

SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR INDUKSI 1 FASA DENGAN METODE *LINEAR QUADRATIC REGULATOR* BERBASIS MIKROKONTROLER

SPEED CONTROL SYSTEM OF ONE PHASE INDUCTION MOTOR USING LINEAR QUADRATIC REGULATOR BASED ON MICROCONTROLLER

Tondi Mandala Fajarullah Lubis¹, Ir.Porman Pangaribuan, M.T.², Agung Surya Wibowo, S.T., M.T.³

Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Jl. Telekomunikasi, Dayeuh Kolot Bandung 40257 Indonesia

[1tondidafa@telkomuniversity.ac.id](mailto:tondidafa@telkomuniversity.ac.id), [2por@telkomuniversity.ac.id](mailto:por@telkomuniversity.ac.id), [3auw@telkomuniversity.ac.id](mailto:auw@telkomuniversity.ac.id)

Abstrak

Sistem kendali sangat memegang peranan penting saat ini. Hampir di setiap tempat ditemukan alat yang menggunakan sistem kendali, salah satunya adalah pada motor ac. Motor ac merupakan salah satu jenis motor listrik yang kecepatannya terbilang sukar untuk diatur atau dikendalikan. Oleh karena itu di perlukan sistem kendali optimal yang mempunyai indeks performansi. Salah satu bentuk dari sistem kendali optimal dengan indeks performansi adalah *Linear Quadratic Regulator*.

Pada tugas akhir ini, di lakukan perancangan sistem kendali motor induksi 1 fasa dengan *Linear Quadratic Regulator* berbasis mikrokontroler. Perancangan sistem ini dibagi menjadi 2 bagian, yaitu bagian perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras meliputi mikrokontroller Arduino Uno, motor ac induksi 1 fasa, driver motor ac induksi 1 fasa, rotary encoder. Sedangkan untuk perancangan perangkat lunak menggunakan bahasa pemrograman arduino dan MATLAB.

Hasil yang ingin dicapai dari perancangan sistem ini adalah kestabilan dan ketelitian kecepatan motor induksi 1 fasa dengan pemberian masukan yang berubah-ubah. Parameter kestabilan dan ketelitian sistem yang di ukur terletak pada karakteristik sistem yaitu berupa *rise time*, *settling time*, *error state*, dan *over shoot*.

Kata Kunci : Motor Induksi, *Linear Quadratic Regulator*, Mikrokontroler

Abstract

Control system plays an important role today. Almost every place was found a tool that uses the control system, one of which is on ac motor. Ac motor is one kind of electric motor which speed is fairly difficult to be regulated or controlled. It is therefore in need of optimal control system which has a performance index. One form of optimal control systems with the performance index is a *Linear Quadratic Regulator*.

In this thesis, in doing the design of the control system 1 phase induction motor with a microcontroller-based *Linear Quadratic Regulator*. The design of the system is divided into two parts, namely the hardware and software. The hardware includes a microcontroller Arduino Uno, the first induction phase ac motors, ac induction motor driver first phase, rotary encoder. As for the software design using a programming language and MATLAB Arduino.

Results to be achieved from the design of this system is the stability and accuracy of 1 phase induction motor speed with the feedback changing. Parameter stability and accuracy in measuring systems lies in the characteristics of the system in the form of *rise time*, *settling time*, *error state*, and *over shoot*.

Keywords: Induction Motors, *Linear Quadratic Regulator*, Microcontroller

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Sistem kendali telah memegang peranan yang sangat penting dalam kehidupan sehari-hari. Semakin berkembangnya sistem kendali memungkinkan untuk dapat meningkatkan kinerja sistem, kualitas produksi dan menekan biaya produksi. Keberadaan suatu sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem karena dari suatu sistem yang dapat kita ubah berdasarkan dengan kebutuhan adalah bagian kontrol. Masalah umum dalam sistem kontrol adalah pencapaian spesifikasi performansi yang berkaitan dengan kestabilan dan kecepatan respon sehingga akan menghasilkan sistem kontrol yang optimal. Hal lain yang juga perlu diperhatikan adalah bagaimana spesifikasi performansi tersebut dapat dicapai.

