



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *EXTENDED KALMAN FILTER*
UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION*
MOTOR DI UNIT PENGGERAK KERETA API
PT.INKA**

ISMI PUTRI ANGGRAINI
NRP. 023115 40000 020

Dosen Pembimbing
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



TUGAS AKHIR - TF 181801

**EXTENDED KALMAN FILTER DESIGN FOR
SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR IN
TRAIN MOVEMENT UNIT PT.INKA**

**ISMI PUTRI ANGGRAINI
NRP. 023115 40000 020**

Supervisors

Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

**DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2019**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Ismi Putri Anggraini
NRP : 023115 40000 020
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul *PERANCANGAN EXTENDED KALMAN FILTER UNTUK SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR* DI UNIT PENGGERAK KERETA API PT.INKA adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, Yang membuat



Ismi Putri Anggraini
NRP. 02311540000020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

PERANCANGAN *EXTENDED KALMAN FILTER* UNTUK
SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR DI UNIT
PENGGERAK KERETA API PT. INKA

Oleh:

Ismi Putri Anggraini
NRP. 023115 40000 020

Surabaya, 10 Juli 2019
Mengetahui/Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN. 19760523 200012 2 001

Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.



Konala Departemen
Fisika FTI-ITS

Agus Mubandjaja Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIRN. 197809022003121002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PERANCANGAN *EXTENDED KALMAN FILTER* UNTUK
SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR DI UNIT
PENGGERAK KERETA API PT. INKA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada**

**Bidang Minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

ISMI PUTRI ANGGRAINI

NRP. 023115 40000 020

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Febry Pandu W., S.T., M.Eng., Ph.D. (Pembimbing II)
3. Ir. Yaumar, M.T. (Penguji I)
4. Bambang Lelono W., S.T., M.T. (Penguji II)
5. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T. (Penguji III)

**SURABAYA
JULI 2019**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERANCANGAN *EXTENDED KALMAN FILTER* UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR* DI UNIT PENGGERAK KERETA API PT.INKA

Nama : Ismi Putri Anggraini
NRP : 0231154000020
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, ST, MT
Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

Abstrak

Untuk mengetahui informasi kecepatan pada motor induksi dilakukan pemasangan sensor kecepatan. Namun pemasangan sensor dianggap memiliki kekurangan dan membutuhkan tambahan biaya. Pada tugas akhir ini diajukan teknik estimasi untuk sistem operasi pada *speed sensorless induction motor* dengan dengan metode *extended Kalman filter* (EKF). *Study* dilakukan untuk sistem motor induksi di PT.Inka(persero). *Extended Kalman filter* adalah suatu estimator yang digunakan untuk sistem nonlinier. Perancangan *extended Kalman filter* menggunakan arus pengukuran dan tegangan sebagai masukan. Pada *extended Kalman filter* terdapat beberapa langkah yaitu prediksi state, estimasi error kovarian, gain *extended Kalman filter*, estimasi state, dan update error kovarian. Penelitian ini terdapat enam langkah. Pertama pengambilan data kecepatan motor induksi pada PT.Inka (persero). Kedua adalah pemodelan motor induksi. Ketiga adalah perancangan *extended Kalman filter*, didapatkan nilai estimasi arus rms sebesar 3,10 A, nilai estimasi fluks rms sebesar 0,8044 Wb dan nilai estimasi kecepatan sebesar 157,07 rad/s, bila dibandingkan dengan pengukuran di PT.Inka didapatkan error sebesar 0,1%. Keempat adalah variasi tegangan dari 226 volt menjadi 380 volt, diketahui bahwa *extended Kalman filter* dapat mengikuti perubahan yang terjadi. Kelima adalah variasi frekuensi estimasi didapatkan hasil estimasi pada saat 40 Hz didapatkan kecepatan sebesar 125,6 rad/s dan pada saat 50 Hz didapatkan kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Keenam adalah variasi torsi beban sebesar 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm, didapatkan hasil bahwa saat pada torsi terbesar maka error yang terjadi besar pula, namun error masih dibawah 0,5%, sehingga *extended Kalman filter* masih mampu mengestimasi dengan baik.

Kata kunci — Extended Kalman filter, motor induksi, speed sensorless

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**EXTENDED KALMAN FILTER DESIGN FOR SPEED
SENSORLESS INDUCTION MOTOR IN TRAIN
MOVEMENT UNIT PT.INKA**

Name : Ismi Putri Anggraini
NRP : 0231154000020
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Dr. Katherin Indriawati, ST, MT
Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

Abstract

To get speed information on an induction motor, a speed sensor is installed. However, installation of sensors is considered to have deficiencies and requires additional costs. In this final project, an estimation technique for the operating system is proposed on the sensorless induction motor speed with the extended Kalman filter (EKF) method, study in PT.Inka (Persero). Extended Kalman filter is an estimator used for nonlinear systems. Extended design Kalman filters use measurement currents and voltages as inputs. In extended Kalman filter there are several steps, namely state prediction, covariance error estimation, extended Kalman filter gain, state estimation, and covariant error updates. First, data collection on induction motor speed at PT. Inka (Persero). Second is induction motor modelling. The third is the extended Kalman filter design, obtained an estimated value of rms current of 3.10 A, estimated rms flux value of 0.8044 Wb and an estimated value of speed of 157.07 rad / s, when compared with measurements at PT.Inka This error is obtained by 0.1%. Fourth is the voltage variation from 226 volts to 380 volts, it is known that the output extended Kalman filter can follow the changes. Fifth is the variation of the estimated frequency from the estimation when 40 Hz obtained a speed of 125.6 rad / s and at 50 Hz the speed was 157.07 rad/s. Sixth is the variation of load torque of 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm, the results show that when the largest torque is a large error, the error is still below 0.5%, so extended Kalman filters are still able to estimate properly.

