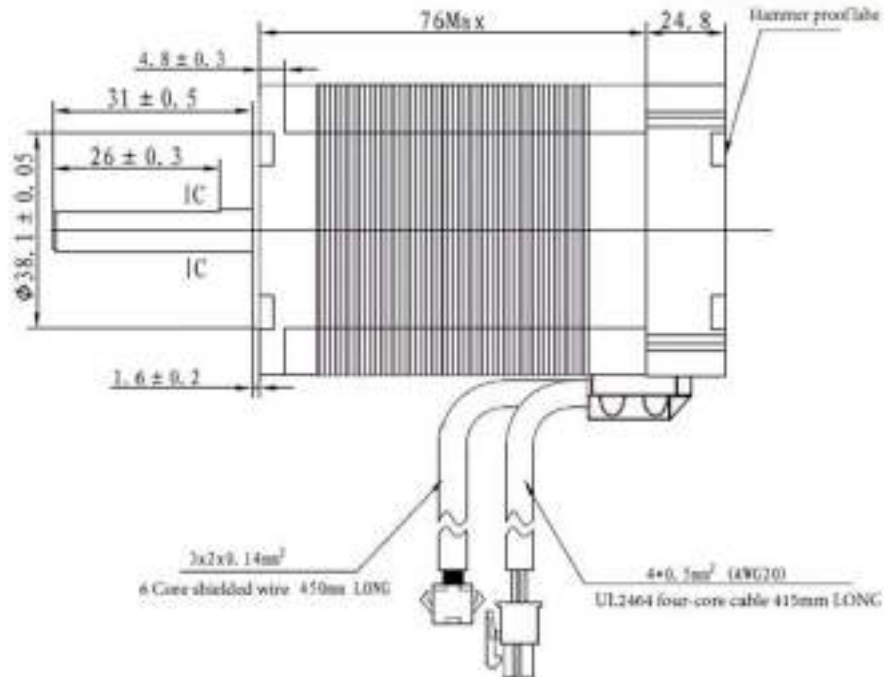


Gambar 2.4 Flowchart Tahapan Simulasi

Sumber: Penulis, 2023

2.2 Pemodelan Matematis Sistem dan Sensor

42D29Y401



Gambar 2.5

Electrical Characteristics		6.Phase inductance	1. 4mH \pm 20% (1kHz 1V rms)
1.Phase number	2 Phase	7. Holding torque	2. 2N.m Min (两相通电)
2. Step angle	1. 8°	8. Rotor inertia	300g.cm ²
3. Rated voltage	2. 31V	9. Motor weight	680g Ref.
4. Rated current	4. 2A	10. Insulation resistance	100M Ω Min. (DC 500V)
5. Phase resistance	0. 54 Ω \pm 10% (20° C)	11. Insulation class	B (130° C)

Gambar 2.6

Spesifikasi Motor DC 42D29Y401

Nama Motor= Motor DC 42D29Y401

$\tau = 2,2$ N/m

Rated Current= 4.2 A

Voltage= 31 V

Speed = 6000 rpm atau 628,32 m/s

Dari spesifikasi yang telah didapatkan bentuk umum fungsi alih orde 1

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Orde 1 Motor DC

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (2)$$

Dimana sehingga

$$K = \tau i = 2.24.2 = 0.523 \quad (3)$$

Persamaan orde 1 motor dc :

$$G(s) = 0,5232.2s + 1 \quad (4)$$

Pemodelan Orde 2

Bentuk umum fungsi alih orde 2

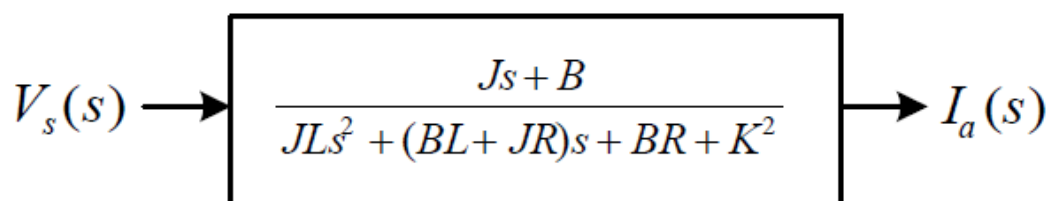
$$G(s) = \omega n^2 s^2 + 2\zeta \omega n s + \omega n^2 \quad (5)$$

$$Gs = 2\pi f^2 s^2 + 2\zeta 2\pi f s + 2\pi f^2 \quad (6)$$

$$G(s) = (2\pi 50)^2 s^2 + 2(300)(2\pi 50)s + (2\pi 50)^2 \quad (7)$$

$$G(s) = 98596s^2 + 188400s + 98596 \quad (8)$$

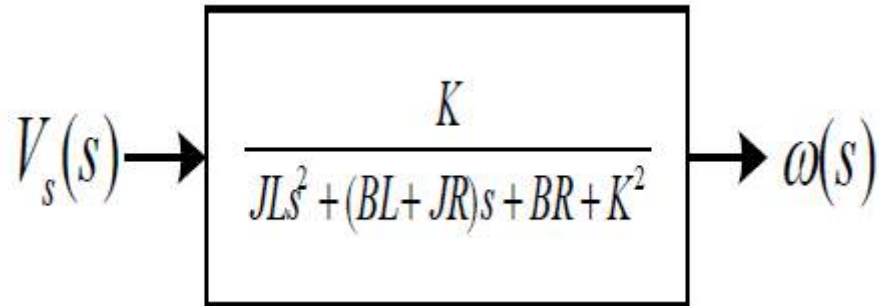
Pada sistem dengan *multiple output* dibutuhkan fungsi alih sensor arus sebagai *feedback* pada sistem untuk membaca nilai arus yang dihasilkan motor DC 42D29Y401. Blok fungsi alih sensor arus seperti pada Gambar 2.3 berikut ini .



Gambar 2.7 Blok Fungsi Alih Sensor Arus

Sumber:

Untuk membaca nilai kecepatan motor DC 42D29Y401 dibutuhkan blok fungsi alih sensor kecepatan seperti pada Gambar 2.4 berikut ini .



Gambar 2.8 Blok Fungsi Alih Sensor Kecepatan

Sumber:

Momen inersia (J) : 30 Kg.m²

Redaman sistem mekanik (B): 0,14 Nms

Konstanta motor (K): 0,298 Nm/A

Resistansi (R): 0,54 ohm

Induktansi (L): 0,0014 H

Pemodelan fungsi alih sensor arus:

$$Js + BJs^2 + BL + JRs + BR + K^2 \tag{9}$$

(8)

$$30s + 0,14(30)(0,0014)s^2 + (0,14 * 0,0014) + (30 * 0,54)s + (0,14 * 0,54) + 0,298^2 \tag{10}$$

(9)

$$30s + 0,140,042s^2 + 16,2001s + 0,0756 + 0,0888 \tag{11}$$

(Fungsi Alih Sensor Arus)(10)

Pemodelan fungsi alih sensor kecepatan:

$$KJs^2 + BL + JRs + BR + K^2 \tag{12}$$

(11)

$$0,298(30)(0,0014)s^2 + (0,14 * 0,0014) + (30 * 0,54)s + (0,14 * 0,54) + 0,298^2 \tag{13}$$

(12)

$$0,2980,042s^2 + 16,2001s + 0,0756 + 0,0888 \tag{14}$$

(Fungsi Alih Sensor Kecepatan)(13)

A. 2.3 Pemrograman Script MATLAB

Dalam praktikum optimasi sistem motor DC 42D29Y401 dengan metode LQR dan LQT dibutuhkan program *script* MATLAB untuk melakukan simulasi sistem pada *Simulink*. Dibawah ini merupakan program *script* MATLAB yang digunakan.

B. 2.2.1 Optimasi Sistem LQR Pada Motor Dc

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J = 30 ; % J = Momen Inersia

b = 0.14 ; % b = Rasio Redam

K = 0.0298 ; % K = Konstanta

R = 0.54 ; % R = Resistansi

L = 0.0014 ; % L = Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

AA = [ A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J)

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

     0 1 0;

     0 0 1000];

R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)
```

```

KI2=-K_lqr(3);
KK2=[K_lqr(1) K_lqr(2)];

```

C. 2.2.2 Optimasi Sistem LQT Pada Motor DC

```

clear;
clc;
% Model Motor DC
J = 30 ; b= 0.14 ; K= 0.0298 ; R= 0.54 ; L = 0.0014 ;
% J = Momeninersia , b = Rasioedam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
B = [0; 1/L];
C = [1 0]
Q=10; R=0.0000000001; %0.00000000000001
W=C'*Q; %
[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P
K=inv(R)*B'*S %feedback Gain
ACL=(A-B*K)'
L=inv(R)*B' %model following gain

```

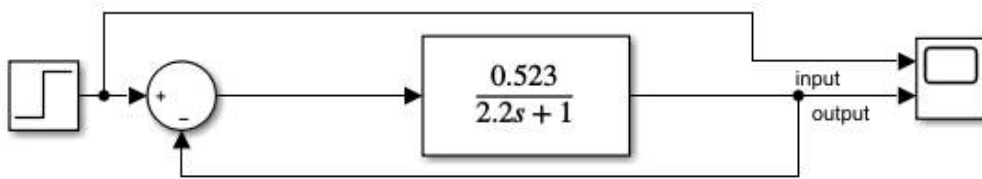
D. 2.4 Analisa Kebutuhan Sistem

Dalam paper ini metode LQR dan LQT menggunakan simulink dari *Software* MATLAB. . Komponen yang dibutuhkan seperti pada Tabel 1.

Tabel 2.1 Daftar Komponen Simulink

E. 2.5 Perancangan Sistem pada Simulator

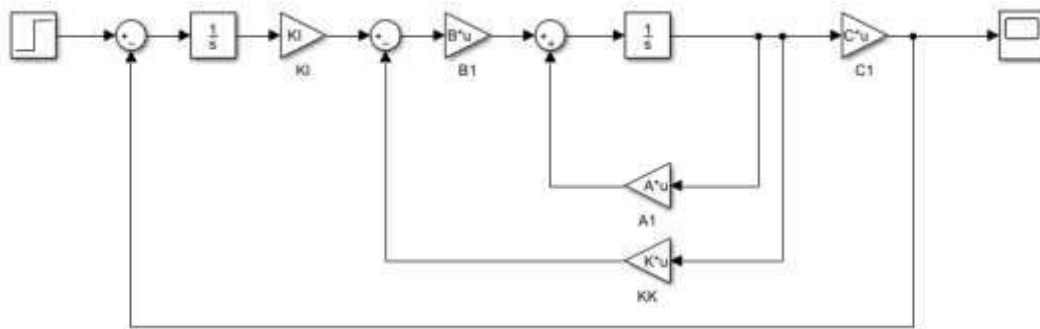
Rangkaian motor DC 42D29Y401 Orde 1



Gambar 2.9 Rangkaian Motor DC 42D29Y401 Orde 1

Sumber: Penulis, 2023

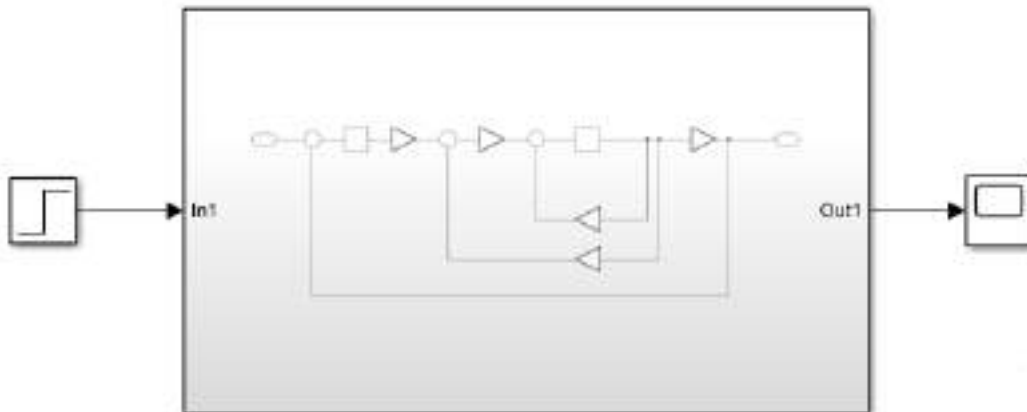
Rangkaian LQR



Gambar 2.10 Rangkaian LQR

Sumber: Penulis, 2023

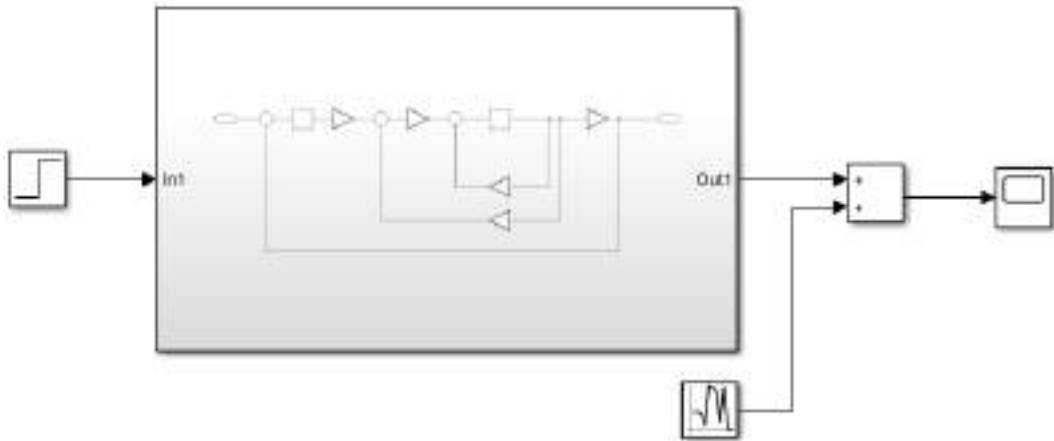
Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



Gambar 2.11 Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise

Sumber: Penulis, 2023

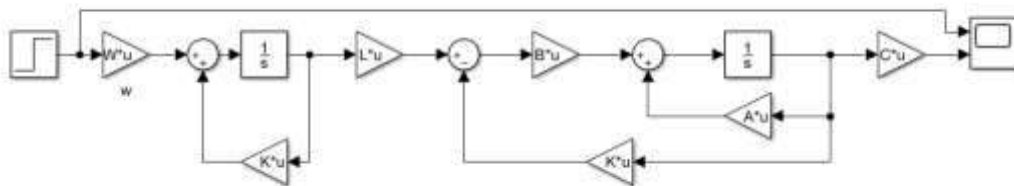
Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



Gambar 2.12 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise

Sumber: Penulis, 2023

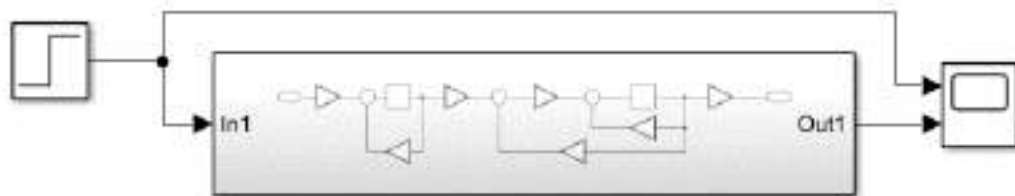
Rangkaian LQT



Gambar 2.13 Rangkaian LQT

Sumber: Penulis, 2023

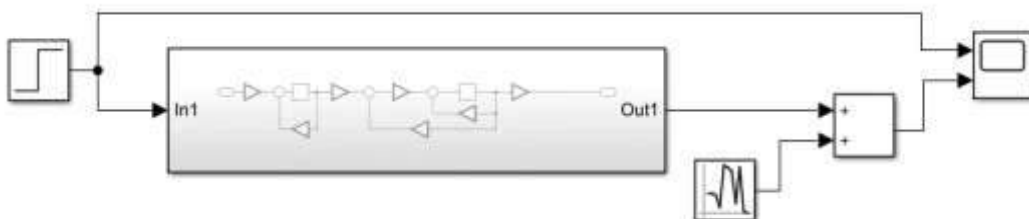
Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 2.14 Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise

Sumber: Penulis, 2023

Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise



Gambar 2.15 Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise

Sumber: Penulis, 2023

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Hasil Simulasi Motor DC 42D29Y401 Orde 1

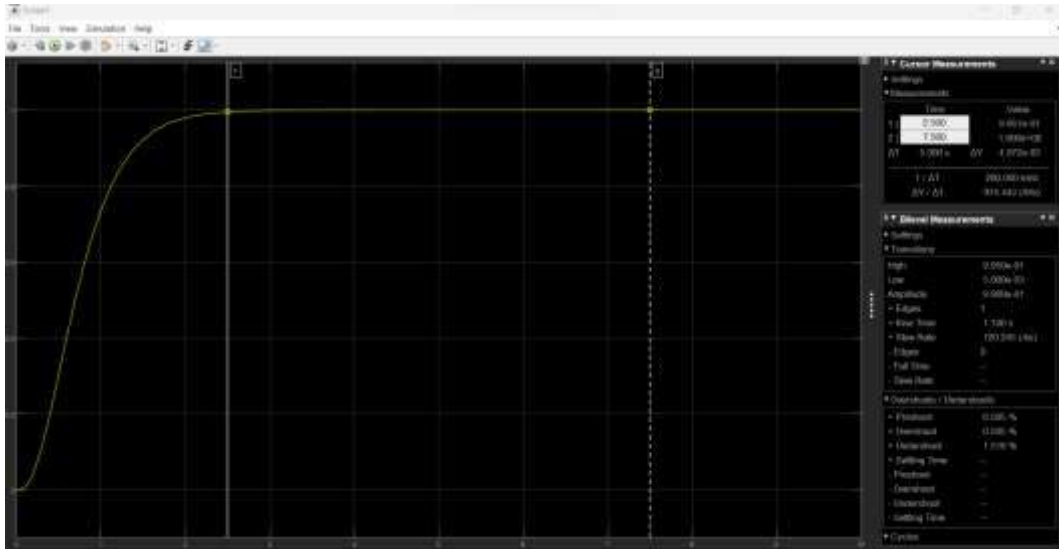


Gambar 2.16 Tampilan Step Response SISO

Sumber: Data Pribadi, 2023

Pada Gambar 14 merupakan *step response* motor DC 42D29Y401 pada sistem SISO Orde 1. Dari gambar grafik diatas dapat dilihat terdapat dua grafik yaitu grafik berwarna kuning yang merupakan grafik *input* yang diberikan pada sistem atau dapat dikatakan sebagai *setpoint* dan grafik berwarna biru yang merupakan *step response* motor DC 42D29Y401. Dapat dilihat bentuk grafik *output* dari sistem SISO Orde 1 belum mencapai *setpoint* yang ditentukan dan memiliki bentuk grafik yang stabil dengan *amplitude* sebesar 0.0204 dan *rise time* sebesar 231.789 ms. Pada sistem ini terdapat *overshoot* sebesar 0.505% dan *undershoot* sebesar 0.499%.

Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQR Motor DC 42D29Y401 tanpa *Noise*

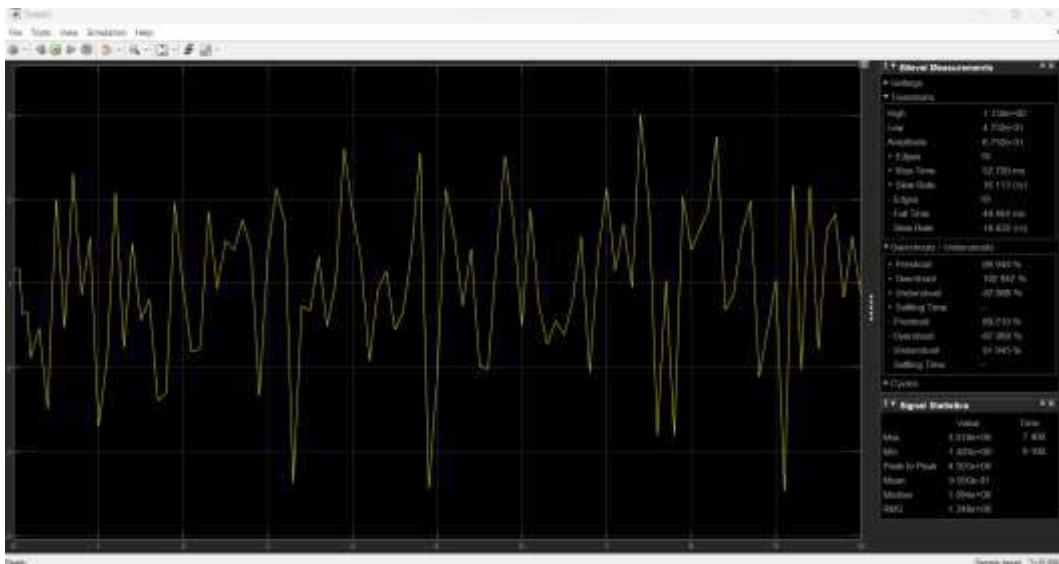


Gambar 2.17 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise

Sumber: Data Pribadi, 2023

Pada Gambar 15 merupakan *step response* dari motor DC 42D29Y401 LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari optimasi sistem LQR pada motor DC 42D29Y401 mencapai amplitudo sebesar 0.99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Pada sistem ini memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 3.11 s serta memiliki *overshoot* sebesar 0.501% dan *undershoot* sebesar 1.98%.

Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQR Motor DC 42D29Y401 dengan *Noise*



Gambar 2.18 Tampilan Step Response LQR dengan Noise

Sumber: Data Pribadi, 2023

Pada Gambar 16 merupakan *step response* dari motor DC 42D29Y401 LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari optimasi sistem LQR pada motor DC

42D29Y401 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Pada sistem ini memiliki amplitudo sebesar 0.67 dan *rise time* sebesar 52.72 ms serta memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup besar dengan nilai *overshoot* sebesar -87.06% dan *undershoot* sebesar 91.94%.

Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQT pada Motor DC 42D29Y401 tanpa *Noise*



Gambar 2.19 Tampilan Step Response LQT tanpa Noise

Sumber: Data Pribadi, 2023

Pada Gambar 17 merupakan *step response* dari motor DC 42D29Y401 LQT tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari optimasi sistem LQT pada motor DC 42D29Y401. Pada sistem ini memiliki amplitudo sebesar 0.99 dan *rise time* sebesar 7.43 ms serta memiliki *overshoot* dan *undershoot* sebesar 1.53% dan *undershoot* sebesar 0.45%.

Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQT pada Motor DC 42D29Y401 dengan *Noise*



Gambar 2.20 Tampilan Step Response LQT dengan Noise

Sumber: Data Pribadi, 2023

Pada Gambar 18 merupakan *step response* dari motor DC 42D29Y401 LQT dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari optimasi sistem LQT pada motor DC 42D29Y401 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Pada sistem ini memiliki amplitudo sebesar 0.18 dan *rise time* sebesar 92.71 ms serta memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup besar dengan nilai *overshoot* sebesar 12.41% dan *undershoot* sebesar -6.55%.

Data Hasil Simulasi

Dibawah ini merupakan data hasil simulasi percobaan pada Simulink MATLAB 2018B

Tabel 2.2 Data Hasil Simulasi

No.	Model Sistem	Amplitudo	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Undershoot (%)
1.	SISO Orde 1	3.40	3.11	0.501	1.98
2.	LQR tanpa Noise	0.99	1.1	0.505	1.518
3.	LQR dengan Noise	0.67	52.72	-87.06	91.94
4.	LQT tanpa Noise	0.99	7.43	1.53	0.45
5.	LQT dengan Noise	0.18	92.71	12.41	-6.55

F. Kesimpulan

$$G(s) = 0,5232,2s + 1 \quad (15)$$

Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan *datasheet* motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 maka ditemukan *transfer function* dan dengan hasil *run script* matlab LQR didapat nilai variabel A, B, C, K_lqr, dll yang muncul pada *workspace*.

Hasil *step response* dari motor DC 42D29Y401 berorde 1 didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 3.40 dalam artian mencapai *setpoint* dan *rise time* 3.11s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 1.98%. Sedangkan *output step response* dari LQR motor DC 42D29Y401 mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup

maksimal di angka 1,1s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%.

Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil *step response* kedua sistem bahwa sistem motor DC 42D29Y401 dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor DC 42D29Y401 orde 1 karena dengan menggunakan LQR, *step response* dari motor DC 42D29Y401 dapat mencapai *set point*, memiliki grafik yang stabil, memiliki *rise time* yang cepat, serta memiliki *overshoot* dan *undershoot* dengan nilai yang kecil. Tetapi *step response* yang dihasilkan sistem LQT memiliki hasil yang lebih maksimal dari kedua sistem tersebut.

Daftar Pustaka

- [1] Rahim, R, Kurniasih, N, Hasibuan, A, Andriany, L, Najmurokhman, A and "Congklak, a traditional game solution approach with breadth first search." MATEC web of Conferences 197, 2018, p. 3007.
- [2] Nugraha, AT and Hidayana, E. "Object Detection of Track Using YOLO Method in Fast Unmanned Vessel Application." Jurnal Teknologi Maritim 7.1, 2024, pp. 52-62.
- [3] Nugraha, AT, Pratiwi, OD, As'ad, RF and Athavale, VA. "Brake current control system modeling using linear quadratic regulator (lqr) and proportional integral derivative (pid)." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2022
- [4] Yahya, D, Pambudi, DSA and Nugraha, AT. "Community-Based Fire and Temperature Monitoring System with PIR Sensors for Enhanced Safety and Prevention." Conference of Electrical, Marine and Its Application 1.1, 2022, pp. 19-27.
- [5] Nugraha, AT, Azam, AI, Sobhita, RA and Sunarno, E. "IOT-Based Smart Home Control Design Using Blink Application and Esp8266 Wi-Fi Module." Mein: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 1.1, 2024, pp. 7-11.
- [6] Nugraha, AT, Widodo, HA, Pambudi, DSA, Cahyono, L, Apriani, M and ""PORTABLE-2WG" Inovasi Turbin Pembangkit Listrik Portable Air Dan Angin Untuk Kebutuhan Rumah Tangga Pada Penduduk Daerah Aliran Sungai." ID Patent EC00,202,223,113, 2022
- [7] Sobhita, RA, Nugraha, AT and Jamaludin, M. "Analysis of capacitor implementation and rectifier circuit impact on the reciprocating load of a single-phase AC generator." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1, 2025, pp. 1-9.
- [8] Nugraha, AT, Rinaldi, D, Messiah, MS, Shiddiq, M, Ramadhan, M and Ainudin, F. "Implementation of Line of Sight Algorithm Design Using Quadcopter on Square Tracking." JPSE (Journal of Physical Science and Engineering) 7.2, 2022, pp. 99-107.
- [9] Nugraha, AT. "Desain Kontrol Path Following Quadcopter Dengan Algoritma Line of Sight." Prosiding SENIATI, B9., 2017, pp. 1-8.
- [10] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Konsep Dasar Elektronika Daya." Deepublish, 2022
- [11] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Fatqurrochman, MI. "ZETA Converter as a Voltage Stabilizer with Fuzzy Logic Controller Method in The Pico Hydro Power Plant." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2022
- [12] Jamil, MH, Rukka, RM, Tenriawaru, AN, Achmad, R, Nugraha, AT and "The existence of rice fields in Makassar City." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 681.1, 2021, p. 12091.
- [13] Nugraha, AT, Hidayat, EP, Mudjiono, U and Widodo, HA. "ANALISIS POSTUR TUBUH PEKERJA PADA AKTIVITAS PROYEK KONSTRUKSI DENGAN METODE RULA

- (RAPID UPPER LIB ASSESMENT) DI CV. BASANI." Jurnal Cakrawala Maritim 4.2, 2021, pp. 9-21.
- [14] Primaningtyas, WE, Utomo, AP, Wulandari, KD, Alfanda, BD, Cahyono, L and "DISEMINASI PEMBUATAN PAPLAS (PAVING PLASTIK) SEBAGAI SARANA DEMARKASI AREA POTENSI BAHAYA DI LINGKUNGAN SEKOLAH." Jurnal Cakrawala Maritim 4.2, 2021
- [15] Ravi, AM, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Pengaruh Penggunaan Metode Kontrol Pi Pada Kontrol Eksitasi Generator Sinkron." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [16] Nugraha, AT and Febrianti, C. "Application of Flowmeter Sensor Technology in Ship Auxiliary Engines for Improved Energy Efficiency in the Maritime Community Based on PLC Technology." Maritime in Community Service and Empowerment 2.2, 2024, pp. 57-63.
- [17] Nugraha, AT. "Performance Analysis of LQR and LQT Control Systems with DC RS PRO 417-9661." Conference of Electrical, Marine and Its Application 3.1, 2024, pp. 128-139.
- [18] Nugraha, AT, Rudianto, Ahmad, MM, Prambudi, DSA, Utomo, AP and "Buku Rancang Bangun Ship Alarm Monitoring (SAM) Sebagai Solusi Keamanan Pengoperasian Auxiliary Engine.", 2021
- [19] Apriani, M, Astuti, UP, Nugraha, AT and Atiqoh, VZ. "Daur Ulang Tutup Botol Bekas Menjadi Media Biofilter Dengan Lubang Lingkaran Sebagai Pengolah Limbah Restoran." ID Patent EC00,202,312,633, 2023
- [20] Realdo, AM, Nugraha, AT and Misra, S. "Design and Development of Electricity Use Management System of Surabaya State Shipping Polytechnic Based on Decision Tree Algorithm." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2021

BAB III

Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) Motor DC MY1016Z2

Oleh: **Novalliansyah Ramadhan1**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: LQR, LQT, Motor DC, Noise

LQR is one of the optimal control methods for state space-based systems. The LQR controller has two parameters, namely the Q and R weight matrices, which must be determined so as to produce the optimal control action as expected. The LQR method is very important to be combined with the discipline of system optimization to reach the optimum point and reduce errors in a tool so that we can adjust the work of a tool according to our wishes. LQT is an optimal control method that minimizes the objective function (Performance Index) and regulates the system (Plant) to track according to the desired reference or it can be interpreted that LQT is a linear control system whose system output follows the desired reference (trajectory).

This article discusses DC motors under normal conditions and noise, noise is noise that is generated from nonperiodic vibrations in the air, in general it can be defined as unwanted sound that can have an unfavorable effect on comfort, noise can cause emotional disturbance both consciously or unconsciously and can cause discomfort and interfere with communication.

Abstrak

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R , yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Metode LQR ini menjadi sangat penting untuk dipadukan dengan disiplin ilmu optimasi sistem untuk meraih titik optimum dan mengurangi error pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita. LQT adalah metode kontrol optimal yang meminimalisir fungsi tujuan (Performance Index) dan mengatur sistem (Plant) agar melakukan penjejakan sesuai referensi yang diinginkan atau dapat diartikan bahwa LQT merupakan sistem pengaturan linear yang output sistem mengikuti referensi (trajectory) yang diinginkan.

Artikel ini membahas motor DC pada saat kondisi normal dan noise, noise merupakan suara bising yang dihasilkan dari getaran nonperiodik di udara, secara umum dapat didefinisikan sebagai suara yang tidak diinginkan yang dapat memberikan efek kurang baik terhadap kenyamanan, noise dapat menimbulkan gangguan emosional baik secara sadar maupun tidak sadar serta dapat menimbulkan ketidaknyamanan dan membuat komunikasi terganggu.

PENDAHULUAN

Permasalahan mengenai optimasi sangat berpengaruh terhadap kebutuhan sistem dengan performansi yang tinggi, Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan indeks performansi dan rekayasa yang akan menghasilkan sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik dalam menyelesaikan sistem kontrol optimal, diinginkan mencari suatu aturan untuk mengambil keputusan sistem kontrol yang akan meminimumkan suatu ukuran simpangan dari perilaku idealnya.

Pada paper ini penulis membahas metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*) yang terkandung pada mata kuliah “Optimasi Sistem”. LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone *quadcopter*. Metode LQR ini menjadi sangat penting untuk dipadukan dengan disiplin ilmu optimasi sistem untuk meraih titik optimum dan mengurangi error pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita. Sedangkan LQT adalah metode kontrol optimal yang meminimalisir fungsi tujuan (*Performance Index*) dan mengatur sistem (*Plant*) agar melakukan penjejukan sesuai referensi yang diinginkan atau dapat diartikan bahwa LQT merupakan sistem pengaturan linear yang output sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang diinginkan. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh metode LQR dan LQT pada motor DC maka penulis melakukan analisis terkait *step response* motor MY1016Z2 menggunakan metode LQR dan LQT dengan menggunakan *software* Matlab Script dan Simulink.

Pada mata kuliah “Optimasi Sistem” ini penulis membahas penerapan metode LQR plant motor DC yang telah disertai *datasheet*. *Datasheet* tersebut akan di masukkan pada script MATLAB kemudian disimulasikan menggunakan *software* MATLAB Simulink untuk

melihat *step response*. Motor DC yang digunakan yaitu tipe MY1016Z2 yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi.

Artikel ini membahas motor DC pada saat kondisi normal dan *noise*, *noise* merupakan suara bising yang dihasilkan dari getaran nonperiodik di udara, secara umum dapat didefinisikan sebagai suara yang tidak diinginkan yang dapat memberikan efek kurang baik terhadap kenyamanan, *noise* dapat menimbulkan gangguan emosional baik secara sadar maupun tidak sadar serta dapat menimbulkan ketidaknyamanan dan membuat komunikasi terganggu.

Atikel atau paper ini bertujuan untuk dapat mengoperasikan *Software* Matlab dan dapat membuat Simulink pada Matlab, Simulink pada Matlab sangat dibutuhkan karena ini adalah dasar dalam mempelajari sebuah Optimasi Sistem, dimana rangkaian yang akan dibuat mencakup Rangkaian LQR.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penulis melakukan praktikum Optimasi Sistem menggunakan *Software* Matlab untuk membuat rangkaian dengan Simulink, sebelum membuat rangkaian akan membuat *coding* pada Script Matlab dan memerlukan *Datasheet*, dari hasil tersebut akan dibuat rangkaian pada Simulink Matlab.

3.1.1. Identifikasi Masalah

Pada saat melakukan praktikum terkadang kurang teliti dalam memilah motor DC karena ada beberapa motor DC yang tidak lengkap dan pembacaan datasheet, datasheet yang kurang lengkap juga mengharuskan kita mencari rumus yang lain pada jurnal. Masalah lain yang dihadapi yaitu minimnya artikel atau jurnal mengenai rangkaian, jadi harus mencari jurnal internasional yang tepat serta pemahaman rangkaian agar tidak terjadi kesalahan.

3.1.2. Penetapan Masalah

Pada tahap ini dapat di tetapkan bahwa permasalahan ketika menentukan *coding* dan menggunakan software. Mencari datasheet yang lengkap akan memudahkan dalam perhitungan.

3.1.3. Studi Literatur

Dalam mengumpulkan literatur–literatur sebagai bahan penunjang proses penyelesaian masalah bisa didapatkan melalui buku, referensi, dan jurnal penelitian.

2.2 Metode Penyelesaian Masalah

Metode penyelesaian masalah ini dijelaskan dengan rinci pada bagian tabel, berisi langkah-langkah penyelesaian yang akan membantu dalam mempermudah membuat artikel. Metode penyelesaian masalah akan disajikan dalam Tabel 2.1 dibawah ini

Tabel 3.1 Metode Penyelesaian Masalah Motor DC

No.	Langkah-langkah	Penjelasan
1.	Mencari Motor DC yang sesuai dengan pembuatan artikel	Penulis menggunakan type Motor DC MY1016Z2
2.	Membuat coding LQR dengan memerhatikan datasheet	Coding LQR bisa didapatkan pada artikel atau YouTube
3.	Membuat rangkaian LQR normal pada Simulink	Rangkaian harus dibuat dengan teliti
4.	Membuat rangkaian LQR Simulink pada kondisi noise	Rangkaian harus dibuat dengan teliti
5.	Menuliskan kesimpulan apabila semua simulasi sudah dilakukan	Kesimpulan didapat apabila telah melakukan semua simulasi, membandingkan simulasi pada kondisi normal dan kondisi noise

Langkah-langkah penyelesaian masalah diatas sangat diperlukan dalam sebuah menyusun artikel, karena tanpa ada persiapan maka akan terjadi kesalahan dalam perhitungan, membuat rangkaian, ataupun artikel.

A. 2.1.1 LQR (Linear Quadratic Regulator)

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga *drone quadcopter*. Dengan menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari *set point* yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/*noise*.

2.1.2 Motor DC MY1016Z2

Motor DC adalah motor listrik yang memerlukan suplai tegangan arus searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi gerak mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Motor arus searah, sebagaimana namanya, menggunakan arus langsung yang tidak langsung/directunidirectional. Motor DC tersusun dari dua bagian yaitu bagian diam (stator) dan bagian bergerak (rotor). Stator motor arus searah adalah badan motor atau kutub magnet (sikat-sikat), sedangkan yang termasuk rotor adalah jangkar lilitanya. Pada motor,

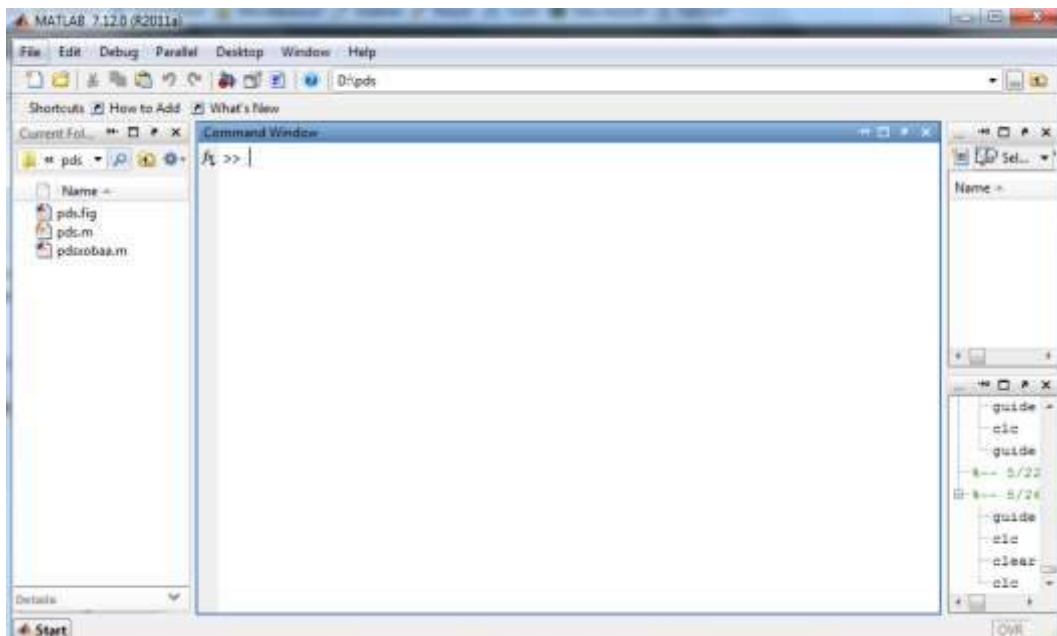
kawat penghantar listrik yang bergerak tersebut pada dasarnya merupakan lilitan yang berbentuk persegi panjang yang disebut kumparan. Pada artikel ini penulis menggunakan Motor DC MY1016Z2 seperti pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Motor DC MY1016Z2

B. 2.1.3 Software MATLAB

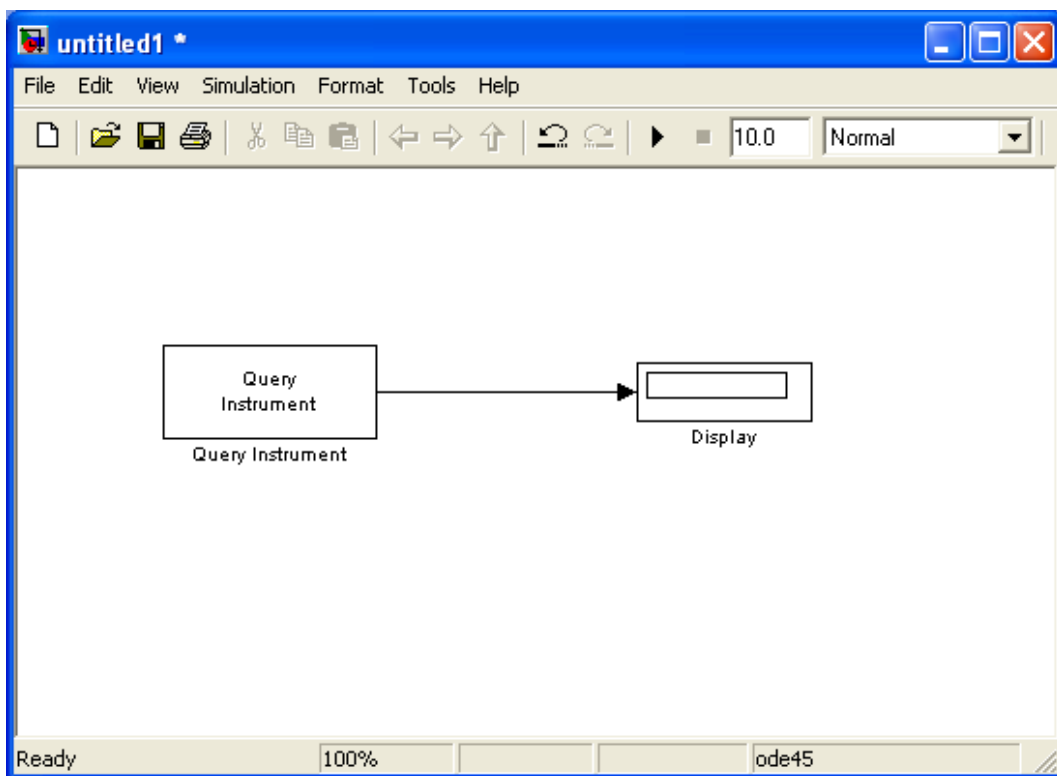
MATLAB adalah platform pemrograman yang menggunakan bahasa berbasis matriks sehingga umumnya digunakan untuk menganalisis data, membuat algoritma, serta menciptakan pemodelan dan aplikasi. Tampilan *software* MATLAB seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 3.2 Tampilan MATLAB

Pada simulasi untuk melihat respon yang dihasilkan oleh motor DC penulis menggunakan fitur Simulink pada MATLAB. Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang berperan sebagai pemrograman grafis.

Kegunaan utama dari Simulink adalah untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasi dilakukan menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing secara ekuivalen. Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka pengguna grafis. Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier.



Gambar 3.3 Tampilan Simulink MATLAB

2.1.4 Datasheet Motor DC MY1016Z2

Motor DC MY1016Z2 memiliki Datasheet yang cukup lengkap untuk menghitung Orde 1 dan Orde 2, Gambar 2.2 dibawah ini adalah datasheet Motor DC MY1016Z2.

Specification	MY1016Z2		MY1016Z3	
Rated output Power	250W	250W	350W	350W
Rated Voltage	24V DC	36V DC	24V DC	36V DC
Rated speed	3000RPM	3000RPM	3000RPM	3200RPM
No load speed	3850RPM	3850RPM	3850RPM	3850RPM
Full load Current	≤13.4A	≤9.0A	≤18.70A	≤12.50A
No load Current	≤2.2A	≤2.0A	≤2.20A	≤2.0A
Rated Torque	0.80N.m	0.80N.m	1.11N.m	1.11N.m
Efficiency	≥78%	≥78%	≥78%	≥78%
Gear Ratio	1:9.78			
Application	Light E.V./ E-bike			

Gambar 3.4 Datasheet Motor DC MY1016Z2

Spesifikasi dari Motor DC MY 1016Z2 sebagai berikut:

Nama Motor= Motor DC MY1016Z2

Momen Inersia (J)= 47.330 kg.m²/s²

Redaman Sistem (B)= 0.1 Nms

Konstanta Motor (K)= 0.152 Nm/A

Resistansi (R)= 0.113 ohm

Induktansi (L)= 0.000395 H

Dari *datasheet* dapat di tentukan pula model matematis sistem orde satu dari motor DC MY1016Z2. Sistem orde satu merupakan suatu sistem yang di dalamnya terdapat perubahan satu kali [10]. Berikut rincian pemodelan sistem orde satu.

Persamaan umum fungsi alih orde 1:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Berdasarkan datasheet motor MY1016Z2 maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (2)$$

Dimana sehingga Persamaan orde 1 motor dc :

$$K = \tau i = 1,119 = 0,123 \quad (3)$$

$$Gs = \frac{0,123}{0,119s + 1} \quad (4)$$

2.3 Program Script Matlab

2.3.1 PROGRAM SCRIPT LQR PADA MOTOR DC

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC
```

```
clear;
```

```

clc;

% Model Motor DC
J = 47.330 ; b= 0.1 ; K= 0.152 ; R= 0.113 ; L = 0.000395 ;

% J = Momeninersia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=

% Induktansi
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
B = [0; 1/L];
C = [1 0]
AA = [ zeros(2,1); -C 0];
BB = [B;0];

% Pole Placement
J = [-3 -4 -5];
K = acker(AA,BB,J);
KI = -K(3);
KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR
Q = [1 0 0;
     0 1 0;
     0 0 1000];
R = [1];
K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)
KI2 = -K_lqr(3);
KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];

```

2.3.2 PROGRAM SCRIPT LQT PADA MOTOR DC

```

% OPTIMASI SISTEM LQT PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC
J = 47.330 ; b= 0.1 ; K= 0.152 ; R= 0.113 ; L = 0.000395 ;