Berkaitan dengan kestabilan sistem kontrol, salah satu sistem yang tergolong sukar di kontrol kestabilannya adalah motor induksi. Motor induksi sukar di atur kestabilannya, dalam hal ini berupa kecepatan, karena sifatnya yang tidak linear atau non-linear. Untuk mengatur kestabilan motor induksi ini dapat digunakan sistem kontrol optimal. Sistem Kontrol Optimal adalah konsep optimasi sistem kontrol yang memperhitungkan pemilihan indeks atau kriteria performansi serta desain yang akan menghasilkan sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik. Indeks performansi didefinisikan sebagai suatu fungsi yang harganya menunjukkan seberapa baik performansi sistem yang sebenarnya mendekati performansi yang diinginkan. Secara garis besar teori kontrol optimal adalah suatu teori kontrol yang pencarian solusinya didasarkan pada usaha untuk meminimumkan atau memaksimalkan suatu fungsi indeks kinerja. Fungsi ini terdiri dari beberapa buah variable sistem yang diminimasi harganya dengan memberikan matrik bobot yang menyatakan besarnya pembobotan untuk masing-masing variabel sistem tersebut.

Salah satu kontrol optimal yang sudah ada adalah *Linear Quadratic Regulator*. *Linear Quadratic Regulator* adalah metode kontrol yang menggunakan bentuk ruang waktu dari *Plant* yang akan dikontrol. Karena menggunakan bentuk ruang waktu dari *Plant* yang dikontrol, maka untuk *Plant* yang berbeda diperlukan bentuk ruang waktu yang berbeda pula. Oleh karena itu bisa dikatakan bahwa *Linear Quadratic Regulator* adalah metode yang spesifik untuk *Plant* tertentu.

Pada Tugas Akhir ini digunakan sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk pengendalian kecepatan motor induksi 1 fasa berbasis mikrokontroler. *Linear Quadratic Regulator* (LQR) merupakan bentuk khusus dari sistem kontrol optimal. Pada proses kontroler menggunakan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) digunakan matriks-matriks yang akan menentukan indeks performansi dari sistem tersebut. Matriks-matriks tersebut di cari menggunakan penurunan model matematis dari motor induksi 1 fasa. Keluaran dari mikrokontroler akan mengatur kecepatan motor induksi 1 fasa. Pada sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) ini umpan balik selain menggunakan keluaran yang di dapat juga menggunakan input yang selanjutnya, sehingga umpan balik merupakan gabungan antara keluaran dan masukan. Sehingga hasil akhir dari Tugas Akhir ini adalah dengan masukan tegangan yang ada bisa didapatkan keluaran kecepatan motor induksi 1 fasa yang sesuai.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dari tugas akhir ini, yaitu:

1. Menggunakan sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) sebagai pengontrol kecepatan motor induksi 1 fasa.
2. Merealisasikan perancangan sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) pada mikrokontroler.
3. Melakukan penelitian dan pengujian secara langsung terhadap Sistem Kendali Kecepatan Motor Induksi 1 Fasa dengan Metode *Linear Quadratic Regulator* Berbasis Mikrokontroler.

1.3 Rumusan Masalah

Permasalahan yang melatarbelakangi pembuatan Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Merancang blok diagram sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) pada kendali kecepatan motor induksi 1 fasa.
2. Menentukan matriks-matriks yang digunakan pada sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk kendali kecepatan motor induksi 1 fasa.
3. Merealisasikan sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) pada mikrokontroler.
4. Menganalisa hasil rancangan sistem kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) berbasis mikrokontroler pada kendali kecepatan motor induksi 1 fasa.

1.4 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Teknik kontrol yang digunakan adalah teknik kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR).
2. Perancangan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan matriks pembobot kendali R konstan yaitu 1.
3. Persamaan Riccati digunakan sebagai metode untuk meminimalkan indeks performansi kuadrat.
4. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Uno.
5. Pembahasan kestabilan sistem bertitik berat pada rise time, settling time, dan max overshoot.
6. Tegangan masukan yang diberikan berkisar antara 0 – 12 volt.

1.5 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penyelesaian Tugas Akhir, yaitu:

1. Studi literatur
Merupakan kegiatan pembelajaran materi melalui sumber pustaka yang berkaitan dengan penelitian, baik berupa buku, artikel maupun jurnal ilmiah.
2. Perancangan dan implementasi alat
Membuat perancangan alat berdasarkan parameter- parameter yang diinginkan dan merealisasikannya.
3. Analisis masalah
Menganalisis semua permasalahan yang ada berdasarkan sumber- sumber dan pengamatan terhadap permasalahan yang ada.
4. Simulasi alat
Melakukan simulasi alat untuk melihat performansi dari alat yang telah dirancang.
5. Mengambil kesimpulan.
Dapat mengambil kesimpulan dari semua kinerja alat yang telah direalisasikan.