Keyword—Extended Kalman filter, induction motor, speed sensorless

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikan Tugas Akhir dengan judul “Perancangan *Extended Kalman Filter* untuk *Speed Sensorless Induction Motor* di Unit Penggerak Kereta Api PT. INKA”

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini :

1. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku pembimbing Tugas Akhir dan Bapak Febry Pandu Wijaya, S.T.,M.Eng.,Ph.D. selaku pembimbing di lapangan.
2. Seluruh staff PT. Industri Kereta Api (INKA) Madiun, dan terkhusus staff Departement Pengembangan, PT. Industri Kereta Api (INKA) Madiun
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D, selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu dan pembekalan selama kuliah.
6. Kedua orang tua (Bapak Mujaiyin dan Ibuk Siti Badriah) dan Adik (Septia Zeindria) dan keluarga besar saya, atas kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk apapun sehingga terselesaikan tugas akhir ini.

7. Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir bidang Rekayasa Instrumentasi, Yogi, Retno Indriani Ardini, Eka Putri, Asmaul Husna,dll.
8. Kepada teman saya Henry Putra Prasetya yang telah menemani dan membantu dalam beberapa hal, untuk mendukung terselesaikannya tugas akhir ini.
9. Teman-teman Laboratorium Fisika Rekayasa, Kakak Puyen, kakak Ajeng selaku senior yang sering membantu, Teman-Teman Kongguan, Teman-Teman Geboks yang telah mensupport dan memberikan semangat kepada saya.
10. Seluruh teman-teman angkatan 2015 yang turut memberikan dukungannya
11. Semua pihak yang terlibat dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan laporan tugas akhir. Semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN I	x
LEMBAR PENGESAHAN II.....	xii
Abstrak	xiv
<i>Abstract</i>	xvi
KATA PENGANTAR.....	xviii
DAFTAR ISI.....	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxii
DAFTAR TABEL	xxiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.2 Motor Induksi	7
2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	9
2.4 Pemodelan dari motor induksi.....	9
2.5 <i>Extended Kalman filter</i>	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1 Pengujian Tanpa Beban.....	18
3.2 Pemodelan Motor Induksi	19
3.3 Perancangan <i>Extended Kalman Filter</i>	21
3.4 Pengujian <i>Extended Kalman Filter</i>	22
3.5 Penambahan torsi beban pada inputan motor induksi dan <i>extended Kalman filter</i>	23
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Hasil Pemodelan Motor Induksi.....	27
4.2 Hasil <i>Extended Kalman Filter</i> (EKF).....	29
4.3 Validasi Observer <i>Extended Kalman Filter</i> (EKF)	33
4.4 Pemodelan Dengan Perubahan Tegangan.....	33

4.5 Pemodelan Dengan Adanya Torsi Beban.....	37
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	45
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran.....	46
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Transformasi clarke (Cypress.com).....	6
Gambar 2.2 Sumbu ABC dan $\alpha\beta$ (Deshmukh,Bansal& Killedar 2017).....	6
Gambar 2.3 Bagian motor induksi (Deshmukh, Bansal, & Killedar , 2017).....	7
Gambar 2.4 Stator motor induksi (Deshmukh,Bansal,& Killedar ,2017).....	8
Gambar 2.5 Rotor motor induksi (Deshmukh,Bansal, & Killedar , 2017).....	8
Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen motor induksi (Chan, T. F., & Shi, K. (2011)).....	9
Gambar 2.7 Skema <i>extended Kalman filter</i>	16
Gambar 3.1 Diagram alir tugas akhir.....	17
Gambar 3.2 Inverter sebagai penggerak motor induksi.....	18
Gambar 3.3 Pengambilan data.....	18
Gambar 3.4 Pengambilan data dengan tachometer	19
Gambar 4.1 Arus motor induksi.....	27
Gambar 4.2 Fluks motor induksi	28
Gambar 4.3 Kecepatan motor induksi.....	28
Gambar 4.4 Gain EKF pada K11,K12,K21,K22.....	30
Gambar 4.5 Gain EKF pada K31,K41,K32,K42.....	30
Gambar 4.6 Gain EKF pada K51,K52.....	30
Gambar 4.8 Arus hasil motor induksi dan EKF	31
Gambar 4.9 Fluks hasil motor induksi dan sstimasi EKF	32
Gambar 4.10 Kecepatan motor induksi dan EKF.....	32
Gambar 4.11 Arus saat variasi tegangan	34
Gambar 4.12 Fluks saat variasi tegangan	34
Gambar 4.13 Perubahan respon kecepatan terjadi perubahan tegangan	35
Gambar 4.14 Arus variasi frekuensi.....	36
Gambar 4.15 Fluks variasi frekuensi.....	36
Gambar 4.16 Perubahan kecepatan perubahan frekuensi	37