```

% J = Momeninersia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

$A = [-b/J \quad K/J; -K/L \quad -R/L];$

$B = [0; 1/L];$

$C = [1 \quad 0]$

$Q=10; R=0.0000000001; \%0.0000000000000001$

$W=C'*Q; \%$

$[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) \%m=v(t) \%S=P$

$K=inv(R)*B'*S \%feedback \text{ Gain}$

$ACL=(A-B*K)'$

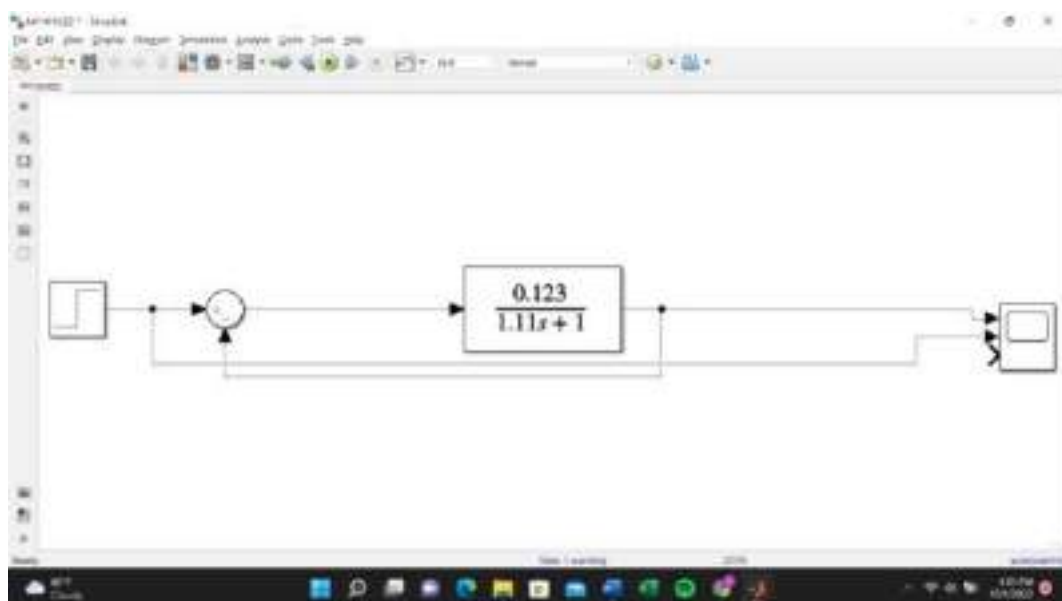
$L=inv(R)*B' \%model \text{ following gain}$

3.3 Perancangan LQR Motor MY1016Z2 pada Simulink

C. 3.3.1 Daftar komponen

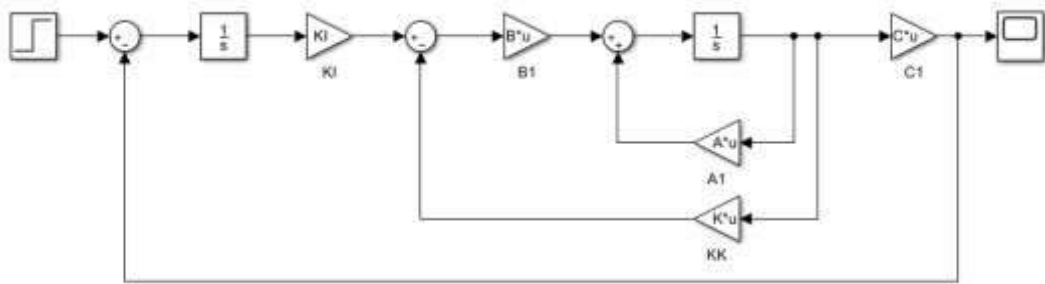
Tabel 3.2

D. 3.3.2 Rangkaian Motor DC MY1016Z2 Orde 1



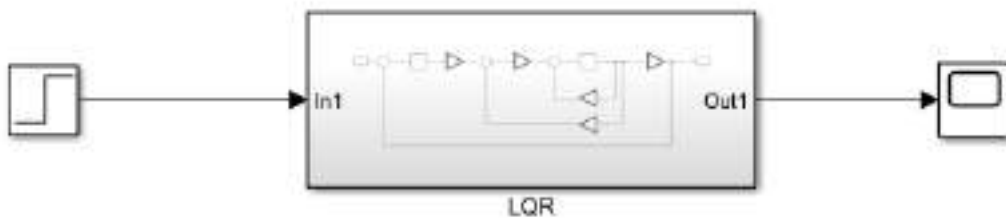
Gambar 3.5

E. 3.3.3 Rangkaian LQR



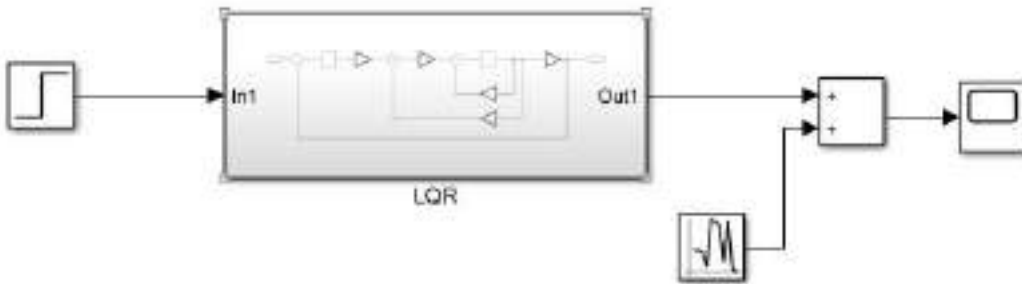
Gambar 3.6

F. 3.3.4 Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



Gambar 3.7

G. 3.3.5 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



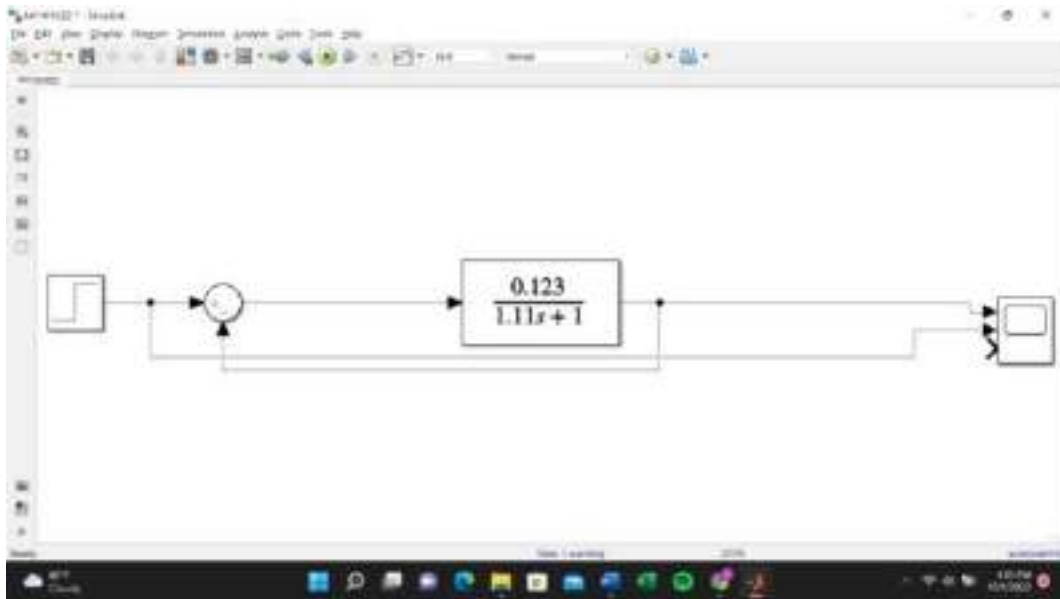
Gambar 3.8

3.4 Perancangan LQT Motor MY1016Z2 pada Simulink

H. 3.4.1 Daftar komponen

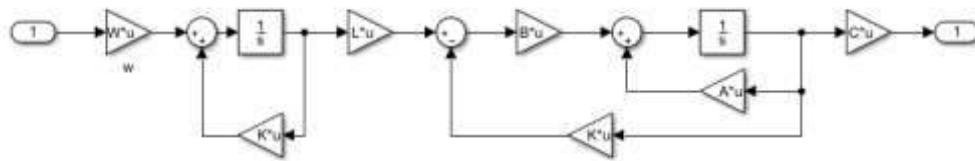
Tabel 3.3

I. 3.4.2 Rangkaian Motor DC MY1016Z2 Orde 1



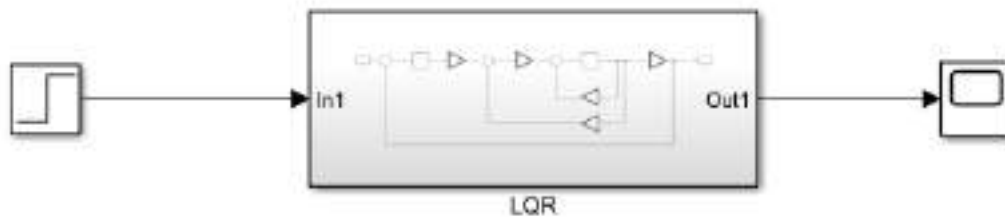
Gambar 3.9

J. 3.4.3 Rangkaian LQT



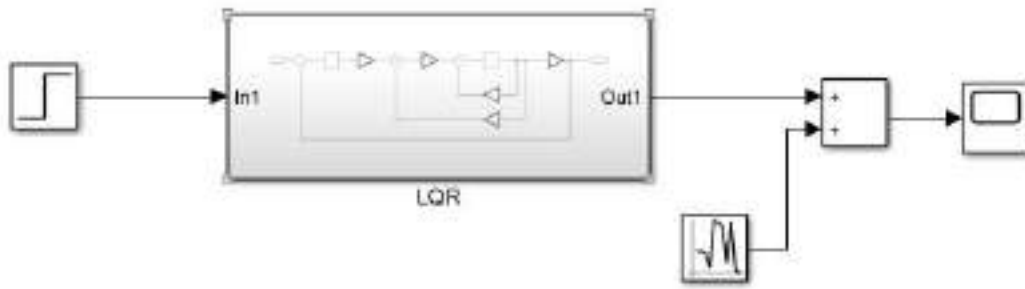
Gambar 3.10

K. 3.4.4 Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 3.11

L. 3.4.5 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



Gambar 3.12

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

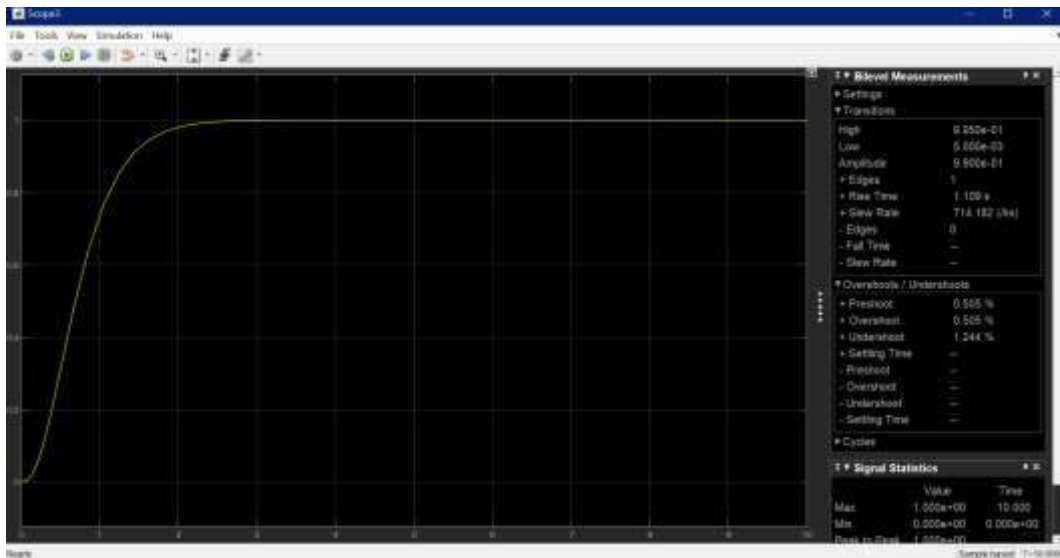
M. 4.1 Hasil Simulasi Motor DC MY1016Z2 Orde 1



Gambar 3.13 Tampilan Step Response

Pada Gambar 4.1 merupakan tampilan *step response* dari motor DC MY1016Z2 Pada SISO berorde satu tanpa *noise* didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,124 (tidak mencapai *set point*) dengan *rise time* 5,497s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 1.985%.

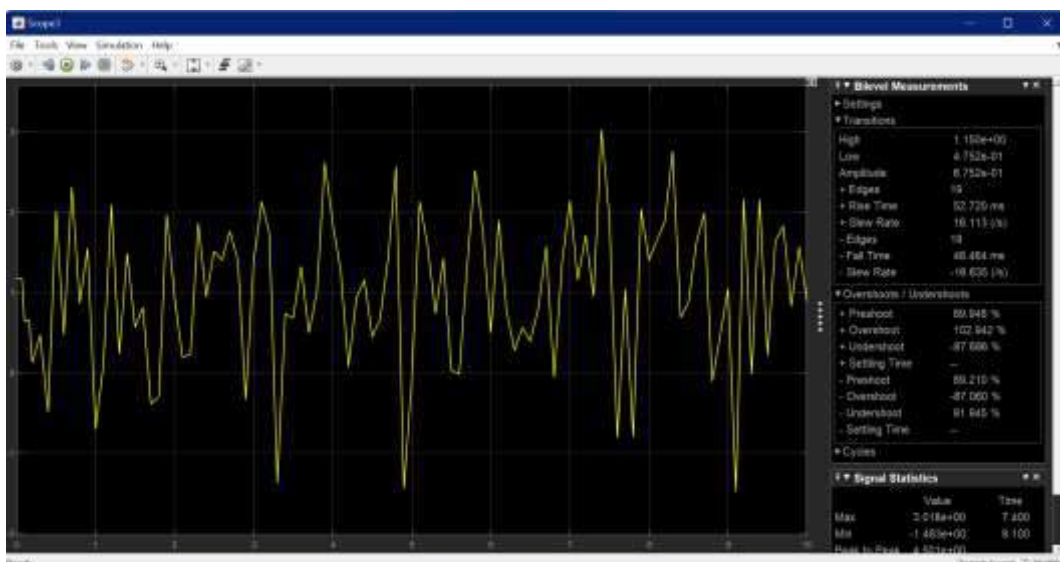
N. 4.2 Hasil Simulasi LQR tanpa Noise



Gambar 3.14 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise

Pada Gambar 4.1 merupakan tampilan *step response* dari motor DC MY1016Z2 LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC MY1016Z2 mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1,109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%.

O. 4.3 Hasil Simulasi LQR dengan Noise

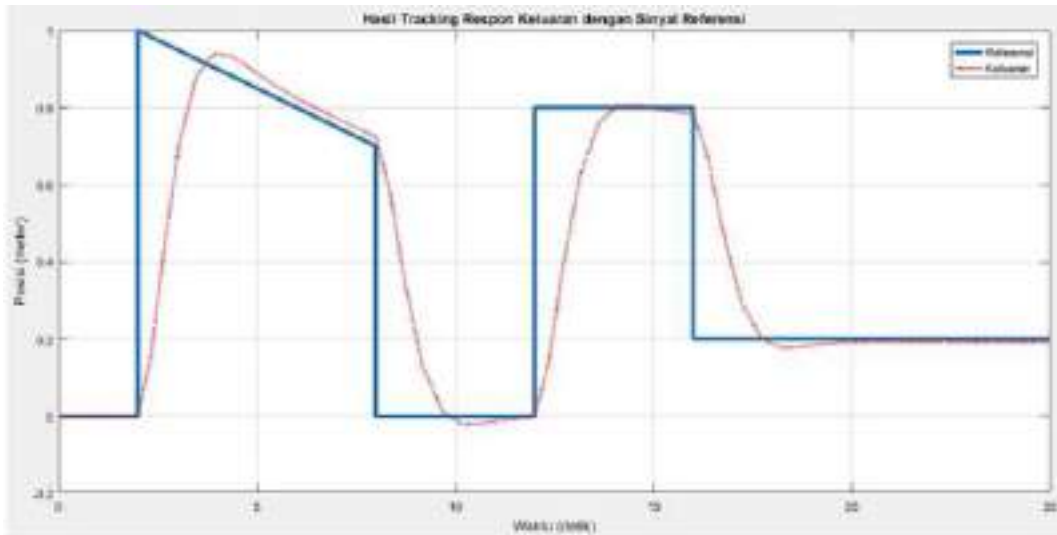


Gambar 3.15 Tampilan Step Response LQR dengan Noise

Pada Gambar 4.2 merupakan tampilan *step response* dari motor DC MY1016Z2 LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC MY1016Z2 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai

amplitudo sebesar 0,67 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 52.720ms dan memiliki *overshoot* sebesar 102.942% serta *undershoot* diangka -87.686%.

4.4 Hasil Simulasi LQT



Gambar 3.16

P. Kesimpulan

$$G_s = 0.12311s + 1 \quad (5)$$

Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan *datasheet* motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 maka ditemukan *transfer function* dan dengan hasil *run script* matlab LQR didapat nilai variabel A, B, C, K_lqr, dll yang muncul pada *workspace*.

Hasil *step response* dari motor DC MY1016Z2 berorde 1 didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,124 dalam artian mencapai *setpoint* sebesar 1 dengan *rise time* 5,497s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 1.985%. Sedangkan *output step response* dari LQR motor DC MY1016Z2 mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1,109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%.

Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil *step response* kedua sistem bahwa sistem motor DC MY1016Z2 dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor DC MY1016Z2 orde 1 karena dengan menggunakan LQR, *step response* dari motor

DC MY1016Z2 dapat mencapai *set point*, memiliki grafik yang stabil, memiliki *rise time* yang cepat, serta memiliki *overshoot dan undershoot* dengan nilai yang kecil.

Daftar Pustaka

- [1] Sheila, SY, Rochamwati, NW, Riyadi, F, As'ad, RF and Nugraha, AT. "Desain and Build a Medium Voltage Cubicles Temperature and Humidity Optimization Tool to Minimize the Occurrence of Corona Disease with the PLC-Based Fuzzy Method." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2022
- [2] Nugraha, AT, Jamaludin, M, Sobhita, RA and Saputra, DE. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." SAINSTECH NUSANTARA 2.2, 2025, pp. 1-13.
- [3] Elmi, H, Edy, S, Juniani, AI and Amelia, P. "Utilizing total dissolved solids (TDS) sensor for dissolved solids measurement in the water." JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization 7.1, 2024, pp. 22-30.
- [4] Pramesta, A, Wulandari, P, Mudjiono, U and Nugraha, AT. "Implementasi Sensor LDR dan Sensor Raindrop pada Prototipe Automatic Sliding Roof System." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.1, 2021, pp. 1-11.
- [5] Nugraha, AT. "Slip Control Design On Electrical Wheel Haul Truck-Based Sliding Mode Control." MISEIC 2018, 2018
- [6] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Rochmawati, NW, Sena, AI and "PERANCANGAN BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK CHARGING BATERAI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 22-33.
- [7] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "SISTEM KONTROL KESTABILAN PADA MOTOR DC." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 23-30.
- [8] Nugraha, AT. "Motor DC Dengan Penyearah Tak Terkontrol Tiga Fasa Gelombang Penuh Berbasis PSIM." KOMPUTEK 7.2, 2023, pp. 59-66.
- [9] Safitri, LN. "PROTOTIPE PTO (POWER TAKE-OFF) GENERATOR DENGAN MENGATUR KECEPATAN MOTOR 3 PHASE UNTUK MEMENUHI KEBUTUHAN LISTRIK DI KAPAL." Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, 2021
- [10] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1, 2025, pp. 29-38.
- [11] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "PERBANDINGAN RESPON KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN METODE PID DAN LQR." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 10-15.
- [12] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "IMPLEMENTASI SINGLE PHASE FULL WAVE CONTROLLED RECTIFIER PADA MOTOR DC." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 3-9.
- [13] Nugraha, AT, Priyambodo, D and Sarena, ST. "Design A Battery Charger with Arduino Uno-Based for A Wind Energy Power Plant." JPSE (Journal of Physical Science and Engineering) 7.1, 2022, pp. 23-38.
- [14] Basyari, HA, Fathurrohman, MF and Nugraha, AT. "Motor Speed Control Using PID Control with a Metaphysical Approach: A Comprehensive Analysis." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 2.2, 2024, pp. 1-10.
- [15] Nugraha, AT, Asri, P, Sunarno, E, Eviningsih, RP, Putra, ZMA, Indaryani, S and "Design Build an Off Grid Based Solar Power Plant System Using The Bidirectional Buck And Boost

- Topology In The Conservation Of Sea Pearl Turtles." E3S Web of Conferences 473, 2024, p. 1006.
- [16] Sa'diyah, A, Nugraha, AT, Indaryani, S, As'ad, RF and Shiddiq, MJ. "RANCANG BANGUN TRIPMETER DIGITAL MENGGUNAKAN SENSOR SENSOR HALL EFFECT PADA SEPEDA TREADMILL." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 39-45.
- [17] Haj, MI, Saputra, DE, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Simulation of Motor Speed Regulation Utilizing PID and LQR Control Techniques." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 2.1, 2025, pp. 41-49.
- [18] Putra, ZMA, Nugraha, AT, Widiarti, Y, Safaroz, W and Sobhita, RA. "Design of Unipolar Pure Sine Wave Inverter with Spwm Method Based On Esp32 Microcontroller As a Support of The Ebt System On Ship." E3S web of conferences 473, 2024, p. 1008.
- [19] Nugraha, AT, Jami'in, MA, Budiawati, R, Rahmat, MB, Darmajanti, P and "Rancangan Listrik Kapal." ID Patent EC002,023,136,593, 2023
- [20] Asri, P, Widodo, HA, Nugraha, AT, Rachman, I, Rahmat, MB, Poetro, JE and "Desain Hybrid Panel Surya dan Generator Set pada Kapal Ikan Pesisir Selatan Jawa." Jurnal Inovtek Polbeng 12.1, 2022, pp. 46-53.

BAB IV

Perbandingan Kontrol Optimalisasi pada Motor DC MG-16 pada Sirkuit LQR dan LQT

Oleh: **Novaly Arya Pratama**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: LQR, LQT, Motor DC, Noise, Optimasi

DC motor is an electronic component that is very common in everyday life. In general, a DC motor will slow down under load, slowing down and not running at a constant speed. DC motor speed can be adjusted by changing the input voltage. Therefore, a controller is needed to keep the DC motor speed stable when the load changes. One method of controlling DC motors to improve motor performance is LQR (Linear Quadratic Regulator) and LQT (Linear Quadratic Tracker).). The task of LQR is to bring the engine response closer to the desired set point and reduce the overshoot and undershoot that occur in the system. LQT is a linear control system whose system output follows the desired setpoint. The LQR method has the same response results as the desired setpoint without overshoot or undershoot. If the LQR method is not used, the motor response will be far from the desired set point and the response will take quite a long time. The motor response using the LQT method is faster, namely ± 0.5 seconds, but overshoot occurs and the response experiences a slight ripple. The LQT method is preferred over the LQR method because the response is faster than the LQR method to reach the set point on the MG-16B DC motor.

Abstrak

Motor DC merupakan komponen elektronika yang sangat umum dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Secara umum, motor DC akan melambat di bawah beban, melambat dan tidak bekerja dengan kecepatan konstan. Kecepatan motor DC dapat diatur dengan mengubah tegangan input. Oleh karena itu, diperlukan suatu kontroler untuk menjaga agar kecepatan motor DC tetap stabil saat beban berubah. Salah satu metode pengendalian motor DC untuk meningkatkan performa motor adalah LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracker).). Tugas LQR adalah mendekatkan respon mesin ke titik setel yang diinginkan dan mengurangi overshoot dan undershoot yang terjadi pada sistem. LQT merupakan sistem kontrol linier yang output sistemnya mengikuti setpoint yang diinginkan Metode LQR memiliki hasil respon yang sama dengan setpoint yang diinginkan tanpa overshoot maupun undershoot. Jika metode LQR tidak digunakan maka respon motor akan

jauh dari set point yang diinginkan dan respon akan memakan waktu yang cukup lama. Respon motor menggunakan metode LQT lebih cepat yaitu $\pm 0,5$ detik, namun terjadi overshoot dan respon mengalami sedikit ripple. Metode LQT lebih disukai daripada metode LQR karena responnya lebih cepat daripada metode LQR untuk mencapai set point pada motor DC MG-16B.

PENDAHULUAN

Motor DC merupakan komponen elektronika yang sangat umum dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Motor listrik adalah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau gerak. Prinsip pengoperasian motor DC adalah arah medan magnet rotor selalu berlawanan dengan arah medan magnet stator yang saling tolak. Kumputan menolak aliran tegangan, yang menciptakan medan dalam arah tertentu di sekitar kumputan anker . Secara umum, motor DC akan melambat di bawah beban, melambat dan tidak bekerja dengan kecepatan konstan. Kecepatan motor DC dapat diatur dengan mengubah tegangan input . Misalnya beban bertambah dan motor DC melambat, solusinya adalah menambah kecepatan lagi dengan menaikkan nilai tegangan masukan motor DC. Oleh karena itu, diperlukan suatu kontroler untuk menjaga agar kecepatan motor DC tetap stabil terhadap perubahan beban. Fungsi dasar dari pengontrol adalah untuk membandingkan nilai sebenarnya dari output plant dengan input referensi (titik setel), menentukan kesalahan dan menghasilkan sinyal kontrol yang mengurangi kesalahan hingga hampir nol..

Salah satu metode pengendalian motor DC untuk meningkatkan performa motor adalah LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracker). Tugas LQR adalah mendekatkan respon mesin ke titik setel yang diinginkan dan mengurangi overshoot dan undershoot yang terjadi pada sistem. Metode kontrol LQR memiliki karakteristik seperti ketahanan, keandalan, pembangkitan penguatan statis, dll. Dengan menggunakan metode kontrol optimal ini dalam sistem multi-input besar, kontrol multi-output yang efisien dapat dicapai secara andal dan ekonomis. Teknik pengontrol linier-kuadrat digunakan untuk merancang pengontrol optimal yang meminimalkan fungsi biaya tertentu, indeks efisiensi.

LQT merupakan sistem pengaturan linear yang *output* sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang diinginkan (Akbar et al., 2016). *Linear quadratic tracker* (LQT) adalah mekanisme kontrol pelacakan berbasis model yang menggunakan umpan balik keadaan affine untuk mencapai kontrol optimal. LQT terdiri dari sakelar umpan balik mode sistem dinamis linier biasa dan istilah kontrol input tambahan. Ekspresi feedforward bergantung

pada vektor sinyal referensi (Saleem et al., 2018). Biasanya LQR digunakan untuk masalah optimasi pada sistem yang berkaitan dengan *tracking*.

Dengan dua metode optimasi tersebut, pada Mata Kuliah Optimasi Sistem Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dilakukan percobaan bagaimana pengaruh metode LQR dan LQT terhadap respon *output* yang dihasilkan oleh suatu motor DC. Eksperimen juga dilakukan dengan menambahkan noise pada sistem untuk melihat apakah penambahan metode LQR dan LQT tidak akan mempengaruhi respon motor pada noise yang diberikan atau jika noise yang diberikan masih mempengaruhi respon motor. Dan apa perbedaan metode optimasi LQR dan LQT untuk tipe motor DC yang sama.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Identifikasi Motor DC

Pada tahapan ini dilakukan identifikasi mengenai spesifikasi Motor DC yang akan dilakukan penelitian. Bentuk Motor DC yang dilakukan penelitian yaitu berbentuk motor *brushless* dengan nama dan tipe MG-16B. Berikut merupakan *datasheet* dari Motor DC MG-16B.

Gear Ratio	Rated Voltage	Part Number	Torque (mNm)			Speed (rpm) (Reference)		Current (mA)			Length (mm)		Weight (g) (Reference)
			Rated	Max.	Starting	No-Load	Rated	No-Load	Rated	Starting	Motor	Gear	
1/30	DC6 V	MG16B-030-AA-00	20	30	> 50	477	380	< 160	< 400	< 1600	35	14	25
	DC12 V	MG16B-030-AB-00						< 80	< 250	< 800			
1/60	DC6 V	MG16B-060-AA-00	40	60	> 100	213	160	< 160	< 400	< 1600	38	17	30
	DC12 V	MG16B-060-AB-00						< 80	< 250	< 800			
1/120	DC6 V	MG16B-120-AA-00	60	90	> 170	127	100	< 160	< 400	< 1600	41	20	35
	DC12 V	MG16B-120-AB-00						< 80	< 250	< 800			
1/240	DC6 V	MG16B-240-AA-00	120	180	> 350	53	40	< 160	< 400	< 1600	41	20	35
	DC12 V	MG16B-240-AB-00						< 80	< 250	< 800			
1/300	DC6 V	MG16B-300-AA-00	160	240	> 400	45	34	< 160	< 400	< 1600	41	20	35
	DC12 V	MG16B-300-AB-00						< 80	< 250	< 800			

Gambar 4.1 Datasheet Motor DC MG-16B

Sumber gambar: Datasheet Motor DC MG-16B

Dari Gambar 1 tersebut dapat diambil data mengenai spesifikasi dari Motor DC MG-16B.

2.2 Permodelan Motor DC Orde 2

Model motor DC orde dua secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (1)$$

Keterangan :

ζ = Rasio Redaman (dB)

ω_n = Frekuensi Alami (rad/s)

Dimana :

$$\omega_n = 2\pi f \quad (2)$$

$$\omega_n = 2 \times 3,14 \times 50 = 314 \text{ rad/s} \quad (3)$$

Sehingga perhitungan pada motor DC MG-16B berdasarkan spesifikasi dari *datasheet* yang diperoleh adalah :

$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (4)$$

$$G(s) = 2\pi f^2 s^2 + 2\zeta(2\pi f)s + 2\pi f^2 \quad (5)$$

$$s = 2\pi 50^2 s^2 + 2 \cdot 30 \cdot 2\pi 50 s + 2\pi 50^2 \quad (6)$$

$$G(s) = 98596s^2 + 18840s + 98596 \quad (7)$$

2.3 Kendali Optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-keadaan (*state space*). Karena pendekatan sederhana dari metode ruang keadaan, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini. Persamaan ruang keadaan untuk sistem secara umum ditulis sebagai:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (8)$$

Pada prinsipnya, metode LQR mencari suatu sinyal control u yang meminimumkan indeks performansi J .

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (9)$$

LQR menemukan hukum input kontrol optimal u^* . Kendala yang disebabkan oleh matriks Q dan R meminimalkan indeks kinerja. Hukum kontrol optimal loop tertutup didefinisikan sebagai:

$$u^* = -Kx \tag{10}$$

Di mana K mewakili matriks gain umpan balik yang optimal. Matriks gain bekerja untuk meminimalkan indeks kinerja. Ini menentukan penempatan kutub loop tertutup yang tepat untuk meminimalkannya. Matriks penguatan umpan balik K bergantung pada matriks A, B, Q dan R. Umpan balik gainmatrix k diperoleh dengan menyelesaikan Algebraic Riccati Equation (ARE), P mendefinisikan matriks simetris dan matriks definit positif yang diperoleh solusi dari ARE didefinisikan sebagai:

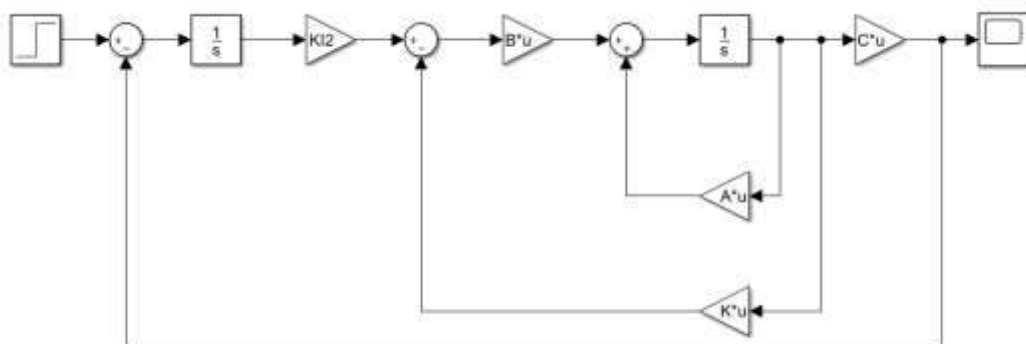
$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \tag{11}$$

$$K = A X - B K x = A - B K x \tag{12}$$

Substitusi persamaan (8) dan (9) menjadi

$$\dot{x} = A X - B K x = A - B K x \tag{13}$$

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR di tunjukan oleh Gambar 2.



Gambar 4.2 Diagram Blok LQR

Sumber gambar: Penulis

2.4 Program Matlab LQR pada Motor DC MG-16B

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC
```

```
clear; clc;
```

```
% Model Motor DC
```

```

J=46.045 ; b=0.2 ; K=0.5 ; R=0.05 ; L =0.000416 ;
% J = Momeninertia , b = Rasioedam, K= konstanta, R= resistansi, L=
% Induktansi
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
B = [0; 1/L];
C = [1 0];
AA = [ A zeros(2,1); -C 0];
BB = [B;0];
% Pole Placement
J = [-3 -4 -5];
K = acker(AA,BB,J)
KI = -K(3);
KK = [K(1) K(2)];
% Matrix LQR
Q = [1 0 0;
     0 1 0;
     0 0 1000];
R = [1] ;
K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)
KI2=-K_lqr(3);
KK2=[K_lqr(1) K_lqr(2)];

```

2.5 Kendali Optimal *Linear Quadratic Tracker* (LQT)

LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi, $r(t)$. Vektor $r(t)$ dinyatakan dalam :

$$r(t) = [V_{ref} \ 0]^T \quad (14)$$

(13)

$$V_{ref} \quad (15)$$

Dimana, adalah sinyal tegangan referensi yang bervariasi terhadap waktu. Skema LQT meminimalkan indeks kinerja kuadrat untuk menghasilkan keputusan kontrol yang optimal yang dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut (Saleem et al., 2018).

$$J = \int_0^T (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (16)$$

Dimana, Q dan R adalah keadaan antara dan control matriks pembobotan, masing-masing. Mereka dipilih sedemikian rupa; $Q = Q^T \geq 0$ dan $R = R^T > 0$. Karena sifat kuadrat dari fungsi cost, sinyal kontrol sebanding dengan variasi kuadrat persamaan. Jadi, jika state-variations besar; minimalisasi dan, karenanya, tingkat konvergensi lebih cepat.

Keputusan kontrol affine yang optimal dievaluasi melalui ekspresi matematika yang ditunjukkan pada (Saleem et al., 2018),

$$dt = -Kx + K_{ff}v_{ref}(t) \quad (17)$$

Dimana,

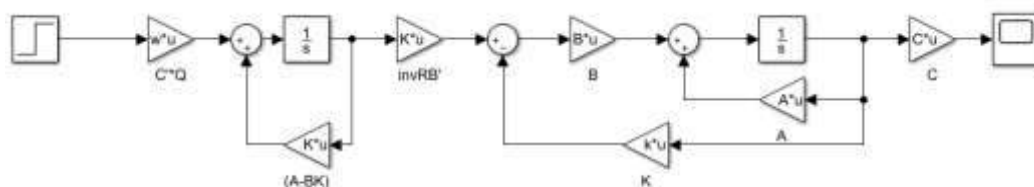
$$K = R^{-1} B^T P \quad (18)$$

$$K_{ff} = R^{-1} B^T ((A - BK)^T)^{-1} H T Q \quad (19)$$

Vektor penguatan, K, membantu merelokasi kutub sistem untuk mensintesis kontroler yang optimal. Perolehan optimal vektor bergantung pada matriks definit positif simetris, P, ditunjukkan pada persamaan (14). Matriks, P, untuk sistem yang diberikan dapat diperoleh dengan memecahkan Persamaan Aljabar Riccati, ditunjukkan pada.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + H T Q H = 0 \quad (20)$$

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR di tunjukan oleh Gambar 3.



Gambar 4.3 Diagram Blok LQT

Sumber gambar: Penulis

2.6 Program Matlab LQT pada Motor DC MG-16B

```

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J=0.00000242 ; b=0.1 ; K=0.0167 ; R=0.343 ; L =0.00018 ;

% J = Momen inertia , b =Rasio redam, K=konstanta, R=resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

D = 0;

Q=10000;

R=0.001;

%Perhitungan Ricatti

%S=P

[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R);

k = inv(R)*B'*S

w = C'*Q;

AB =(A-B*k)';

ABT = AB';