2. Dasar Teori

2.1 Motor Listrik

Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk memutar *impeller* pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, dll.

2.1.1 Motor Induksi

Motor Induksi merupakan motor AC yang bekerja berdasarkan induksi elektromagnetis dari kumparan stator ke kumparan rotornya. Motor induksi terdiri dari dua bagian yaitu rotor adalah bagian yang bergerak dan stator adalah bagian yang diam. Arus rotor pada motor induksi berasal dari arus yang terinduksi, akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator.

2.1.2 Motor induksi satu fasa.

Motor ini hanya memiliki satu gulungan *stator*, beroperasi dengan pasokan daya satu fase, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti fan angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.

2.2 Linear Quadratic Regulator

Teori kontrol optimal berkaitan dengan operasi sistem dinamis dengan biaya minimal. Kasus di mana dinamika sistem yang dijelaskan oleh satu set persamaan diferensial linear dan biaya dijelaskan oleh fungsional kuadrat disebut masalah LQ. Salah satu hasil utama dalam teori ini adalah bahwa solusi ini disediakan oleh regulator linear-kuadrat (LQR), controller umpan balik yang diberikan persamaan di bawah ini.

Sebuah sistem dapat dinyatakan dalam bentuk variabel keadaan sebagai

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \text{dengan } x(0) \in \mathbb{R}^n, u(\cdot) \in \mathbb{R}^m \quad (1)$$

Kondisi awal adalah $x(0)$. Asumsi sini bahwa semua keadaan adalah terukur dan berusaha untuk menemukan keadaan-variabel umpan balik (state-variable feedback (SVFB)) kontrol.

$$u = -Kx + v \quad (2)$$

Sudah diasumsikan sebelumnya bahwa kontrol eksternal $v(t)$ sama dengan nol. Persamaan dalam kurung harus identik sama dengan nol. Dapat di lihat pula bahwa proses

$$\begin{aligned} (\dot{x} - Ax) + B(u - v) + C + Dv &= 0 \\ \dot{x} + Ax + B(u - v) + C + Dv - \dot{x} - Ax &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

Ini adalah *matrix quadratic equation*. Meskipun prosedur yang digunakan rumit untuk matriks, misalkan di pilih matriks

$$P = P^T \tag{4}$$

Maka menghasilkan

$$\begin{aligned} \dot{x} + Ax + B(u - v) + C + Dv - \dot{x} - Ax + (P(A + Bv)) - (P(A + Bv)) - P(A + Bv) &= 0 \\ \dot{x} + Ax + B(u - v) + C + Dv - \dot{x} - Ax - P(A + Bv) &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

Persamaan (5) dikenal sebagai *algebraic Riccati equation (ARE)*. Dengan ditemukannya persamaan riccati ini maka dapat dibuat prosedur dalam mencari nilai SFVB K, yaitu:

- Tentukan parameter desain matriks Q dan R
- Selesaikan *algebraic Riccati equation (ARE)* untuk matrik P

Cari nilai SFVB menggunakan $K = P^{-1}B^T P$

2.3 Arduino

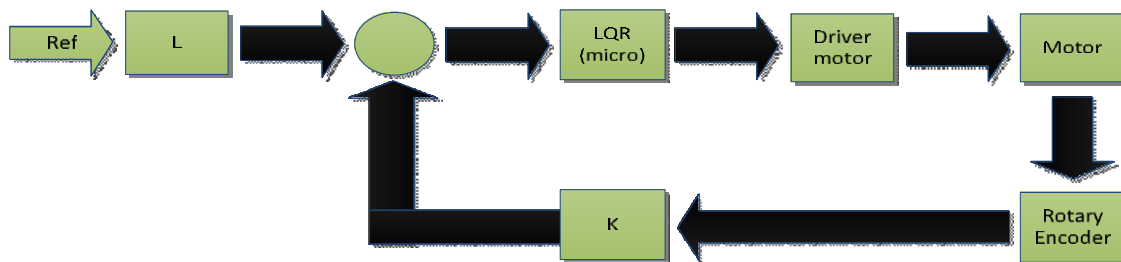
Arduino adalah pengendali mikro single-board yang bersifat open-source, diturunkan dari Wiring platform, dirancang untuk memudahkan penggunaan elektronik dalam berbagai bidang. Hardwarenya memiliki prosesor Atmel AVR dan softwarenya memiliki bahasa pemrograman sendiri.