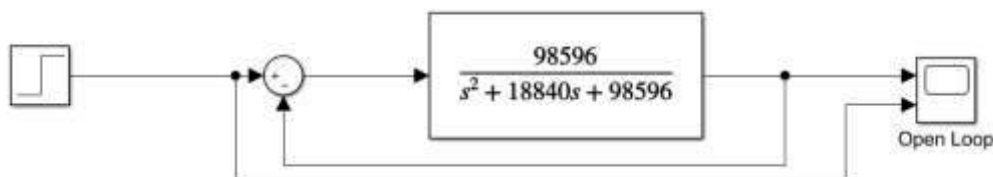
RB=inv(R)*B';

```

2.7 Blok Diagram Sistem

2.7.1 Blok Diagram Orde Dua Motor DC MG-16B

Pada blok diagram orde satu motor bertujuan untuk mengetahui hasil respon asli dari motor DC jika motor DC MG-16B tanpa ditambahkan metode yang dilakukan pada *software simulink*.



Gambar 4.4 Diagram Blok Orde Dua Motor DC

Sumber gambar: Penulis

Pada gambar 3 merupakan diagram blok orde dua suatu motor DC yang terdiri dari sebuah input dan sebuah *output*. *Input* yang digunakan berjenis *step response*. *Transfer function* pada diagram tersebut dapat berisikan permodelan motor DC orde kedua. Hasil respon akan ditampilkan pada *scope* dan *display* untuk mengetahui berapa nilai maksimal respon yang dihasilkan.

2.7.2 Blok Diagram LQR Motor DC MG-16B

Pada blok diagram LQR Motor DC MG-16B bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada *software simulink*.

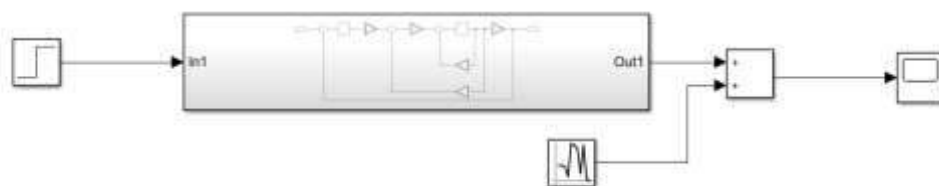


Gambar 4.5 Diagram Blok LQR Motor DC MG-16B

Sumber gambar: Penulis

A. 2.7.3 Blok Diagram LQR Motor DC MG-16B dengan Noise

Pada blok diagram LQR Motor DC MG-16B dengan *noise* bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada *software simulink*.



Gambar 4.6 Diagram Blok LQR Motor DC MG-16B dengan Noise

Sumber gambar: Penulis

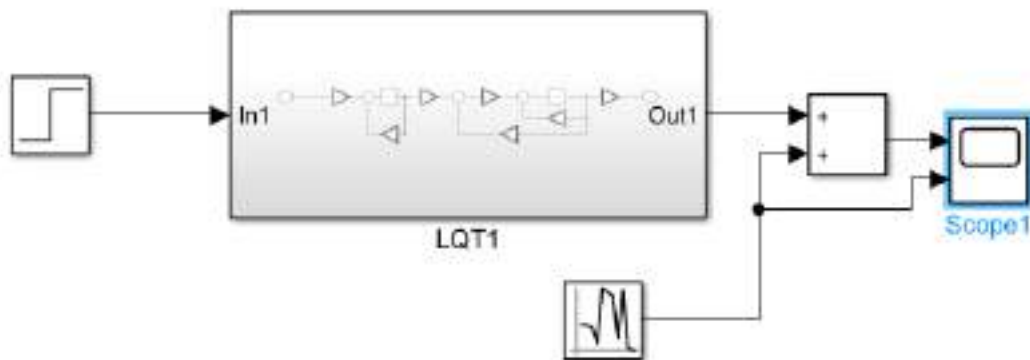
B. 2.7.4 Blok Diagram LQT Motor DC MG-16B



Gambar 4.7 Diagram Blok LQT Motor DC MG-16B

Sumber gambar: Penulis

C. 2.7.5 Blok Diagram LQT Motor DC MG-16B dengan Noise



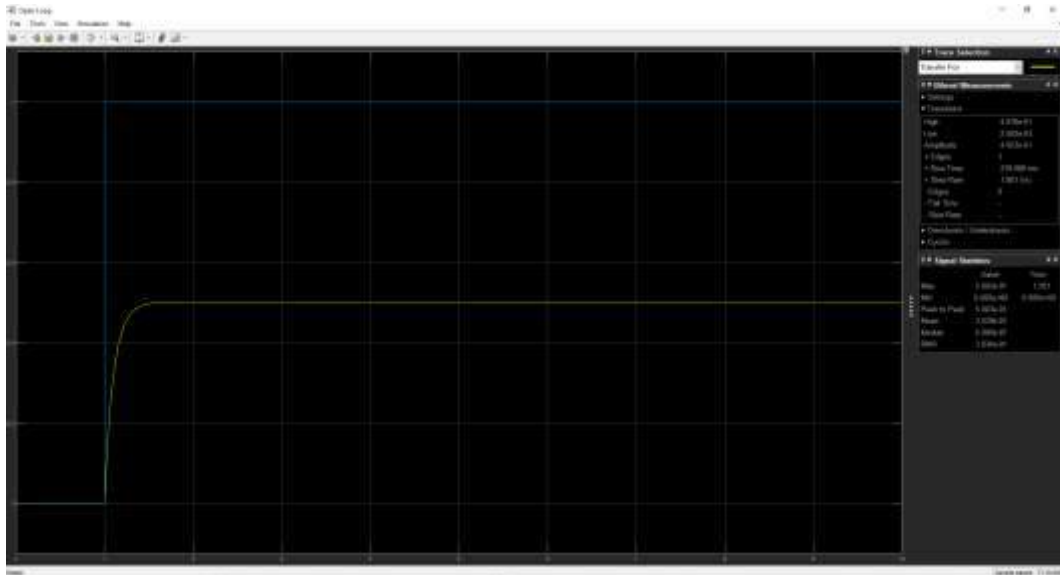
Gambar 4.8 Diagram Blok LQT Motor DC MG-16B dengan Noise

Sumber gambar: Penulis

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dibahas mengenai hasil dari respon motor DC MG-16B pada model matematis orde pertama dan saat diberikan metode LQR dan LQT dengan dan tanpa *noise*. Hasil respon didapatkan dengan menggunakan simulasi pada *software* Simulink Matlab.

3.1. Hasil Respon Orde Dua Motor DC MG-16B

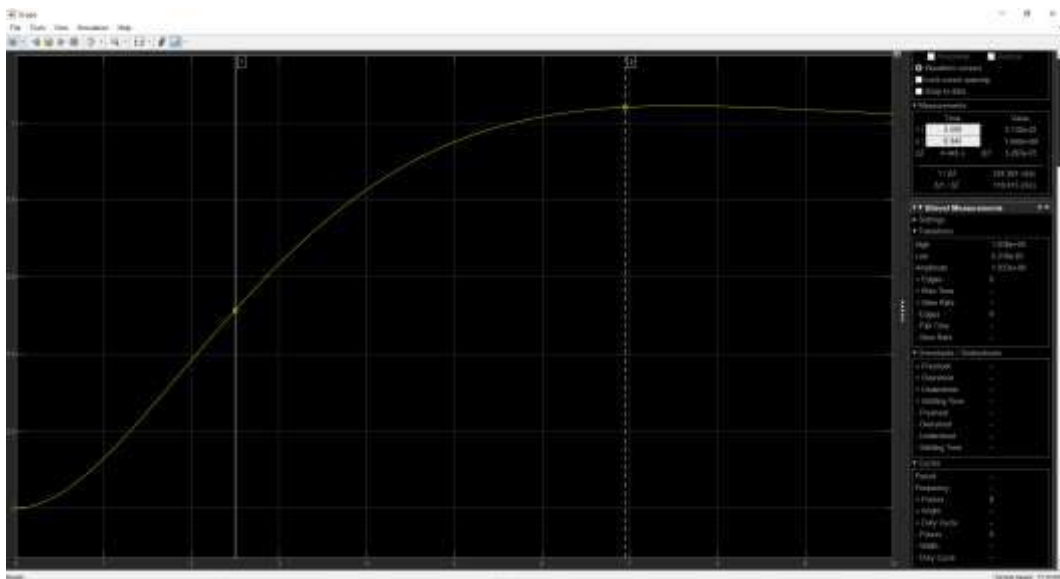


Gambar 4.9 Hasil Respon Motor DC MG-16B pada Permodelan Matematis Orde Dua

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* repon permodalan orde kedua yang terlihat pada gambar 9, terlihat grafik respon motor pada orde dua memiliki keluaran yang sangat jauh dari set poin yang diinginkan. Gelombang berwarna kuning merupakan hasil respon motor sedangkan yang berwarna biru merupakan set poin yang diinginkan. Set poin yang diinginkan yaitu 0,5 sedangkan respon motor hanya berada pada nilai 219 dengan riak yang tinggi pada *rise time* respon motor. Motor DC MG-16B yang diamati memiliki karakteristik linier yang ditunjukkan dengan bentuk sinyal yang tidak terdapat riak. Respon motor berada pada kondisi *steady state* pada detik ke $\pm 0,27$.

3.2. Hasil Respon Motor DC MG-16B Menggunakan Metode LQR

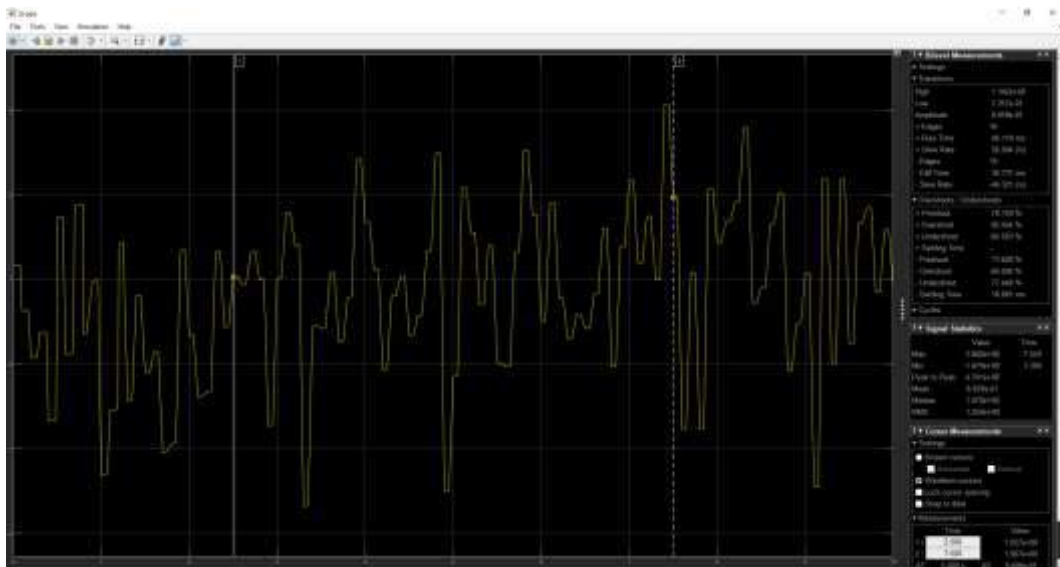


Gambar 4.10 Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQR

Sumber gambar: Penulis

Pada Gambar 10 merupakan tampilan *step response* dari motor DC MG-16B LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC MG-16B mencapai amplitudo sebesar 1,033 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang minimal di angka 3,940 s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0%.

3.3. Hasil Respon Motor DC MG-16B Menggunakan Metode LQR dengan Noise

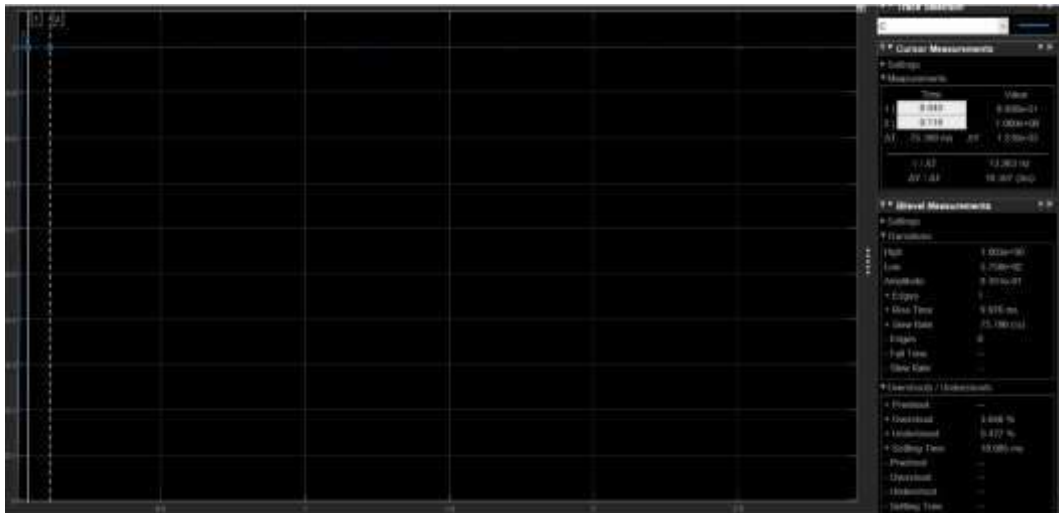


Gambar 4.11 Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQR Saat Diberikan Noise

Sumber gambar: Penulis

Pada Gambar 12 merupakan tampilan *step response* dari motor DC MG-16B LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC MG-16B hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar 8,059 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 52.720ms dan memiliki *overshoot* sebesar 82,454% serta *undershoot* diangka -64,563%

3.4. Hasil Respon Motor DC MG-16B Menggunakan Metode LQT

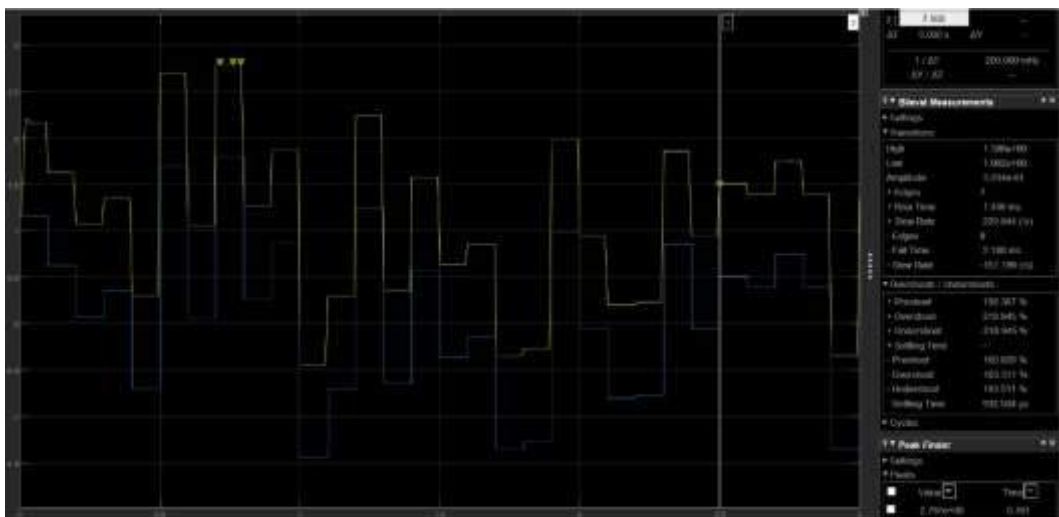


Gambar 4.12 Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQT

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon permodalan gambar 13, terlihat grafik respon motor DC MG-16B dengan menggunakan LQT memiliki keluaran yang sama dengan nilai set poin yang diinginkan yaitu 0,5 dengan waktu respon menuju *steady state* sangat cepat yaitu 8.364us. Namun, respon yang dihasilkan mengalami overshoot 3.646% dan *undershoot* 0.477%.

3.5. Hasil Perbandingan Respon Motor DC MG-16B Menggunakan Metode LQT dan Tanpa Metode



Gambar 4.13 Hasil Respon Motor DC MG-16B dengan Metode LQT Saat Diberikan Noise

Sumber gambar: Penulis

Dari hasil gambar 14 terlihat sinyal kuning yang merupakan hasil respon motor DC MG-16B dengan metode LQT mengalami perubahan bentuk dari sebelum diberikan noise. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* serta meniru bentuk dari sinyal noise yang

diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linier dan jauh dari kondisi stabil atau steady state pada set poin yang telah diberikan.

D. Kesimpulan

Dari hasil percobaan terhadap motor DC MG-16B didapatkan hasil bahwa penggunaan metode LQR memiliki hasil respon yang sama dengan *set poin* yang diinginkan tanpa adanya *overshoot* dan *undershoot*. Waktu untuk mencapai *steady state* $\pm 1,2$ lebih cepat dibandingkan tanpa metode. Saat tanpa menggunakan metode LQR, respon motor jauh dari nilai set poin yang diinginkan dan untuk mencapai nilai *steady state* membutuhkan waktu yang cukup lama. Hasil respon motor DC MG-16B menggunakan LQR saat diberikan noise menghasilkan respon yang mengikuti sinyal noise yang diberikan pada sistem sehingga respon yang dihasilkan tidak lagi linier. Pada saat motor DC MG-16B diberikan metode LQT, dengan waktu mencapai nilai *steady state* sangat cepat yaitu 8.364us. Namun, respon yang dihasilkan mengalami overshoot 3.646% dan undershoot 0.477%. Hasil respon motor DC MG-16B menggunakan LQT saat diberikan noise menghasilkan respon yang mengikuti sinyal noise yang diberikan pada sistem sehingga respon yang dihasilkan tidak lagi linier. Metode LQT dinilai lebih baik dibandingkan metode LQR karena respon yang lebih cepat daripada metode LQR untuk mencapai set poin pada motor DC MG-16B.

Daftar Pustaka

- [1] Zakariz, NP, Poetro, JE and Nugraha, AT. "Pengaruh Variasi Inlet Notch Terhadap Kecepatan Dan Daya Yang Dapat Terbangkitkan Dari Generator Pada Pembangkit Listrik Tenaga Piko hidro." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [2] Zakariz, NP, Nugraha, AT and Phasinam, K. "The Effect of Inlet Notch Variations in Pico-hydro Power Plants with Experimental Methods to Obtain Optimal Turbine Speed." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2022
- [3] Nugraha, AT. "TRACKING QUADCOPTER MENGGUNAKAN COMMAND GENERATOR TRACKER BERBASIS LOS SAAT ADANYA DISTURBANCE PADA LINTASAN PERSEGI." Prosiding SENIATI 4.2, 2018, pp. 7-13.
- [4] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "ANALISIS KONTROL KECEPATAN PUTARAN MOTOR SATU FASA MENGGUNAKAN PARAMETER FREKUENSI." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 103-111.
- [5] Sutrisna, VHK, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Comparative Analysis of PID and LQR Controllers for Speed Regulation of Series DC Motors." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 2.2, 2024, pp. 1-9.
- [6] Kurniawan, RF, Mudhoffar, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." Jurnal Teknologi Maritim 6.1, 2023, pp. 23-32.
- [7] Negeri, ATNPP and Negeri, MJSPP. "Comparison of Insulated Switch Gear with Desiccant Addition to SF6 Gas Quality System at Waru Substation."

- [8] Ainudin, FH, Ashlah, MB and Nugraha, AT. "Pengontrol Kecepatan Respon Motor dengan Pid dan Lqr." Seminar MASTER PPNS 7.1, 2022
- [9] Utomo, AP, Angga, ATN, Pambudi, DSA and Priyambodo, D. "Battery Charger Design with PI Control Based on Arduino Uno R3." *Applied Technology and Computing Science Journal* 4.2, 2021, pp. 78-90.
- [10] Fatqurrochman, MI, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Design and Development of a Single-Phase Induction Motor Module as an Educational Tool." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1, 2025
- [11] Nugraha, AT, Purwoko, ARJ, Yuniza, SI and Achmad, I. "Analisa Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Cuk Konverter." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 69-83.
- [12] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Rochmawati, NW, Sena, AI and "PERANCANGAN BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK CHARGING BATERAI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 22-33.
- [13] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "IMPLEMENTASI PENGATUR TEGANGAN AC SATU FASA UNTUK MENGATUR KECERAHAN LAMPU PIJAR." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 35-38.
- [14] Nugraha, AT, Priyambodo, D and Sarena, ST. "Design A Battery Charger with Arduino Uno-Based for A Wind Energy Power Plant." *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)* 7.1, 2022, pp. 23-38.
- [15] Jamaludin, M and Nugraha, AT. "Optimizing the Output System of PG36M555 DC Carbon-Brush Motors Using LQR and LQT Methods in MATLAB Simulink." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 1.1, 2023, pp. 1-8.
- [16] Nugraha, AT, Ruddianto, Ahmad, MM, Pambudi, DSA, Utomo, AP and "Rancang Bangun Ship Alarm Monitoring (SAM) Sebagai Solusi Keamanan Pengoperasian Auxiliary Engine." ID Patent EC00,202,204,473, 2022
- [17] Angga, ATN, Shiddiq, MJ and Ramadhan, MF. "Use ordinary expressions to learn how to extract code feedback from the software program upkeep process." *International Journal of Advances in Data and Information Systems* 2.2, 2021, pp. 105-113.
- [18] Ainudin, FH and Nugraha, AT. "Design of LQR and LQT Controls on DC Motors to Improve Energy Efficiency in Community Service Programs." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.2, 2024, pp. 7-13.
- [19] Nugraha, AT, Sobhita, RA and Firdaus, AA. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." *Emerging Trends in Industrial Electronics* 1.1, 2025, pp. 1-8.
- [20] Nugraha, AT, Primaningtyas, WE, Abdullah, K, Wulandari, KD, Alfanda, BD and "Pelatihan manufaktur komposit sebagai produk kerajinan tangan pada industri rumahan." *Educivilia: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat* 1.2, 2020, pp. 119-129.

BAB V

Respons Keluaran Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 417-9661

Oleh: Nur Hasyim As'ari

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *Komparasi, LQR, LQT, Noise, Optimasi*

Technology was created to help humans complete work more efficiently. However, there are factors that influence technology such as environmental factors, installation of controllers with computers, and factors from the technology itself. These factors are called noise or interference so that the technology created does not work optimally. Based on this, it is necessary to optimize a system to reduce the existing noise. Therefore, a study was conducted to determine the magnitude of the effect of noise on the system. This study uses a 417-9661 DC motor to see the effect of noise on a motor system. DC motor is used as a plan in several circuits, single input single output, multiple input single output, single input multiple output, multiple input multiple output. There are 2 additional variables, namely order 1 and order 2. To conduct research using Matrix Laboratory (MATLAB) software, firstly, mathematical modeling is carried out on the motor to get the Transfer Function values of order 1 and order 2. Second, simulations are carried out on each circuit to be analyzed. And lastly, a comparison of the output signal of the circuit is carried out. The results show that noise has a significant effect on the 417-9661 DC motor, so there is a need for an optimization method to reduce noise in the motor. However, the second-order motor has a better output than the first-order motor as seen from the condition after the raise time.

Abstrak

Teknologi diciptakan untuk membantu manusia menyelesaikan pekerjaan menjadi lebih efisien. Namun, ada faktor yang mempengaruhi teknologi seperti faktor lingkungan, instalasi kontroler dengan komputer, dan faktor dari teknologi itu sendiri. Faktor-faktor itu disebut dengan *noise* atau gangguan sehingga teknologi yang diciptakan tidak bekerja secara optimal. Berdasarkan hal tersebut perlu adanya pengoptimalan suatu sistem untuk mengurangi *noise* yang ada. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk menentukan besaran pengaruh *noise* pada sistem. Penelitian ini menggunakan motor DC 417-9661 untuk melihat pengaruh *noise* pada suatu sistem motor. Motor DC digunakan sebagai plan pada beberapa rangkaian *single input single output, multiple input single output, single input multiple*

output, multiple input multiple output. Ada 2 variabel tambahan yaitu orde 1 dan orde 2. Untuk melakukan penelitian menggunakan bantuan *software* Matrix Laboratory (MATLAB), pertama dilakukan pemodelan matematis pada motor untuk mendapatkan nilai *Transfer Function* orde 1 dan orde 2. Kedua dilakukan simulasi pada setiap rangkaian yang akan dianalisis. Dan terakhir dilakukan komparasi hasil keluaran sinyal rangkaian. Didapatkan hasil bahwa *noise* memiliki pengaruh yang signifikan pada motor DC 417-9661 sehingga perlu adanya metode pengoptimalan untuk mengurangi *noise* pada motor. Namun, motor orde 2 memiliki keluaran yang lebih baik daripada orde 1 terlihat dari kondisi setelah *raise time*.

A. Pendahuluan

Teknologi pada perkembangan dunia sekarang berjalan secara linear dengan manusia. Semakin maju sumber daya manusia, teknologi akan semakin baik. Teknologi membantu manusia dalam menyelesaikan pekerjaan menjadi lebih efisien. Misalkan dalam industri perlu adanya sistem untuk dapat meningkatkan dan mempercepat proses produksi (Anifah, 2022). Dalam proses produksi banyak digunakan peralatan elektronik berupa motor DC.

Motor DC adalah alat yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik/gerak (Jumiyatun, 2017). Motor DC membutuhkan tegangan dan arus searah untuk bekerja (Supriadi et al., 2020). Dalam penelitian ini penulis menggunakan Motor DC RS PRO 417-9661 12 V. Motor DC dengan tipe tersebut memiliki kecepatan pada efisiensi maksimum sebesar 47 rpm (radian per menit) dan torsi sebesar 157,02 mN.m (Pribadi & Prasetyo, 2019). Namun, saat motor diberi arus searah (DC) tidaklah optimal. Sehingga dibutuhkan suatu metode untuk pengontrolan motor DC supaya keluaran motor menjadi lebih optimal (Raihan, 2022).

Terdapat dua metode yang akan digunakan untuk mengoptimalkan keluaran dari Motor DC RS PRO 417-9661. Metode yang pertama adalah *Linear Quadratic Regulator (LQR)*. LQR berfungsi mengoptimalkan respon motor untuk lebih mendekati *set point* (mengurangi *undershoot* dan *overshoot*). LQR memiliki sifat ketahanan, keandalan, dan penguatan statis. Dengan menggunakan metode *Linear Quadratic Regulator* dalam sebuah sistem yang besar dengan banyak input, kontrol efisien beberapa keluaran dicapai secara ekonomis. Metode ini dirancang untuk merancang pengontrol optimal yang meminimalisir fungsi biaya yang diberikan (Topan, 2022).

Metode yang kedua adalah *Linear Quadratic Tracker (LQT)*. LQT adalah sebuah sistem pengaturan linear dimana keluaran sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang diinginkan

(Nugroho, 2019). Mekanisme kerja dari metode *Linear Quadratic Tracker* adalah mengatur pelacakan berbasis model yang menggunakan *affine state-feedback* untuk memberikan upaya pengendalian yang optimal (Sari et al., 2019). LQT terdiri dari *feedback* keadaan biasa dari sistem dinamis linear Bersama dengan kontrol umpan maju tambahan (Styawati et al., 2021). Metode *Linear Quadratic Tracker* umumnya digunakan untuk masalah optimasi pada sistem yang berkaitan dengan pelacakan (*tracking*) (Sukarman & Abdulah, 2020).

Dalam penelitian kali ini, akan dilakukan komparasi respon keluaran pada motor DC tipe 417-9661 menggunakan dua metode optimasi sistem, yaitu *Linear Quadratic Regulation (LQR)* dan *Linear Quadratic Tracker (LQT)*. Percobaan juga dilakukan dengan menambahkan *noise* pada setiap rangkaian, tujuannya untuk mengetahui pengaruh *noise* pada setiap metode yang disimulasikan. Untuk melaksanakan penelitian ini peneliti menggunakan *software* Matrix Laboratory (MATLAB) untuk membuat rangkaian dan menampilkan hasil respon keluaran.

B. Metodologi Penelitian

Tahapan Penelitian

Berdasarkan pendahuluan didapatkan tahapan penelitian sebagai berikut:

Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahapan awal dalam penelitian ini. Pada tahapan ini dilakukan pencarian referensi terkait dengan metode optimasi sistem *Linear Quadratic Regulation* dan *Linear Quadratic Tracker*. Referensi digunakan sebagai acuan untuk menyelesaikan masalah. Referensi diambil dari dua sumber yaitu jurnal/ artikel ilmiah, dan *datasheet*.

Pembuatan Model Matematis

Pembuatan model matematis dilakukan tahapan perhitungan teoritis untuk mendapatkan model matematis orde 1 dan orde 2 berdasarkan *datasheet* yang didapatkan. Model matematis digunakan sebagai *transfer function* dari rangkaian yang akan disimulasikan.

Pembuatan Rangkaian Sistem

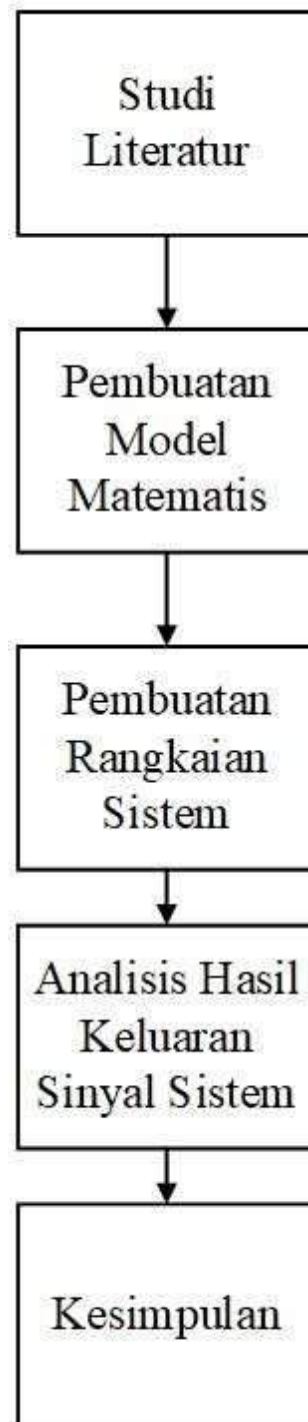
Pada tahapan ini dilakukan pembuatan setiap rangkaian sistem yang akan disimulasikan. Tahapan ini dilakukan pada *software* MATLAB. Terdapat 4 rangkaian yang dibuat yaitu, rangkaian LQT, rangkaian LQT dengan *noise*, rangkaian LQR, rangkaian LQR dengan *noise*.

Analisa Respon Keluaran Sistem

Pada tahapan ini dilakukan analisa dari respon keluaran sinyal simulasi rangkaian sistem. Analisis pada penelitian ini ditekankan pada komparasi atau perbandingan dua metode optimasi sistem.

Kesimpulan

Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah penarikan kesimpulan berdasarkan Analisa yang telah dilakukan.



Gambar 5.1 Diagram Blok Sistem

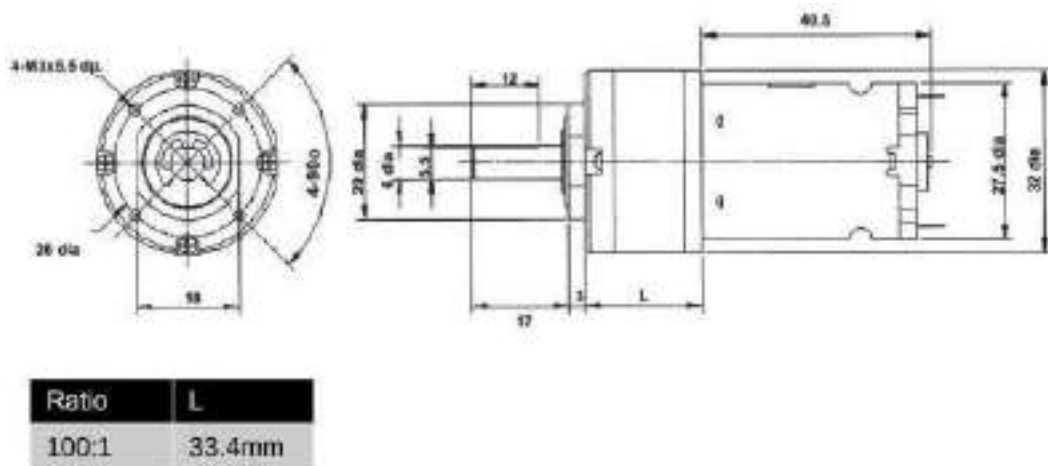
C. Model Matematis Motor DC RS PRO 417-9661

Datasheet Motor DC RS PRO 417-9661

Spesifikasi Motor DC RS PRO 417-9661:

Tabel 5.1

Nama Motor	: Motor DC RS PRO 417-9661
	: 0,465 N/m
Rated current	: 0,99 A
Voltage	: 12 V
Speed	: 116 rpm
Reduction Ratio	: 1:100
Diameter	: 32 mm
Jari – jari motor	: 16 mm = 0,016 m



Gambar 5.2 Datasheet Motor DC RS PRO 417-9661

D. Pemodelan Matematis Orde 1

Pemodelan matematis motor DC RS PRO 417-9661 orde 1 sebagai berikut:

Pemodelan Orde 1

Bentuk umum fungsi alih orde 1

$$() =$$

$$+ 1$$

Orde 1 motor DC

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 : Dimana = .
sehingga

$$=$$

$$= 0,461$$

$$0,99$$

$$= 0,465$$

Persamaan orde 1 motor DC :

$$() = 0,465$$

$$0,461 + 1$$

$$(1)$$

E. Pemodelan Matematis Orde 2

Pemodelan matematis motor DC RS PRO 417-9661 orde 2 sebagai berikut:

Pemodelan Orde 2

Bentuk umum fungsi alih orde 2

$$() =$$

$$n^2$$

$$^2 + 2n + n^2$$

Menjadi :

$$() = 98,596$$

$$^2 + 2.100.3,14 + 98,596$$

$$() = 98,596$$

$$^2 + 62.800 + 98,596$$

$$(2)$$

Kendali Optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-keadaan (*state space*). Karena pendekatan sederhana dari metode ruang keadaan, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini. Persamaan ruang keadaan untuk sistem secara umum ditulis sebagai berikut:

$$= + u(3)$$

Pada prinsipnya, metode LQR mencari suatu sinyal kontrol yang meminimalisir indeks performansi J.

$$= \int$$

$$+ u t$$

(4)

LQR menemukan hukum *input* kontrol optimal u^* . Kendala yang disebabkan oleh matriks Q dan R meminimalkan indeks kinerja. Hukum kontrol optimal loop tertutup didefinisikan sebagai:

$$u^* = -Kx \quad (5)$$

Dimana K mewakili matriks gain umpan balik yang optimal. Matriks gain bekerja untuk meminimalkan indeks kinerja. Ini menentukan penempatan kutub loop tertutup yang tepat untuk meminimalkannya. Matriks penguatan umpan balik K bergantung pada matriks A, B, Q dan R. Umpan balik gainmatrix k diperoleh dengan menyelesaikan Algebraic Riccati Equation (ARE), P mendefinisikan matriks simetris dan matriks definit positif yang diperoleh solusi dari ARE didefinisikan sebagai:

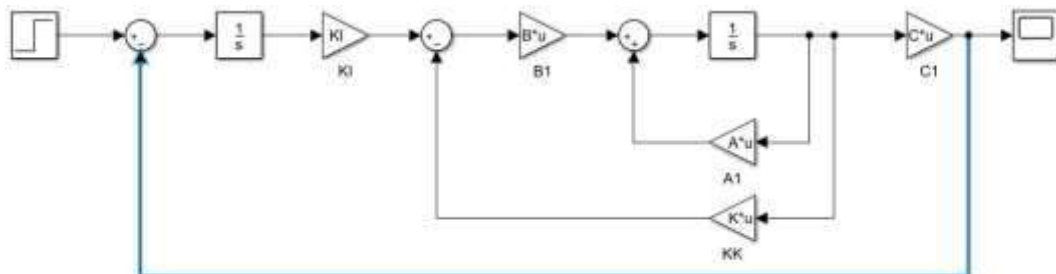
$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (6)$$

$$P = P^T > 0 \quad (7)$$

Substitusi persamaan (8) dan (9) menjadi :

$$A - B K = -\lambda I \quad (8)$$

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 5.3 Diagram Blok Linear Quadratic Regulation (LQR)

Program Matlab *Linear Quadratic Regulation (LQR)* pada Motor DC RS PRO 417-9661

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC
```

```
clear; clc;
```

```
% Model Motor DC
```

```
J=0.0000012 ; b=0.1 ; K=0.0125 ; R=0,80 ; L =0.00015 ;
```

```
% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=
```

```
% Induktansi
```

```

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
B = [0; 1/L];
C = [1 0];
AA = [ A zeros(2,1); -C 0]; BB = [B;0];
% Pole Placement J = [-3 -4 -5];
K = acker(AA,BB,J) KI = -K(3);
KK = [K(1) K(2)];
% Matrix LQR Q = [1 0 0;
0 1 0;
0 0 1000]; R = [1] ;
K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R) KI2=-K_lqr(3);
KK2=[K_lqr(1) K_lqr(2)];

```

Kendali Optimal *Linear Quadratic Tracker* (LQT)

Linear Quadratic Tracker (LQT) terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linear bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan maju tergantung pada vektor sinyal referensi, $r(t)$. Vektor $r(t)$ dinyatakan dalam:

$$r = [e^{-t} \quad 0](9)$$

r_{ref} merupakan sinyal tegangan referensi yang bervariasi terhadap waktu. Skema LQT meminimalkan indeks kinerja kuadrat untuk menghasilkan keputusan kontrol yang optimal yang dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (10)$$

Q dan R adalah keadaan antara dan control matriks pembobotan, masing-masing. Mereka dipilih sedemikian rupa; $Q = Q^T \geq 0$ dan $R = R^T > 0$. Karena sifat kuadrat dari fungsi cost, sinyal kontrol sebanding dengan variasi kuadrat persamaan. Jadi, jika state- variations besar; minimalisasi dan, karenanya, tingkat konvergensi lebih cepat.

Keputusan kontrol *affine* yang optimal dievaluasi melalui ekspresi matematika yang ditunjukkan pada,

$$\dot{t} = -t + e t \quad (11)$$

Dimana

$$=^{-1}(12)$$

$$=^{-1}((-))^{-1}(13)$$

Vektor penguatan, K, membantu merelokasi kutub sistem untuk mensintesis kontroler yang optimal. Perolehan optimal vektor bergantung pada matriks definit positif simetris, P, ditunjukkan pada (12). Matriks, P, untuk sistem yang diberikan dapat diperoleh dengan memecahkan Persamaan Aljabar Riccati, ditunjukkan pada.

$$+ -^{-1} + QH = 0 \quad (14)$$

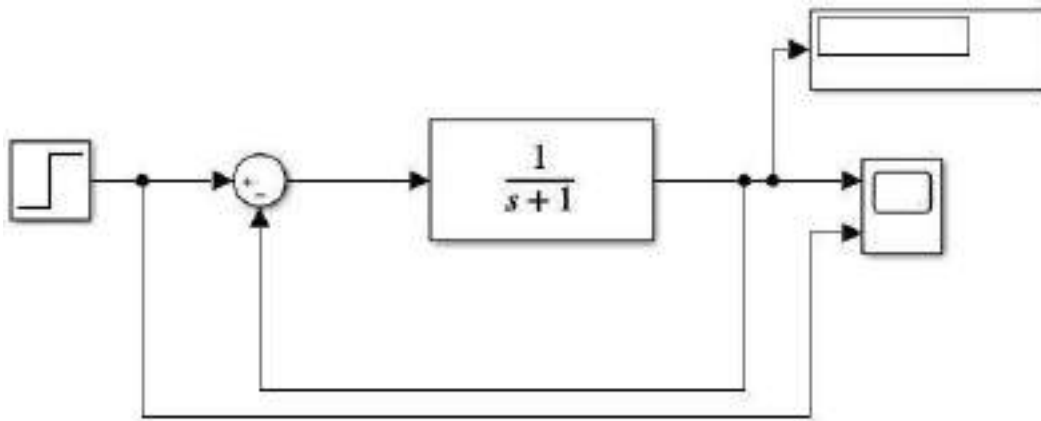
Program Matlab *Linear Quadratic Tracker (LQT)* pada Motor DC RS PRO 417-9661

```
clear clc
%parameter sistem MSD m=2;
k=8; b=6;
%Matriks pada state A=[0 1;k/m -b/m];
B=[0;1/m];
C=[1 0];
%bobot
Q=[1 0;0 1]; R=10;
[S,eig,G] = care(A,B,G) %riccati 0=A'S+SA-SB(inv R)B'S+Q Kx=inv(R)*B'*S
%feedback Gain Kx
Kr=(Kx*(inv(A))*B-eye(1))*(inv(C*(inv(A))*B)) Ahat=[0 1 0;-k/m -b/m 0;1 0 0]
Bhat=[0;1/m;0]
%bobot hat
Qhat=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];
Rhat=6;
[Shat,eighat,Ghat] = care(Ahat,Bhat,Qhat) %Riccati 0=A'S+SA-SB(inv R)B'S+Q
Khat=inv(Rhat)*Bhat'*Shat Kw=Khat(:,3)
```

F. Simulasi Rangkaian Sistem pada Matlab

Rangkaian Orde Satu Motor DC RS PRO 417-9611

Rangkaian orde satu digunakan untuk mengetahui keluaran respon asli pada motor DC RS PRO 417-9611 tanpa dipengaruhi metode optimasi dan *noise*.

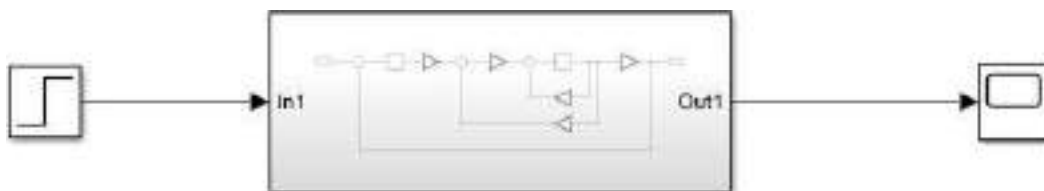


Gambar 5.4 Rangkaian Orde Satu Motor DC

Gambar 2.4 adalah rangkaian orde satu motor DC yang terdiri dari satu *input* dan satu *output*. *Input* menggunakan jenis *step*. *Transfer function* pada rangkaian tersebut berupa permodelan motor DC RS PRO 417-9611 orde satu. Keluaran respon ditampilkan pada *scope* untuk melihat hasil respon.

Rangkaian *Linear Quadratic Regulation (LQR)* Motor DC RS PRO 417- 9611

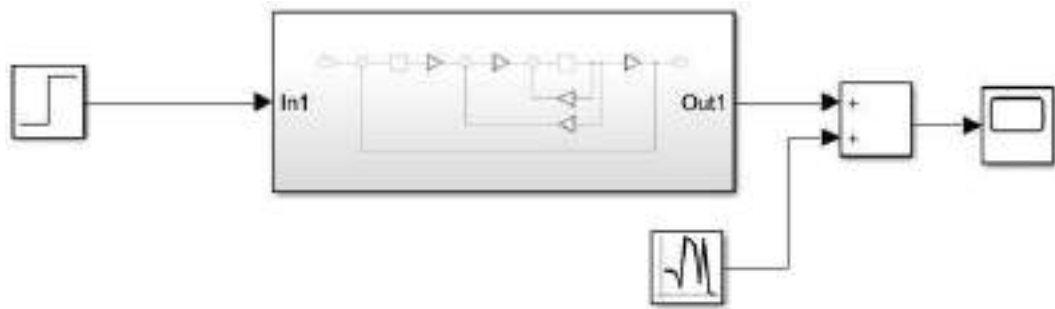
Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 417-9611 digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motr DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 5.5 Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 417-9661

Rangkaian *Linear Quadratic Regulation (LQR)* Motor DC RS PRO 417- 9611 dengan *Noise*

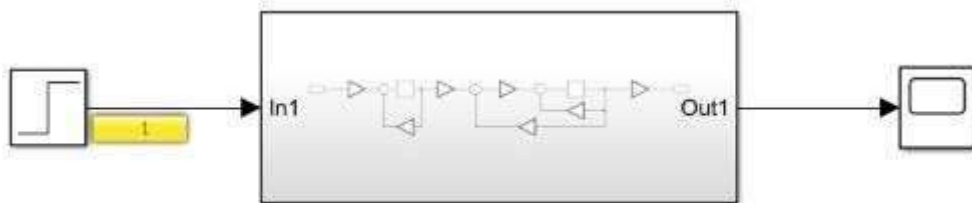
Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 417-9611 dengan *noise* digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 5.6 Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Noise

Rangkaian Linear Quadratic Tracker (LQT) Motor DC RS PRO 417-9611

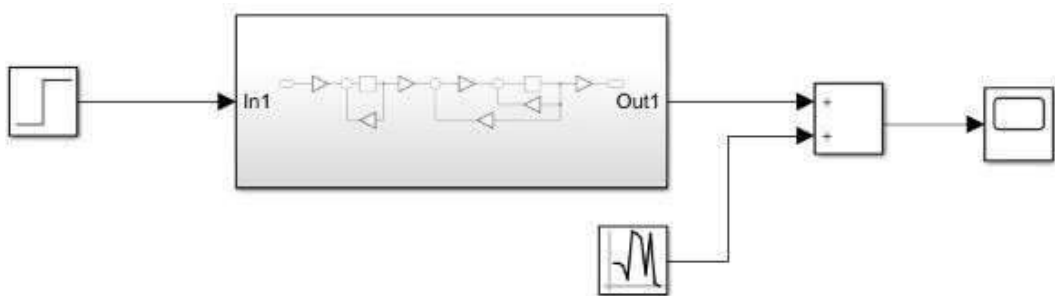
Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 417-9611 digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motr DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 5.7 Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 417-9661

Rangkaian Linear Quadratic Tracker (LQT) Motor DC RS PRO 417-9611 dengan Noise

Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 417-9611 dengan *noise* digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQT dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 5.8 Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Noise

G. HASIL DAN Pembahasan

Hasil percobaan berupa grafik keluaran respon motor DC RS PRO 417-9611 dengan model matematis orde satu, ditambahkan metode *Linier Quadratic Regulation* (LQR),

metode *Linier Quadratic Tracker* (LQT), serta ditambahkan *noise* .Dari hasil percobaan akan dilakukan komparasi untuk keluaran respon motor.

H. Hasil Respon Orde Satu Motor DC RS PRO 417-9611

Keluaran respon orde satu (Gambar 3.1). Gelombang warna oranye merupakan hasil respon motor sedangkan yang warna biru adalah *set point*. *Set point* bernilai 0,5 sedangkan respon motor hanya di angka 0,07, terpaut jauh dari *set point*. Motor DC RS PRO 417-9611 memiliki karakteristik linear yang ditunjukkan dengan bentuk sinyal yang tidak ada *ripple*. Respon motor berada pada kondisi *steady state* pada detik ke 2. Respon tersebut pada optimasi terbilang lambat.



Gambar 5.9 Hasil Respon Motor DC 37-GB500 Orde Satu

I. Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9611 dengan Metode LQR



Gambar 5.10 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQR

Keluaran respon rangkaian LQR (Gambar 3.2), terlihat grafik respon motor 37- GB500 memiliki keluaran yang sama dengan nilai *set point* yang diinginkan. *Set point* bernilai 0,5. Respon motor berhasil mencapai *set point* pada detik ke 1,2 tanpa adanya *overshoot* maupun *undershoot*. Respon motor DC RS PRO 417-9611 dengan metode *Linear Quadratic Regulation* (LQR) lebih baik dibandingkan dengan respon motor orde satu.

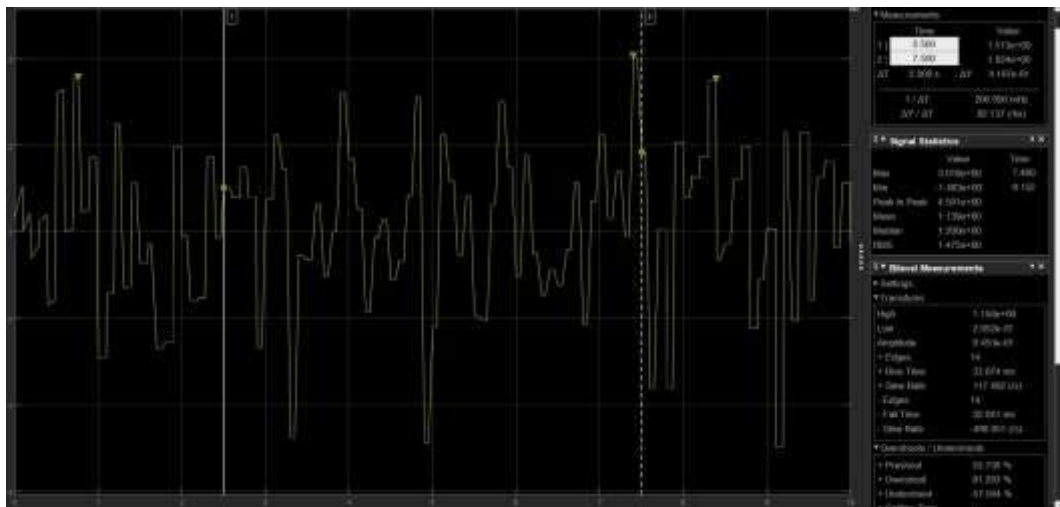
J. Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 417-9611 dengan Metode LQR dan Tanpa Metode

Keluaran respon perbandingan (Gambar 3.3) antara menggunakan metode LQR dan tanpa menggunakan metode. Keluaran respon memiliki grafik yang berbeda. Gelombang warna oren merupakan *set point* yang diinginkan, warna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQR, dan gelombang warna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQR. Pada gambar 3.3 terlihat respon motor dengan metode LQR mempunyai respon yang paling baik jika dibandingkan dengan tanpa metode apapun. Selain memiliki respon yang sesuai dengan *set point*, respon motor juga menjadi lebih cepat untuk mencapai nilai *steady state*.



Gambar 5.11 Hasil Perbandingan Respon Motor DC 37-GB500 dengan Metode LQR dan Tidak Menggunakan Metode

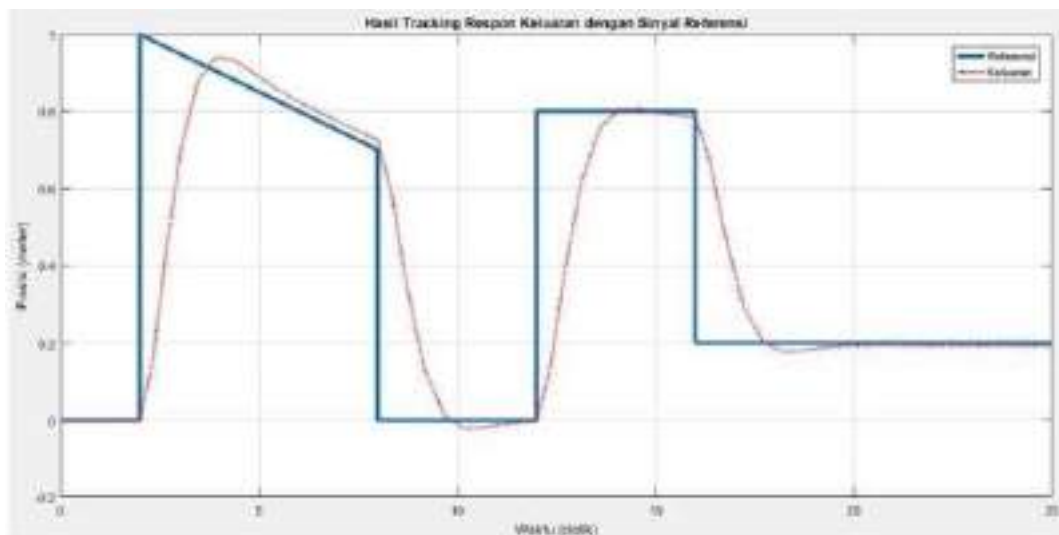
K. Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9611 Metode LQR dengan Noise



Gambar 5.12 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQR saat Diberikan Noise

Keluaran respon rangkaian LQR dengan *noise* (Gambar 3.4), terlihat sinyal berwarna kuning mengalami perubahan bentuk sebelum diberikan *noise*. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* dan mengduplikat bentuk dari sinyal *noise* yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linear dan jauh dari kondisi *steady state* pada *set point* yang telah diberikan.

L. Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9611 dengan Metode LQT



Gambar 5.13 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQT

Keluaran respon rangkaian LQT (Gambar 3.5), terlihat grafik respon motor 37- GB500 memiliki keluaran yang sama dengan nilai *set point* yang diinginkan. *Set point* bernilai 0,5. Respon motor berhasil mencapai *set point* pada detik ke 1,2 tanpa adanya *overshoot* maupun

undershoot. Respon motor DC RS PRO 417-9611 dengan metode *Linear Quadratic Tracker* (LQT) lebih baik dibandingkan dengan respon motor orde satu.

M. Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9611 dengan Metode LQT dan Tanpa Metode

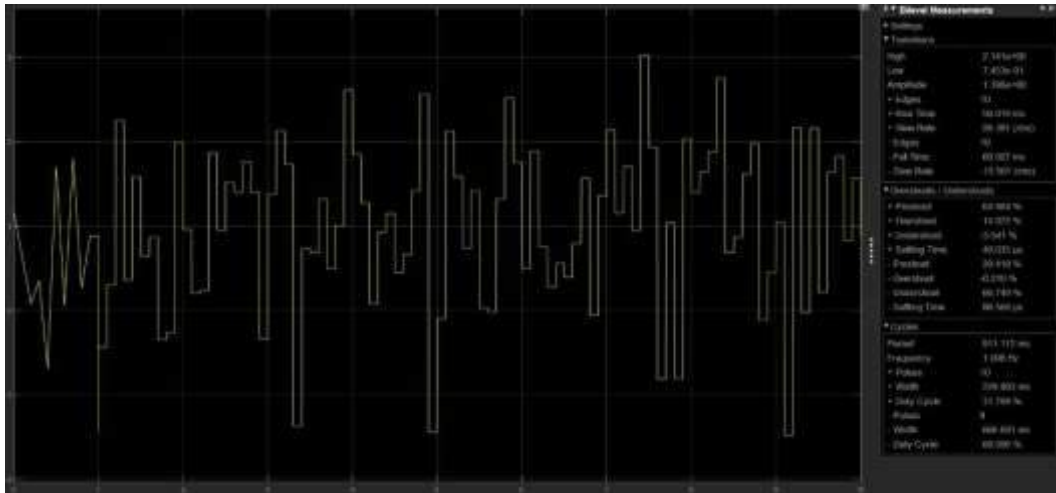
Keluaran respon perbandingan (Gambar 3.6) antara menggunakan metode LQT dan tanpa menggunakan metode. Keluaran respon memiliki grafik yang berbeda. Gelombang warna oren merupakan *set point* yang diinginkan, warna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQT, dan gelombang warna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQT. Pada gambar 3.3 terlihat respon motor dengan metode LQR mempunyai respon yang paling baik jika dibandingkan dengan tanpa metode apapun. Selain memiliki respon yang sesuai dengan *set point*, respon motor juga menjadi lebih cepat untuk mencapai nilai *steady state*.



Gambar 5.14 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQT dan Tidak Menggunakan Metode

N. Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9611 Metode LQT dengan Noise

Keluaran respon rangkaian LQT dengan *noise* (Gambar 3.7), terlihat sinyal berwarna kuning mengalami perubahan bentuk sebelum diberikan *noise*. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* dan mengduplikat bentuk dari sinyal *noise* yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linear dan jauh dari kondisi *steady state* pada *set point* yang telah diberikan.



Gambar 5.15 Hasil Respon Motor DC RS PRO 417-9661 dengan Metode LQT saat Diberikan Noise

O. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang dilakukan pada motor DC RS PRO 417-9611 pada beberapa rangkaian, didapatkan kesimpulan bahwa kedua metode yang digunakan (*Linear Quadratic Regulation* dan *Linear Quadratic Tracker*) memiliki pengaruh yang signifikan pada respon motor. Bentuk keluaran sinyal dari rangkaian menggunakan metode LQR, LQT, dan orde satu memiliki diferensi yang mencolok. Meski begitu, rangkaian saat ditambahkan *noise* mengalami banyak sekali *ripple*.

Dengan analisis komparasi hasil keluaran sinyal yang dilakukan, penelitian hanya terbatas pada metode yang digunakan berupa *Linear Quadratic Regulation* dan *Linear Quadratic Tracker*.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT. "Buku Rancang Bangun Teknologi Pemurni Air.", 2022
- [2] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Buku Penerapan Sistem Elektronika Daya: AC Regulator, DC Chopper, dan Inverter.", 2022
- [3] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Controlled Single-Phase Full-Wave Rectifier Experiment for DC Shunt Motor Control." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 1.1, 2023, pp. 1-10.
- [4] Prastica, RAN, Hasin, MK and Nugraha, AT. "Pregnancy Chatbot Menggunakan NLP (Natural Language Processing)." *JOI: Journal of Automation Engineering and Its Application* 1.1, 2022
- [5] Nugraha, AT, Primaningtyas, WE, Abdullah, K, Wulandari, KD, Alfanda, BD and "Pelatihan manufaktur komposit sebagai produk kerajinan tangan pada industri rumahan." *Educivilia: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat* 1.2, 2020, pp. 119-129.
- [6] Nugraha, AT, Tiwana, MZA and Ravi, AM. "Analisis Optimalisasi Manajemen Daya Chiller Untuk Rencana AC Sentral Industri." *Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi* 1.1, 2021, pp. 35-46.

- [7] Nugraha, AT, Wahyudi, LA, Agna, DIY and Novsyafantri, N. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri dengan Menggunakan Penyearah Terkendali." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 9-20.
- [8] ad, RF As' and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Penstabil Kinerja Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.1, 2022
- [9] Nugraha, AT, Widiarti, Y, Rachman, I, Riantini, R, Pambudi, DSA and "Instalasi Listrik Kapal." ID Patent EC002,023,136,868, 2023
- [10] Azam, MRI, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Mini Weather Station dengan Penerapan Panel Surya sebagai Sumber Energi Berbasis Mikrokontroler." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.2, 2021, pp. 67-77.
- [11] Nugraha, AT, Lembang, MYD, Rahman, FWN and Sobhita, RA. "Control of DC rotary motor type S-50-39 using second order PID method based on Ziegler-Nichols 1 and 2." *AIP Conference Proceedings* 3334.1, 2025, p. 20015.
- [12] Dermawan, D, Basyari, HA, Fathurrohman, MF and Nugraha, AT. "Kendali Kecepatan Motor Dengan Kontrol Pid Menggunakan Metode Metaheuristik." *Seminar MASTER PPNS 8.1*, 2023, pp. 236-243.
- [13] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Planning Of A 70 kW Solar Power Plant In Magersari Village." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...)*, 2024
- [14] Nugraha, AT, Apriani, M, Utomo, AP, Sari, DP and Sobhita, RA. "Buku Converter DC-DC Sebagai Alat Konversi Daya Listrik Searah (DC).", 2024
- [15] Pratama, MST, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Permodelan Elektromekanis dan Analisis Fungsi Alih Motor DC Maxon DCX 35 L untuk Sistem Kontrol Presisi." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 4.1, 2025
- [16] Apriani, M, Astuti, UP, Nugraha, AT and Atiqoh, VZ. "Daur Ulang Tutup Botol Bekas Menjadi Media Biofilter Dengan Lubang Lingkaran Sebagai Pengolah Limbah Restoran." ID Patent EC00,202,312,633, 2023
- [17] Pramesta, A, Wulandari, P, Mudjiono, U and Nugraha, AT. "Implementasi Sensor LDR dan Sensor Raindrop pada Prototipe Automatic Sliding Roof System." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 1-11.
- [18] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "PERBANDINGAN RESPON KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN METODE PID DAN LQR." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 10-15.
- [19] Nugraha, AT, Saputra, DBD, Sobhita, RA and Ashlah, MB. "Photovoltaics Concept Integrated on the Grid With the STT-PLN Building." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.1, 2024, pp. 12-16.
- [20] Najmurokhman, A, Nugraha, A, Kusnandar, UK and Wibowo, B. "Perancangan dan Realisasi Sistem Pendeteksi Objek menggunakan Perangkat Lunak Python 2.7." *LPPM UNJANI*, 2017

BAB VI

Rangkaian Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) pada Motor DC

Oleh: **Dan Linear Quadratic Tracking (LQT)**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: Motor DC, Linear Quadratic Regulator (LQR), Simulink, Matlab, PID

A. Nur Zafira Arya Ar Rahmah¹

¹D4 Teknik Otomasi, Teknik Kelistrikan Kapal

, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

This paper describes the process of determining which DC motor system is the most widely used type of motor compared to other electric motors, because this type of motor has several advantages such as simple construction, robustness, relatively inexpensive price and does not require complicated maintenance. But the main thing, the problem of this discussion is to keep the speed of the motor constant. If on a DC motor there is a change in the given load with a certain nominal load value, then the response will change even though the controller has been given. To overcome this problem, the optimal control technique used is the Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT). In this study, the DC Motor System Identification Module with Arduino was developed to facilitate the acquisition of DC motor models using first and second order modeling approaches. This module is integrated between Arduino and Simulink Matlab, used to collect input - output data. The output of the system recognition process is a DC motor model with an autoregressive quadratic exogenous (ARX) model. In addition, the application of the LQR control technique with the parameter matrix element Q is found by multiplying the displacement matrix of system C by the matrix of system C . Meanwhile, the matrix of element R is found experimentally set to 0.0001. From the test results it is known that the LQR control produces a more optimal system response time constant.

B. Abstrak

Makalah ini menjelaskan proses penentuan sistem Motor DC merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan motor listrik lainnya, karena motor jenis ini memiliki beberapa keunggulan seperti konstruksi sederhana, kokoh, relatif murah harga dan tidak memerlukan perawatan yang rumit. Tapi yang utama, masalah dari

pembahasan ini adalah menjaga agar kecepatan motor tetap konstan. Jika pada motor DC terjadi perubahan beban yang diberikan dengan nilai tertentu beban nominal, maka respon akan berubah meskipun pengontrol telah diberikan. Untuk mengatasi masalah tersebut, pengendalian optimal teknik yang digunakan yaitu Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT). Pada penelitian ini, Modul Identifikasi Sistem Motor DC dengan Arduino dikembangkan untuk memfasilitasi perolehan model motor DC dengan pendekatan pemodelan orde pertama dan kedua. Modul ini terintegrasi antara Arduino dan Simulink Matlab, digunakan untuk mengumpulkan data input – output. Keluaran dari proses pengenalan sistem adalah model motor DC dengan model autoregressive quadratic exogenous (ARX). Selain itu, penerapan teknik kontrol LQR dengan parameter matriks elemen Q ditemukan dengan mengalikan perpindahan matriks sistem C dengan matriks sistem C . Sedangkan matriks elemen R ditemukan secara eksperimental ditetapkan ke 0,0001. Dari hasil pengujian diketahui bahwa kontrol LQR menghasilkan konstanta waktu respon sistem yang lebih optimal.

C. Pendahuluan

Untuk mengetahui dan mempelajari suatu sifat pada sistem diperlukan identifikasi sistem, hal ini diperoleh dengan cara memodelkannya secara matematika berdasarkan sifat-sifat komponennya. Dari hasil identifikasi ini diperoleh transfer function. Dengan model transfer function ini, dapat diketahui sifat respon sistem terhadap berbagai input. Berdasarkan pengetahuan atas sifat sistem tersebut, dapat ditentukan tindakan atau perlakuan yang tepat agar sistem berperilaku sesuai yang diinginkan. Identifikasi sistem merupakan suatu pendekatan eksperimental untuk menentukan model dinamik dari suatu sistem.

Secara mendasar sebuah model dibangun dari data yang diamati. Identifikasi suatu sistem merupakan tugas penting dalam penelitian ilmiah sebagai langkah pertama dari setiap analisis sistem. Namun, untuk mendapatkan model diperlukan prosedur yang tidak mudah. Terdapat dua cara dalam hal memperoleh model matematis dari sebuah sistem fisik, yaitu melalui pendekatan analisis dan eksperimen.

Ada beberapa teknik dalam hal mendapatkan model suatu sistem Motor DC dengan cara eksperimen. Salah satu diantaranya adalah dengan cara mengamati data masukan dan keluaran dari Motor DC tersebut. Namun ada juga peneliti yang menggunakan algoritma kecerdasan buatan seperti *recurrent neural networks* (RNN), metode yang digunakan dengan jaringan syaraf tiruan, dimana model dinamik Motor DC diperoleh dari nilai minimum

kesalahan hasil learning dari suatu model Motor DC yang telah diketahui parameternya. Selanjutnya, penelitian pada memanfaatkan tegangan balik.

Pada Motor DC untuk dijadikan variabel masukan dan kecepatan putar Motor DC sebagai variabel keluaran. Hubungan antara masukan dan keluaran dievaluasi dengan sistem identifikasi *tool* yang terdapat pada Matlab.

Motor DC bekerja secara nonlinear terutama saat terjadi diberi variasi beban. Pengendali konvensional, seperti PID controller sangat umum digunakan karena memiliki performa yang baik dalam mengendalikan sistem linear. Pada memaparkan sistem pengendalian motor induksi menggunakan kontroler PID dengan metode *field oriented control* (FOC). Metode ini digunakan untuk memperbaiki sinyal kontrol arus torsi di dalam sistem kontroler PID. Selain itu, teknik kendali optimal telah digunakan oleh beberapa peneliti seperti menggunakan *linear quadratic regulator* (LQR).

Pada makalah ini digunakan Motor DC dengan magnet permanen sebagai plant yang akan diidentifikasi serta dikendalikan dengan dengan teknik kendali optimal LQR. Penelitian ini menggunakan identifikasi *black box*, yaitu dengan mengamati *input – output* dari suatu sistem Motor DC. Pada penelitian ini juga dikembangkan modul identifikasi Motor DC dengan menggunakan Arduino dan terintegrasi dengan Simulink-Matlab.

D. Metode

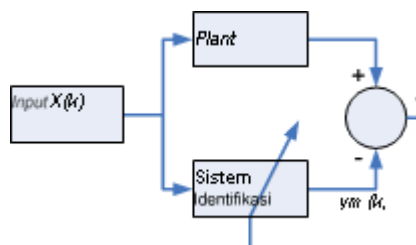
Metode Identifikasi

Dalam sistem kendali, identifikasi sistem pada umumnya dapat digambarkan seperti pada Gambar 1. Langkah-langkah proses identifikasi sistem terdiri atas empat tahap, yaitu :

Tersedianya data *input-output plant* yang akan diidentifikasi.

Pemilihan struktur model.

Estimasi parameter-parameter model.

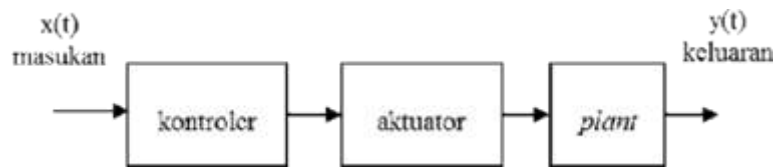


Gambar 6.1 Blok diagram proses identifikasi suatu sistem.

Validasi model yang telah diidentifikasi (struktur dan nilai parameter- parameternya).

Pada penelitian ini proses identifikasi motor DC dilakukan secara *open loop* melalui Arduino dan *personal computer* (PC) dengan terhubung Simulink-Matlab. Metode yang digunakan untuk identifikasi adalah metode identifikasi statis [8].

Identifikasi statis salah satu yang paling banyak digunakan adalah dengan metode *open loop* dengan memasukkan step seperti yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 6.2 Diagram blok identifikasi plant dengan metode open loop [8]

Karakteristik Sistem

Karakteristik sistem merupakan ciri khusus perilaku dinamik suatu sistem atau dinamakan dengan istilah spesifikasi performansi sistem. Tanggapan (*respon*) keluaran sistem muncul akibat diberikannya suatu sinyal masukan atau setelah diberi sinyal uji. Berdasarkan karakteristik respon sistem dapat diklasifikasikan menjadi karakteristik respon waktu (*time respons*) dan karakteristik respon frekuensi (*frequency respons*). Lebih jauh, pada penelitian ini diamati karakteristik respon waktu dari Motor DC. Tujuan dari pengamatan karakteristik respon waktu ialah untuk mengamati bentuk respon keluaran sistem terhadap berubahnya waktu. Secara umum spesifikasi performansi respon waktu dapat dibagi atas dua tahapan pengamatan, yaitu spesifikasi respon transien dan respon *steady state* [10]. Lebih jauh, pengamatan karakteristik suatu sistem dapat didekati pada sistem orde satu dan orde dua.

E. Linier Quadratic Regulator

Sistem terbaik adalah yang bekerja paling baik untuk referensi yang diberikan. Sebuah sistem kontrol yang optimal memerlukan kriteria optimasi yang dapat meminimalkan pengukuran ke perilaku ideal ketika sistem menyimpang dari perilakunya .

Hal ini diukur dengan menentukan indeks kinerja. Indeks Kinerja adalah fungsi penetapan harga yang menunjukkan seberapa baik kinerja sistem yang sebenarnya sesuai dengan kinerja yang diinginkan. Indeks Kinerja adalah tolok ukur untuk kontrol yang optimal. Sistem yang optimal dengan nilai indeks kinerja terendah. Dalam beberapa proses, gangguan dapat menyebabkan penyimpangan pada variabel yang dikendalikan. Kontroler harus mengkompensasi gangguan tersebut.

LQR adalah teknik untuk merancang sistem kontrol yang optimal. Keuntungan dari metode kontrol orde kedua yang optimal adalah bahwa bentuk sistem kontrol ini dapat menyediakan cara sistematis untuk menghitung matriks penguat umpan balik keadaan (K) untuk m input (u). Format sinyal kontrol, yaitu:

$u(t) = -Kx(t)$ (1) Dengan bentuk indeks kerjanya:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (2)$$

Dimana:

Q = matriks simetris, semi definit positif, real ($Q \geq 0$).

R = matriks simetris, definit positif, real ($R > 0$).

Matriks Q dan R menentukan nilai kesalahan dan konsumsi energi. Dalam hal ini, kita asumsikan bahwa vektor kendali $u(t)$ tidak dibatasi. Hukum kendali linier yang terdapat pada persamaan (1) merupakan hukum kendali optimal. Bentuk persamaan (1) paling cocok untuk keadaan awal $x(0)$ ketika elemen K dari matriks tidak diketahui dan jumlah preferensi minimum telah ditentukan.

F. Linier Quadratic Tracking

Penerapan teori kontrol optimal untuk pengaturan sistem linear banyak digunakan dalam dunia industri dan dunia pendidikan. Penggunaan kontrol optimal dengan cara meminimalkan fungsi energi yang digunakan, sehingga akan diperoleh indeks performansi optimal. Sistem suspensi pada kendaraan digunakan untuk meredam efek guncangan/gangguan pada kondisi jalan yang tidak rata.

Permasalahan error steady state dapat diatasi dengan menambahkan kontroler integral. Kontroler integral bekerja dengan cara menambahkan error integral output sebagai tambahan variable state.

Tujuan kontrol pada penelitian ini adalah dapat mengontrol kendaraan melalui sistem suspensinya sedemikian rupa sehingga berada pada posisi yang diinginkan dengan nilai error steady state kecil saat terjadi guncangan atau gangguan. Kontroler yang digunakan adalah linear quadratic integral tracking (LQIT) dimana kontroler ini merupakan modifikasi dari struktur kontroler linear quadratic tracking (LQT) dengan penambahan kontroler integral.

Linear Quadratic Regulator adalah suatu kontrol optimal pada sistem linear dengan dengan kriteria kuadratik untuk menyelesaikan permasalahan regulator. Sedangkan Linear Quadratic Tracking merupakan metode kontrol optimal pada sistem linear dengan kriteria

kuadratik untuk menyelesaikan permasalahan tracking. Bentuk umum dari persamaan keadaan adalah sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

dengan,

- x_{n+1} : Keadaan (state) sistem
- $u_{m \times n}$: State input
- $y_{1 \times 1}$: State output
- A : Matriks sistem
- B : Matriks sistem
- C : Matriks output

Gambar 6.3

Dengan meminimalisasi energy (cost function/quadratic function) melalui indeks performansi dalam interval $[t_0, \infty]$ adalah:

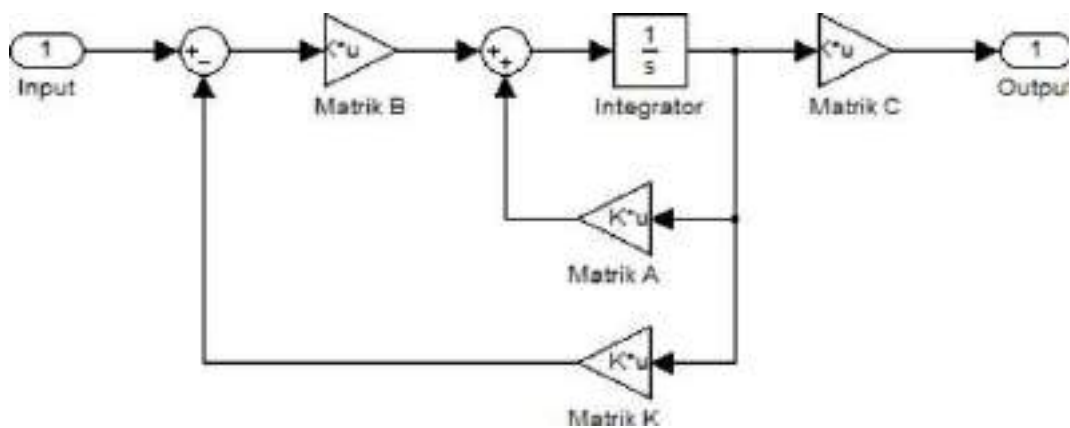
$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt$$

dengan,

- t_0 = waktu awal
- ∞ = waktu akhir
- Q = matriks semidefinit positif
- R = matriks definit positif

Gambar 6.4

Persoalan regulator dan tracking dapat diselesaikan dengan menyelesaikan Persamaan Riccati sebagai berikut:



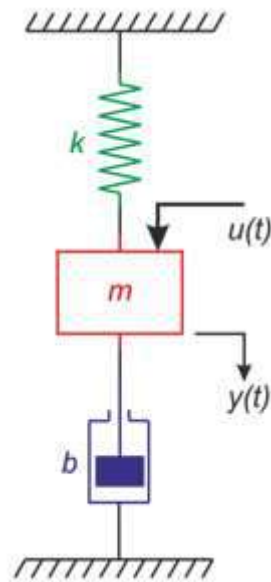
Gambar 6.5

Untuk desain kontroler LQR dan LQT, di mana pemilihan matriks bobot Semakin besar harga Q, maka akan semakin dekat dengan titik minimumnya, dan Semakin kecil/minimum energy yang digunakan. Gambar 1 menunjukkan diagram blok dari kontrol optimal.

Diusahakan harga dari penyelesaian Persamaan Riccati merupakan matriks yang bernilai kecil, yaitu:

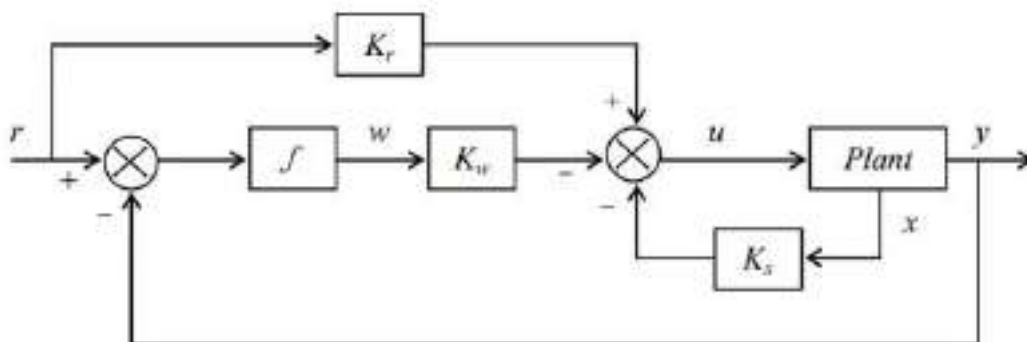
3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Sketsa Sistem



Gambar 6.6

3.2 Block Diagram



Gambar 6.7

3.3 Perhitungan Matematis

Model suspensi kendaraan pada dasarnya adalah sistem mass-spring-damper dengan kendaraan yang berfungsi sebagai massa, coil suspensi sebagai pegas, dan shock absorber sebagai damper yang diasumsikan sistem linear, ditunjukkan pada Gambar 2.

Dengan mengacu pada hukum Newton II, menyatakan bahwa jika resultan gaya yang bekerja pada sebuah benda tidak sama dengan nol maka benda akan mengalami percepatan

$$\begin{aligned}\Sigma F &= m \cdot a \\ u - bv - ky &= m \cdot a \\ u &= ma + bu + ky\end{aligned}$$

Gambar 6.8

Dimana u adalah gaya ke bawah/sinyal kontrol (N), m adalah massa (kg), a adalah percepatan (m/s^2), b adalah konstanta damper (Ns/m), k adalah konstanta spring (N/m), dan y adalah jarak posisi perpindahan massa dari titik awal sampai akhir (m) atau dapat dikatakan output.

Persamaan Differensial:

Telah diketahui sebelumnya bahwa y merupakan posisi dan u adalah sinyal kontrol maka dapat dikatakan bahwa \dot{x} merupakan kecepatan dan x merupakan percepatan sehingga persamaan di atas menjadi:

Persamaan State Space:

Agar persamaan differensial mudah di hitung maka persamaan tersebut dijadikan persamaan orde 1 dalam bentuk state space. Berikut adalah variabel state yang digunakan:

Asumsikan $x_1 = y$ sehingga nilai adalah
 $x_2 = \dot{y}$

Gambar 6.9

Sehingga apabila persamaan differensial di rubah menjadi persamaan state maka:

$$\begin{aligned}u &= m\ddot{y} + b\dot{y} + ky \\ u &= m\dot{x}_2 + bx_2 + kx_1 \\ m\dot{x}_2 &= u - bx_2 - kx_1 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k}{m}x_1 - \frac{b}{m}x_2 + \frac{u}{m}\end{aligned}$$

Gambar 6.10

Secara lengkap persamaan state spacenya adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k}{m}x_1 - \frac{b}{m}x_2 + \frac{u}{m}\end{aligned}$$

Gambar 6.11

Persamaan Outputnya adalah:

Kontroler LQR didesain untuk membuat state menuju ke zero. Hal ini membuat terbatasnya kasus tracking, di mana keluaran sistem dipaksa sesuai dengan nilai yang diinginkan.

Sistem beserta keluarannya mempunyai persamaan:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}$$

Gambar 6.12

Ketika reference r merupakan kombinasi dari \bar{x} dan \bar{u} maka nilai $y = r$ Sehingga Matrix A harus invertible (non-zero-eigen values). Pendekatan intuitive untuk membuat output y mengikuti referensi r yang menggantikan persamaan state pada LQR Menjadi persamaan state baru

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}} &= A\bar{x} + B\bar{u} = 0 \Rightarrow \bar{x} = -A^{-1}B\bar{u} \\ \bar{y} &= C\bar{x} = r \\ \bar{y} &= C(-A^{-1}B\bar{u}) = -CA^{-1}B\bar{u} = r \\ \bar{u} &= -[CA^{-1}B]^{-1}r\end{aligned}$$

Gambar 6.13

Didefinisikan:

Sehingga didapatkan state:

Dengan index performasi:

$$J = \int_0^{\infty} \tilde{x}^T Q \tilde{x} + \tilde{u}^T R \tilde{u}, \quad Q \geq 0, \text{ dan } R \geq 0$$

Gambar 6.14

Optimal Feedback Law

$$\begin{aligned}
\tilde{u} &= -K\tilde{x} \text{ sehingga} \\
\tilde{u} &= u - \bar{u} \Rightarrow u = \bar{u} + \tilde{u} \Rightarrow \dots \\
u &= \bar{u} + \tilde{u} \\
u &= \bar{u} + (-K\tilde{x}) \\
u &= \bar{u} - K(x - \bar{x})
\end{aligned}$$

Gambar 6.15

Dimana nilai K adalah:

Dan S didapatkan dari Solusi Riccati:

Dengan memasukkan nilai \bar{u} dan \bar{x} maka didapatkan hasil:

$$\begin{aligned}
u &= -Kx + [KA^{-1}B - I](CA^{-1}B)^{-1}r \\
u &= -Kx + Fr
\end{aligned}$$

Gambar 6.16

$$\begin{aligned}
u &= \bar{u} - K(x - \bar{x}) \\
u &= -[CA^{-1}B]^{-1}r - K(x - (-A^{-1}B\bar{u})) \\
u &= -Kx - KA^{-1}B\bar{u} - [CA^{-1}B]^{-1}r \\
u &= -Kx - KA^{-1}B(-[CA^{-1}B]^{-1}r) - [CA^{-1}B]^{-1}r \\
u &= -Kx + KA^{-1}B[CA^{-1}B]^{-1}r - [CA^{-1}B]^{-1}r \\
u &= -Kx + [KA^{-1}B - I](CA^{-1}B)^{-1}r \\
u &= Kx + Fr \text{ dimana } F = [KA^{-1}B - I](CA^{-1}B)^{-1}
\end{aligned}$$

Gambar 6.17

Penambahan aksi Integral pada control klasik berguna untuk mengeliminasi eror steady state saat tracking berlangsung. Kontrol integral dapat dibuat pada permasalahan linear quadratic (LQ) dengan menambahkan error integral output sebagai tambahan variable state. Error Integral output didapatkan dari penurunan error antara output dan referensi.

$$\begin{aligned}
\dot{w} &= r - y \\
\dot{w} &= r - Cx
\end{aligned}$$

Gambar 6.18

Kontrol Optimal Tracking dengan Aksi Integral

Didefinisikan Augmented state error

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + B\tilde{u} \\ \dot{w} &= r - Cx\end{aligned}$$

Gambar 6.19

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ w \end{bmatrix}$$

Gambar 6.20

Sehingga dihasilkan state matrix

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{x}} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ w \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_B \tilde{u}$$

Gambar 6.21

Dengan index performasi

$$J = \int_0^{\infty} \hat{x}^T Q \hat{x} + \tilde{u}^T R \tilde{u}, \quad Q \geq 0, \text{ dan } R \geq 0$$

Gambar 6.22

Sinyal Kontrol Optimal

$$\begin{aligned}\tilde{u} &= -K\hat{x} \quad \text{dengan} \\ K &= R^{-1} \hat{B}^T S = \begin{bmatrix} K_x & K_w \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Gambar 6.23

Dan solusi Riccati

$$\begin{aligned}0 &= \hat{A}^T S + S \hat{A} - S \hat{B} R^{-1} \hat{B}^T S + Q \\ u &= \bar{u} + \tilde{u} \\ u &= \bar{u} - K\hat{x} \\ u &= \bar{u} - \begin{bmatrix} K_x & K_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ w \end{bmatrix} \\ u &= \bar{u} - K_x \tilde{x} - K_w w\end{aligned}$$

Gambar 6.24

Karena

Diketahui sebelumnya bahwa

$$\bar{u} = -[CA^{-1}B]^{-1}r$$

$$\bar{x} = -A^{-1}B\bar{u}$$

Gambar 6.25

Sehingga sinyal Kontrolnya adalah

$$u = (-[CA^{-1}B]^{-1}r) - K_x(x - (-A^{-1}B(-[CA^{-1}B]^{-1}r))) - K_w w$$

$$u = -[CA^{-1}B]^{-1}r - K_x x + K_x A^{-1} B [CA^{-1}B]^{-1} r - K_w w$$

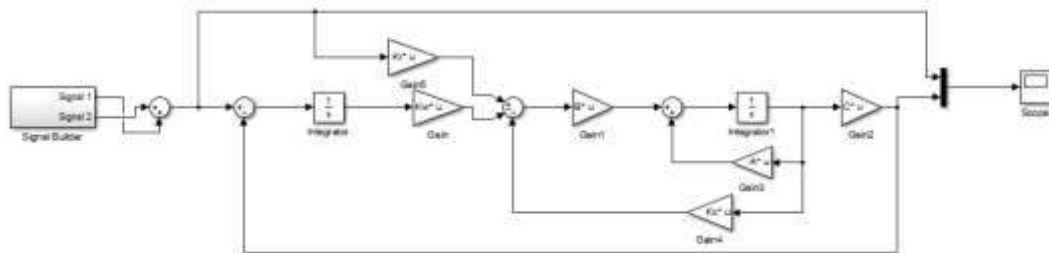
$$u = -K_x x - K_w w + (K_x A^{-1} B - I) [CA^{-1}B]^{-1} r$$

$$u = -K_x x - K_w w + K_r r$$

Gambar 6.26

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rangkaian Simulasi



Gambar 6.27

Script

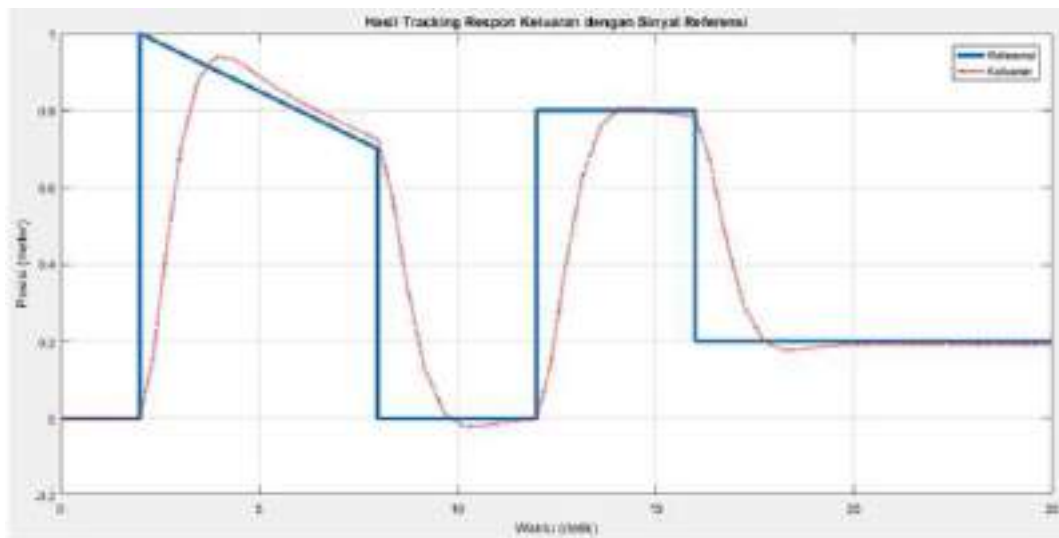
```

Editor - D:\AKHMAQ AZHAR FRDAUS\pofteknik perhapalan negri surabaya\TUGAS.a SEMESTER 5\Optimasi Sistem\PI...
deus lqtm
1 %Parameter Sistem MSD
2 m=2; %massa
3 k=8; %Spring
4 b=6; %Damp
5 %Matrix Pada state
6 A=[0 1; -k/m -b/m];
7 B=[0; 1/m];
8 C=[1 0];
9 %Bobot
10 Q=[1 0; 0 1];
11 R=10;
12 [S,eig,G] = care(A,B,Q) %Riwayat 0=A*B+SA-SB(inv R)B*B+Q
13 Kx=inv(R)*B'*S %Feedback Gain Kx
14 Kz=(Kx*(inv(A)*B-eye(1)))*(inv(C*(inv(A)*B)))
15 Ahat=[0 1 0; -k/m -b/m 0; 1 0 0]
16 Bhat=[0; 1/m; 0]
17 %Bobot hat
18 Qhat=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
19 Rhat=6;
20 [Dhat,eighat,Ghat] = care(Ahat,Bhat,Qhat) %Riwayat 0=A*B+SA-SB(inv R)B*B+Q
21 Khat=inv(Rhat)*Bhat'*Dhat
22 Kz=Khat(:,3)

```

Gambar 6.28

Hasil Simulasi



Gambar 6.29

Analisa

Pengujian kontroler yang diterapkan pada sistem dilakukan pada kondisi yang berbeda, dengan asumsi gangguan/guncangan pada sistem suspensi berubah-ubah. Pada Hasil simulasi garis biru menyatakan nilai referensi yang ditentukan, sedangkan garis warna merah menunjukkan respon sistem dengan kontroler LQIT.

Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa sistem dengan kontroler LQIT mampu tracking posisi sesuai dengan referensi yang ditentukan. Pada respon transien sistem

diketahui bahwa nilai error steady state adalah 3%, nilai ini menunjukkan kondisi yang baik dengan rata-rata error steady state 3% mengindikasikan bahwa saat terjadi guncangan pada kendaraan yang menyebabkan perubahan posisi pada sistem suspensi, kontroler yang diterapkan mampu membawa sistem suspensi untuk tracking posisi secara tepat sehingga gangguan/guncangan yang terjadi mampu diredam dengan baik.

5. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian secara simulasi dapat disimpulkan bahwa kontroler Linear Quadratic Integral Tracking (LQIT) yang diterapkan pada sistem suspensi sederhana yang terdiri dari massa (mass)-pegas(spring)-peredam (damper) mampu mengatasi adanya gangguan/guncangan dengan respon tracking yang sesuai dengan referensi dan memiliki nilai rata-rata error steady state 3%.

Daftar Pustaka

- [1] Prastyawan, RE and Nugraha, AT. "PENERAPAN TEKNOLOGI INFORMASI UNTUK PEMBELAJARAN TEST OF ENGLISH FOR INTERNATIONAL COMMUNICATION PREPARATION." *Jurnal Cakrawala Maritim* 5.1, 2022, pp. 4-8.
- [2] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "PENYEARAH TIDAK TERKONTROL SATU PHASA SETENGAH GELOMBANG MENGGUNAKAN MOTOR AC 1 PHASA." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 112-116.
- [3] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1, 2025, pp. 10-19.
- [4] Nugraha, AT. "Buku Organisasi dan Arsitektur Komputer.", 2024
- [5] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Riyadi, F, Sheila, SY, Pramudika, AES and "DESAIN DAN SIMULASI BUCK-BOOST CONVERTER MENGGUNAKAN PSIM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 68-77.
- [6] Angga, ATN, Shiddiq, MJ and Ramadhan, MF. "Use ordinary expressions to learn how to extract code feedback from the software program upkeep process." *International Journal of Advances in Data and Information Systems* 2.2, 2021, pp. 105-113.
- [7] Nugraha, AT. "Buku Desain Kontrol Path Following Quadcopter dengan Command Generator Tracker Model Following.", 2024
- [8] Sugianto, MGPA and Nugraha, AT. "Implementasi sensor cahaya sebagai level bahan bakar pada tangki harian kapal." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.1, 2022
- [9] Dharmawan, AD, Subiyanto, L and Nugraha, AT. "Implementasi sistem monitoring pada panel listrik." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 12.2, 2022, pp. 82-91.
- [10] Shiddiq, MJ, Ramadhan, MF and Nugraha, AT. "Perencanaan Pembangkit Listrik Energi Bayu Kincir Savonius Guna Mewujudkan Pemanfaatan Renewable Energy Pada Jembatan Suramadu." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [11] Pangestu, ND, Fathurrohman, MF, Nugraha, AT, Sukoco, D and Pambudi, DSA. "PERANCANGAN SMART PROTECTION PADA MOTOR KINCIR AERATOR

- TAMBAK UDANG MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY." Jurnal 7 Samudra 9.1, 2024, pp. 1-8.
- [12] Santosa, AF and Nugraha, AT. "Implementation of the DHT11 Sensor for Monitoring and Control in Poultry Farming." Journal of Electrical, Marine and Its Application 3.1, 2025
- [13] Sheila, SY, As'ad, RF, Rochmawati, NW, Riyadi, F and Nugraha, AT. "RANCANG BANGUN Alat Optimalisasi Suhu Dan Kelembaban Kubikel Tegangan Menengah Untuk Meminimalisir Terjadinya Corona Disease Dengan Metode Fuzzy Berbasis Plc." ID Patent EC00,202,294,998, 2022
- [14] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "SISTEM KONTROL KESTABILAN PADA MOTOR DC DENGAN METODE PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) DAN LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 16-22.
- [15] Bintari, A, Mudjiono, U and Nugraha, AT. "Analisa Pentahanan Netral dengan Tahan Menggunakan Sistem TN-C." Elektrise: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 12.2, 2022, pp. 92-108.
- [16] Putra, ZMA, Nugraha, AT, Widiarti, Y, Safaroz, W and Sobhita, RA. "Design of Unipolar Pure Sine Wave Inverter with Spwm Method Based On Esp32 Microcontroller As a Support of The Ebt System On Ship." E3S web of conferences 473, 2024, p. 1008.
- [17] Firdaus, AA, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Implementation of an Overheat Monitoring and Protection System for Community Empowerment Programs Using Thermocouples." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1, 2025
- [18] Nugraha, AT, Rinaldi, D, Messiah, MS, Shiddiq, M, Ramadhan, M and Ainudin, F. "Implementation of Line of Sight Algorithm Design Using Quadcopter on Square Tracking." JPSE (Journal of Physical Science and Engineering) 7.2, 2022, pp. 99-107.
- [19] Nugraha, AT, Ruddianto, Ahmad, MM, Pambudi, DSA, Utomo, AP and "Rancang Bangun Ship Alarm Monitoring (SAM) Sebagai Solusi Keamanan Pengoperasian Auxiliary Engine." ID Patent EC00,202,204,473, 2022
- [20] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "SISTEM KONTROL KESTABILAN PADA MOTOR DC." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 23-30.

BAB VII

Implementasi Pendekatan LQR dan LQT pada Kajian Pemodelan Optimalisasi Sistem pada Plant Motor DC IG-22GM

Oleh: **Nurahmad Hadi Cahyadi**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *Motor DC, Noise, Overshoot, LQR, LQT*

The control system or control system is one of the tools to control, command, and regulate the state of a system. DC motor is a device that converts direct current electrical energy into kinetic energy (motion). DC motors have two terminals, namely positive and negative terminals that require voltage to work. The use of DC motors is widely used in various modern industrial systems with specifications that vary according to the needs of an industry. The reason that makes DC motors widely used in modern industry is because DC motors are easy to regulate in a wide speed range with various speed regulation methods that can be used. The method commonly used to regulate the rotational speed of a DC motor is to use a speed control device in order to be able to adjust the needs of a tool work system. Therefore, an experiment is needed to optimize the dc motor work system through mathematical modeling and control systems using matlab software. In this problem, the optimization system used is the LQR (Leniar Quadratic Regulator) and LQT (Linear Quadratic Tracking) methods so that the system can work optimally. Therefore, in this study, modeling and simulation of DC motor models equipped with optimization circuits and not were carried out

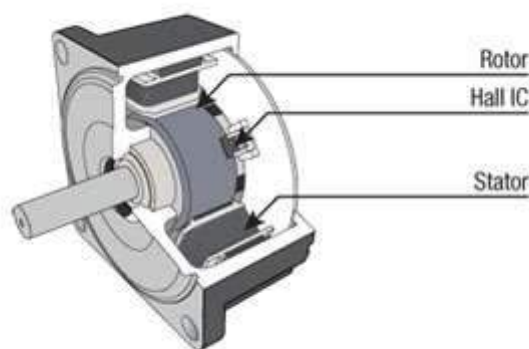
Abstrak

Sistem kendali atau sistem kontrol (*control system*) adalah salah satu alat untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan dari suatu sistem. Motor DC merupakan alat yang merubah energi listrik arus searah menjadi energi kinetik (*motion*). Motor DC memiliki dua terminal yaitu terminal positif dan negatif yang memerlukan tegangan untuk dapat bekerja. Penggunaan motor DC marak digunakan di berbagai sistem industri modern dengan spesifikasi yang bervariasi menyesuaikan kebutuhan pada suatu industri. Alasan yang menjadikan motor DC banyak digunakan pada industri modern karena motor DC mudah diatur dalam suatu rentang kecepatan yang luas dengan berbagai metode pengaturan kecepatan yang dapat digunakan. Metode yang biasa digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor DC yaitu menggunakan *speed control device* agar dapat menyesuaikan

kebutuhan suatu sistem kerja alat. Oleh karena itu, diperlukan percobaan untuk mengoptimalkan sistem kerja motor dc melalui pemodelan matematis dan sistem kendali dengan menggunakan bantuan software matlab. Pada permasalahan ini Sistem Optimasi Yang di gunakan yaitu metode LQR (*Leniar Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*) agar sistem dapat bekerja dengan optimal. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi pemodelan motor DC yang dilengkapi oleh rangkaian optimasi dan tidak..

PENDAHULUAN

Motor DC (*Direct Current*) atau motor arus searah merupakan motor yang mudah dalam pengaplikasiannya. Karena kemudahannya, motor DC sering digunakan untuk berbagai macam keperluan, seperti pada industri, peralatan rumah tangga, hingga ke mainan anak-anak maupun sebagai piranti pendukung sistem instrument elektronik [1]. Motor DC merupakan motor dengan arus searah yang memiliki dua terminal dan memerlukan tegangan arus searah atau DC (*Direct Current*) untuk menggerakannya [2]. Motor DC (*Direct Current*) dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik [3]. Kebanyakan motor DC (*Direct Current*) beroperasi saat terjadi interaksi antara medan magnet dengan konduktor, pembawa arus untuk menghasilkan putaran motor. Motor DC sendiri memiliki komponen penyusun seperti rotor dan stator [4].



Gambar 7.1 Bagian-Bagian Motor DC [5]

Dengan kebutuhan industri yang sangat tinggi terhadap motor DC maka diperlukan penerapan optimasi sistem kendali yang merupakan suatu proses analisis & perhitungan untuk mendapatkan solusi yang optimum. Sistem kendali merupakan suatu proses pengaturan/pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel, parameter) sehingga berada pada suatu harga atau dalam rangkuman harga. Dalam istilah lain disebut

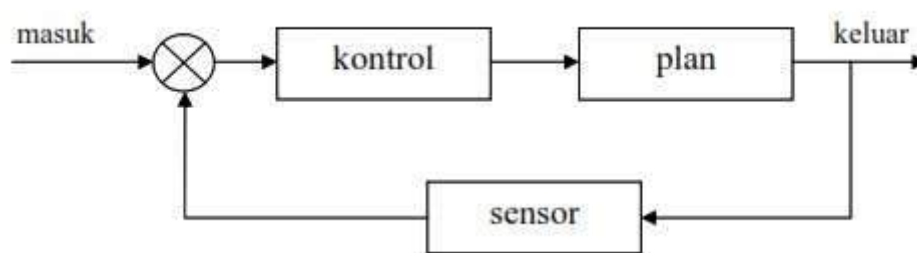
juga teknik pengaturan, sistem pengendalian atau sistem pengontrolan. Ditinjau dari segi peralatan dan Instrument yang digunakan, sistem kendali terdiri dari berbagai susunan komponen fisik yang digunakan untuk mengarahkan aliran energi ke suatu mesin atau proses agar mendapatkan hasil yang diinginkan [6].