Arduino juga merupakan platform hardware terbuka yang ditujukan kepada siapa saja yang ingin membuat purwarupa peralatan elektronik interaktif berdasarkan hardware dan software yang fleksibel dan mudah digunakan. Mikrokontroler diprogram menggunakan bahasa pemrograman arduino yang memiliki kemiripan syntax dengan bahasa pemrograman C. Karena sifatnya yang terbuka maka siapa saja dapat mengunduh skema hardware arduino dan membangunnya.

Arduino menggunakan keluarga mikrokontroler ATmega yang dirilis oleh Atmel sebagai basis, namun ada individu/perusahaan yang membuat clone arduino dengan menggunakan mikrokontroler lain dan tetap kompatibel dengan arduino pada level hardware. Untuk fleksibilitas, program dimasukkan melalui bootloader meskipun ada opsi untuk membypass bootloader dan menggunakan downloader untuk memprogram mikrokontroler secara langsung melalui port ISP.

3. Perancangan Sistem

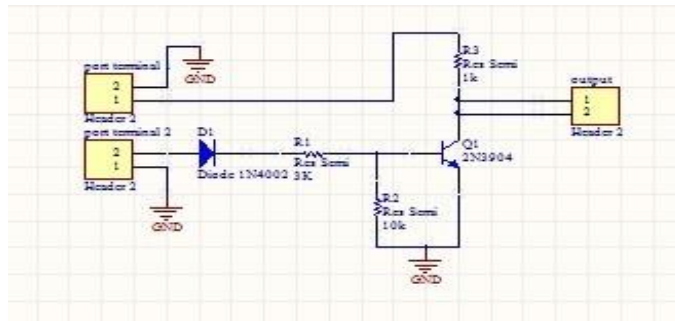
3.1 Blok Diagram Sistem



Gambar 3.1 Block Diagram Sistem

Pada blok diagram diatas, Ref berupa tegangan input awal dari sistem yang akan di gabung dengan matrik L. selanjutnya akan masuk ke pembanding yang menjadi pertemuan antara input sistem dengan umpan balik sistem yang berasal dari output sistem. Pada pembanding akan dilihat perbedaan antara input sistem dengan output sistem yang terbaca, perbedaan ini yang akan menjadi error sistem. Error sistem ini selanjutnya di proses di mikro dengan metode *Linear Quadratic Regulator* untuk menentukan parameter untuk mengatur kestabilan kecepatan motor. Parameter-parameter yang ditentukan pada LQR sesuai dengan plant motor induksi 1 fasa. Parameter yang telah didapat dari mikro selanjutnya di teruskan ke driver motor. Pada driver motor di atur kecepatan motor sesuai dengan masukan dari mikrokontroler, berupa tegangan yang disesuaikan dengan error yang terbaca. Kecepatan motor akan di baca oleh rotary encoder yang mengubah kecepatan motor menjadi pulsa-pulsa untuk kembali di baca oleh mikrokontroler. Sebelum masuk kembali ke mikrokontroler, umpan balik hasil dari rotary encoder akan di kalikan dengan matriks K dan masuk ke pembanding untuk mengetahui error sistem kembali.

3.2 Rangkaian Zero Crossing Detector

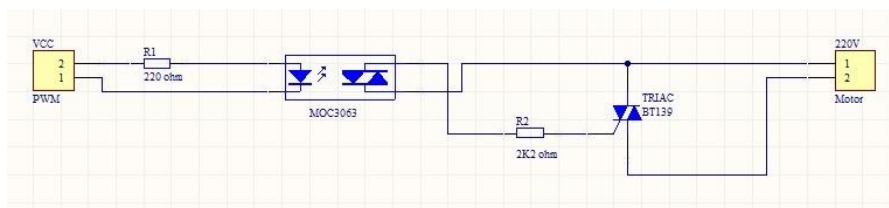


Gambar 3.2 Rangkaian ZCD

Rangkaian ZCD diatas memiliki prinsip rangkaian pembanding. Jika sinyal masukan tegangan AC bersiklus positif pada kaki positif op-amp maka tegangan VCC yang akan keluar dari kaki output op-amp. Jika masukan tegangan AC bersiklus negative pada kaki positif op-amp maka ground atau 0 volt akan keluar dari kaki output op-amp