Dalam sistem kendali dapat dibagi menjadi dua yaitu sistem kendali *loop* terbuka atau *open-loop control system* dan sistem kendali *loop* tertutup atau *closed-loop control system* [7]. Sistem kendali *loop* terbuka atau *open-loop control system* yaitu sistem kendali yang sinyal luaran tidak berpengaruh terhadap aksi pengendalian. Hal tersebut dikarenakan didalam sistem kendali terbuka atau *open-loop control system* tidak terdapat proses umpan balik sinyal output yang menuju ke sinyal input [8]. Model sistem kendali *loop* terbuka atau *open-loop control system* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 7.2 Sistem Kendali Loop Terbuka [9]

Sistem kendali *loop* tertutup atau *closed-loop control system* merupakan suatu sistem kendali dimana sinyal keluaran mempunyai pengaruh langsung terhadap aksi kontrol pada suatu sistem. Hal tersebut dikarenakan pada sistem ini terdapat jaringan umpan balik [10]. Model sistem kendali *loop* tertutup atau *close-loop control system* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 7.3 Sistem Kendali Loop Tertutup [11].

Pada penelitian ini, penulis menggunakan sistem kendali *loop* tertutup untuk mengetahui bagaimana respon motor DC tipe IG 22GM dengan pemodelan matematis orde 1 bila menjadi plant pada suatu sistem. Penulis melakukan simulasi menggunakan metode LQR dan LQT pada motor DC tipe IG 22GM. LQR (*Linear-Quadratic Regulator*) merupakan salah satu metode kendali state space yang memerlukan informasi dari keseluruhan sistem. Untuk mencapai nilai gain optimal maka perlu melakukan pembobotan untuk nilai Q dan R

pada LQR [12]. LQT (*Linear-Quadratic Tracker*) merupakan metode utama untuk kelas masalah *tracking* dalam sistem linier. LQT di desain untuk merancang kontrol optimal sedemikian rupa sehingga sistem kontrol linier dapat melacak lintasan referensi yang ditentukan. Kontrol optimal dapat dicapai dengan meminimalkan fungsi nilai kuadrat yang ditentukan. LQT terdiri dari bagian *feedback* dan *feed-forward* yang dihitung dengan *Algebraic Riccati Equation* (ARE) [13].

Pada penelitian ini penulis menggunakan *Simulink* untuk mensimulasikan sistem yang dibuat menggunakan metode LQR dan LQT. *Simulink* adalah *graphical Extension Matlab* untuk memodelkan dan mensimulasikan sebuah sistem. Dalam *simulink*, sistem digambarkan sebagai sebuah block diagram, diantaranya *transfer function*, *summing junction*, di dalamnya terdapat pula *virtual input* dan *output device* seperti *function generator* dan *oscilloscope* [14].

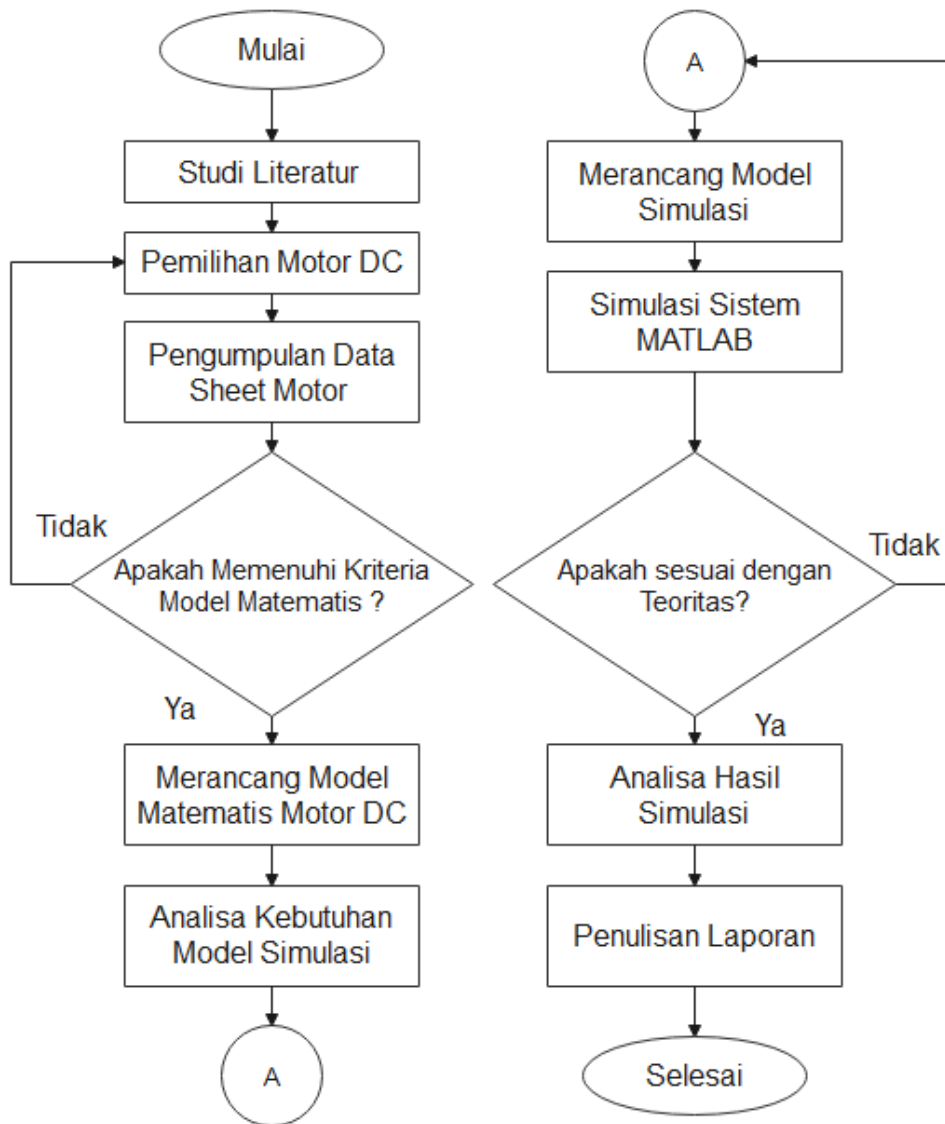
Pemodelan matematis merupakan teknik untuk mempresentasikan suatu sistem yang kompleks ke dalam model matematika. Dengan demikian, model matematika yang diformulasi diharapkan mampu menjelaskan situasi kompleks yang sedang diamati [15]. Penulis melakukan perhitungan mengacu pada *datasheet* motor DC IG22GM untuk mendapatkan pemodelan matematis orde 1 yang digunakan sebagai fungsi transfer (*transfer function*) *plant* yang merupakan suatu hubungan matematis antara *input* dan *output* dari komponen sistem kontrol [16].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa *step response* atau perubahan perilaku *output* terhadap perubahan sinyal *input* dari motor DC tipe IG22GM dengan perlakuan tanpa diberi *noise* dan diberi *noise* pada *output* sistem [17].

2. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan pada diagram alir pada **Gambar 4.**



Gambar 7.4 Flowchart Tahapan Simulasi

Sumber : Penulis, 2023

B. Pemodelan Matematis Motor DC

Pada penelitian ini dibutuhkan motor DC yang memiliki nilai terminal *inductance phase to phase* dan terminal *resistance phase to phase* yang nantinya digunakan untuk pemodelan motor DC dengan metode LQR dan LQT. Dengan kriteria tersebut maka penulis menggunakan motor DC tipe IG 22GM dengan *input* tegangan sebesar 18V yang memiliki variasi nilai terminal *inductance phase to phase* dan terminal *resistance phase to phase* di setiap variasi *input* tegangan yang digunakan.

直流馬達 (DC Carbon-brush motors)

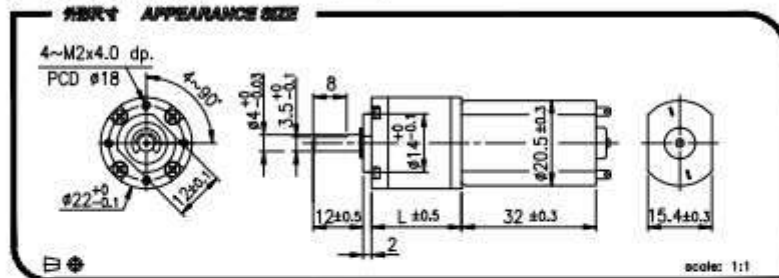
IG-22
GEARED MOTOR
SERIES

IG-22GM

01&02 TYPE



REDUCTION RATIO	L	REDUCTION RATIO	L
1/4	14.40	1/198~1/455	25.35
1/14~1/19	18.05	1/742~1/1996	29.00
1/53~1/104	21.70		



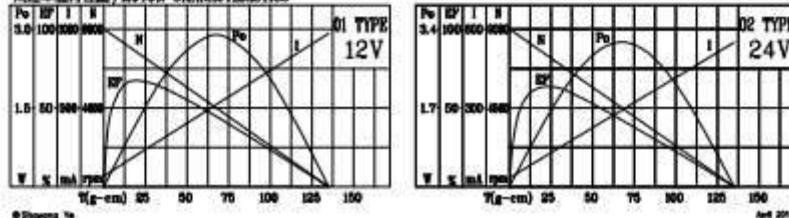
GEARED MOTOR TORQUE/SPEED

減速比 Reduction ratio	1/4	1/14	1/16	1/19	1/53	1/62	1/72	1/84	1/104	1/198	1/211	1/270	1/316	1/370	1/455	1/742	1/1014	1/1249	1/1621	1/1996
12V 定額扭力 (g-cm) Rated torque	77	215	250	295	885	890	950	1100	1370	2100	2500	2500	2500	2500	3000	3000	3000	3000	3000	3000
12V 空轉轉速 (rpm) No load speed	1487	470	407	348	127	108	93	79	64	34	29	25	22	19	15.5	9.5	7.4	6.0	4.8	3.8
24V 定額扭力 (g-cm) Rated torque	77	215	250	295	885	890	950	1100	1370	2100	2500	2500	2500	2500	3000	3000	3000	3000	3000	3000
24V 空轉轉速 (rpm) No load speed	1850	518	450	384	140	120	103	88	71	37	32	28	23.5	21	17.5	10.5	8.0	6.6	5.0	4.2

馬達數據 / MOTOR DATA

定額電壓 Rated volt (V)	定額扭力 Rated torque (g-cm)	定額轉速 Rated speed (rpm)	定額電流 Rated current (mA)	無負載轉速 No load speed (rpm)	無負載電流 No load current (mA)	定額輸出 Rated output (W)	重量 Weight (g)
12	22	6700	≤ 200	8000	≤ 70	1.5	32.0
24	22	7460	≤ 110	9000	≤ 40	1.7	32.0

馬達特性曲線 / MOTOR CHARACTERISTICS



Gambar 7.5 Datasheet Motor DC tipe IG 22GM [18]

Sumber :

Dari *datasheet* yang didapatkan, penulis kemudian menentukan spesifikasi yang akan digunakan dengan spesifikasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 7.1 Spesifikasi Motor DC EC-i 40

Spesifikasi Motor DC tipe EC-i 40	
Rated Torque (τ)	105 mNm = 0,105 Nm
No Load Current(A)	448 mA = 0,448 A
Rated Current(A)	4,87 A
Voltage (V)	18V
Speed (rpm)	441 rpm = 46,18 m/s
Rotor Inertia	

Spesifikasi Motor DC tipe EC-i 40	
Resistance (R)	0,199 Ω
Inductance (L)	0,113 mH
Redaman Sistem Mekanik (B)	0,1 Nms

Dari tabel diatas dapat ditentukan model matematis sistem orde 1 dari motor DC IG 22GM serta pemodelan motor DC IG 22GM pada program *script* MATLAB yang nantinya digunakan untuk optimasi sistem pada motor DC IG 22GM dengan metode LQR dan LQT.

Pemodelan Matematis Motor DC Orde 1

Dari model matematis suatu sistem, orde dari suatu sistem dapat dilihat dari besar pangkat variabel s (dalam transformasi *Laplace*). Suatu sistem dapat dikatakan ber-orde satu jika fungsi alihnya mempunyai variabel s dengan pangkat tertinggi satu [19]. Berikut rincian pemodelan sistem orde satu.

Persamaan umum fungsi alih orde 1:

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Keterangan :

G(S)= Penguatan

τ = Torsi

K= Konstanta

Berdasarkan *datasheet* diatas maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (2)$$

Dimana sehingga diperoleh persamaan orde 1 motor dc :

$$K = \tau i = 0,1054,87 = 0,014 \quad (3)$$

$$G(s) = 0,0210,105s + 1 \quad (4)$$

C. Pemrograman Script MATLAB

Dalam praktikum optimasi sistem motor DC IG 22GM dengan metode LQR dan LQT dibutuhkan program *script* MATLAB untuk melakukan simulasi sistem pada *Simulink*. Dibawah ini merupakan program *script* MATLAB yang digunakan.

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J = 23 ; % J = Momen Inersia

b = 0.1 ; % b = Rasio Redam

K = 0.021 ; % K = Konstanta

R = 0.199 ; % R = Resistansi

L = 0.000113 ; % L = Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

AA = [A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J)

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

0 1 0;

0 0 1000];

R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)

KI2=-K_lqr(3);

KK2=[K_lqr(1) K_lqr(2)];

Pemrograman LQT

clear;

clc;

```

% Model Motor DC
J = 30 ; b = 0.14 ; K = 0.0298 ; R = 0.54 ; L = 0.0014 ;
% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K = konstanta, R = resistansi, L = Induktansi
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
B = [0; 1/L];
C = [1 0]
Q = 10; R = 0.0000000001; % 0.000000000000001
W = C'*Q; %
[S,o,m,n] = care(A,B,C'*Q*C,R) % m = v(t) % S = P
K = inv(R)*B'*S % feedback Gain
ACL = (A - B*K)';
L = inv(R)*B' % model following gain

```

D. Analisa Kebutuhan Sistem

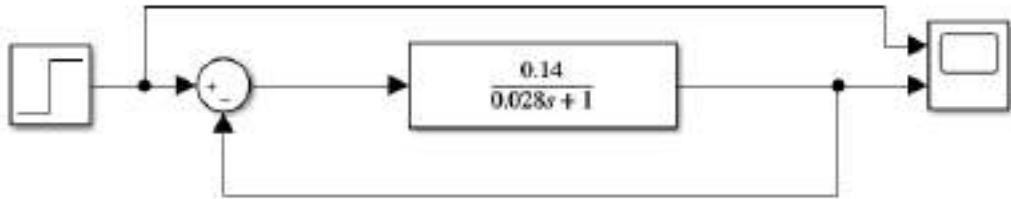
Dalam praktikum optimasi sistem motor DC dengan metode LQR dan LQT menggunakan *simulink* dari *software* MATLAB membutuhkan komponen seperti pada Tabel 2.

Tabel 7.2 Daftar Komponen

E. Perancangan Sistem pada Simulator

Setelah melakukan pemodelan matematis motor DC, pemrograman *script* MATLAB dan analisa kebutuhan sistem maka langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah perancangan sistem dengan metode LQR dan LQT tanpa diberi *noise* dan diberi *noise* menggunakan komponen *Random Number*. Model perancangan sistem dengan metode LQR dan LQT pada *Simulink* seperti dibawah ini.

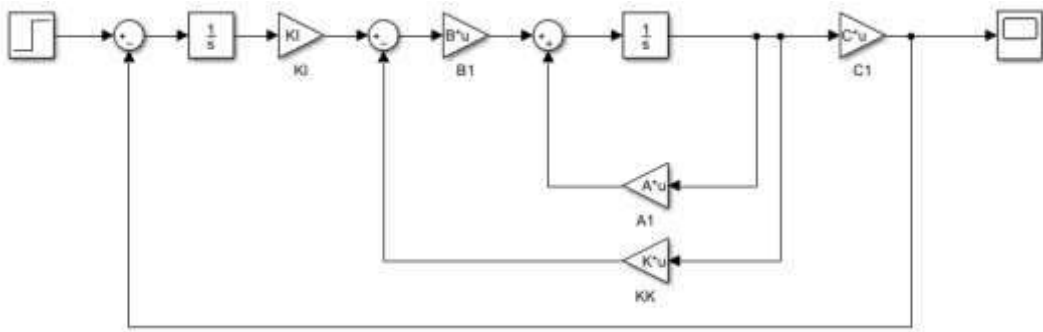
Rangkaian Motor DC Orde 1



Gambar 7.6 Rangkaian Motor DC IG 22GM Orde 1

Sumber : Data Pribadi, 2023

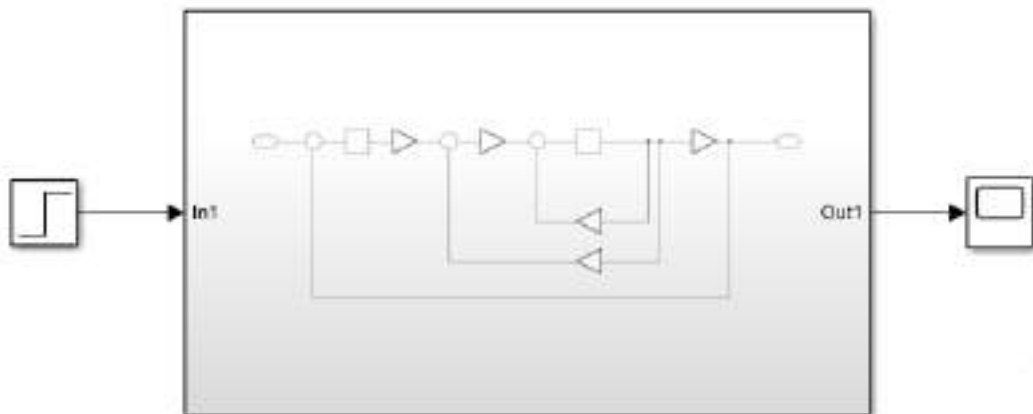
Rangkaian LQR



Gambar 7.7 Rangkaian LQR

Sumber : Data Pribadi, 2023

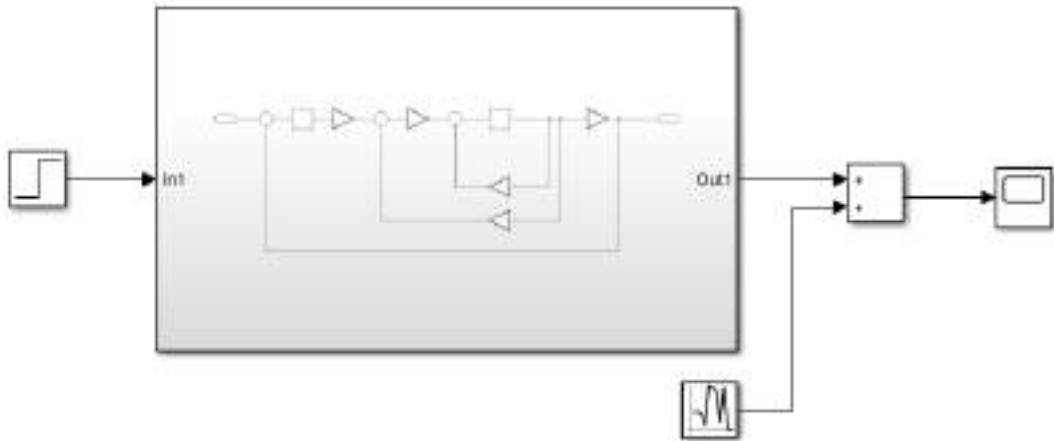
Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



Gambar 7.8 Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise

Sumber : Data Pribadi, 2023

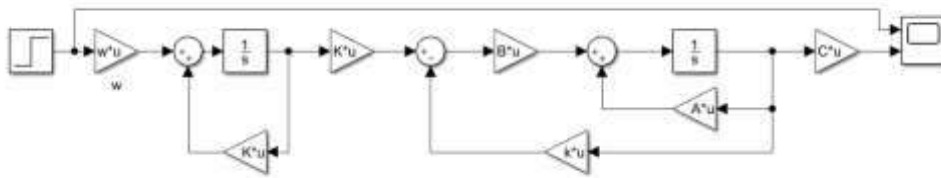
Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



Gambar 7.9 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise

Sumber : Data Pribadi, 2023

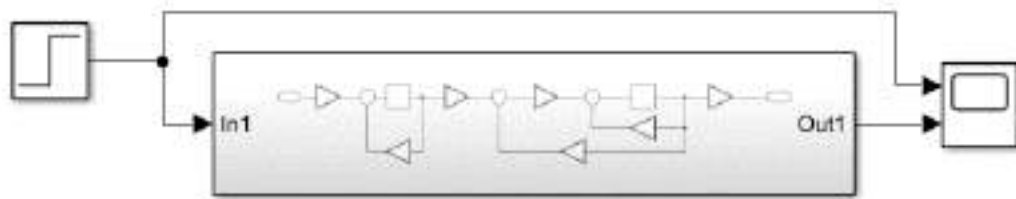
Rangkaian LQT



Gambar 7.10 Rangkaian LQR

Sumber : Data Pribadi, 2023

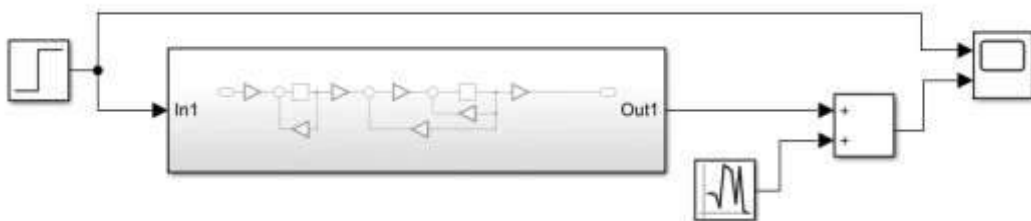
Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 7.11 Rangkaian LQR

Sumber : Data Pribadi, 2023

Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise



Gambar 7.12 Rangkaian LQR

Sumber : Data Pribadi, 2023

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Hasil Simulasi Motor DC IG 22GM Orde 1

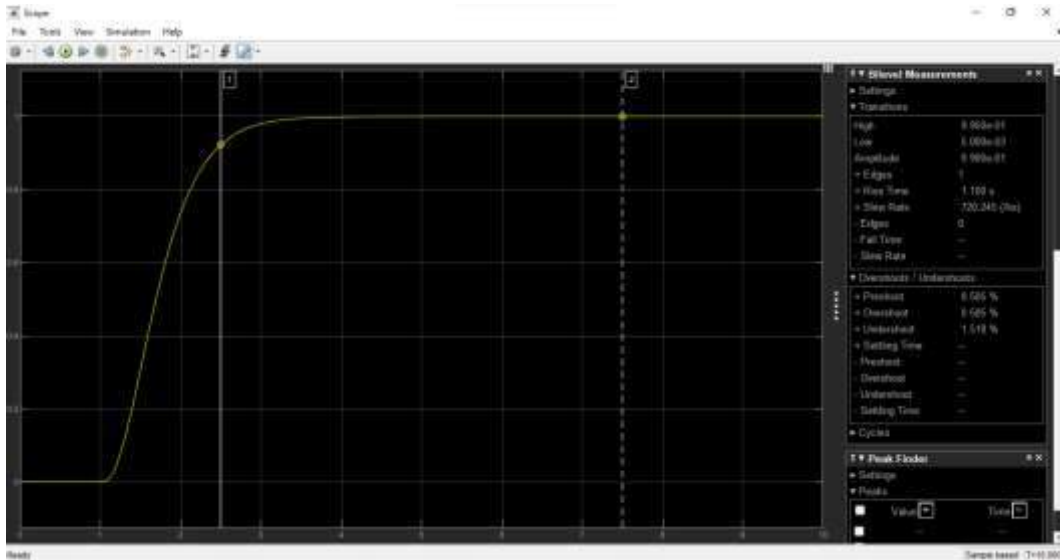


Gambar 7.13 Tampilan Step Response Motor DC EC-i 40 Orde 1

Sumber : Data Pribadi 2023

Pada Gambar 12 merupakan *step response* motor DC IG22GM pada sistem SISO Orde 1. Dari gambar grafik diatas dapat dilihat terdapat dua grafik yaitu grafik berwarna kuning yang merupakan grafik *input* yang diberikan pada sistem atau dapat dikatakan sebagai *setpoint* dan grafik berwarna biru yang merupakan *step response* motor DC EC-i 40. Dapat dilihat bentuk grafik *output* dari sistem SISO Orde 1 belum mencapai *setpoint* yang ditentukan dan memiliki bentuk grafik yang stabil dengan *amplitude* sebesar 0.0204 dan *rise time* sebesar 231.789 ms. Pada sistem ini terdapat *overshoot* sebesar 0.505% dan *undershoot* sebesar 0.499%.

Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQR pada Motor DC IG 22GM tanpa *Noise*

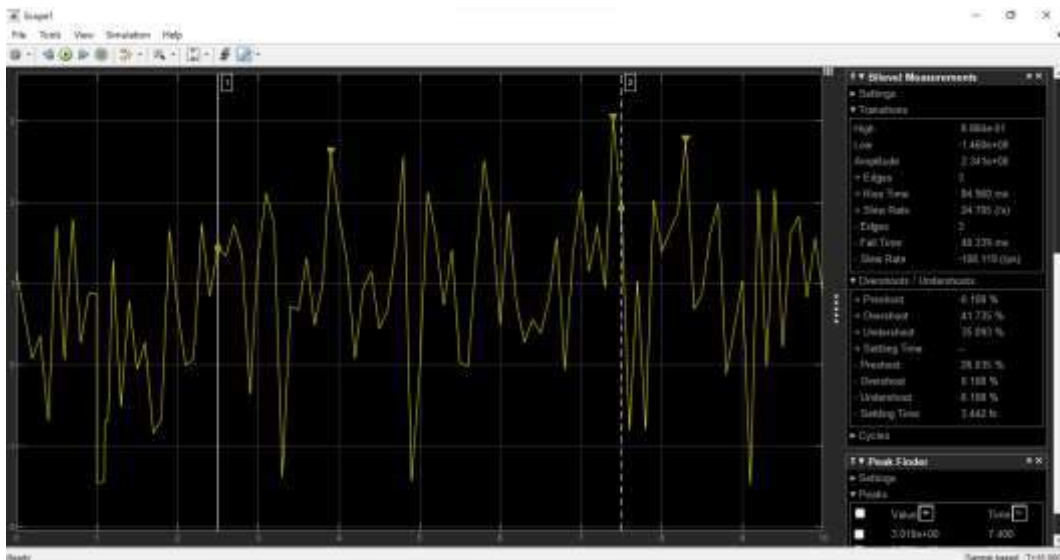


Gambar 7.14 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise

Sumber : Data Pribadi, 2023

Pada Gambar 13 merupakan *step response* dari motor DC IG 22GM LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari optimasi sistem LQR pada motor DC EC-i 40 mencapai amplitudo sebesar 0.99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Pada sistem ini memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1.1 s serta memiliki *overshoot* sebesar 0.505% dan *undershoot* sebesar 1.518%.

Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQR pada Motor DC IG 22GM dengan *Noise*



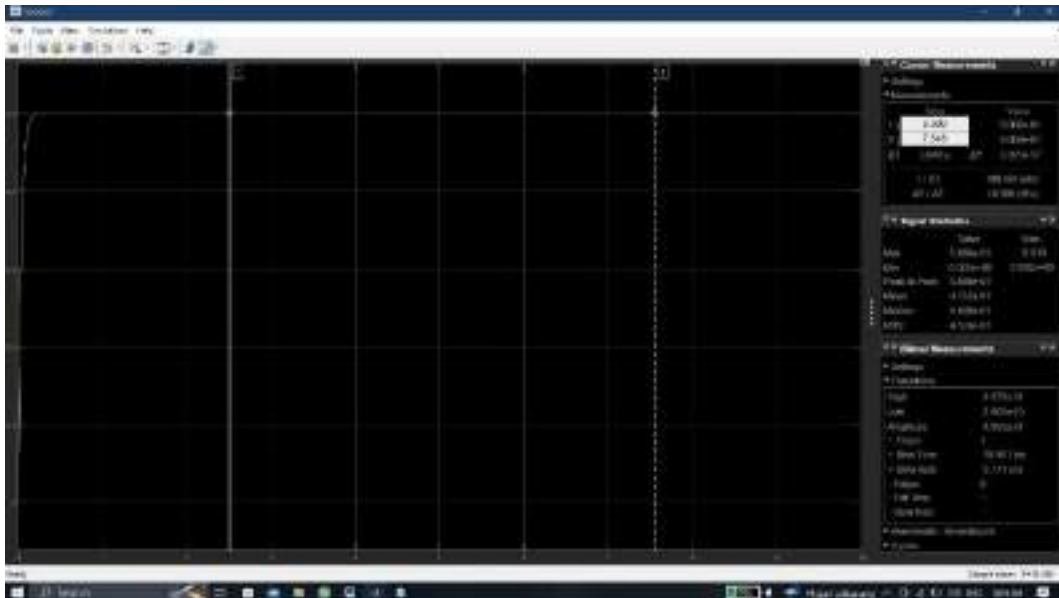
Gambar 7.15 Tampilan Step Response LQR dengan Noise

Sumber : Data Pribadi, 2023

Pada Gambar 14 merupakan *step response* dari motor DC IG 22GM LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari optimasi sistem LQR pada motor DC IG

22GM hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Pada sistem ini memiliki amplitudo sebesar 2.34 dan *rise time* sebesar 84.96 ms serta memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup besar dengan nilai *overshoot* sebesar 41,735% dan *undershoot* sebesar 35.093%.

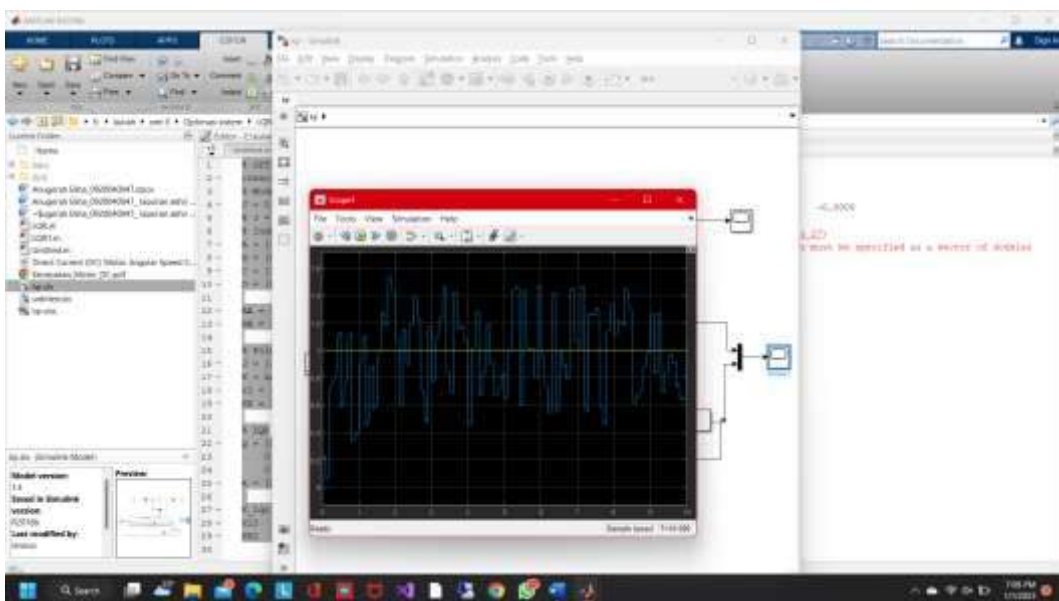
Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQT pada Motor DC IG 22GM tanpa *Noise*



Gambar 7.16 Simulasi Rangkaian LQT

Sumber : Data Pribadi, 2023

Analisa Hasil Simulasi Optimasi Sistem LQT pada Motor DC IG 22GM dengan *Noise*



Gambar 7.17 Rangkaian LQT dengan noise

Sumber : Data Pribadi, 2023

Setelah dilakukan simulasi dapat diketahui bagaimana respons setiap model motor DC. Dari simulasi yang telah dilakukan dapat diperoleh bahwa respons model motor tidak mampu mencapai set poin yang di buktikan hanya mampu menghasilkan Singal respons sebesar 33% saja oleh karena itu motor jenis ini memiliki efisien yang rendah dan memiliki eror rate sebesar 77% dari nilai set point.

Setelah di beri Rangkaian LQT pada Model motor DC tersebut Singal respons berubah dengan drastis dimanah Singal respons mampu menyentuh nilai set poin setelah 0.8 detik di beri pemicu atau masukan. Singal respons setelah menyentuh set poin tidak mengalami osilasi sama sekali namun cenderung tenang dan tetap berada pada kondisi Stedy State.

Selain itu pada penelitian ini juga meneliti bagai mana respons sistem jika diberi atau mengalami gangguan pada percobaan ini diketahui pada sistem tanpa LQT hasil Singal respons sistem mengalami osilasi parah dan cenderung mengikuti Singal nois bergerak. Namun setelah diberi rangkaian LQT Singal respons masih mengalami osilasi dan mengikuti bentuk noise namun berbeda dengan sistem tanpa LQT singal respons yang menghasilkan Singal respons yang sangat tidak beraturan pada sistem yang di lengkapi LQT Singal respons tetap berisolasi namun nilai eror atau simpangannya lebih minimal atau seperti di redam.

Kumpulan Data Hasil Simulasi

Tabel 7.3 Data Simulasi Optimasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC IG 22GM

No.	Model Sistem	Amplitudo	Rise Time (s)	Overshoot (%)	Undershoot (%)
1.	SISO Orde 1				
2.	LQR tanpa Noise	0.99	1.1	0.505	1.518
3.	LQR dengan Noise	0.67	52.72	-87.06	91.94
4.	LQT tanpa Noise	0.99	7.43	1.53	0.45
5.	LQT dengan Noise	0.18	92.71	12.41	-6.55

F. Kesimpulan

Hasil *step response* dari motor DC IG-22GM berorde 1 didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,124 dalam artian mencapai *setpoint* sebesar 1 dengan rise time 5,497s dan sistem mengalami overshoot sebesar 0,501% dan undershoot 1.985%. Sedangkan *output step response* dari LQR motor DC IG—22GM mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise*

time yang cukup maksimal di angka 1,109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT, Rochmawati, NW and Sheila, SY. "Buku Topologi Bidirectional Buck-Boost Converter Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.", 2024
- [2] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Adzani, FR, Itislam, TA, Firdiansyah, R and "PENINGKATAN EFISIENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA MENGGUNAKAN KONVERTER SEPIC BERBASIS MOSFET IRF540." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 53-61.
- [3] Rohman, YF, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Optimization of DC Motor Control System FL57BL02 Using Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT): Performance Analysis." ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems 1.1, 2025, pp. 15-22.
- [4] Ihsanudin, Y, Hidayat, EP and Nugraha, AT. "Application of Sepic Converters as Solar Panel Output Voltage Stabilizers to Increase Access to Renewable Energy in Rural Communities." Maritime in Community Service and Empowerment 2.1, 2024, pp. 40-45.
- [5] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Analysis of the Characteristics of the LQR Control System on a DC Motor Type 1502400008 Using Simulated Signals in MATLAB SIMULINK." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1, 2025, pp. 66-75.
- [6] Elmi, H, Edy, S, Juniani, AI and Amelia, P. "Utilizing total dissolved solids (TDS) sensor for dissolved solids measurement in the water." JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization 7.1, 2024, pp. 22-30.
- [7] Nugraha, AT, Primaningtyas, WE, Abdullah, K, Wulandari, KD, Alfanda, BD and "Pelatihan manufaktur komposit sebagai produk kerajinan tangan pada industri rumahan." Educivilia: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat 1.2, 2020, pp. 119-129.
- [8] Nugraha, AT, Priyambodo, D and Sarena, ST. "Design A Battery Charger with Arduino Uno-Based for A Wind Energy Power Plant." JPSE (Journal of Physical Science and Engineering) 7.1, 2022, pp. 23-38.
- [9] Rohman, YF, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Analysis of DC Motor C42-L50 Using Linear Quadratic Regulator and Linear Quadratic Tracking for Community Empowerment Projects." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1, 2025
- [10] Ferdinandus, AR Andrew, Nugraha, AT and Jamaaluddin, J. "Setting Neuro-Fuzzy PID Control In Plant Nonlinear Active Suspension." Journal of Physics: Conference Series 1114.1, 2018, p. 12063.
- [11] Sasongko, A, Nugraha, AT, Anshory, I, Rahim, R, Khuwaja, KSA and "Estimation of the thrust coefficient of a Quadcopter Propeller using Computational Fluid Dynamics."
- [12] Jamil, MH, Rukka, RM, Tenriawaru, AN, Achmad, R, Nugraha, AT and "The existence of rice fields in Makassar City." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 681.1, 2021, p. 12091.
- [13] Magriza, RY, Hidayana, E, Nugraha, AT and Evaningsih, RP. "Design and Implementation of Water Quality Control in Catfish Farming Using Fuzzy Logic Method with IoT-Based Monitoring System.." Jurnal Teknologi Maritim 4.1, 2021, pp. 13-18.
- [14] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Quadcopter movement analysis using output feedback control based on line of sight." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2023
- [15] Nugraha, AT, Mubarrok, MR, Yuniza, SI and Sugianto, MGPA. "Analysis of Thyristor Usage in Controlled Half-Wave Rectifiers on DC Motor Speed Control." Conference of Electrical, Marine and Its Application 2.1, 2023, pp. 74-82.

- [16] Amelia, P, Juniani, AI, Nugraha, AT and Hendrata, F. "RANCANG BANGUN SISTEM INFORMASI PENCARIAN KERJA DENGAN INTEGRASI MEKANISME KETERLACAKAN DOKUMEN UNTUK TRANSPARANSI REKRUTMEN." JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization 8.1, 2025, pp. 49-56.
- [17] Utomo, AP, Apriani, M, Ruddianto, R, Cahyono, L, Nugraha, AT and Nugroho, MI. "Pelatihan Pembuatan Terumbu Buatan Berbasis Eco-friendly sebagai Sarana Rehabilitasi Terumbu Karang di Daerah Pantai Wisata Pasir Putih, Situbondo." INTEGRITAS: Jurnal Pengabdian 5.2, 2021, pp. 299-312.
- [18] Nugraha, AT and Haj, MI. "Zeta Converter Design for Solar Power Generation System with Controller Using Arduino Microcontroller." Conference of Electrical, Marine and Its Application 2.1, 2023, pp. 54-64.
- [19] Khojim, MN, Ainudin, FH, Widiarti, Y, Nugraha, AT and Pambudi, DSA. "Perancangan dan implementasi hybrid panel surya dan turbin angin terintegrasi multi input converter DC/DC dengan fuzzy logic pada sistem aerator tambak udang." Jurnal 7 Samudra 8.1, 2023
- [20] Nugraha, AT, Saputra, DBD, Sobhita, RA and Ashlah, MB. "Photovoltaics Concept Integrated on the Grid With the STT-PLN Building." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 1.1, 2024, pp. 12-16.

BAB VIII

Single-Phase Uncontrolled Full-Wave Rectifier in a Three-Phase AC Motor

Abstrak

A three-phase induction motor rotates at a nearly constant speed, which is very close to the synchronous speed. Induction motors are especially suitable for drive systems that require constant speed, as the speed will decrease slightly as the load torque increases. The aim of this research is to design an inverter, especially a single phase full wave inverter with constant V/f control which is used to control the speed of an induction motor. The research method is data collection, data processing and data analysis. The data that has been processed is then analyzed and concluded. The single-phase inverter designed is capable of adjusting the speed of the induction motor through various adjustments. Based on the test results obtained the average value of the ratio constant V/f of 2.34. The output voltage waveform generated by the inverter is still a square AC voltage. Based on the graph of the input frequency against the motor speed plot in the single-phase inverter test being loaded, it can be seen that when the input frequency increases the speed of the induction motor also increases. This is because the frequency is directly proportional to the motor speed.

Kata Kunci: Induction motor, Inverter, Speed

I. INTRODUCTION phase inverter with constant V/f control which is useful for controlling the speed of an induction motor. A 3-phase induction motor is an electrical device that converts electrical energy into mechanical energy, and the electricity converted is 3-phase electricity [1]. A 3-phase II. LITERATURE REVIEW induction motor rotates at an almost continuous speed, which 1. Rectifier is very close to using synchronous speed. Induction motors are used for drive systems that require a constant speed, because A power rectifier is an electronic power circuit the speed will decrease slightly as the load torque increases. designed to convert an AC input source into a constant DC However, when using an electric motor, it is possible to set a in the form of a sine wave. Single-phase and three-phase AC speed that can change the speed when the load changes, and to voltages can be used as input voltage sources to supply the adjust various voltages and frequencies which is considered main rectifier circuit. A single-phase rectifier is a power continuous V/f control. Constant V/f control is a method of rectifier circuit using a single-phase AC input. The rectifier circuit can be implemented in the form of 1/2 wave rectifier controlling the speed of an induction motor by changing the & full wave rectifier. Power Rectifier Loads are generally voltage & frequency and keeping the ratio of the two equipped using resistive-resistive loads or resistive-inductive permanently continuous. This adjustment means that the loads. The effect of this load affects the quality of the output torque obtained can be maintained continuously over the voltage obtained by the rectifier circuit[2]. speed control

range. The most generic use according to this The single-phase rectifier circuit has a working method uses a rectifier which is considered an inverter. A principle of replacing the AC current as a DC current. Filter wave rectifier circuit is a circuit that replaces an AC wave C (capacitor) is used at the end of the rectifier circuit to (alternating current) as a DC (unidirectional) circuit. The achieve the desired output voltage, for example to reduce inverter converts the AC motor voltage to DC and then back voltage ripple. However, the use of a C filter in a rectifier to AC at the desired frequency. This makes it possible to circuit must be balanced with an output that allows the control the motor according to the desired speed. Therefore, rectified current waveform to contain harmonics. This this study attempts to design an inverter, a full wave single increases the harmonics and temperature of the electronic

components (load on the electronic components), which Average voltage : reduces the quality of the rectifier circuit network[3]. $V_r(pp) V_m V_{dc} = V_m - = V_m - (6) \frac{2fRC}{4fRC}$
 The single-phase rectifier is divided into two parts: one- phase half-wave rectifier and one-phase full-wave rectifier. AC component voltage approaches rms : $V_r(pp) V_m$ Many household electronic devices, such as televisions, VAC = = (7) $2\sqrt{2} \sqrt{2(4fRC-1)}$ laptops, cell phones, DVD players, radio cassette recorders, components, and other communication devices, use a single- d. Full-wave Single Phase Rectifier RL phase full-wave rectifier circuit as a power source. The Load Inductive load affects the output voltage form of the advantage of a full-wave single-phase rectifier circuit over a circuit because it causes the diode to permanently turn on half-wave rectifier circuit is that the output voltage and temporarily even though the diode is reverse biased due to load current are relatively good with little ripple. Also, the output L. voltage is higher than the half-wave rectifier circuit[4].

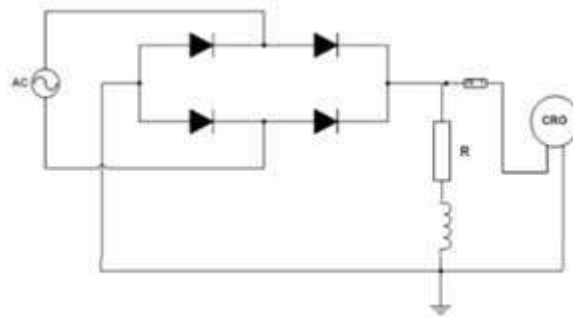
a. Single Phase Full-Wave Rectifier R

FIGURE 2.1. R load single phase power supply circuit FIGURE 2.2. Load single phase power supply circuit

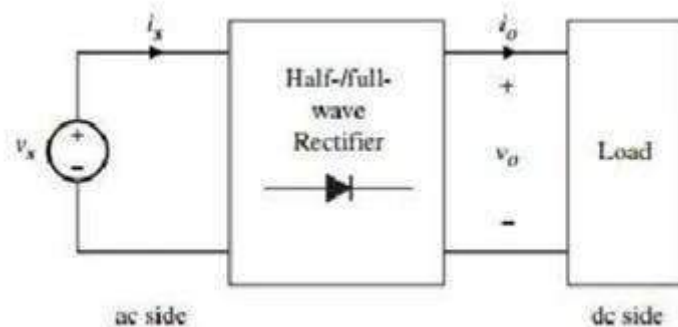
Figure 2.1. shows the output waveform of the circuit for 2. Single Phase Uncontrolled Rectifier a capacitive load. If the half wave rectifier rectifies only half a cycle, the full wave rectifier rectifies to 2 cycles, forming Uncontrolled Rectifier An uncontrolled rectifier is a better waveform & higher voltage value. The output circuit that converts an AC current voltage source into a fixed voltage of a full-wave single-phase rectifier circuit can be DC [7]. It is called an uncontrolled single-phase rectifier calculated using the following equation: because the output of this rectifier cannot be adjusted or Average voltage (VDC) controlled

so that the output value depends on the input $2V_m$ VDC = (1) voltage [8]. π While the RMS voltage (V_L) Uncontrolled rectifiers usually use a diode as a switch. V_m Diodes are used for single phase uncontrolled 1/2 wave $V_L = (2) \sqrt{2}$ rectifiers. Single phase uncontrolled rectifier is divided as 1/2 wave rectifier & full wave rectifier. b. Single Phase Full Wave Rectifier L Filter L is used to equalize the current. If the input current is positive, the inductor will be charged, and if the negative period is the inductor, the inductor will be discharged. At infinity, the output current is uniform and the input current is square[5]. For load rectifiers R and L, the average output voltage is defined as: V_R VDC = IR R = ()R (3) $Z Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}$ (4)

c. Single Phase Full-Wave Rectifier C Filter C is used to equalize the output voltage. If diode 1 FIGURE 2.3. Single Phase Uncontrolled Rectifier Circuit turns on, the capacitor will charge. When the voltage is minimum, the capacitor discharges to power the load[6]. The There are 2 kinds of full wave uncontrolled rectifier output voltage never becomes zero. The magnitude of the circuit, namely center tap rectifier (two diodes) & bridge discharge voltage is as follows: rectifier (4 diodes), both of which have the same output. The Voltage ripple : following is a full-wave rectifier circuit that is not single-phase $V_m \Delta V = V_r(PP) = V_m - V_{min} = (5)$ controlled [9]. $2fRC$



Gambar 8.1



Gambar 8.2

a. Center Tap Rectifier (2 Diodes) b. Bridge Rectifier (Bridge / 4 Diodes)

FIGURE 2.7. Circuit Diagram and Bridge Rectifier Waveform

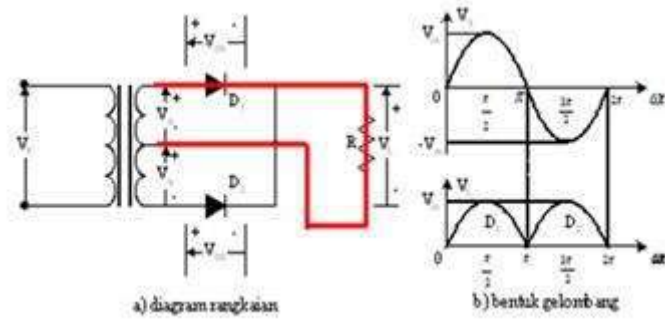
FIGURE 2.4. Circuit Diagram and Waveform of a center tap rectifier Based on the figure, it can be seen that the circuit has 2 (two diodes) main work cycles, namely: 1. When the input voltage on the top side of the transformer is The figure is a center tap rectifier (two diodes). Based on positive, D1 and D4 are forward biased. As long as the input the picture, it can be seen that this circuit has two main work voltage on the underside of the transformer is negative, diode processes, namely: 2 (D2) and diode 3 (D3) are reverse biased. When current 1.If the upper arm of the transformer is positive, diode 1 (D1) flows through the forward bias diode, current flows from the will be forward biased. While the lower arm of the top leg of the transformer to D1, then to the load, then to D4, transformer is negative, as a result diode 2 (D2) is reverse and back to the transformer through the bottom leg. biased. When the diode is forward biased, current flows. Since the forward bias is diode 1 (D1), current flows through FIGURE 2.8. Circuit Diagram and Waveform If the Input Voltage at diode 1 and the load, then returns through the center leg to the transformer.

the Top of the Transformer is Positive

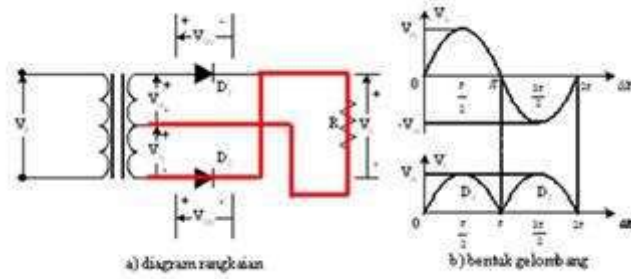
2.When the input voltage on the top side of the transformer is FIGURE 2.5. Circuit Diagram and Waveform If Transformer Upper negative, diode 2 (D2) and diode 3 (D3) are forward biased. In Arm is Positive this case, the forearm input voltage is positive, and diode 1 (D1) and diode 4 (D4) are reverse biased. When current flows 2.If the upper arm of the transformer is negative, diode 1 through the forward bias diode, current flows from the lower (D1) will be reverse biased. While the bottom of the leg of the transformer to D3, then to the load, then to D2, and transformer is positive, as a result diode 2 (D2) is forward through the upper leg back to the transformer. biased. When the diode is forward biased, current flows. Because the forward bias is diode two (D2), current flows through diode two and the load, then returns through the middle leg to the transformer.

FIGURE 2.9. Circuit Diagram and Waveform If the Input Voltage at the Top of the Transformer is Negative

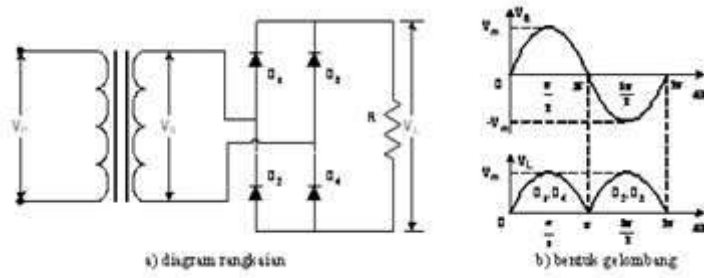
The output voltage of the above circuit can be calculated using the following equation:
 FIGURE 2.6.. Circuit Diagram and Waveform If Transformer Upper If : $V_{\text{sumber}} = V_m \cdot \sin \omega t$ (8) Arm is Negative



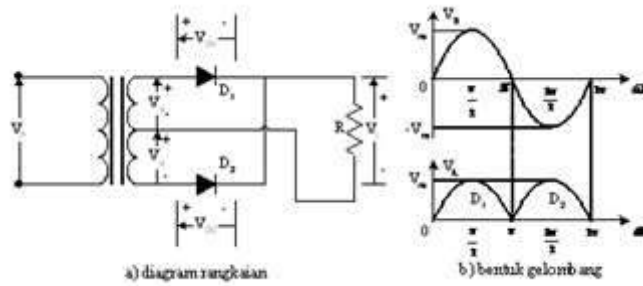
Gambar 8.3



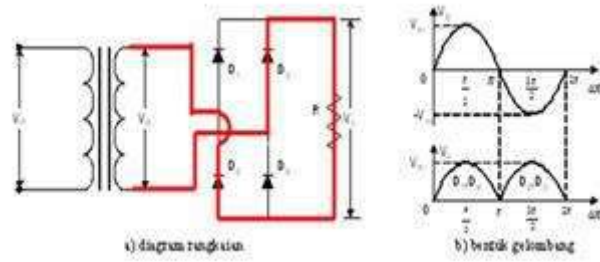
Gambar 8.4



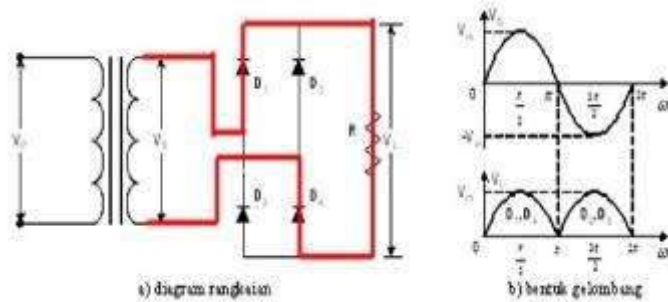
Gambar 8.5



Gambar 8.6



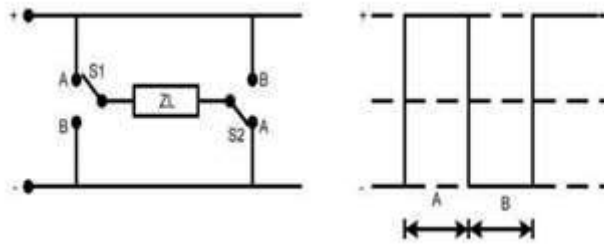
Gambar 8.7



Gambar 8.8

Then : $V_{DC} = V$ rata-rata induction motor, the rotor is in contact with the stator. The 1 $T V_{DC} = \int_0^T V(t)dt$ (9) stator and rotor are separated by an air gap. The structure of an T 12π induction motor is simpler than a DC motor because it has a $V_{DC} = \int_0^{2\pi} V(\omega t)d(\omega t)$ 2π commutator, carbon brushes, and maintenance of an induction $1 \pi V_{DC} = \int_0^{2\pi} Vm \sin \omega t d(\omega t)$ motor is only a mechanical component, induction motors are $2\pi 2$ very tough and fail electrically [1]. $V_{DC} = \int_0^{2\pi} [-Vm \cos \omega t]d(\omega t)$ 2π The working principle of an induction motor is simply $Vm V_{DC} = \int_0^{2\pi} [-\cos \pi + \cos 0]$ that when a 3-phase voltage source is connected to the stator $\pi Vm V_{DC} = \int_0^{2\pi} [1+ 1]$ coil, a rotating magnetic field is generated at a certain speed. πVm The rotating stator magnetic field cuts the rotor conductor $V_{DC} = 2 \pi$ (10) rods and creates an induced voltage of electric mobility [13]. The closed circuit of the motor coils impacting the electric 3. Single Phase Inverter mobility force produces a current. The current in the magnetic field creates a force in the rotor. If the initial Inverter An inverter is a circuit that converts a direct coupling obtained by the force in the rotor is relatively large current (DC) source with adjustable voltage and frequency to support the load clutch, then the rotor will rotate in the into alternating current (AC) [10]. he AC voltage is generated same direction using a rotating stator field [14]. in the form of a square wave, and some applications require a filter to generate a sine wave. Voltage control is carried out in two ways. Set the DC input voltage to the outside first, but 5. Speed Control of Single-Phase Induction Motors wider when setting the switch. Next, set the width when Single-phase

switching with a fixed DC input voltage. Induction motors usually rotate at near-continuous speeds when connected to a continuous voltage and controlled or uncontrolled rectifier circuit, an inverter (using frequency, very close to synchronous speed [15]). As the load varies, torque increases, the rotational speed decreases slightly, and an ignition control circuit/control circuit to regulate the making induction motors ideal for drive systems that require voltage and frequency. The inverter gets [11]. continuous rotational speed. But in practice, especially in industry, sometimes the speed needs to be adjusted. The speed of the induction motor can be adjusted in several ways, including [16] a. Changing the number of poles b. Set resource frequency c. Set the terminal voltage d. Arrangement of external prisoners e. Constant V/f Control The speed of an induction motor is proportional to the frequency of the power supply as well as the number of poles on the motor. The number of poles is affected by design, so FIGURE 2.10. Simple Circuit Inverter the best way to change the speed of an induction motor is to change the frequency of the power supply. The torque generated by an induction motor is proportional to the ratio of the applied voltage to the mains frequency. By keeping a 3 phase induction motor is an electrical device that the ratio of the two constant while changing the voltage and renews electric power as mechanical energy, the converted frequency, the torque generated can be kept constant electricity is 3 phase electricity. Asynchronous motors are also throughout the speed control range. This control is known as considered to use asynchronous motors. [1]. Basically, a 3- constant V/f control [17]. phase induction motor will have a continuous speed when there is no load (zero/idle) as well as full load. Since the speed of a 3-phase induction motor depends on the operating frequency, it is difficult to adjust the speed. Detailed structure of induction motor. The research methods used in this study are: The induction motor consists of two parts, namely the stator a. Data collection methods and the rotor. The stator is a fixed part of the motor, which • Field Study consists of the motor body, stator iron core, stator windings, Finding and collecting ideas becomes the basis for bearings and junction box [12]. The rotor is a rotating machine research design. part, consisting of a cage rotor and a rotor shaft. In an • Literature Study



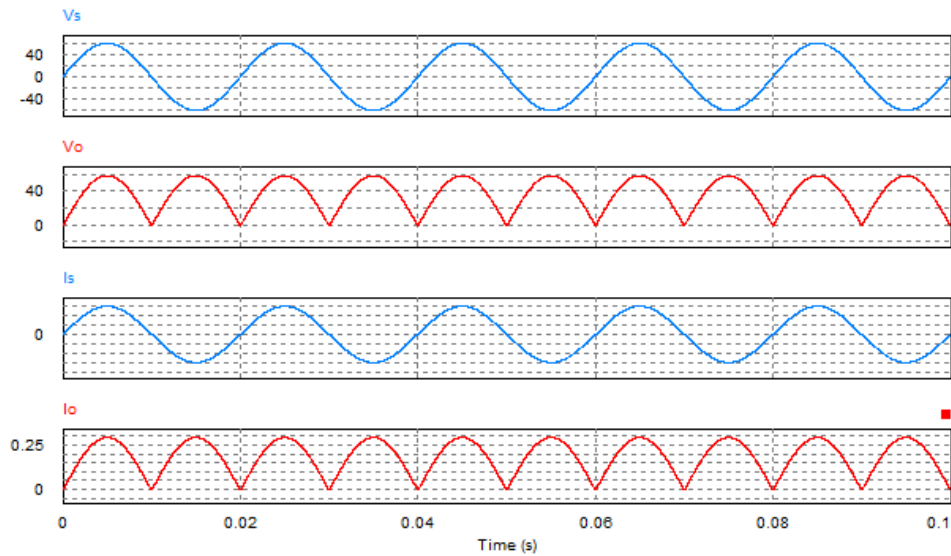
Gambar 8.9

Collecting research tools and investigating the DC output voltage produced by the rectifier is obtained by basic theories that support the research the following formula: • System Design $V_{DC} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t dt = \frac{2V_m}{\pi} = 0,636 T \pi$ Create research, test and response measurement Then : $V_{DC} = 0,363 \times 104 \times \sqrt{2} = 93,540$ Volt tools based on tools for system control. b. Data Processing Method The results obtained using mathematical formulas in The data processing method is from collecting data theory and measurements using a multimeter do not change through testing and measuring the response of the the magnitude of the output voltage produced significantly. instrument equipment to the control system There is a slight difference in the value of the resulting output c. Data Analysis voltage, such as an unstable mains voltage, the coefficient of From the data that has been processed then further the components used, etc. The resulting output waveform is analyze and make conclusions. as expected, but due to the use of a bridge diode, it gives a complete waveform. IV. RESULTS AND DISCUSSION 2. Testing of Single-Phase Inverter Circuit Without Load 1. Testing of Rectifiers Before the Voltage Leveling The purpose of this test is to determine the effect of Process changes in the keypad-based input frequency on the output voltage of a single-phase inverter circuit, and to determine The purpose of testing before the voltage grading the effect of variations in the input frequency to a constant process is to see the waveform and understand the results of ratio value of V/f. Below is a graph of input frequency vs. the output voltage values. output voltage and input frequency vs value of constant ratio V/f.

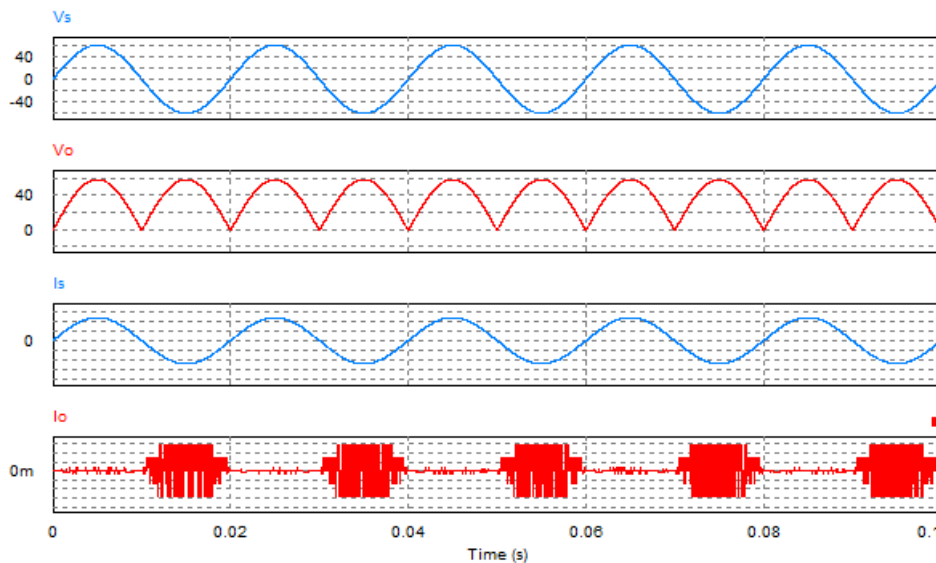
FIGURE 4.1. 1 Phase Full Wave Rectifier Test Circuit Before FIGURE 4.3. Phase Full Wave Rectifier Test Circuit Without Load Voltage Leveling Process

FIGURE 4.4. Output Waveform of Single Phase Full Wave Rectifier FIGURE 4.2. Output Waveform of Single Phase Full Wave Rectifier Without Load Before Voltage Leveling Process

The value of the output voltage measured by a multimeter from a single-phase full-wave rectifier circuit before the voltage grading process is 92VDC. In this test, the voltage source measured by the multimeter is 104 VAC from the secondary side of the transformer and is lowered from 220 VAC to 110 VAC using a step down transformer. The



Gambar 8.10



Gambar 8.11 Graph of Input Frequency Against V/f Ratio Constant FIGURE 4.7. Graph of Input Frequency to Output Voltage in Single Value In Testing Single Phase Inverter Without Load Phase Inverter Testing with Load

Based on the circuit in Figure 4.3, there are differences in the waveforms produced by V_s and V_{out} . In these two measuring instruments, namely V_s and V_{out} , the waves obtained show full AC waves, it can be said that the voltage is still AC-shaped voltage and has not been filtered. Meanwhile, in the simulation results of I_s and I_o , it can be seen that waves in

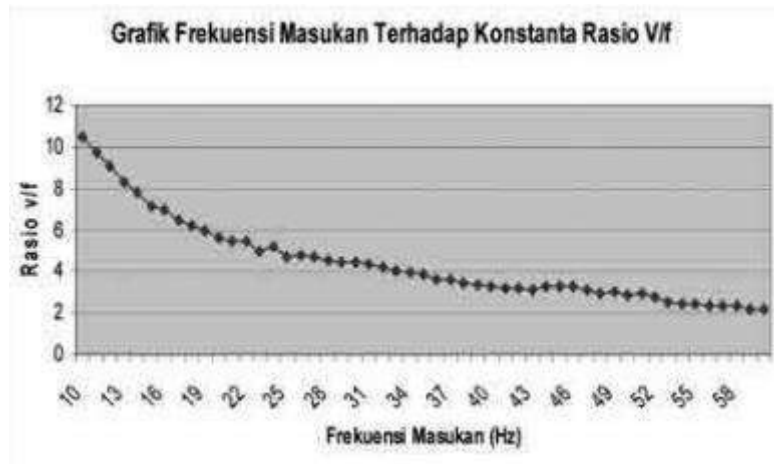
the form of waves are irregular because of the many ripples that occur in them. Ripples occur because the current is still in the form of AC current and there is no strong filter to stabilize the ripples. In Figure 4.5, although the input frequency changes regularly, the resulting constant V/f ratio is still not constant because the output signal from FIGURE 4.8. Graph of Input Frequency to V/f Ratio Constant Value the inverter is still square waves, which makes the output in Single Phase Inverter Testing with Load signal unstable.

3. Testing Single Phase Inverter Circuit With Load

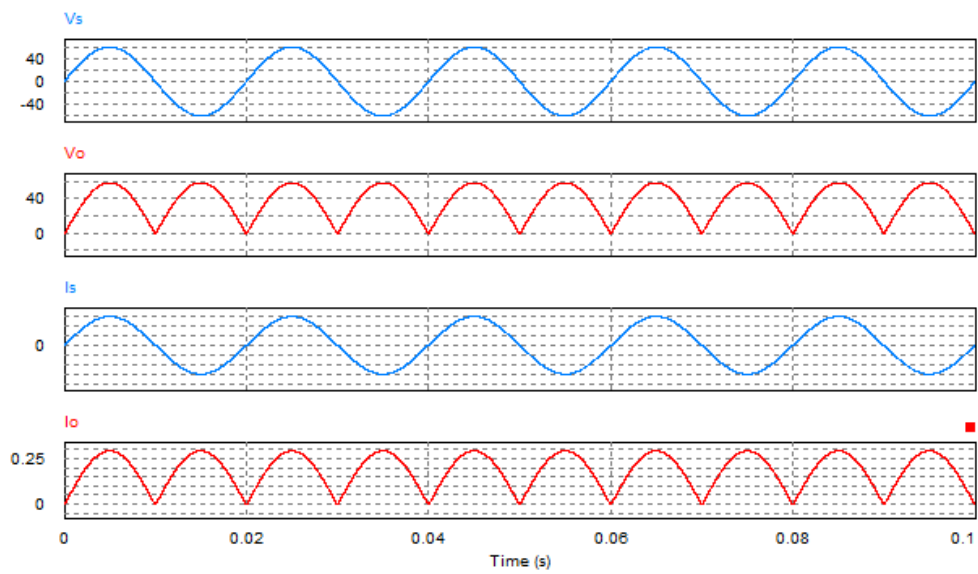
The purpose of this test is to determine the effect of the From figures 4.6 and 4.7, it is found that the full wave input frequency variation on the output voltage and the effect seen on the V_s measuring instrument and also in the form of the input frequency variation on the value of the ratio a full wave seen on the I_s , V_o , and I_o tools. In the measuring constant V/f. Below is a graph of the input frequency of the instrument vs. the wave output is in the form of a full wave, output voltage and a graph of the value of the input frequency meaning that the source voltage issued in the circuit is still to the ratio of the constant V / f . in the form of a voltage or AC signal that causes the formation of a full wave. In a measuring instrument with a full wave output, it means that the AC signal flowing in the circuit has been equalized by the diode to a DC signal, but not completely by eliminating the negative signal in the full wave only tells the positive signal, therefore the wave released by the oscilloscope is in the form of a full wave. In figure graph 4.8, the output voltage of the inverter changes as the input frequency changes, since the frequency is designed to change as the voltage changes. That is, changing the value of the PWM signal pulse width period and the cycle of its value remains at 50%. The homogeneous-

FIGURE 4.6. Phase Full Wave Rectifier Test Circuit with Load

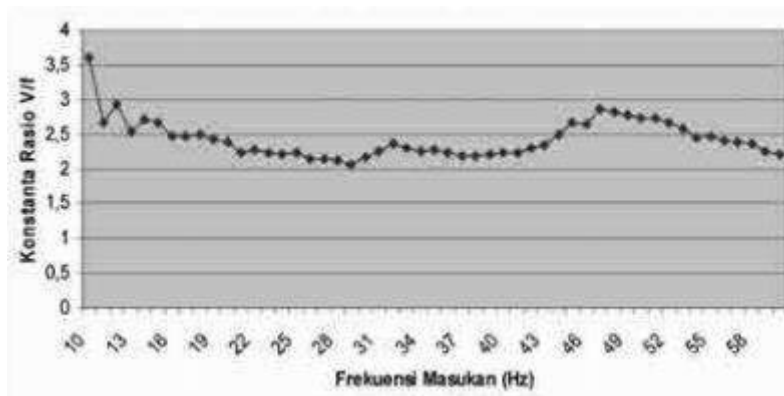
homogeneous value of the V/f ratio constant obtained was 2.34. The resulting V/f ratio constant value is suitable using the initial design. The constant value of the V/f ratio can be designed or obtained using replacing the PWM frequency pulse width period value. Cycles are worth always 50%.



Gambar 8.12



Gambar 8.13



Gambar 8.14

square wave AC voltage. Based on the plot of input frequency versus motor speed on a single-phase inverter load test, it can be seen that the greater the input frequency, the speed

of the induction motor also continues to increase because the frequency is proportional to the motor speed.

Suggestions for further development is to design a PWM signal generator, where the inverter produces a sinusoidal output voltage. This can reduce harmonics because it can shorten the life of the motor, the resulting output voltage becomes unstable, and when an AC motor is connected as a load, mechanical resonance occurs which FIGURE 4.9. Comparative Graph of the Relationship Between Input causes motor rotation disturbance. Frequency and V/f Ratio Constant Value

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT. "Konsep Dasar Aplikasi Komputer.", 2024
- [2] Handandi, ZZ, Putra, RAPA, Raihan, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." Jurnal Teknologi Maritim 6.1, 2023, pp. 11-16.
- [3] Nugraha, AT, Ravi, AM and Tiwana, MZA. "Penggunaan Algoritma Interferensi dan Observasi Untuk Sistem Pelacak Titik Daya Maksimum Pada Sel Surya Menggunakan Konverter DC-DC Photovoltaics." Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi 1.1, 2021, pp. 8-18.
- [4] Rahman, FWN, Ibrahim, M, Pahlevi, DRR, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "ASSESSING THE MARKETING APPROACH OF PT PAL INDONESIA COMPANY THROUGH A SWOT ANALYSIS." Jurnal Cakrawala Maritim 6.1, 2023, pp. 20-24.
- [5] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "O₂ Gas Generating Prototype In Public Transportation." JEEMECs (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2020
- [6] Nugraha, AT and Febrianti, C. "Prototype of Ship Fuel Monitoring System Using NodeMCU." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 2.1, 2024, pp. 54-62.
- [7] Zaibah, S and Nugraha, AT. "Pembangkit Energi Listrik Pico Hydro Terapung Menggunakan Underwater Turbine Untuk Mendukung Pemenuhan Rasio Elektrifikasi Dan Energi Listrik Di Daerah 3t." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [8] Nugraha, AT and Haritman, E. "Development of remote laboratory based on HTML5." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 850.1, 2020, p. 12017.
- [9] Agna, DIY, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Penyearah gelombang penuh 3 fasa tak terkendali dari generator kapal AC 3 fasa." Seminar MASTER PPNS 8.1, 2023, pp. 214-221.
- [10] Nugraha, AT. "Buku Konsep Dasar Elektronika Industri: Prinsip Dan Aplikasi Listrik Dasar Elektromagnetik Serta Transformator.", 2024
- [11] Bintari, A, Mudjiono, U and Nugraha, AT. "Analisa Pentahanan Netral dengan Tahan Menggunakan Sistem TN-C." Elektrise: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 12.2, 2022, pp. 92-108.
- [12] Purwanti, EP, Nugraha, AT, Sobhita, RA and Rivanda, DD. "PENGENDALI MOTOR DC INDUSTRI BERBASIS PSIM DAN PENYEARAH SATU FASA."
- [13] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Adzani, FR, Itislam, TA, Firdiansyah, R and "PENINGKATAN EFISIENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA MENGGUNAKAN KONVERTER SEPIC BERBASIS MOSFET IRF540." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 53-61.
- [14] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyfantri, Purba, JV and "ANALISIS KONTROL KECEPATAN PUTARAN MOTOR SATU FASA MENGGUNAKAN PARAMETER FREKUENSI." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 103-111.

- [15] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 29-38.
- [16] Azam, MRI, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Mini Weather Station dengan Penerapan Panel Surya sebagai Sumber Energi Berbasis Mikrokontroler." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.2, 2021, pp. 67-77.
- [17] Riyanto, DK, Asri, P and Nugraha, AT. "Monitoring akselerasi getaran dan suhu motor induksi." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 33-39.
- [18] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype hybrid power plant of solar panel and vertical wind turbine as a provider of alternative electrical energy at Kenjeran beach Surabaya." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2020
- [19] Saputra, FY, Sobhita, RA, Nugraha, AT and Firdaus, AA. "Efficiency Of Generator Set On Changes In Electrical Load On Fishery Vessels." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.2, 2024, pp. 1-4.
- [20] Nugraha, AT. "Buku Elektronika Industri 1: Prinsip dan Aplikasi Motor Listrik Mesin Listrik Serta Alat Ukur.", 2024

BAB IX

Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) Motor DC VD-49.15-K1-B00

Oleh: **Perdinan Setia Budi1**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: kontrol, LQR, LQT, optimasi, VD-49.15-K1-B00

Search Results "The problem of ideal control has attracted great attention at this time, it is caused by the increasing need for systems with high performance. The concept of control system optimization compromises the selection of performance indices and engineering that will produce an ideal control system within the limits of physical constraints In To solve an ideal control system, it is desired to find a rule for making control system decisions that will minimize a deviation from the ideal behavior. LQR is one of the optimal control methods for state space-based systems. The LQR controller has two parameters, namely the Q and R weight matrices , which must be determined so as to produce optimal control actions as expected.Examples of the implementation of the LQR method include controlling the speed of induction motors, controlling the frequency of power generators, to quadcopter drones.Linear Quadratic Tracking (LQT) is a surveillance system a rule whose output is set to follow (tracking) a predetermined path through the input. Tracking is done at the height of the quadrotor so that it follows a predetermined input response. In this method we will simulate Simulink on LQT circuits which can later be done in Matlab applications. In the "System Optimization" course, the author discusses the application of the LQR and LQT methods for DC motor plants which are accompanied by datasheets. The datasheet will be entered in the MATLAB script then simulated using the MATLAB Simulink software to see the step response. The DC motor used is the VD-49.15-K1-B00 type which is equipped with a value of moment of inertia, motor constant, damping ratio, resistance and inductance.

Abstrak

Hasil Pencarian "Persoalan kontrol ideal telah menarik perhatian yang sangat besar pada saat ini, hal itu diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan sistem dengan performansi tinggi. Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan indeks performansi dan rekayasa yang akan menghasilkan sistem kontrol ideal dalam batas-batas kendala fisik Dalam menyelesaikan sistem kontrol ideal, diinginkan mencari suatu aturan untuk mengambil keputusan sistem kontrol yang akan meminimumkan suatu ukuran simpangan

dari perilaku idealnya. LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R , yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone quadcopter. *Linear Quadratic Tracking* (LQT) merupakan sistem pengaturan yang keluarannya diatur agar mengikuti (*tracking*) jalur yang telah ditetapkan melalui masukan. *Tracking* dilakukan pada ketinggian quadrotor agar mengikuti respon masukan yang telah ditentukan. Pada metode ini kita akan mensimulasikan Simulink pada rangkaian LQT yang nantinya dapat dilakukan pada aplikasi Matlab. Pada mata kuliah “Optimasi Sistem” ini penulis membahas penerapan metode LQR dan LQT plant motor DC yang telah disertai datasheet. Datasheet tersebut akan di masukkan pada script MATLAB kemudian disimulasikan menggunakan software MATLAB Simulink untuk melihat step response. Motor DC yang digunakan yaitu tipe VD-49.15-K1-B00 yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi.”.

PENDAHULUAN

Persoalan kontrol ideal telah menarik perhatian yang sangat besar pada saat ini, hal itu diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan sistem dengan performansi tinggi. Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan indeks performansi dan rekayasa yang akan menghasilkan sistem kontrol ideal dalam batas-batas kendala fisik Dalam menyelesaikan sistem kontrol ideal, diinginkan mencari suatu aturan untuk mengambil keputusan sistem kontrol yang akan meminimumkan suatu ukuran simpangan dari perilaku idealnya.

Pada laporan ini penulis membahas metode LQR (Linear Quadratic Regulator) yang terkandung pada mata kuliah Teknik Otomasi PPNS yaitu. “Optimasi Sistem”. LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R , yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone quadcopter. Metode LQR ini menjadi sangat penting untuk dipadukan dengan disiplin ilmu optimasi sistem untuk meraih titik optimum dan mengurangi error pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita.

Linear Quadratic Tracking (LQT) merupakan sistem pengaturan yang keluarannya diatur agar mengikuti (*tracking*) jalur yang telah ditetapkan melalui masukan. *Tracking* dilakukan pada ketinggian quadrotor agar mengikuti respon masukan yang telah ditentukan. Pada metode ini kita akan mensimulasikan Simulink pada rangkaian LQT yang nantinya dapat dilakukan pada aplikasi Matlab.

Pada mata kuliah “Optimasi Sistem” ini penulis membahas penerapan metode LQR dan LQT plant motor DC yang telah disertai datasheet. Datasheet tersebut akan di masukkan pada script MATLAB kemudian disimulasikan menggunakan software MATLAB Simulink untuk melihat step response. Motor DC yang digunakan yaitu tipe VD-49.15-K1-B00 yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

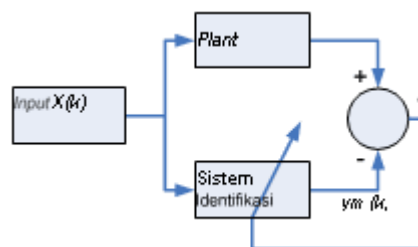
Dalam sistem kendali, identifikasi sistem pada umumnya dapat digambarkan seperti pada Gambar 1. Langkah-langkah proses identifikasi sistem terdiri atas empat tahap, yaitu :

Tersedianya data input-output plant yang akan diidentifikasi.

Pemilihan struktur model.

Estimasi parameter-parameter model.

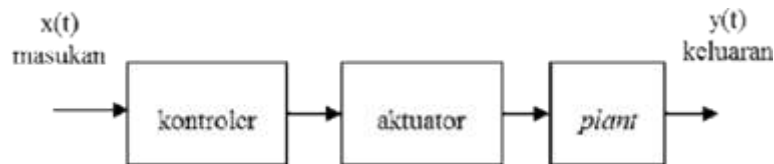
Validasi model yang telah diidentifikasi (struktur dan nilai parameter-parameternya).



Gambar 9.1 Blok diagram proses identifikasi suatu sistem.

Pada penelitian ini proses identifikasi motor DC dilakukan secara open loop melalui Arduino dan personal computer (PC) dengan terhubung Simulink-Matlab. Metode yang digunakan untuk identifikasi adalah metode identifikasi statis.

Identifikasi statis salah satu yang paling banyak digunakan adalah dengan metode open loop dengan masukkan step seperti yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 9.2 Diagram blok identifikasi plant dengan metode open loop

2.2 Karakteristik Sistem

Karakteristik sistem merupakan ciri khusus perilaku dinamik suatu sistem atau dinamakan dengan istilah spesifikasi performansi sistem. Tanggapan (respon) keluaran sistem muncul akibat diberikannya suatu sinyal masukan atau setelah diberi sinyal uji. Berdasarkan karakteristik respon sistem dapat diklasifikasikan menjadi karakteristik respon waktu (*time respons*) dan karakteristik respon frekuensi (*frequency respons*). Lebih jauh, pada penelitian ini diamati karakteristik respon waktu dari Motor DC. Tujuan dari pengamatan karakteristik respon waktu adalah untuk mengamati bentuk respon keluaran sistem terhadap berubahnya waktu. Secara umum spesifikasi performansi respon waktu dapat dibagi atas dua tahapan pengamatan, yaitu spesifikasi respon transien dan respon *steady state*. Lebih jauh, pengamatan karakteristik suatu sistem dapat didekati pada sistem orde satu dan orde dua.

2.3 LQR (*Linear Quadratic Regulator*)

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga *drone quadcopter*. Dengan menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari *set point* yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/*noise*.

2.4 LQT (*Linear Quadratic Tracking*)

Linear Quadratic Tracking (LQT) merupakan sistem pengaturan yang keluarannya diatur agar mengikuti (*tracking*) jalur yang telah ditetapkan melalui masukan. *Tracking* dilakukan pada ketinggian quadrotor agar mengikuti respon masukan yang telah ditentukan.

2.5 Noise

Noise atau disturbance merupakan suatu sinyal yang cenderung mempengaruhi nilai keluaran dari suatu sistem. Disturbance yang dihasilkan oleh sistem dinamakan internal

disturbance sedangkan disturbance yang muncul dari luar sistem disebut external disturbance. Noise tersebut tentunya akan membuat nilai keluaran menjadi tidak

2.6 Spesifikasi Motor DC



Gambar 9.3 Datasheet Motor DC tipe VD-49.15-K1-B00

Spesifikasi Motor

Nama Motor= VD Motor seri VD-49.15-K1-B00

$\tau = 235 \text{ mNm/A} = 0,235 \text{ N/m}$

No load current= 0.47 A

Rated Current= 6.10 A // arus

Voltage= 24 V

Speed = 6000 rpm atau 628m/s

Diameter = 48 mm

Jari-jari Motor= 24 mm = 0,024 m

10-6 (1)

Rasio redaman= $108 \text{ kgcm}^2 \times$

Bentuk umum fungsi alih orde 1

$G(s) = K\tau s + 1$ (2)

Orde 1 Motor DC

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 :

$\tau = K \cdot i$ (3)

Dimana sehingga

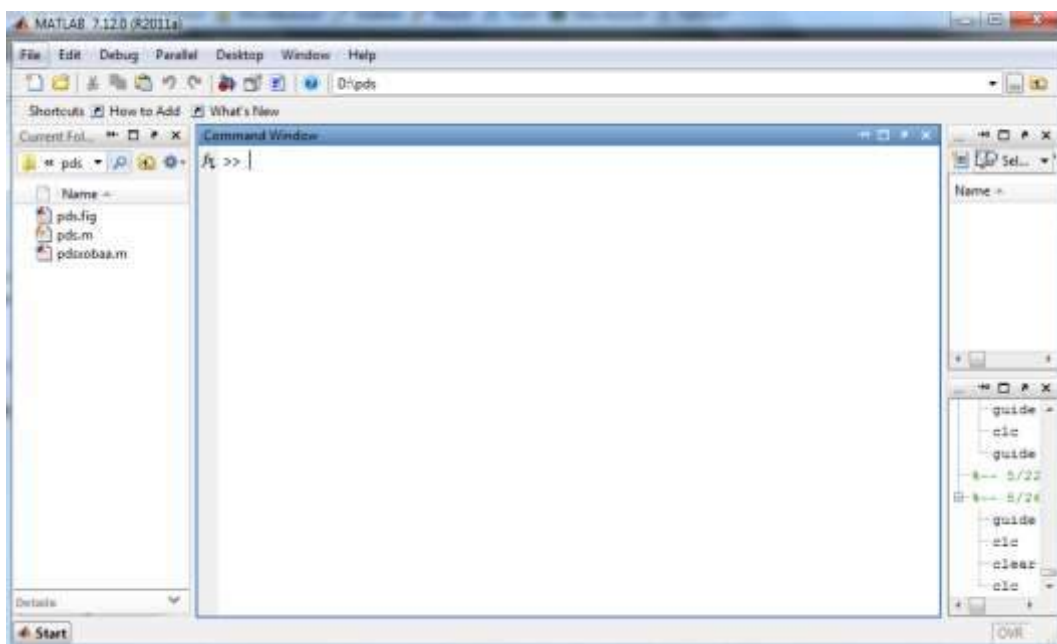
$$K = \tau i = 0,2356, 10 = 0,0385 \quad (4)$$

Persamaan orde 1 motor dc :

$$G(s) = 0,03850,235s + 1 \quad (5)$$

2.7 Software Matlab

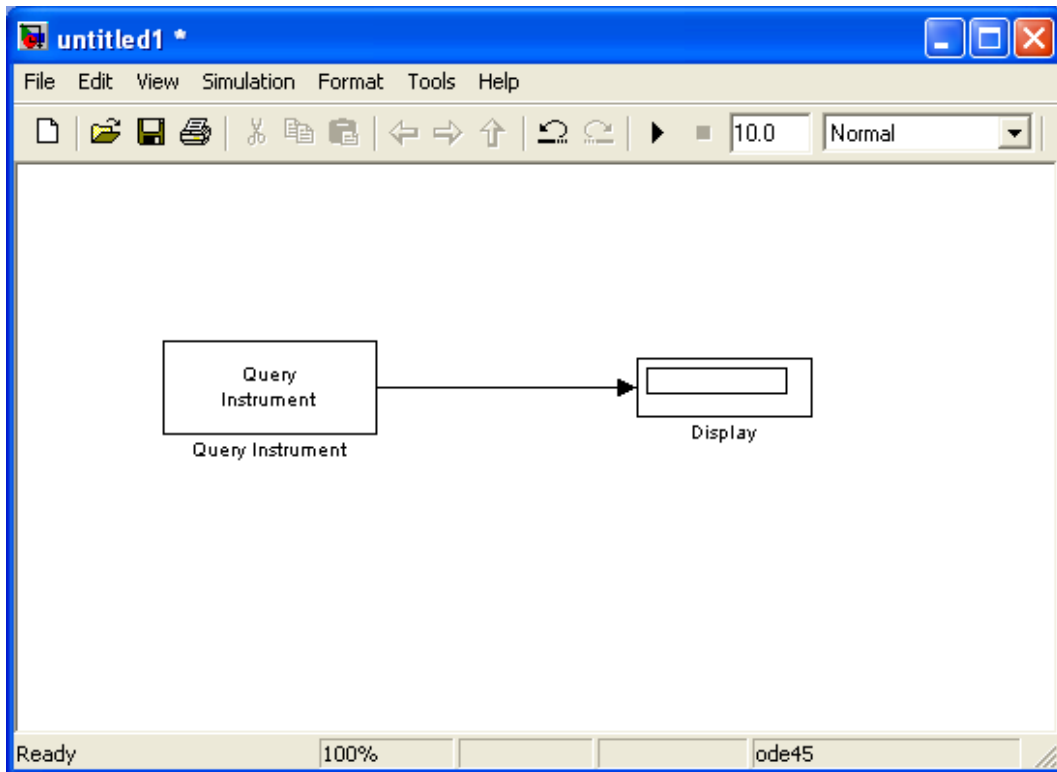
MATLAB adalah platform pemrograman yang menggunakan bahasa berbasis matriks sehingga umumnya digunakan untuk menganalisis data, membuat algoritma, serta menciptakan pemodelan dan aplikasi. Tampilan *software* MATLAB seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 9.4 Tampilan MATLAB

Pada simulasi untuk melihat respon yang dihasilkan oleh motor DC penulis menggunakan fitur Simulink pada MATLAB. Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang berperan sebagai pemrograman grafis.

Kegunaan utama dari Simulink adalah untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasi dilakukan menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing secara ekuivalen. Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka pengguna grafis. Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier.