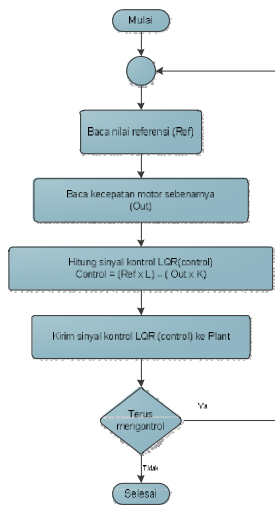
3.3 Rangkaian Triac dan IC MOC

Rangkaian pengatur tegangan berfungsi sebagai driver tegangan dan arus AC yang melewati motor induksi 1 fasa. Input rangkaian ini berasal dari keluaran Mikrokontroler yang telah di proses dengan metode *LQR*. Input yang berasal dari Mikrokontroler merupakan pulsa PWM yang di mana akan mentrigger putaran motor AC. Pengatur tegangan ini memakai IC MOC 3063 dan driver TRIAC.



Gambar 3.3 Rangkaian Triac dan IC MOC

3.4 Diagram Alir Sistem



Gambar 3.4 Diagram alir sistem

4. Pengujian dan Analisis

4.1 Pengujian Arduino

Pengujian Arduino dilakukan dengan cara memberi arduino program untuk membaca potensiometer dan hasilnya di tampilkan melalui serial.

Hasil pembacaan potensiometer oleh Arduino sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil Pembacaan Potensiometer oleh Arduino

PotensioMeter	Hasil baca oleh Arduino
0	0
300	300
600	600
900	900
1023	1023

Dari hasil pengujian yang dilakukan dapat dilihat bahwa Arduino bekerja dengan benar. Hasil pembacaan potensiometer sesuai dengan nilai sebenarnya. Di tugas akhir ini Potensiometer digunakan sebagai masukan yang menjadi acuan nantinya dalam mengatur kecepatan motor AC induksi 1 fasa. Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa potensiometer ketika telah dibaca oleh Arduino dan diubah menjadi bentuk digital memberikan max angka 1023, dalam hal ini nantinya akan di bagi 4 menjadi 255 sebagai acuan PWM untuk mengatur kecepatan motor AC induksi 1 fasa.

4.2 Pengujian sensor rotary encoder

Pengujian sensor rotary encoder dilakukan dengan cara memberikan PWM ke motor AC induksi 1 fasa dan hasil kecepatannya akan dibaca oleh sensor yang akan di kirim kembali ke Arduino dan ditampilkan melalui LCD. Hasil yang dibaca oleh sensor dicacah setiap detiknya didalam arduino yang akan dikalikan 60 untuk mendapatkan kecepatan motor dalam bentuk RPM. Dari hasil pengujian yang dilakukan didapatkan hasil sebagai berikut:

PWM	RPM
20	150
60	225
80	525
100	1275
170	1350
255	1425

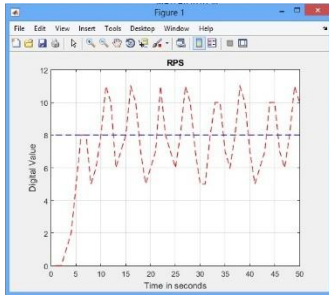
Tabel 4.2 Hasil pembacaan sensor rotary encoder

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa RPM terendah yang terbaca oleh sensor rotary encoder adalah 150 RPM dan tertinggi adalah 1425 RPM. Dapat dilihat juga bahwa dari PWM 60 ketika dirubah ke PWM 80 terjadi lonjakan RPM yang tidak stabil. Sama seperti ketika PWM diubah menjadi 100 PWM terjadi lonjakan RPM yang tidak stabil. Ini bukan dikarenakan kesalahan di sensor rotary encoder tetapi hasil yang diperoleh merupakan hasil program open loop sehingga RPM yang terbaca tidak terkontrol.

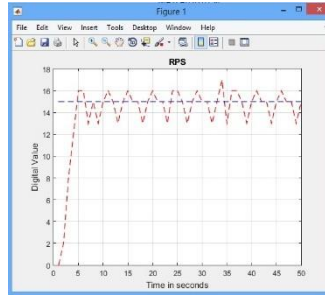
4.3 Pengujian sistem secara keseluruhan

Pengujian dilakukan dengan memberikan masukan dari potensiometer sebagai acuan untuk mengubah nilai delay. Nilai delay akan di olah dengan program yang telah dibuat didalam arduino. Nilai delay yang telah diolah akan di keluarkan ke driver motor yang akan mengatur tegangan yang masuk ke motor AC induksi 1 fasa. Kecepatan motor yang didapat akan dibaca oleh sensor rotary encoder yang akan dikirim kembali ke arduino untuk dicacah dan dibandingkan dengan nilai acuan dari potensiometer. Kecepatan motor akan ditampilkan melalui LCD dan akan di liat

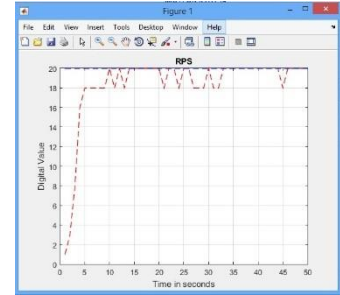
respon grafiknya melalui serial arduino ke MATLAB. Dari grafik respon yang ditampilkan di MATLAB akan dilihat performansi sistem yaitu *rise time*, *settling time*, dan *max overshoot*.



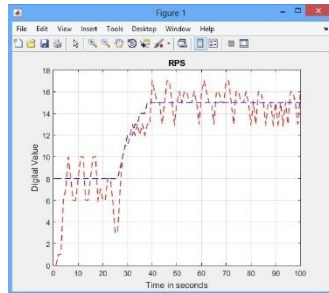
Gambar 4.1 8 RPS



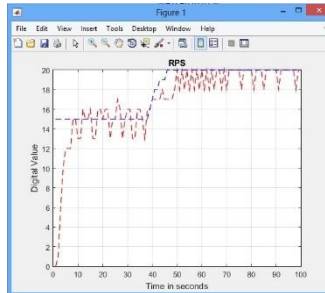
Gambar 4.2 15 RPS



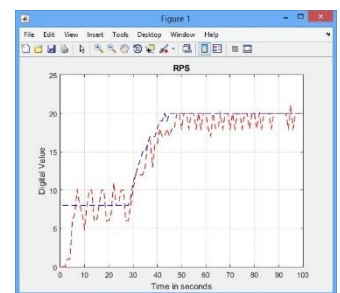
Gambar 4.3 20 RPS



Gambar 4.4 Setpoint 8 - 15 RPS



Gambar 4.5 Setpoint 15 - 20 RPS



Gambar 4.6 Setpoint 8 - 20 RPS

Dari Gambar 4.1 didapat bahwa rise time dicapai pada kisaran 6 s/d 7 detik. Untuk settling time sangat lama hingga lebih dari 50 detik, dan error steady state masih sangat besar dikarenakan masih terjadinya loncatan tegangan keluaran dari driver motor yang mengakibatkan loncatan kecepatan pada motor AC. Untuk max overshoot terjadi pada nilai 11 RPS.

Dari Gambar 4.2 dapat dilihat grafik pengujian sistem pada setpoint 15 RPS. Dari grafik didapat bahwa rise time dicapai dikisaran 4 s/d 5 detik. Settling time dicapai sekitar 16 s/d 17 detik akan tetapi error steady state masih sangat sering terjadi. Untuk Overshoot terjadi pada nilai 17 RPS.

Dari Gambar 4.3 dapat dilihat grafik pengujian sistem pada setpoint 20 RPS. Dari grafik dapat dilihat rise time dicapai sekitar 8 s/d 10 detik. Untuk settling time dicapai sekitar 14 s/d 19 detik dengan error steady state yang sudah sangat berkurang. Untuk Overshoot tidak terjadi karena dapat dilihat di grafik menunjukkan nilai tertinggi yang dicapai sesuai dengan setpoint.

Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa setpoint berubah pada sekitar 25 s/d 26 detik dan mencapai setpoint baru pada 38 detik dan motor mencapai kecepatan yang diinginkan pada 39 detik. Untuk settling time dicapai sangat lama hingga error steady state yang terjadi pun sangat besar seperti pada pengujian setpoint 15 RPS. Untuk Overshoot dicapai pada titik 17 RPS ketika mencapai setpoint baru.