Gambar 9.5 Tampilan Simulink MATLAB

2.8 Tool Simulink

Tabel 9.1

Komponen	Nama Komponen
	Step
	Random Number
	Add
	Gain
	Integrator
	Scope

2.9 Script pada Matlab

2.9.1 Script pada LQR

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC
```

```
clear;
```

```
clc;
```

```
% Model Motor DC
```

```
J = 360 ; b= 0.01 ; K= 0.056 ; R= 0.70 ; L = 0.00049 ;
```

```
% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi
```

```
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
```

```
B = [0; 1/L];
```

```
C = [1 0]
```

```
AA = [ A zeros(2,1); -C 0];
```

```
BB = [B;0];
```

```
% Pole Placement
```

```
J = [-3 -4 -5];
```

```
K = acker(AA,BB,J);
```

```
KI = -K(3);
```

```
KK = [K(1) K(2)];
```

```
% Matrix LQR
```

```
Q = [1 0 0;
```

```
0 1 0;
```

```
0 0 1000];
```

```
R = [1] ;
```

```
K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)
```

```
KI2 = -K_lqr(3);
```

```
KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];
```

2.9. 2 Script pada LQT

```
% OPTIMASI SISTEM LQT PADA MOTOR DC
```

```
clear;
```

```
clc;
```

```
% Model Motor DC
```

```
J = 360 ; b= 0.01 ; K= 0.056 ; R= 0.70 ; L = 0.00049 ;
```

```
% J = Momeninersia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi
```

```
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
```

```
B = [0; 1/L];
```

```
C = [1 0]
```

```
Q=10; R=0.0000000001; %0.000000000000001
```

```

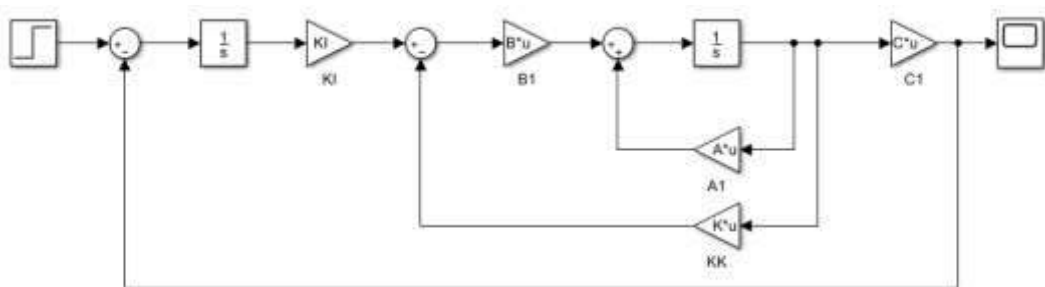
W=C'*Q; %
[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P
K=inv(R)*B'*S %feedback Gain
ACL=(A-B*K)'
L=inv(R)*B' %model following gain

```

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

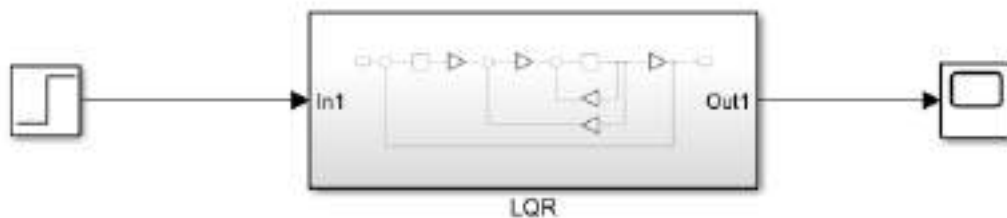
3.1 Gambar Rangkaian Simulink pada Matlab LQR

Gambar rangkaian LQR



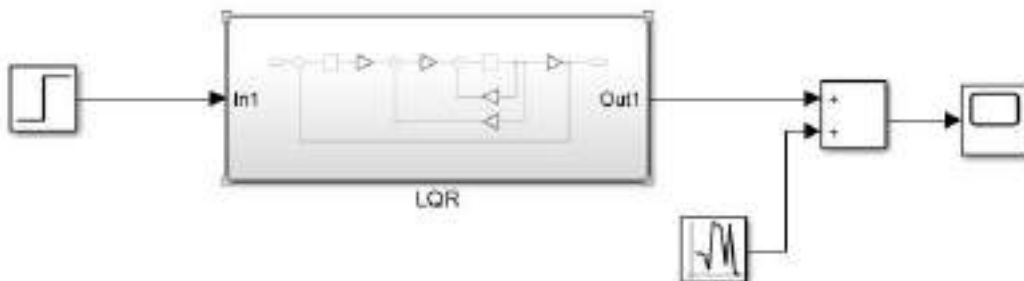
Gambar 9.6 rangkaian simulink LQR motor DC

Rangkaian Simulink LQR Motor DC VD-49.15-K1-B00 tanpa noise



Gambar 9.7 rangkaian simulink LQR motor DC tanpa noise

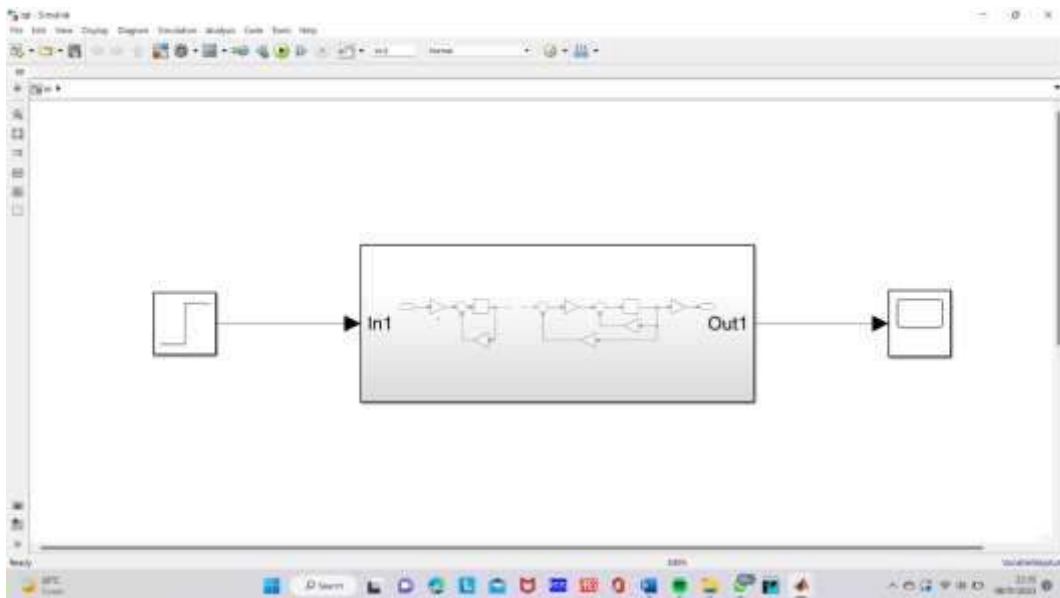
Rangkaian Simulink LQR Motor DC VD-49.15-K1-B00 dengan Noise



Gambar 9.8 rangkaian Simulink LQR motor DC dengan noise

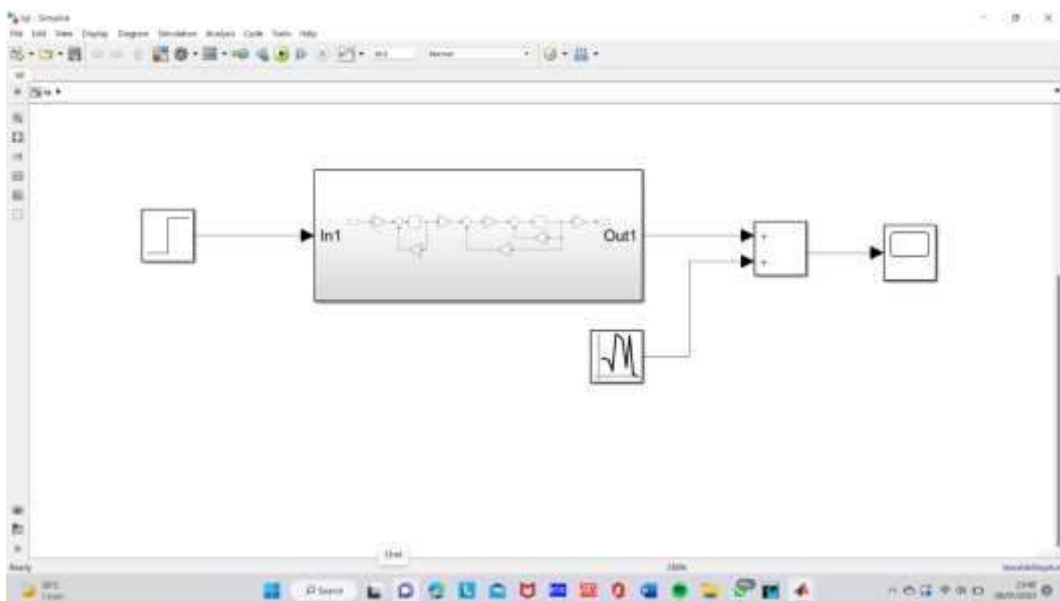
3.2 Gambar Rangkaian Simulink pada Matlab LQT

Rangkaian Simulink LQT Motor DC VD-49.15-K1-B00 tanpa noise



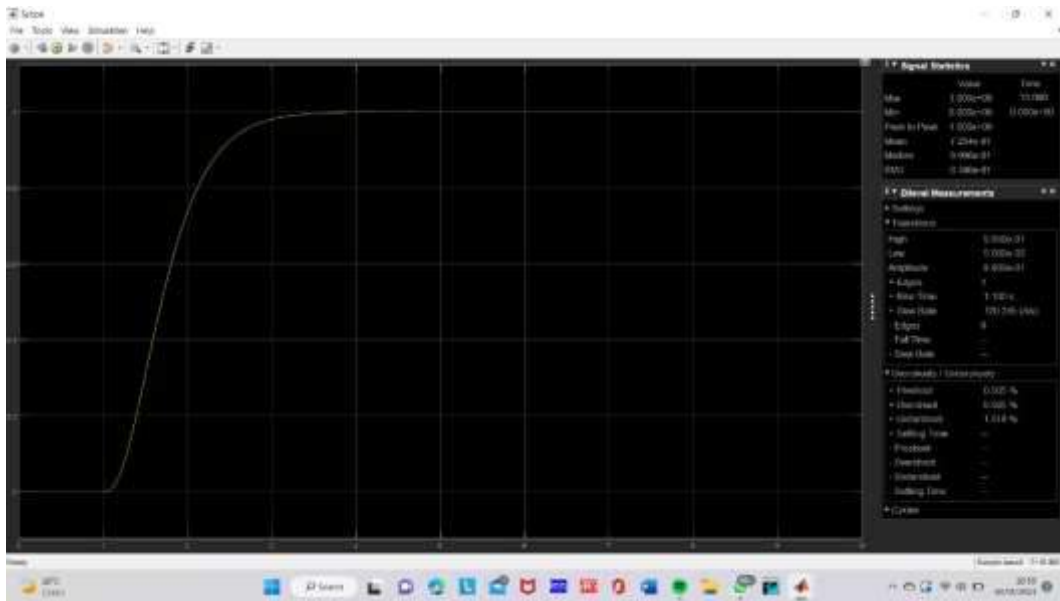
Gambar 9.9 rangkaian Simulink LQT motor DC tanpa noise

Rangkaian Simulink LQT Motor DC VD-49.15-K1-B00 dengan noise



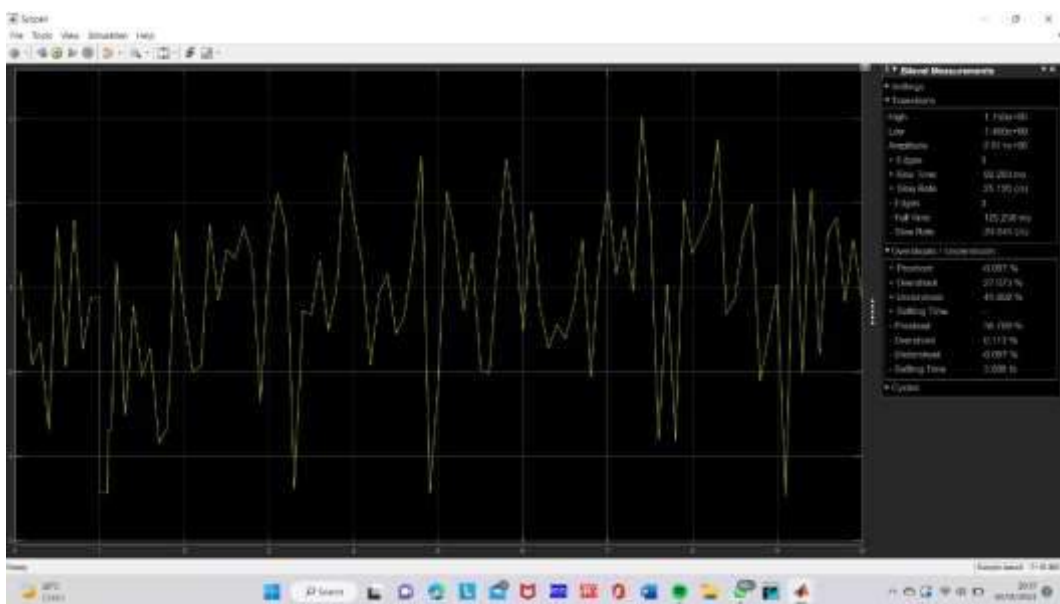
Gambar 9.10 rangkaian Simulink LQT motor DC dengan noise

3.3 Grafik Output Rangkaian LQR Tanpa Noise



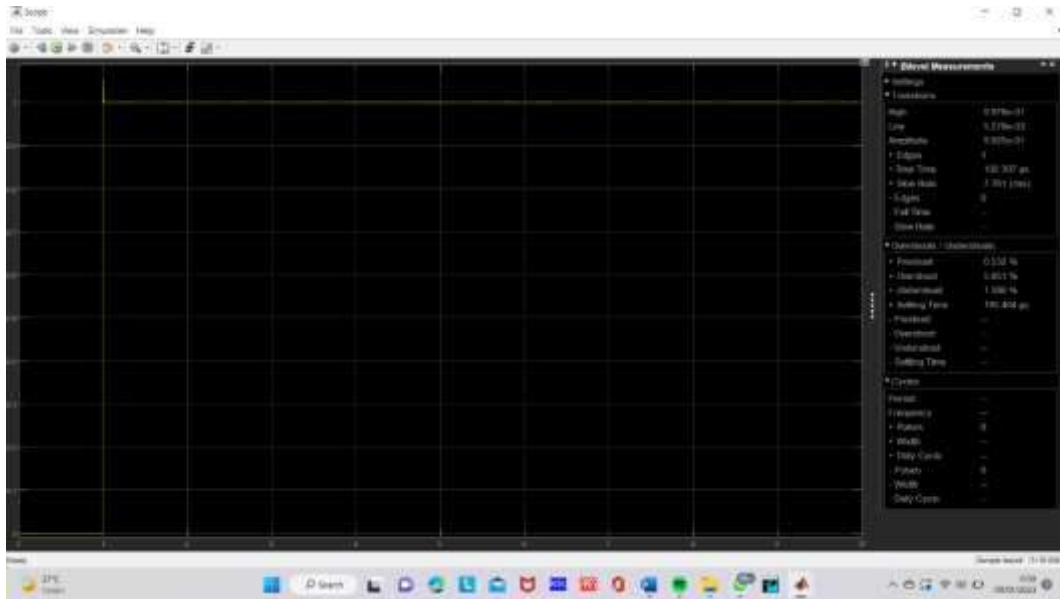
Gambar 9.11 Grafik Output Rangkaian LQR Tanpa Noise

3.4 Grafik Output Rangkaian LQR dengan Noise



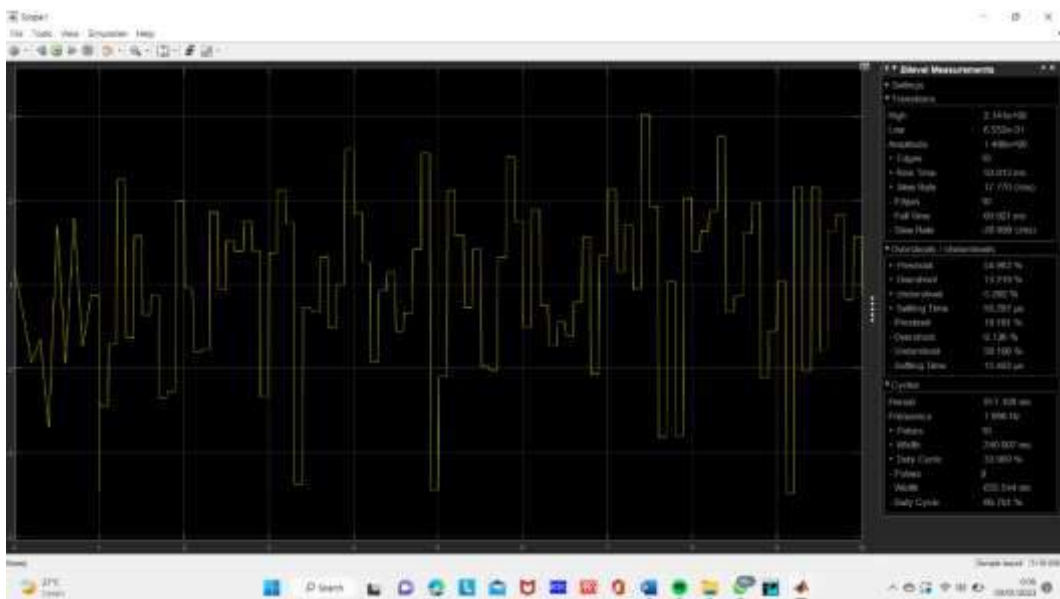
Gambar 9.12 Grafik Output Rangkaian LQR dengan Noise

3.5 Grafik Output Rangkaian LQT Tanpa Noise



Gambar 9.13 Grafik Output Rangkaian LQT Tanpa Noise

3.6 Grafik Output Rangkaian LQT dengan Noise



Gambar 9.14 Grafik Output Rangkaian LQT dengan Noise

3.7 Pembahasan

LQR Tanpa Noise

Pada gambar 3.6 merupakan grafik respon output yang dihasilkan oleh rangkaian LQR tanpa noise. Terlihat pada output respon yang dihasilkan LQR tanpa beban pada motor DC jenis VD-49.15-K1-B00 mencapai amplitudo hampir mencapai angka 1 sehingga dapat dikatakan telah mencapai setpoint. Memiliki rise time yang cukup maksimal di angka 1,2s dan memiliki overshoot dan undershoot yang cukup kecil diangka 0,507%.

LQR Dengan Noise

Pada gambar 3.7 yang merupakan rangkaian LQR dengan noise dari motor DC VD-49.15-K1-B00. Dapat dilihat bahwa pada grafik yang menampilkan output respons pada rangkaian hanya memiliki grafik fluktuatif diakibatkan noise yang diberikan (*random number*). Sistem telah mencapai amplitudo sebesar 0,68 sehingga belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal berada di angka 52,73 ms dan memiliki *overshoot* sebesar 102,93% serta *undershoot* di angka -87,68%.

LQT Tanpa Noise

Pada gambar 3.8 merupakan grafik respon output yang dihasilkan oleh rangkaian LQT tanpa noise dari plant motor DC VD-49.15-K1-B00. Terlihat pada grafik output memiliki amplitudo sebesar 9,924 dan mengalami *overshoot* sebesar 5,59% dan menunjukkan pada rangkaian LQT tersebut mengalami *overshoot* yang cukup besar. Tidak seperti grafik output LQR yang *overshootnya* sedikit dan dapat mencapai *setpoint* secara perlahan dan bertahap.

LQT dengan Noise

Pada gambar 3.9 merupakan grafik respon output yang dihasilkan oleh rangkaian LQT pada plant motor DC VD-49.15-K1-B00 dengan noise. Pada grafik LQT dengan noise memiliki *undershoot* sebesar -9,135% dan *overshoot* 13,218%, pada rangkaian ini hanya menunjukkan grafik fluktuatif diakibatkan noise yang diberikan atau dipasang komponen (*random number*). Rangkaian tidak mencapai *set point*, memiliki *rise time* yang cukup maksimal pada angka 50,013 ms.

A. Kesimpulan

Setelah melakukan beberapa percobaan mengenai rangkaian LQR noise dan tanpa noise pada motor DC VD-49.15-K1-B00. Pada percobaan LQR ini diperlukan perhitungan matematis untuk mencari konstanta pada orde 1. Dengan melihat datasheet motor brushless pada motor DC BN28 dan mencari nilai momen inersia, induktansi, resistansi, rasio redaman, serta konstanta motor.

Terlihat pada output respon yang dihasilkan LQR tanpa beban pada motor DC jenis VD-49.15-K1-B00 mencapai amplitudo hampir mencapai angka 1 sehingga dapat dikatakan telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1,2s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil di angka 0,508%. Pada grafik LQR dengan noise yang menampilkan output respons pada rangkaian hanya memiliki grafik fluktuatif diakibatkan noise yang diberikan (*random number*). Sistem telah mencapai amplitudo sebesar 0,68 sehingga belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal

berada diangka 52,73 ms dan memiliki overshoot sebesar 102,93% serta undrshoot diangka -87,68%.

Pada grafik output LQT tanpa noise memiliki amplitudo sebesar 9,924 dan mengalami *overshoot* sebesar 5,58% dan menunjukkan pada rangkaian LQT tersebut mengalami *overshoot* yang cukup besar. Tidak seperti grafik output LQR yang *overshootnya* sedikit dan dapat mencapai setpoint secara perlahan dan bertahap.

Respon output yang dihasilkan oleh rangkaian LQT pada plant motor DC VD-49.15-K1-B00 dengan noise. Pada grafik LQT dengan noise memiliki undershoot sebedar -9,135% dan overshoot 13,218%, pada rangkaian ini hanya menunjukkan grafik fluktuatif diakibatkan noise yang diberikan atau dipasang komponen (*random number*). Rangkaian tidak mencapai *set point*, memiliki rise time yang cukup maksimal pada angka 50,013 ms.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT. "Buku Elektronika Industri 1: Prinsip dan Aplikasi Motor Listrik Mesin Listrik Serta Alat Ukur.", 2024
- [2] Nugraha, AT, Putra, ZMA, Santoso, M, Najudah, F and Fathurrohman, MF. "Design of buck-boost converter as a voltage stabilizer on solar power plant at PPNS Baruna 01 Crewboat." E3S Web of Conferences 473, 2024, p. 1007.
- [3] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "PENYEARAH SATU FASE TERKENDALI GLOMBANG PENUH BEBAN RESISTIF." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 46-51.
- [4] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Itislam, TA, Fathurrohman, MF and "SIMULASI SISTEM PENGISIAN BATERAI BERDASARKAN LERENG DAYA DAN TEGANGAN PADA PANEL SURYA MENGGUNAKAN KONVERTER DC-DC BUCK-BOOST UNTUK PENERANGAN JALAN UMUM BERBASIS ENERGI" Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 43-52.
- [5] Shiddiq, MJ and Nugraha, AT. "Sistem monitoring detak jantung pada sepeda treadmill." Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE) 3.2, 2022
- [6] Nugraha, AT. "TRACKING QUADCOPTER MENGGUNAKAN COMMAND GENERATOR TRACKER BERBASIS LOS SAAT ADANYA DISTURBANCE PADA LINTASAN PERSEGI." Prosiding SENIATI 4.2, 2018, pp. 7-13.
- [7] Arifuddin, R, Dirgantara, W, Sumarahinsih, A, Hafsari, RPI, Maulana, FI and "Baby room temperature and humidity control system using fuzzy logic." Emitter: Jurnal teknik elektro, 2024, pp. 275-280.
- [8] Nugraha, AT, Sutrisna, VHK and Shiddiq, MJ. "Comparison Of LQR And PID Control Approaches In Enhancing Stability Of DC Motor Systems." Journal of Electrical, Marine and Its Application 1.2, 2023, pp. 1-6.
- [9] Nugraha, AT, Riyadi, F and Adzani, FR. "Making a Turtle Conservation Website and Sumbreng Sea Pearl Education Tour for Ecosystem Balance." Frontiers in Community Service and Empowerment 2.4, 2023
- [10] Nugraha, AT, Asri, P, Putra, ZMA, Sunarno, E, Eviningsih, RP, Indaryani, S and "Buku Bidirectional DC-DC Converter Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.", 2024
- [11] Ainudin, FH, Ashlah, MB and Nugraha, AT. "Pengontrol Kecepatan Respon Motor dengan Pid dan Lqr." Seminar MASTER PPNS 7.1, 2022

- [12] Nugraha, AT. "Design and build a distance and heart rate monitoring system on a dynamic bike integrated with power generating system." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2022
- [13] Sheila, SY, Sobhita, RA, Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Coffee Drying Tool with LQR-PID Control." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.2, 2024, pp. 18-23.
- [14] Nugraha, AT. "Rancang Bangun Charger Controller Pada Pembangkit Listrik Energi Angin Berbasis Arduino Uno." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [15] Nugraha, AT, Hidayana, E, Junaidi, R and Santosa, AF. "Monitoring Air Quality Parameters (No, No₂, O₃) At Surabaya City Stations." *Jurnal Cakrawala Maritim* 7.1, 2024, pp. 52-59.
- [16] Nugraha, AT. "Buku Rancang Bangun Teknologi Pemurni Air.", 2022
- [17] Pambudi, DSA, Angga, ATN, Utomo, AP, Ahmad, MM, Tiwana, MZA and "Main Engine Water Cooling Failure Monitoring and Detection on Ships using Interface Modbus Communication." *Applied Technology and Computing Science Journal* 4.2, 2021, pp. 91-101.
- [18] Nugraha, AT, Wahyudi, LA, Agna, DIY and Novsyafantri, N. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri dengan Menggunakan Penyearah Terkendali." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 9-20.
- [19] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "TUNING PARAMETER LINEAR QUADRATIC TRACKINGMENGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA UNTUK PENGENDALIAN GERAK LATERAL QUADCOPTER." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 65-71.
- [20] Azam, MRI, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Mini Weather Station dengan Penerapan Panel Surya sebagai Sumber Energi Berbasis Mikrokontroler." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.2, 2021, pp. 67-77.

BAB X

Perbandingan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Respons Keluaran Motor DC Maxon Ec-i

Kata Kunci: *Pemodelan, SISO, SIMO, MIMO, MISO*

DC motors are electronic devices commonly encountered in industrial environments to everyday life. In order for the performance of the DC motor to run properly, a controller is needed so that the performance of the DC motor is better. Modeling is useful to find out whether the response form of a pure DC motor before being given a load has produced a good response or not. The most common forms of plant modeling are SISO, SIMO, MISO, and MIMO. In the modeling requires a mathematical form of the plant so that the response form of the plant can be described in graphical form with the help of software. In this study, it is only limited to the mathematical model of the first and second order DC motors. Ideally a plant is impossible not to experience disturbances. Disturbance caused from within the plant itself is usually called noise. Noise that occurs in the system can affect the plant. This study was carried out with the aim of comparing how the response of the first and second order 42BLFX02 DC Motor when modeled SISO, SIMO, MISO, and MIMO is given or not. The results of the research show that the SISO form without noise produces the best response in the absence of ripples and the response is linear. The response generated by the second-order mathematical model produces a response that is closer to the set point value compared to the DC motor response of the first-order mathematical model. In the MISO and MIMO models, the output form of the response from the system will follow the form of one of the input signals. The addition of noise causes the shape of the output response of the 42BLFX02 DC motor to imitate the shape of the given noise signal.

Abstrak

Motor DC merupakan perangkat elektronik yang biasa ditemui pada lingkungan industri hingga kehidupan sehari-hari. Agar kinerja motor DC dapat berjalan dengan baik maka diperlukan pengontrol agar kinerja dari motor DC lebih baik. Pemodelan berguna untuk mengetahui apakah bentuk respon dari motor DC murni sebelum diberi beban sudah menghasilkan respon yang baik atau belum. Bentuk permodelan suatu *plant* yang banyak ditemui yaitu berupa *SISO, SIMO, MISO, dan MIMO*. Dalam permodelan membutuhkan bentuk matematis dari *plant* agar bentuk respon dari *plant* dapat digambarkan melalui bentuk grafik dengan bantuan *software*. Dalam penelitian kali ini hanyalah dibatasi dengan model

matematis Motor DC orde pertama dan orde kedua saja. Idealnya suatu plant tidak mungkin tidak mengalami gangguan. Gangguan yang diakibatkan dari dalam plant itu sendiri biasa disebut *noise*. *Noise* yang terjadi pada sistem dapat berpengaruh terhadap plant. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan bagaimana respon Motor DC 42BLFX02 orde pertama dan kedua ketika dimodelkan *SISO*, *SIMO*, *MISO*, dan *MIMO* antara dengan diberikan *noise* dan tidak. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk *SISO* tanpa *noise* menghasilkan respon paling baik dengan tidak adanya riak dan respon berbentuk linier. Respon yang dihasilkan oleh model matematis orde kedua menghasilkan respon yang lebih dekat dengan nilai set poin dibandingkan dengan respon motor DC model matematis orde pertama. Pada model *MISO* dan *MIMO* bentuk *output* hasil respon dari sistem akan mengikuti bentuk salah satu sinyal *input*. Penambahan *noise* mengakibatkan bentuk respon *output* dari motor DC 42BLFX02 meniru bentuk sinyal *noise* yang diberikan.

PENDAHULUAN

Motor DC merupakan suatu komponen elektronika yang sangat banyak ditemui pada kehidupan sehari-hari. Motor listrik adalah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau gerak. Prinsip kerja motor DC adalah berusaha agar arah medan magnet rotor selalu berlawanan dengan arah medan magnet *stator* yang saling tolak menolak. Kumparan ditolak oleh arus berenergi, menciptakan medan magnet dalam arah tertentu di sekitar kumparan jangkar. Secara umum, motor DC melambat di bawah beban, melambat, dan tidak berjalan pada kecepatan konstan. Kecepatan motor DC dapat dikontrol dengan mengubah tegangan *input*. Misalnya, jika beban bertambah dan motor DC melambat, solusinya adalah dengan menambah kecepatan lagi dengan meningkatkan nilai tegangan *input* ke motor DC. Oleh karena itu, diperlukan pengontrol untuk menjaga kecepatan motor DC agar tetap stabil seiring dengan perubahan beban. Fungsi dasar dari pengontrol adalah untuk membandingkan nilai sebenarnya dari output dari sebuah plant, dengan masukan referensi, (nilai yang diinginkan), tentukan kesalahan, dan hasilkan sinyal kontrol yang akan mengurangi kesalahan ke nilai yang mendekati nol.

Salah satu metode yang digunakan untuk pengontrolan motor DC agar *output* motor menjadi lebih baik yaitu LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracker*). Fungsi dari LQR yaitu agar respon dari motor lebih mendekati *set poin* yang diinginkan serta mengurangi *overshoot* dan *undershoot* yang terjadi pada sistem. Metode pengontrol LQR memiliki sifat-sifat seperti ketahanan, keandalan, pembangkitan penguatan statis, dll. Dengan menggunakan metode kontrol optimal ini dalam sistem besar dengan

banyak input, kontrol efisien beberapa keluaran dicapai secara andal dan ekonomis. Teknik regulator kuadrat linier digunakan untuk merancang pengontrol optimal yang meminimalkan fungsi biaya yang diberikan, indeks kinerja.

LQT merupakan sistem pengaturan linear yang *output* sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang diinginkan (Akbar et al., 2016). *Linear quadratic tracker* (LQT) adalah mekanisme kontrol pelacakan berbasis model yang menggunakan *affine state-feedback* untuk memberikan upaya pengendalian yang optimal. LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi (Saleem et al., 2018). Biasanya LQT digunakan untuk masalah optimasi pada sistem yang berkaitan dengan *tracking*.

Dengan dua metode optimasi tersebut, pada Mata Kuliah Optimasi Sistem Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dilakukan percobaan bagaimana pengaruh metode LQR dan LQT terhadap respon *output* yang dihasilkan oleh suatu motor DC. Percobaan juga dilakukan dengan menambahkan *noise* pada sistem untuk dilakukan pengamatan apakah penambahan metode LQR dan LQT respon motor tidak akan terpengaruh oleh *noise* yang diberikan atau respon motor tetap terpengaruh oleh *noise* yang diberikan. Serta bagaimana perbedaan antara metode optimasi LQR dengan LQT pada suatu jenis motor DC yang sama.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Identifikasi Motor DC

Pada tahapan ini dilakukan identifikasi mengenai spesifikasi Motor DC yang akan dilakukan penelitian. Bentuk Motor DC yang dilakukan penelitian yaitu berbentuk motor *brushless* dengan nama dan tipe Maxon EC-I 40 70 Watt. Berikut merupakan *datasheet* dari Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt.

Motor Data		with Hall sensors	449469
Values at nominal voltage			
1	Nominal voltage	V	18
2	No load speed	rpm	10100
3	No load current	mA	354
4	Nominal speed	rpm	8230
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	68.7
6	Nominal current (max. continuous current)	A	3.93
7	Stall torque ¹	mNm	876
8	Stall current	A	52.5
9	Max. efficiency	%	84
Characteristics			
10	Terminal resistance phase to phase	Ω	0.343
11	Terminal inductance phase to phase	mH	0.18
12	Torque constant	mNm/A	16.7
13	Speed constant	rpm/V	572
14	Speed/torque gradient	rpm/mNm	11.7
15	Mechanical time constant	ms	2.98
16	Rotor inertia	gcm ²	24.2

Gambar 10.1 Datasheet Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Sumber gambar: Datasheet Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Dari Gambar 1 tersebut dapat diambil data mengenai spesifikasi dari Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt yang akan disajikan pada tabel 1.

Tabel 10.1 Spesifikasi Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Model	Data	Satuan
Nominal voltage	18	V
No load speed	10100	rpm
No load current	354	mA
Nominal speed	8230	rpm
Nominal torque	68.7	mNm
Nominal current	8.93	A
Stall torque	876	mNm
Stall current	52.5	A
Max efficiency	84	%
Terminal Resistance	0.343	ohm
Terminal inductance	0.18	mH
Torque constant	16.7	mNm/A
Speed constant	572	rpm/mNm
Rotor inertia	24.2	gcm ²

Dari tabel 1 diatas kemudian dilakukan identifikasi mengenai motor DC yang digunakan melalui perhitungan matematis yang membutuhkan nilai-nilai variabel yang di dapatkan dari data tabel spesifikasi motor DC.

2.2 Permodelan Matematis Orde 1

Permodelan matematis dilakukan agar dapat diperoleh hasil respon yang dimiliki oleh motor DC. Model matematika dari sistem orde satu dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut :

$$C(s)R(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Keterangan:

$C(s)$ = *Output* sistem.

$R(s)$ = *Input* sistem.

K = *Gain Overall*.

$\tau s + 1$ = Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 63,2% (detik) pada orde satu.

$$\tau = K \cdot i \quad (2)$$

Dimana sehingga :

$$K = \tau i \quad (3)$$

Keterangan:

= Torsi

i = Arus

Sehingga perhitungan pada motor DC tipe Maxon EC-I 40 70 Watt berdasarkan spesifikasi dari *datasheet* yang diperoleh adalah :

$$K = \tau i = 0.2 \cdot 2.1 = 0,095 \quad (4)$$

Substitusi hasil persamaan 3 pada persamaan 1 hingga diperoleh model matematika dari motor DC tipe 42BLFX02 :

$$Gs = K\tau s + 1 = 0,1740.687s + 1 \quad (5)$$

2.3 Kendali Optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-keadaan (*state space*). Karena pendekatan sederhana dari metode ruang keadaan, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini. Persamaan ruang keadaan untuk sistem secara umum ditulis sebagai:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (6)$$

(5)

Pada prinsipnya, metode LQR mencari suatu sinyal control u yang meminimumkan indeks performansi J .

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (7)$$

(6)

LQR menemukan hukum input kontrol optimal u^* . Kendala yang disebabkan oleh matriks Q dan R meminimalkan indeks kinerja. Hukum kontrol optimal loop tertutup didefinisikan sebagai:

$$u^* = -Kx \quad (8)$$

(7)

Di mana K mewakili matriks gain umpan balik yang optimal. Matriks gain bekerja untuk meminimalkan indeks kinerja. Ini menentukan penempatan kutub loop tertutup yang tepat untuk meminimalkannya. Matriks penguatan umpan balik K bergantung pada matriks A , B , Q dan R . Umpan balik gainmatrix k diperoleh dengan menyelesaikan Algebraic Riccati Equation (ARE), P mendefinisikan matriks simetris dan matriks definit positif yang diperoleh solusi dari ARE didefinisikan sebagai:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (9)$$

(8)

$$K = -B^{-1}(A^T P + Q) \quad (10)$$

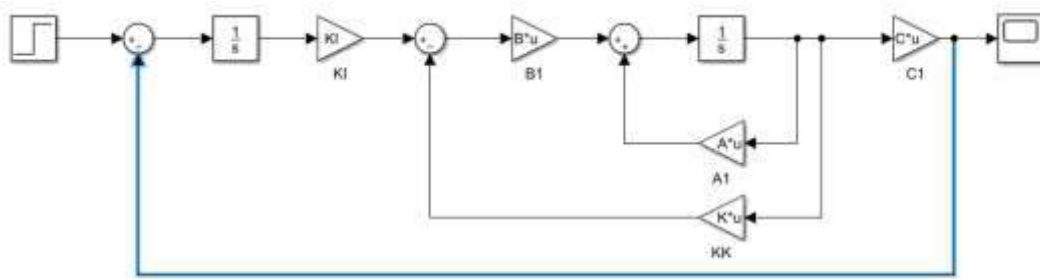
(9)

Substitusi persamaan (8) dan (9) menjadi

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (11)$$

(10)

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR di tunjukan oleh Gambar 2.



Gambar 10.2 Diagram Blok LQR

Sumber gambar: Penulis

2.4 Program Matlab LQR pada Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J=0.00000242 ; b=0.1 ; K=0.0167 ; R=0.343 ; L =0.00018 ;

% J = Momen inertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=

% Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

AA = [A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J)

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

0 1 0;

0 0 1000];

R = [1] ;

$$K_{lqr} = lqr(AA, BB, Q, R)$$

$$KI2 = -K_{lqr}(3);$$

$$KK2 = [K_{lqr}(1) \ K_{lqr}(2)];$$

2.5 Kendali Optimal Linear Quadratic Tracker (LQT)

LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi, $r(t)$. Vektor $r(t)$ dinyatakan dalam :

$$r(t) = [V_{ref} \ 0]^T \quad (12)$$

$$V_{ref} \quad (13)$$

Dimana, adalah sinyal tegangan referensi yang bervariasi terhadap waktu. Skema LQT meminimalkan indeks kinerja kuadrat untuk menghasilkan keputusan kontrol yang optimal yang dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut (Saleem et al., 2018).

$$J = \int_0^T [(x(t) - r(t))^T Q (x(t) - r(t)) + u^T R u] dt \quad (14)$$

Dimana, Q dan R adalah keadaan antara dan control matriks pembobotan, masing-masing. Mereka dipilih sedemikian rupa; $Q = Q^T \geq 0$ dan $R = R^T > 0$. Karena sifat kuadrat dari fungsi *cost*, sinyal kontrol sebanding dengan variasi kuadrat persamaan. Jadi, jika *state-variations* besar; minimalisasi dan, karenanya, tingkat konvergensi lebih cepat.

Keputusan kontrol affine yang optimal dievaluasi melalui ekspresi matematika yang ditunjukkan pada (Saleem et al., 2018),

$$\dot{x}(t) = -Kx(t) + K_{ff}v_{ref}(t) \quad (15)$$

Dimana,

$$K = R^{-1} B^T P \quad (16)$$

$$K_{ff} = R^{-1} B^T ((A - BK)^T)^{-1} H^T Q \quad (17)$$

Vektor penguatan, K , membantu merelokasi kutub sistem untuk mensintesis kontroler yang optimal. Perolehan optimal vektor bergantung pada matriks definit positif simetris, P , ditunjukkan pada (14). Matriks, P , untuk sistem yang diberikan dapat diperoleh dengan memecahkan Persamaan Aljabar Riccati, ditunjukkan pada.

$$ATP+PA-PBR-1BTP+HTQH=0$$

(18)

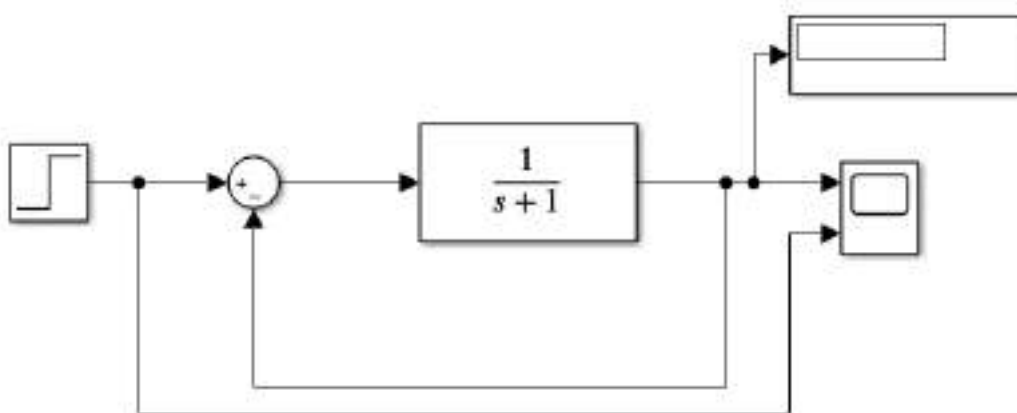
(16)

2.6 Program Matlab LQT pada Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

2.7 Blok Diagram Sistem

2.7.1 Blok Diagram Orde Satu Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Pada blok diagram orde satu motor bertujuan untuk mengetahui hasil respon asli dari motor DC jika motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt tanpa ditambahkan metode yang dilakukan pada *software simulink*.



Gambar 10.3 Diagram Blok Orde Satu Motor DC

Sumber gambar: Penulis

Pada gambar 3 merupakan diagram blok orde satu suatu motor DC yang terdiri dari sebuah input dan sebuah *output*. *Input* yang digunakan berjenis *step response*. *Transfer function* pada diagram tersebut dapat berisikan permodelan motor DC orde pertama. Hasil respon akan ditampilkan pada *scope* dan *display* untuk mengetahui berapa nilai maksimal respon yang dihasilkan.

A. 2.7.2 Blok Diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Pada blok diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada *software simulink*.

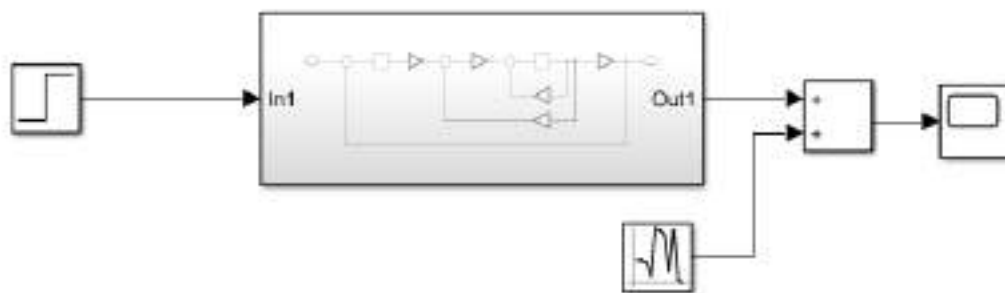


Gambar 10.4 Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

Sumber gambar: Penulis

B. 2.7.3 Blok Diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise

Pada blok diagram LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan *noise* bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada *software simulink*.



Gambar 10.5 Diagram Blok LQR Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan noise

Sumber gambar: Penulis

C. 2.7.4 Blok Diagram LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt

D. 2.7.5 Blok Diagram LQT Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Noise

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dibahas mengenai hasil dari respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt pada model matematis orde pertama dan saat diberikan metode LQR dengan dan tanpa *noise*. Hasil respon didapatkan dengan menggunakan simulasi pada *software Simulink Matlab*.

3.1. Hasil Respon Orde Satu Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt



Gambar 10.6 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt pada Permodelan Matematis Orde Satu

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* repon permodalan orde satu yang terlihat pada gambar 4.1, terlihat grafik respon motor pada orde satu memiliki keluaran yang sangat jauh dari set poin yang diinginkan. Gelombang berwarna oren merupakan hasil respon motor sedangkan yang berwarna biru merupakan set poin yang diinginkan. Set poin yang diinginkan yaitu 0,5 sedangkan respon motor hanya berada pada nilai 0.07. Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt yang diamati memiliki karakteristik linier yang ditunjukkan dengan bentuk sinyal yang tidak terdapat riak. Respon motor berada pada kondisi *steady state* pada detik ke ± 2 , setelah motor dihidupkan. Respon tersebut terbilang cukup lambat.

3.2. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQR



Gambar 10.7 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon permodalan gambar 4.2, terlihat grafik respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan menggunakan LQR memiliki keluaran yang sama dengan nilai set poin yang diinginkan. Set poin yang diinginkan yaitu 0,5, respon motor berhasil mencapai nilai set poin pada detik ke $\pm 1,2$ tanpa adanya nilai *overshoot* dan *undershoot*. Respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt menggunakan metode LQR menjadi lebih baik dibanding tanpa menggunakan metode LQR.

3.3. Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQR dan Tanpa Metode

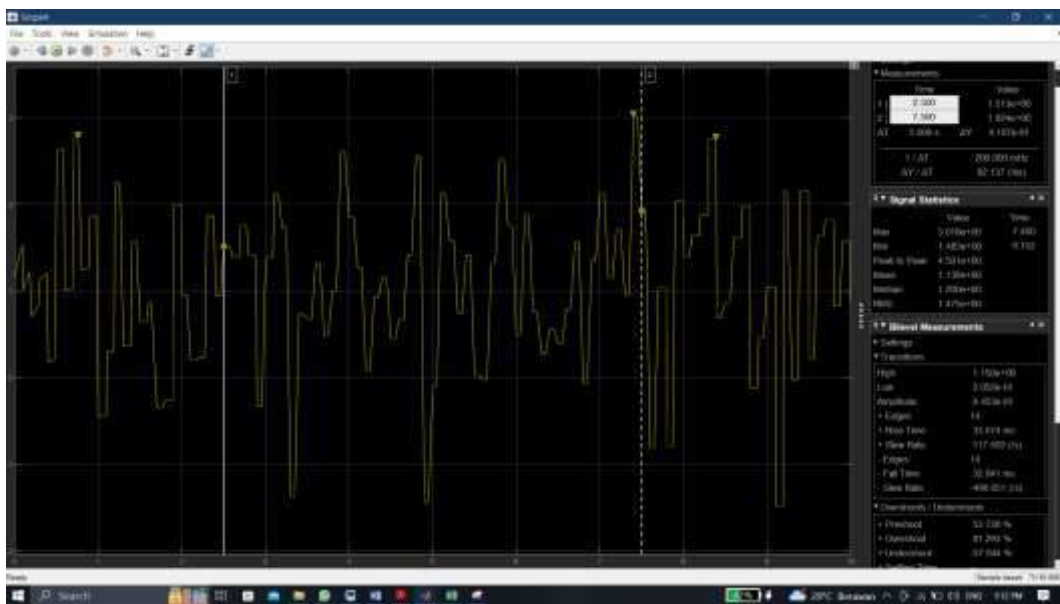


Gambar 10.8 Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan Metode LQR dan Tidak

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon perbandingan permodalan gambar 4.3, terlihat grafik respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan menggunakan LQR dan tidak menggunakan metode memiliki keluaran respon yang berbeda. Gelombang berwarna oranye merupakan set poin yang diinginkan, berwarna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQR, dan gelombang berwarna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQR. Pada gambar 4.3 tersebut terlihat dengan jelas respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan metode LQR memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa metode LQR. Disamping respon yang memiliki nilai sesuai dengan set poin yang diinginkan tanpa adanya *overshoot* dan *undershoot*, respon motor juga menjadi semakin lebih cepat untuk mencapai nilai *steady state*.

3.4. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQR dengan Noise



Gambar 10.9 Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dengan Metode LQR Saat Diberikan Noise

Sumber gambar: Penulis

Dari hasil gambar 4.4 terlihat sinyal kuning yang merupakan hasil respon motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt dengan metode LQR mengalami perubahan bentuk dari sebelum diberikan noise. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali ripple serta meniru bentuk dari

sinyal noise yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linier dan jauh dari kondisi stabil atau steady state pada set poin yang telah diberikan.

3.5. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQT

3.6. Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQT dan Tanpa Metode

3.7. Hasil Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQT dengan Noise

3.8. Hasil Perbandingan Respon Motor DC Maxon EC-I 40 70 Watt Menggunakan Metode LQR, LQT dan Tanpa Metode

E. Kesimpulan

Dari hasil percobaan terhadap motor DC Maxon EC-I 40 70Watt didapatkan hasil bahwa penggunaan metode LQR membuat hasil respon motor DC menjadi lebih baik. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil respon motor DC Maxon EC-I 40 70Watt dapat mencapai set poin yang diinginkan dengan waktu untuk mencapai nilai set poin yang cepat. Berbeda dengan tanpa menggunakan metode LQR, respon motor jauh dari nilai set poin yang diinginkan dan untuk mencapai nilai *steady state* membutuhkan waktu yang cukup lama. Keadaan tersebut membuktikan kebenaran teori bahwa metode optimasi LQR dapat mengoptimalkan hasil respon dari suatu motor DC menjadi lebih baik dari sebelumnya. Namun saat sistem diberikan noise metode LQR tidak dapat mempertahankan hasil responnya. Hasil respon motor DC Maxon EC-I 40 70Watt menggunakan LQR saat diberikan noise menghasilkan respon yang mengikuti sinyal noise yang diberikan pada sistem sehingga respon yang dihasilkan tidak lagi linier.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype hybrid power plant of solar panel and vertical wind turbine as a provider of alternative electrical energy at Kenjeran beach Surabaya." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2020
- [2] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Gas Pressure Measurement On Rocket Chamber Based On Strain Gauge Sensor." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...*, 2020
- [3] Sugianto, MGPA and Nugraha, AT. "Implementasi sensor cahaya sebagai level bahan bakar pada tangki harian kapal." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.1, 2022
- [4] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype Design of Carbon Monoxide Box Separator as a Form of Ar-Rum Verse 41 and To Support Sustainable Development Goals Number 13 (Climate Action)." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2021

- [5] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "PENGIMPLEMENTASIAN SISTEM KONTROL KENDALI LQR UNTUK MENGONTROL MOTOR DC." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 78-82.
- [6] Purwanti, EP, Nugraha, AT, Sobhita, RA and Rivanda, DD. "PENGENDALI MOTOR DC INDUSTRI BERBASIS PSIM DAN PENYEARAH SATU FASA."
- [7] Nugraha, AT, Sobhita, RA and Firdaus, AA. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." Emerging Trends in Industrial Electronics 1.1, 2025, pp. 1-8.
- [8] Asri, P, Rachman, I, Widiarti, Y, Nugraha, AT, Maulidhia, ANA, Widodo, HA and "Membangun Kemandirian Energi Rumah Tangga Melalui Pelatihan Reparasi Alat Kelistrikan." Jurnal Cakrawala Maritim 8.2, 2025, pp. 100-108.
- [9] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "SISTEM KENDALI LQR DAN PID PADA ALAT PENERING BIJI KOPI." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 83-87.
- [10] Ashlah, MB, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Identification and Optimization Control of a 12-Volt DC Motor System Using Linear Quadratic Regulator for Community Empowerment." Maritime in Community Service and Empowerment 3.1, 2025
- [11] Amelia, P, Juniani, AI, Nugraha, AT and Hendrata, F. "RANCANG BANGUN SISTEM INFORMASI Pencarian Kerja Dengan Integrasi Mekanisme Keterlaksanaan Dokumen Untuk Transparansi Rekrutmen." JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization 8.1, 2025, pp. 49-56.
- [12] Nugraha, AT and Sugianto, MGPA. "Development of a Monitoring System for Daily Fuel Tank Levels on Ships." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 2.1, 2024, pp. 23-31.