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa setpoint berubah pada sekitar 38 s/d 39 detik dan mencapai setpoint baru pada 42 s/d 43 detik dan motor mencapai kecepatan yang diinginkan pada 50 detik. Untuk settling time dicapai sekitar 71 s/d 75 detik dengan error steady state yang sudah sangat berkurang. Untuk Overshoot tidak terjadi karena nilai tertinggi sesuai dengan setpoint yang diinginkan.

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa setpoint berubah pada sekitar 28 s/d 29 detik dan mencapai setpoint baru pada 42 s/d 43 detik dan motor mencapai kecepatan yang diinginkan pada 48 s/d 49 detik. Untuk settling time dicapai cukup lama hingga sekitar 89 s/d 92 detik. Untuk Overshoot terjadi pada nilai 22 RPS pada sekitar 95 s/d 96 detik.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem kendali kecepatan motor induksi 1 fasa dapat di implementasikan pada mikrokontroler dengan metode *Linear Quadratic Regulator* akan tetapi sangat sulit karena karakteristik dari motor induksi 1 fasa.
2. Perangkat-perangkat yang digunakan pada tugas akhir ini menunjukkan hasil yang sesuai dengan yang diinginkan walau masih ada error kecil dikeluarkan perangkat.
3. Hasil keluaran dari motor drive yang mengatur tegangan untuk motor induksi 1 fasa masih sering terjadi loncatan yang mengakibatkan sering berubah-ubahnya kecepatan motor.
4. Motor AC induksi 1 fasa yang digunakan memiliki karakteristik yang membuat kecepatan motor hanya akan berubah pada saat diberikan PWM atau tegangan tertentu. Hal ini mengakibatkan kesulitan dalam mengatur kecepatan motor sesuai dengan setpoint yang sudah diatur dalam mikrokontroler.
5. Simulasi dan Serial antara Arduino dan MATLAB menunjukkan hasil yang baik dan sangat membantu dalam menganalisis hasil keluaran kecepatan motor.

5.2 Saran

Berikut adalah saran-saran yang penulis ajukan untuk penelitian selanjutnya:

1. Penelitian sebaiknya menggunakan motor yang memiliki spesifikasi rinci yang sudah tersedia atau bias dicari, karena untuk metode *Linear Quadratic Regulator* sangat membutuhkan plant yang dapat diidentifikasi bentuk persamaannya.
2. Menggunakan mikrokontroler yang lebih baik dari yang penulis gunakan dan bila memungkinkan menggunakan aplikasi simulasi dan serial selain yang penulis gunakan.
3. Menambahkan beban pada motor induksi untuk mengetahui bagaimana performa sistem jika diberi beban.

Daftar Pustaka

- [1] UNEP. (2005) *Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia*. ([http://www.energysustainability.org/docs/ee_modules/indo/Chapter%20-%20Electric%20motors%20\(Bahasa%20Indonesia\).pdf](http://www.energysustainability.org/docs/ee_modules/indo/Chapter%20-%20Electric%20motors%20(Bahasa%20Indonesia).pdf) diunduh tanggal 6 Desember 2012).
- [2] Aulia Pratama, Mohammad. 2009. *Pengontrol PID untuk Gerak Roll Pada Pesawat Terbang Tanpa Awak Dengan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR)*. Tugas Akhir . Bandung: Institut Teknologi Telkom.
- [3] Sinaga, Ridwan. 2011. *Analisis Karakteristik Berbeban Motor Induksi Satu Fasa Kapasitor Start (Aplikasi Pada Laboratorium Konversi Energi Listrik FT – USU)*. Tugas Akhir. Medan: Universitas Sumatera Utara (<http://repository.usu.ac.id/handle/123456789/26659> diunduh tanggal 10 Desember 2012).
- [4] Padhi, Dr. Radhakant. *Advanced Control System Design*. AE Dept. IISc-Bangalore.
- [5] Lewis, F.L. 1998. *Linear Quadratic Regulator (LQR) State Feedback Design*. Copyright All rights reserved (<http://arri.uta.edu/acs/Lectures/lqr.pdf> diunduh tanggal 12 Desember 2012).
- [6] Prianto, Joko., Tinno Daya P, Puji Heliyanto & Fajar Septa W. 2010. *Single Phase Motor*. Depok: Universitas Indonesia. (<http://staff.ui.ac.id/internal/040603019/material/PaperSinglePhaseMotor.pdf> diunduh tanggal 12 Desember 2012).