- [13] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Water Purification Technology Implementation Design." JEEMECs (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2020
- [14] Firdaus, AA, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Design and Development of a Prototype System for Temperature and Water Level Control in an Extruder Machine." Journal of Electrical, Marine and Its Application 1.1, 2023, pp. 1-7.
- [15] NUGRAHA, AT, ALFARISI, N, AZIS, A, HARDIANSYAH, MM, HARIS, GR and "Trainer Kit." ID Patent EC00,202,311,988, 2023
- [16] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "ALAT PENJEMUR KOPI DENGAN KENDALI LQR-PID." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 72-77.
- [17] Nugraha, AT, Rochmawati, NW and Sheila, SY. "Buku Topologi Bidirectional Buck-Boost Converter Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.", 2024
- [18] Riyanto, DK, Asri, P and Nugraha, AT. "Monitoring akselerasi getaran dan suhu motor induksi." Elektrise: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.1, 2021, pp. 33-39.
- [19] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Design of hybrid portable underwater turbine hydro and solar energy power plants: Innovation to use underwater and solar current as alternative electricity in Dusun Dongol Sidoarjo." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [20] Nugraha, AT, Anshory, I and Rahim, R. "Effect of alpha value change on thrust quadcopter Qball-X4 stability testing using backstepping control." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 434.1, 2018, p. 12207.

BAB XI

Pemodelan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) pada Motor DC

Oleh: **Rafli Darrylivan Putra Hadisyah**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Abstrak

: Regulator kuadrat linier (LQR) adalah salah satu metode kontrol optimal untuk sistem berbasis ruang negara. Kontroler LQR memiliki dua parameter yaitu matriks bobot Q dan R yang harus didefinisikan untuk menghasilkan operasi kontrol optimal yang diinginkan. Berbeda dengan kontroler proporsional integral (PID) yang memiliki metode tuning dengan pendekatan sistematis seperti Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon, kontroler LQR tidak memiliki metode tuning khusus untuk menentukan matriks bobot secara sistematis. Masalah tracking bertujuan untuk memaksa output sistem agar output yang dihasilkan mengikuti lintasan yang diinginkan dengan menggunakan teknik kontrol Linear Quadratic Tracking (LQT). Hasil pembahasan masalah ini, khususnya masalah regulator, akan diaplikasikan sebagai program simulasi MATLAB dengan mengambil model suspensi mobil yang persamaan modelnya telah diubah menjadi persamaan program ruang keadaan.

Kata Kunci: Motor, Inverter, Regulator

^{1,2,3}Program Studi D-IV Teknik Otomasi

³Program Studi Teknik Otomasi, Fakultas Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Abstract: *The linear squares regulator (LQR) is one of the optimal control methods for state space-based systems. The LQR controller has two parameters namely the Q and R weight matrices that must be defined to produce the desired optimal control operation. Unlike integral proportional controllers (PIDs) that have tuning methods with a systematic approach such as Ziegler-Nichols and Cohen-Coon, LQR controllers do not have specific tuning methods for systematically determining weight matrices. The tracking problem aims to force the system output so that the resulting output follows the desired trajectory by using the Linear Quadratic Tracking (LQT) control technique. The results of the discussion of this issue, especially the regulator problem, will be applied as a MATLAB simulation program by taking a car suspension model whose model equation has been converted into a state space program equation.*

A. Pendahuluan

B. Latar Belakang

Sistem kontrol yang optimal saat ini menjadi perhatian banyak pihak. Hal tersebut disebabkan oleh meningkatnya permintaan akan sistem yang efisien. Konsep optimasi sistem kontrol menawarkan pilihan kinerja dan parameter teknis yang akan menciptakan sistem kontrol yang optimal dalam batasan fisik. Dengan menyempurnakan sistem kendali yang optimal, diharapkan dapat ditemukan aturan-aturan pengambilan keputusan tentang sistem kendali yang akan meminimalkan penyimpangan sistem dari perilaku idealnya.

Teknik optimasi adalah teknik yang digunakan untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Metode optimasi ini menawarkan banyak keuntungan dalam pengambilan keputusan dan dapat diterapkan pada berbagai bidang keilmuan, seperti contohnya adalah bidang teknologi. Contoh aplikasi ini ditemukan dalam ilmu desain sipil atau mekanik, pemeliharaan jaringan, sistem kontrol dan operasi elektromekanis, dan distribusi daya. Di area ini perlu dibuat keputusan yang baik untuk mencapai biaya minimum dengan hasil maksimum. Di sisi lain, adalah mungkin untuk menghasilkan hasil dengan *error* seminimal mungkin, atau untuk membuat alat termurah dan seefisien mungkin (optimal).

Matematika mampu memberikan solusi pengoptimalan kendali suatu sistem dengan Batasan-batasan tertentu. Contoh pengoptimalan kendali sistem dalam kehidupan sehari-hari adalah kendali optimal kereta api agar tetap stabil, kendali optimal pada keseimbangan gerak robot, hingga kendali optimal kinerja pegas pada suspensi mobil. Sebuah kendali optimal adalah satu set persamaan diferensial yang menggambarkan jalan dari variable-variabel kendali yang meminimalkan biaya fungsional. Secara umum, perancangan sistem kendali optimal mempunyai 2 tujuan, yaitu sebagai *regulator* (menstabilkan sistem dengan *variable/output* agar tetap kecil) dan sebagai *tracking* (mengontrol sistem agar tetap mengikuti *trayektory* dan keadaanya selalu dalam batas-batas tertentu)

C. Tinjauan Pustaka

D. Eddy Current Brakes

Rem dinamometer arus eddy dipilih karena dapat memberikan laju perubahan beban yang cepat, pengereman kecepatan tinggi yang baik, kondisi yang cepat dan stabil serta kontrol akselerasi yang mudah. Dengan demikian, dinamometer rem arus eddy sangat serbaguna dan ideal untuk memeriksa kinerja motor terhadap dinamometer inersia. Sistem dinamometer rem arus eddy menggunakan arus yang dihasilkan oleh perubahan fluks pada

pelat konduktif sebagai bahan penggerak untuk menghasilkan gaya pengereman dalam uji performa motor. Parameter waktu, besaran gaya pengereman dan kestabilan sistem selama pengereman merupakan parameter yang dianalisis untuk mencapai kinerja optimal dari dinamometer arus eddy.

E. Line Quadratic Regulator

LQR adalah salah satu metode kontrol modern yang dapat diterapkan pada sistem yang direpresentasikan oleh ruang keadaan. LQR tergolong metode kontrol optimal dengan mengambil hasil perhitungan yang paling sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Pertimbangan dalam pemilihan spesifikasi dapat ditentukan oleh kondisi plant, kendala, dan biaya [12]. Kendali LQR dapat menghasilkan sistem yang optimal karena dibandingkan dengan metode pole setting, pemilihan gain kendali umpan balik keadaan pada kendali LQR dilakukan secara sistematis. Oleh karena itu, lebih mudah untuk melihat hubungan antara pengaturan penguatan umpan balik status dan perilaku sistem.

Algoritma LQR mengurangi beban kerja yang dilakukan oleh insinyur sistem kontrol untuk mengoptimalkan pengontrol. Namun, para insinyur masih perlu menentukan parameter fungsi biaya dan membandingkan hasilnya dengan tujuan desain yang ditentukan. Ini biasanya berarti bahwa membangun pengontrol akan menjadi proses berulang, di mana para insinyur mengevaluasi pengontrol "optimal" yang diperoleh melalui simulasi, kemudian menyesuaikan parameternya untuk membuat pengontrol yang lebih sesuai dengan tujuan desain. Konsep dasar LQR adalah sebagai berikut :

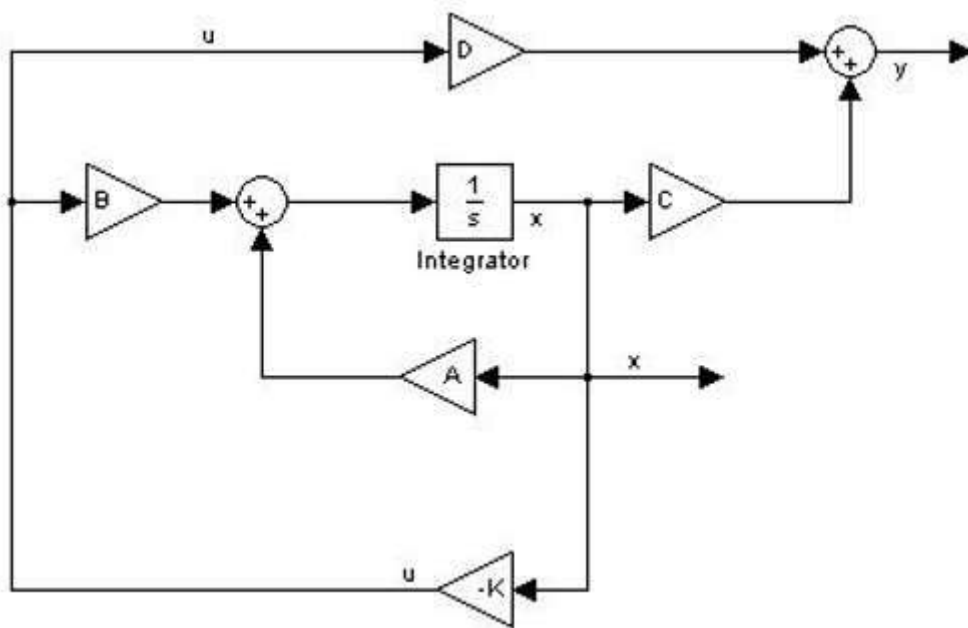
$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

$$y = Cx + Du \tag{2}$$

Tujuan LQR adalah meregulasi/membuat output y menjadi nol dengan input seminimal mungkin. Tujuan ini dicapai dengan mendesain sebuah gain feedback K yang bisa meminimisasi cost function

$$J = \int_0^{\infty} [y^t Q y + u^t R u(t)] dt \tag{3}$$

Q dan R adalah matrix weighing/pembobotan, dan kedua matrix ini harus berupa symmetric positive-definite. Cara memilih matrix-matrix ini akan dijelaskan nanti. Cost function ini berupa persamaan kuadrat dan inilah asal nama Linear Quadratic Regulator. Rancangan LQR adalah sebagai berikut :



Gambar 11.1

LQR mengendalikan proses/plant dengan menggunakan kombinasi linear state plant tersebut. Maka, LQR membutuhkan semua state dalam plant tersedia untuk proses kontrol (dapat diukur atau diakses datanya). Jika tidak semua state ini bisa diperoleh, maka LQR dapat disertai dengan observer/estimator untuk mengestimasi state-state yang tidak dapat diukur berdasarkan model plant dan output yang dapat diukur. Sistem kendali LQR adalah sebagai berikut :

$$u = -Kx \tag{4}$$

$$K = \text{inv}(D'QD + R)(B'P + D'QC) \tag{5}$$

Dengan P adalah solusi dari persamaan aljabar Ricatti :

$$0 = A'P + PA + C'QC - PB + C'QD \text{inv}(D'QD + R)(B'P + D'QC) \tag{6}$$

Output y yang ingin dibuat nol adalah sama dengan seluruh state x. Sehingga $C = 1$ dan $D = 0$. Dengan ini, sistem kendali menjadi :

$$K = \text{inv}RB'P \tag{7}$$

$$0 = A'P + PA + Q - PB \text{inv}RB'P \tag{8}$$

Desain LQR yang telah dijabarkan adalah desain untuk sistem kendali dengan rentang waktu yang tak terhingga (t dari nol hingga $t \rightarrow \infty$). Jika rentang waktunya berhingga, maka P harus dicari dari persamaan diferensial Ricatti:

$$dP/dt = A'P + PA + C'QC - PB + C'QD \text{inv}(D'QD + R)(B'P + D'QC) \tag{9}$$

Dimana persamaan ini harus diselesaikan secara numerik dari $t = t_f$ ke $t = 0$, di mana t_f adalah waktu final kendali. Pada sistem waktu yang berhingga ini, P berubah-ubah terhadap

waktu sehingga feedback gain K juga berubah-berubah terhadap waktu. Lain halnya dengan sistem yang memiliki waktu yang panjang/tak berhingga, nilai P selalu sama sehingga K tidak berubah-ubah terhadap waktu/time invariant.

F. Bryson's Rule

Hal yang paling sering menjadi pertanyaan adalah bagaimana memperoleh/menentukan matrix Q dan R. Tidak ada solusi yang unik untuk matrix-matrix ini. Pemilihan matrix ini tergantung dari seberapa besar pengaruh y dan u yang diinginkan pada cost function dan dilakukan dengan trial and error (coba-coba). Yang perlu diperhatikan dalam proses trial and error ini adalah matrix Q dan R harus dan . Adapun satu aturan yang bisa menjadi acuan awal dalam trial and error ini adalah Bryson's Rule. Bryson's Rule menunjukkan pemilihan matrix Q dan R dapat dimulai dengan:

$$Q = 1 \text{ nilai } y^2 \text{ max yang diperbolehkan} \quad (10)$$

$$R = 1 \text{ nilai } u^2 \text{ max yang diperbolehkan} \quad (11)$$

Cara pemilihan ini tidak dijamin akan memberikan hasil yang diinginkan, tetapi setidaknya dapat menjadi langkah awal dalam proses trial and error. Pada perancangan sistem kendali, seringkali kita harus melakukan trial and error. Contohnya pada desain PID, kita harus melakukan trial and error kepada 3 variable yang berbeda (P, I, dan D). Di sini lah LQR menjadi pilihan yang lebih baik daripada PID. Pada LQR, trial and error hanya dilakukan pada dua variable yakni Q dan R. Maka, proses trial and error pada LQR lebih sederhana tetapi tetap dapat menghasilkan performa yang sama dengan PID.

G. Line Quadratic Tracking

LQT adalah sistem kontrol linier yang outputnya mengikuti jalur yang telah ditentukan melalui input. Akan dijelaskan bagaimana LQT dapat diterapkan untuk mengatur keluaran sistem mendekati keluaran yang diinginkan dengan energi penggerak yang minimal. Persamaan 1 di bawa ini adalah observable sistem yang linear :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

$$y = Cx \quad (13)$$

dengan vector kesalahan seperti pada persamaan 2

$$e = z - y \quad (14)$$

di mana e(t) adalah kesalahan yang didapat dari selisih antara masukan yang diinginkan z(t) dan keluaran sistem y(t). dan indeks performansi seperti pada Persamaan 3 berikut.

$$J = \int_0^{\infty} e^T F e dt + \int_0^{\infty} u^T R u dt \quad (15)$$

Dengan fungsi matriks $P(t)$ harus memenuhi persamaan :

$$P_t = -P_t A_t - A_t' P_t + P_t B_t R^{-1} B_t' P_t + C_t' Q_t C_t \quad (16)$$

Untuk matrix Q dan R , diasumsikan sesuai dengan performa yang diinginkan untuk sistem. Setelah mendapatkan persamaan Riccati, dapatkan persamaan diferensial vektor non-homogen dengan Persamaan 6

$$g_t = -A_t B_t R^{-1} B_t' g_t - C_t' Q_t z(t) \quad (17)$$

Dengan didapatkannya $P(t)$ dan $g(t)$, hanya tersisa gain $K(t)$ untuk dicari. $K(t)$ didapatkan dengan Persamaan 7.

$$K_t = R^{-1} B_t' P(t) \quad (18)$$

Semua parameter yang dibutuhkan untuk metode LQT telah didapatkan. Sekarang saatnya untuk mencari kontrol optimal $u^*(t)$ dengan Persamaan 8.

$$u^*_t = -K_t x^*_t + R^{-1} B_t' g(t) \quad (19)$$

Dengan $x^*(t)$ adalah umpan balik dari sistem. Umpan balik nantinya akan dikalikan dengan gain kontrol $K(t)$ dan ditambahkan dengan $R^{-1}(t)B'(t)g(t)$ untuk menghasilkan $u^*(t)$ yang akan digunakan sebagai masukan kepada sistem agar hasil yang diinginkan tercapai.

H. Metode

Metode yang digunakan pada pembuatan paper ini meliputi, antara lain : melakukan studi pustaka, mencari referensi dari beberapa sumber seperti jurnal, paper, serta literatur lain yang berkaitan dengan paper ini. Melakukan simulasi pada *software* MATLAB juga merupakan metode yang digunakan pada pembuatan paper ini. Hasil yang diperoleh dari simulasi akan diolah, dianalisis, dan dibandingkan sesuai dengan perhitungan yang telah ditetapkan.

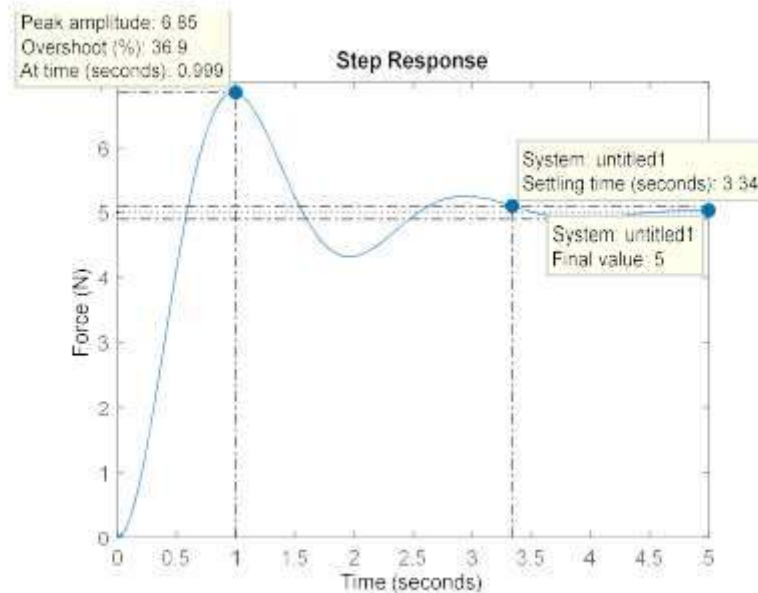
I. HASIL DAN Pembahasan

Dengan bantuan *Software* MATLAB maka permodelan bisa dilakukan dengan membuat blok-blok pada *Software* MATLAB. Dengan memasukkan nilai parameter motor yang akan di uji sesuai dengan nilai yang ada pada *datasheet*. Kemudian melihat hasil grafik pada melalui *scope*.

J. Hasil Simulasi Tanpa Sistem Pengendali

Gambar 6 menunjukkan grafik pengujian sistem tanpa pengendali dilakukan dengan memberi masukan sistem berupa sinyal step sebesar 5 Newton (N), sehingga menghasilkan respon waktu pengereman seperti pada Gambar 6. Hasil simulasi menunjukkan nilai gaya

pengereman sebesar 6.85 N yang melebihi nilai input 5 N artinya mengalami overshoot dan menghasilkan transien respon sistem dengan nilai settling time 3.34 detik, rise time 0.394 detik dan overshoot sebesar 1.85 N atau 36.9 %. Nilai settling time dan rise time sudah cukup baik, namun perlu dilakukan perbaikan untuk nilai overshoot agar sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Berikut adalah gambar 6 :

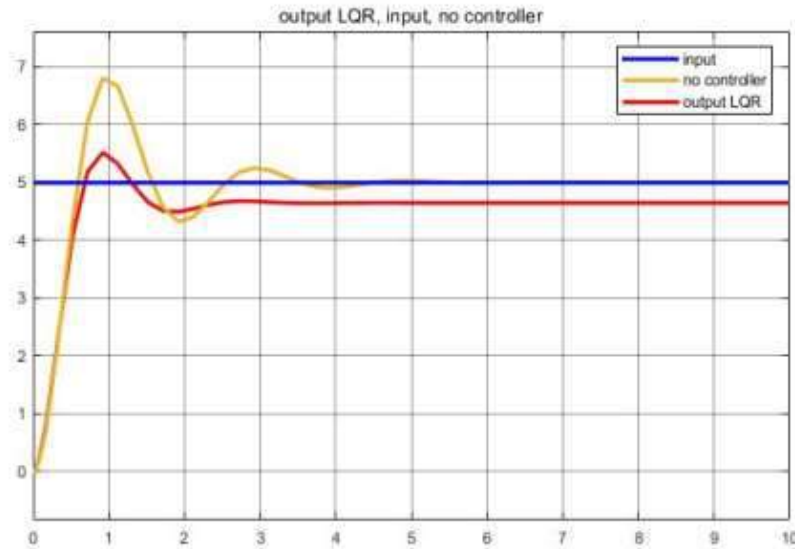


Gambar 11.2

K. Hasil Simulasi Pengendali LQR

Pada pengujian sistem dengan pengendali LQR diawali dengan menentukan Matriks diagonal Q untuk mengatur performance sistem dan matriks diagonal R untuk mengatur input sistem yang nantinya digunakan untuk mendapatkan gain full state feedback matriks K berdasarkan persamaan diatas. Dengan bantuan Matlab perhitungan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan perintah "lqr()". Namun sebelum dilakukan perancangan kendali LQR dilakukan pengecekan terhadap controllability dari sistem. Dari pengecekan tersebut, kemudian dihasilkan nilai rank untuk Matriks controllability adalah 2. Nilai tersebut menunjukkan bahwa semua variable state pada sistem Eddy current brakes bersifat fully controllable atau dapat dikendalikan secara menyeluruh karena nilai rank dari matriks sama dengan orde sistem. Perhitungan gain K dari penyelesaian dengan nilai matriks Q dan R pada pengujian pertama. Dari pengujian pertama menghasilkan nilai penguatan gain $K = [0.8025 \ 0.3181]$. Setelah dilakukan perhitungan dengan penambahan gain reference input, didapatkan nilai penguatan sebesar 1.2251. Setelah didapatkan nilai gain reference input untuk mencapai zero steady state response, maka dilakukan pengujian respon sistem Eddy

current brakes dengan kendali LQR menggunakan Matlab. Pengujian respon Eddy current brakes menggunakan Simulink dengan model dalam bentuk state space seperti pada Gambar 5 menghasilkan respon waktu pengereman seperti pada gambar dibawah ini :

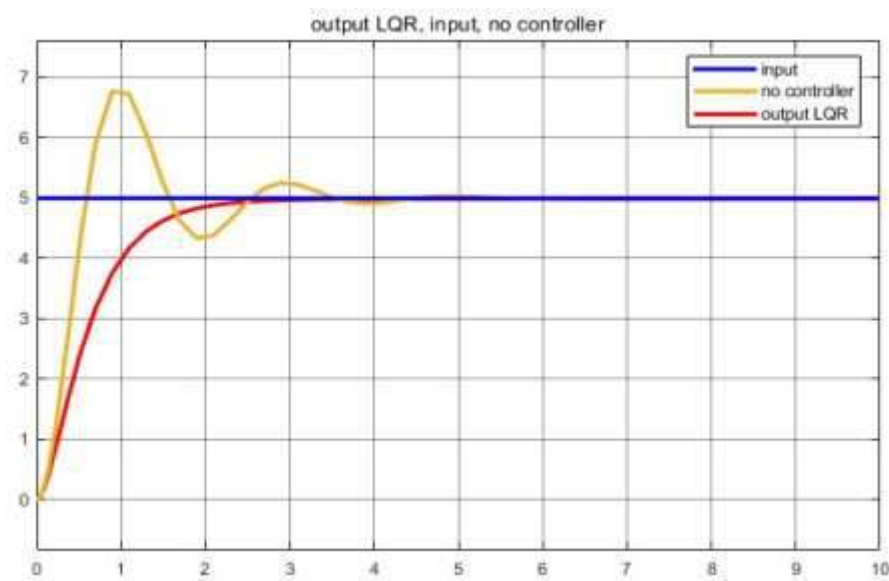


Gambar 11.3

Berdasarkan hasil feedback pada Gambar 8, penggunaan nilai Matriks Q dan R pada pengujian pertama menghasilkan respon sistem yang stabil sebesar 4,61 N dan overshoot sebesar 0,5% dengan nilai input sebesar 5 N. Hal ini menunjukkan bahwa matriks Q dan R pada pengujian pertama tidak memenuhi kriteria overshoot sistem 0%. Nilai waktu stabilisasi (T_s) sebesar 2,19 detik sudah baik karena masih dibawah batas kriteria 5 detik dan masih sesuai dengan kondisi dunia nyata. Sejak percobaan pertama perlu dilakukan perbaikan nilai pada matriks Q dan R agar dapat meningkatkan respon menjadi 5 N dan meningkatkan nilai persen persilangan menjadi 0%. Pada percobaan kedua nilai Matriks Q dan R diubah seperti pada persamaan (11), maka diperoleh nilai gain $K = [2,7815 \ 0,0117]$. Selanjutnya nilai gain Nbar yang dicapai adalah 1.0083

Setelah dilakukan modifikasi maka diperoleh grafik respon seperti pada Gambar 8. Dari umpan balik tersebut terlihat bahwa setelah memperbaiki matriks Q dan R dan gain input referensi N^{ref} adalah offset, dapat dilihat bahwa Sebagai hasil dari umpan balik sistem, stabilitas dapat dicapai dengan gaya pengereman 5 N tanpa melebihi. Nilai waktu proses (T_s) mencapai 2,12 detik yang memenuhi kriteria, dan nilai waktu naik (T_r) mencapai 1,18 detik yang juga memenuhi kriteria yang telah ditetapkan. Menambahkan N^{ref} dapat meningkatkan gain keluaran sistem, sehingga sesuai dengan nilai referensi dan mencapai kondisi kesalahan keadaan tunak nol. Dari hasil pengujian kedua dengan menggunakan

kontroler LQR yang dikombinasikan dengan gain input referensi, N^{ref} dapat memberikan umpan balik waktu pengereman yang memenuhi kriteria.



Gambar 11.4

L. Hasil Simulasi Pengendali LQT

Tujuan kontrol adalah untuk meminimalkan kesalahan pelacakan $e(k)$ antara keluaran sistem yang diinginkan $r(k)$ dan sistem aktual $y(k)$, dengan asumsi bahwa pasangan (A, B) dapat distabilkan dan aktual $y(k)$, dengan asumsi bahwa pasangan (A, B) dapat distabilkan dan pasangan (A, B) pasangan (A, \sqrt{QC}) dapat dideteksi. Kesalahan pelacakan didefinisikan dalam persamaan di bawah ini :

$$e_k = y_k - r_k = Cx_k - r(k) \quad (20)$$

Fungsi kebutuhan dari LQT horizon tak terbatas ditunjukkan dalam persamaan di bawah ini :

$$J = \int_0^{\infty} [e^T T e + u^T R u] \quad (21)$$

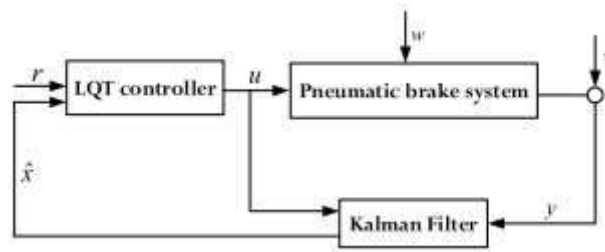
Dimana $Q = Q$

$T \geq 0$ dan $R = R$

$T > 0$

Suku pertama adalah untuk kontrol umpan balik yang bergantung secara linear pada vektor keadaan sistem, dan suku kedua kedua adalah untuk lintasan referensi yang bergantung pada referensi $r(k)$. Karena $x(k)$ tidak dapat diukur, maka perlu diestimasi dengan menggunakan filter Kalman, dan perlu diestimasi dengan menggunakan filter Kalman, asalkan sistem dapat dideteksi. Estimasi keadaan Kalman digunakan untuk

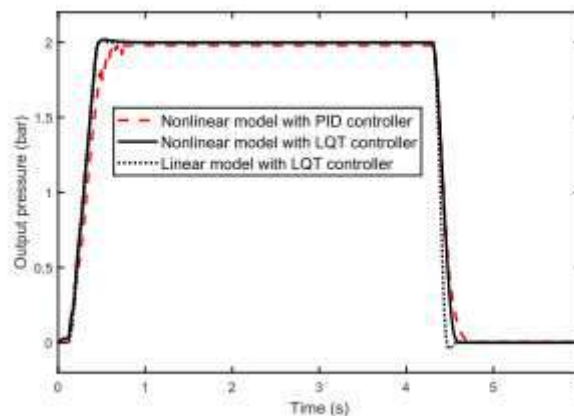
memberikan estimasi vektor keadaan $\hat{x}(k)$ yang optimal berdasarkan algoritma estimasi kuadratik linier dengan Gauss putih. kuadratik linier dengan white Gaussian noises, di mana gangguan proses gangguan proses dilambangkan dengan $w(k)$ dan gangguan pengukuran $v(k)$. Prinsip kerja LQT seperti pada gambar di bawah ini :



Gambar 11.5

Dengan menggunakan vector keadaan yang diestimasi, control sistem dapat dirumuskan sebagai :

$$u_k = -R^{-1}B^T P x_k + R^{-1}B^T g(k) \quad (22)$$



Gambar 11.6

M. Kesimpulan DAN SARAN

N. Kesimpulan

Sistem Eddy current brakes dengan menggunakan kendali PID menghasilkan transient response yang sangat cepat meliputi dari nilai settling time (T_s) = 0.27 detik dan rise time (T_r) = 0.18 detik, serta adanya overshoot 0.7 % di luar kriteria sistem. Respon tersebut dapat dikatakan kurang optimal dalam implementasi pada sistem Eddy current brakes, dikarenakan membutuhkan effort yang sangat tinggi dalam mengendalikan respons gaya pengereman dengan waktu yang sangat cepat sehingga berakibat pada borosnya konsumsi energi untuk menstabilkan gaya pengereman dan jika diimplentasikan ke sisi hardware akan tidak optimal karena respon waktu pengereman yang terlalu cepat. Adapun kelemahan pada pengendalian

sistem menggunakan kendali PID menggunakan parameter K_p , K_i dan K_d yaitu belum mampunya mengendalikan setiap dinamika variable state yang diinginkan pada sistem Eddy current brakes. Berbeda dengan kendali full state feedback LQR yang dapat dikatakan tepat dan optimal untuk diimplementasikan pada sistem Eddy current brakes yang mampu menghasilkan respon waktu yang sesuai dengan kriteria settling time (T_s) = 2.12 detik dan rise time (T_r) = 0.18 detik tanpa adanya overshoot sehingga waktu pengereman diberikan jeda 2 detik yang dapat menjadikan konsumsi energi controller untuk mengendalikan Eddy current brakes lebih efisien. Hal tersebut, dikarenakan kendali LQR mampu mengatur performance sistem dan mengatur efisiensi kinerja aktuator terhadap input sistem, dan kendali full state feedback memiliki metode untuk menghilangkan steady state error melalui tambahan gain reference input yang dapat menghasilkan respon sistem lebih optimal dengan transient response yang sesuai dengan kriteria respon waktu pengereman.

Dengan demikian, kontrol modern tipe LQR dapat menjadi alternatif untuk dipertimbangkan dalam pengembangan metode kontrol PID klasik yang masih umum digunakan pada sistem pengereman arus eddy untuk mencapai efisiensi pengereman yang lebih optimal dan hemat energi dalam pengendalian gaya pengereman yang lebih baik. . Dan dengan pengontrol linier-kuadrat (LQT), pengontrol LQT yang diusulkan meningkatkan kinerja pemantauan dan respons sistem terhadap fluktuasi kecil di bawah perbedaan tingkat daya dan tekanan referensi. Untuk memperluas jangkauan aplikasi dan meningkatkan kegunaan pengontrol untuk sistem, pengontrol LQT yang diinterpolasi pada tingkat tekanan referensi yang berbeda berdasarkan pengontrol LQT individu telah dirancang, dan divalidasi secara eksperimental di meja uji. Hasil validasi sangat sesuai dengan simulasi. Pengontrol LQT Interpolasi Pengontrol LQT interpolasi dapat memantau input yang diinginkan dengan kesalahan penelusuran minimal.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT, Ruddianto, Ahmad, MM, Pambudi, DSA, Utomo, AP and "The Auxiliary Engine Lubricating Oil Pressure Monitoring System Based on Modbus Communication." Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Biomedical ..., 2022
- [2] Nugraha, AT, Ashlah, MB, Sobhita, RA and Anjhani, DAJ. "Optimization Control in MG-16 DC Motor Using LQR and LQT Configurations." SAINSTECH NUSANTARA 2.3, 2025, pp. 57-66.
- [3] Nugraha, AT, Rochmawati, NW and Sheila, SY. "Buku Topologi Bidirectional Buck-Boost Converter Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.", 2024
- [4] Intyanto, GW, Trihatmojo, AA, Yuniarti, DAF and Nugraha, AT. "ELDOC-Design of Electric Dolly Camera for Video Recording Using the Omni-Direction Wheel." Walisongo Journal of Information Technology 5.1, 2023, pp. 41-52.

- [5] Dermawan, D, Yuniza, SI, Septiandi, IN and Nugraha, AT. "Penyearah Setengah Gelombang 3 Fasa Tak Terkendali dari Generator AC 3 Fasa." Seminar MASTER PPNS 8.1, 2023, pp. 244-251.
- [6] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Fatqurrochman, MI. "ZETA Converter as a Voltage Stabilizer with Fuzzy Logic Controller Method in The Pico Hydro Power Plant." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2022
- [7] Febrianti, C and Nugraha, AT. "Implementasi Sensor Flowmeter pada Auxiliary Engine Kapal Berbasis Outseal PLC." Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE) 3.2, 2022
- [8] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Design of hybrid portable underwater turbine hydro and solar energy power plants: Innovation to use underwater and solar current as alternative electricity in Dusun Dongol Sidoarjo." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [9] Faj'riyah, AN, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Prototipe Proteksi Motor Terhadap Overheat Serta Monitoring Arus dan Tegangan Berbasis Arduino Uno." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.1, 2021, pp. 20-25.
- [10] Nugraha, AT, Tiwana, MZA and Ravi, AM. "Analisis Optimalisasi Manajemen Daya Chiller Untuk Rencana AC Sentral Industri." Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi 1.1, 2021, pp. 35-46.
- [11] Apriani, M, Nugraha, AT, Cahyono, L, Utomo, AP, Fatoni, A, Alwi, MH and "Eco Friendly Artificial Coral Reefs Melalui Recovery Limbah Cangkang Kerang Di Pantai Mutiara Desa Wisata." ID Patent EC00,202,300,116, 2023
- [12] Ramadhani, DA, Hidayat, EP and Nugraha, AT. "Pemanfaatan Sensor Ultrasonik sebagai Purwarupa Pengukur Ketinggian Air pada Tangki Pembuangan Air Kotor di Kapal." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 12.2, 2022, pp. 109-116.
- [13] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "RANGKAIAN PENYEARAH TERKONTROL 1 PHASA SETENGAH GELOMBANG MOTOR AC 1 PHASA." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2023, pp. 31-34.
- [14] Zakariz, NP, Poetro, JE and Nugraha, AT. "Pengaruh Variasi Inlet Notch Terhadap Kecepatan Dan Daya Yang Dapat Terbangkitkan Dari Generator Pada Pembangkit Listrik Tenaga Pihohidro." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [15] Nugraha, AT, Widodo, HA, Pambudi, DSA, Cahyono, L, Apriani, M and "“PORTABLE-2WG” Inovasi Turbin Pembangkit Listrik Portable Air Dan Angin Untuk Kebutuhan Rumah Tangga Pada Penduduk Daerah Aliran Sungai." ID Patent EC00,202,223,113, 2022
- [16] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Efficiency of the Position Tracking Photovoltaics using Microcontroller Atmega." JEEMECs (Journal Electr. Eng. Mechatron. Comput. Sci., vol. 5, no. 2, pp., 2022, pp. 77-90.
- [17] Nugraha, A Trisna. "Setting neuro-fuzzy pid control in plant nonlinear active suspension." Journal of Physics Conference Series 1114.1, 2018, p. 12063.
- [18] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1, 2025, pp. 10-19.
- [19] NUGRAHA, AT, ALFARISI, N, AZIS, A, HARDIANSYAH, MM, HARIS, GR and "Trainer Kit." ID Patent EC00,202,311,988, 2023
- [20] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Hazim, A, Rochmawati, NW, Sena, AI and "ANALISIS PENGENDALI KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC MENGGUNAKAN BUCK CONVERTER." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 15-22.

GLOSARIUM

Arus Searah (DC) : Arus listrik yang mengalir dalam satu arah dengan polaritas tetap.

Arus Bolak-balik (AC) : Arus listrik yang arah dan besarnya berubah secara periodik terhadap waktu.

Penyearah (Rectifier) : Rangkaian yang mengubah tegangan/arus bolak-balik (AC) menjadi searah (DC).

LQR (Linear Quadratic Regulator) : Metode kendali optimal yang meminimalkan fungsi biaya kuadratik untuk mengatur keadaan sistem.

LQT (Linear Quadratic Tracking) : Pengembangan LQR yang bertujuan mengikuti (tracking) sinyal referensi tertentu.

PID (Proportional Integral Derivative) : Pengendali umpan balik yang menggabungkan aksi proporsional, integral, dan turunan.

PWM (Pulse Width Modulation) : Teknik pengaturan daya dengan memodulasi lebar pulsa sinyal.

THD (Total Harmonic Distortion) : Ukuran tingkat distorsi harmonik pada suatu gelombang listrik.

SCR (Silicon Controlled Rectifier) : Komponen semikonduktor daya yang berfungsi sebagai sakelar terkendali.

TRIAC : Komponen semikonduktor yang dapat menghantarkan arus pada kedua arah gelombang AC.

Overshoot : Lonjakan respons sistem yang melampaui nilai akhir (steady state) sebelum stabil.

Settling Time : Waktu yang dibutuhkan respons sistem untuk menetap dalam rentang toleransi tertentu.

Steady State : Kondisi tunak ketika keluaran sistem tidak lagi berubah secara signifikan terhadap waktu.

Plant : Objek atau sistem fisik yang dikendalikan dalam suatu sistem kontrol.

Duty Cycle : Rasio durasi sinyal aktif terhadap satu periode penuh, biasa dinyatakan dalam persen.

INDEKS

A

Arus Bolak-balik
Arus Searah

C

Cold Storage

D

Dinamometer

E

Eddy Current

G

Gelombang Penuh

I

Induction Motor
Inverter

K

Komparasi
Kontrol
Kontrol Optimal

L

Linear Quadratic Regulator (LQR)
LQR
LQT

M

Matlab
MIMO
MISO
Motor
Motor AC
Motor DC
Motor Induksi

N

Noise

O

Optimasi
Overshoot

P

Pemodelan

Penyearah
PID
PSIM
PWM

R

Rectifier
Regulator
Regulator Tegangan

S

SCR
Setengah Gelombang
Settling Time
SIMO
Simulink
SISO
Sistem Kendali
Speed
Steady State

T

THD
TRIAC

V

VD-49.15-K1-B00

BIOGRAFI PENULIS

Anggara Trisna Nugraha — *Pengarah*

Anggara Trisna Nugraha merupakan pengarah penyusunan buku bunga rampai ini. Beliau aktif membimbing kegiatan ilmiah mahasiswa di bidang elektronika daya, sistem kendali, dan kelistrikan kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, serta menaruh perhatian besar pada penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID.

Muhammad Rizki Mubarrok — *Penulis BAB I*

Penulis adalah kontributor pada BAB I buku ini dengan judul “Perbandingan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Respons Keluaran Motor DC Maxon Ec-i”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Mujtaba Fa’akuli Zazila — *Penulis BAB II*

Penulis adalah kontributor pada BAB II buku ini dengan judul “Kajian Pemodelan Motor DC 42D29Y401 pada Optimalisasi Sistem dengan Pendekatan LQR dan LQT”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Novalliansyah Ramadhan — *Penulis BAB III*

Penulis adalah kontributor pada BAB III buku ini dengan judul “Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) Motor DC MY1016Z2”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Novaly Arya Pratama — *Penulis BAB IV*

Penulis adalah kontributor pada BAB IV buku ini dengan judul “Perbandingan Kontrol Optimalisasi pada Motor DC MG-16 pada Sirkuit LQR dan LQT”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Nur Hasyim As’ari — *Penulis BAB V*

Penulis adalah kontributor pada BAB V buku ini dengan judul “Respons Keluaran Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 417-9661”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Dan Linear Quadratic Tracking (LQT) — *Penulis BAB VI*

Penulis adalah kontributor pada BAB VI buku ini dengan judul “Rangkaian Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) pada Motor DC”. Tulisan tersebut

dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Nurahmad Hadi Cahyadi1 — *Penulis BAB VII*

Penulis adalah kontributor pada BAB VII buku ini dengan judul “Implementasi Pendekatan LQR dan LQT pada Kajian Pemodelan Optimalisasi Sistem pada Plant Motor DC IG-22GM”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Penulis — *Penulis BAB VIII*

Penulis adalah kontributor pada BAB VIII buku ini dengan judul “Single-Phase Uncontrolled Full-Wave Rectifier in a Three-Phase AC Motor”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Perdinan Setia Budi1 — *Penulis BAB IX*

Penulis adalah kontributor pada BAB IX buku ini dengan judul “Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) Motor DC VD-49.15-K1-B00”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Penulis — *Penulis BAB X*

Penulis adalah kontributor pada BAB X buku ini dengan judul “Perbandingan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Respons Keluaran Motor DC Maxon Ec-i”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Rafli Darrylivan Putra Hadisyah — *Penulis BAB XI*

Penulis adalah kontributor pada BAB XI buku ini dengan judul “Pemodelan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) pada Motor DC”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

BUNGA RAMPAI

TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM KENDALI

TENTANG BUKU INI

Bunga rampai ini menghimpun karya tulis ilmiah mahasiswa dalam bidang elektronika daya dan sistem kendali yang dikembangkan melalui kegiatan ilmiah INERGYC. Edisi I Jilid B tahun 2022 memuat 11 bab yang membahas perancangan dan analisis pengatur tegangan AC, rangkaian penyearah (rectifier), serta penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID pada pengendalian motor listrik.

Setiap bab disusun oleh penulis yang berbeda dengan pendekatan dan studi kasus masing-masing, sehingga buku ini menjadi sumber rujukan yang kaya bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi di bidang teknik kelistrikan.

Topik Utama

- Pengaturan tegangan AC satu fasa dan tiga fasa
- Rangkaian penyearah (rectifier) terkontrol
- Kendali motor DC dengan metode LQR dan LQT
- Pengendali PID dan perbandingan antarmetode
- Simulasi menggunakan PSIM dan MATLAB/Simulink

Edisi I • Jilid B • Tahun 2022

Diterbitkan oleh :

DEPARTMENT OF MARINE ELECTRICAL ENGINEERING
SHIPBUILDING INSTITUTE OF POLYTECHNIC SURABAYA