Gambar 4.17 Perubahan arus dengan beban 1 Nm.....	38
Gambar 4.18 Perubahan fluks dengan beban 1 Nm	39
Gambar 4.19 Kecepatan saat torsi beban 1 Nm	39
Gambar 4.20 Perubahan arus dengan torsi beban 3 Nm	40
Gambar 4.21 Perubahan fluks saat diberi torsi beban 3 Nm	40
Gambar 4.22 Perubahan kecepatan saat torsi beban 3 Nm	41
Gambar 4.23 Perubahan arus pemberian torsi beban 6 Nm	41
Gambar 4.24 Perubahan fluks diberi torsi beban 6 Nm	42
Gambar 4.25 Kecepatan saat torsi beban 6 Nm	42

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter motor induksi	20
Tabel 3.2 Hasil Pengukuran No load dengan Tachometer	23
Tabel 4.1 Validasi pemodelan <i>extended Kalman filter</i> dengan tachometer.....	33

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peraturan Presiden No 22 Tahun 2017, tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), mendorong pihak-pihak terkait untuk memenuhi target penurunan polusi udara dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu cara yang dipilih oleh pemerintah dalam mewujudkan RUEN tersebut adalah pada bidang transportasi. Transportasi listrik adalah suatu transportasi yang sedang dikembangkan di Indonesia, karena lebih ramah lingkungan. Di Indonesia sendiri transportasi listrik yang sedang dikembangkan adalah mobil listrik, motor listrik dan kereta rel listrik (KRL). Pembangunan KRL di beberapa daerah sudah dilaksanakan, seperti commuter line Jabodetabek.

Di dalam dunia industri terutama pada revolusi industri 4.0 penggunaan jenis motor banyak digunakan, terutama untuk bidang transportasi, termasuk transportasi berbasis listrik. Motor induksi lebih sering digunakan pada dunia industri dan transportasi dikarenakan konstruksi yang kuat, harga yang relative murah. Motor induksi adalah sebuah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Disebut motor induksi karena motor ini bekerja dengan adanya arus yang terinduksi dari stator menuju rotor. Secara umum motor induksi terbagi menjadi dua yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa (Tiwari, Das, & Pal, 2017).

Pada banyak aplikasi, motor induksi dituntut beroperasi pada kecepatan tertentu dengan beban yang bervariasi. Untuk keperluan ini, maka digunakan sistem pengendalian kecepatan. Dalam hal ini, informasi kecepatan sangat dibutuhkan sehingga dipasang sensor kecepatan. Namun sensor memiliki keterbatasan resolusi dan persyaratan pemasangan. Oleh karena itu saat ini mulai dikembangkan penelitian tentang motor induksi tanpa sensor atau dikenal sebagai *sensorless induction motor*. Selain itu penghapusan sensor dapat mengurangi biaya. (K.L, T.F, Y.K, & S.L, 2002).

Salah satu cara untuk menggantikan peran sensor adalah dengan menggunakan metode softsensor. Softsensor mampu mengestimasi variabel keadaan sebuah sistem dengan menggunakan model analitis. Salah satu jenis softsensor yang umum dikenal untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi adalah *extended Kalman filter* (Allaoui, Chafaa, Laamari, & Athamena, 2015).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat diambil permasalahan sebagai berikut :

- a. Bagaimana merancang *extended Kalman filter* untuk aplikasi *speed sensorless induction motor*?
- b. Bagaimana performansi *extended Kalman filter* saat digunakan sebagai estimator kecepatan?

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukan penelitian ini sebagai bahan tugas akhir adalah sebagai berikut :

- a. Untuk merancang *extended Kalman filter* untuk aplikasi *speed sensorless* pada motor induksi yang mampu mengestimasi kecepatan dengan data pengukuran arus dan tegangan masukan motor induksi
- b. Untuk mengetahui performansi *extended Kalman filter*

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan untuk tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Parameter motor induksi mengacu pada motor induksi yang digunakan pada unit penggerak kereta api produksi PT. INKA (Persero).
- b. Validasi model dilakukan dengan mengacu pada hasil pengukuran saat motor induksi beroperasi tanpa beban.

- c. Pemodelan berdasarkan keadaan motor induksi dilakukan tanpa beban
- d. Pada pemodelan torsi beban, torsi beban telah ditentukan nilainya terlebih dahulu

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tranformasi Clarke

Motor induksi sering disebut dengan motor asinkron. Motor induksi 3 fasa digunakan pada penelitian tugas akhir ini. Motor induksi 3 fasa adalah motor yang bekerja dengan menggunakan perbedaan fasa pada sumber untuk menimbulkan gaya putar pada bagian rotornya. Perbedaan fasa ini didapatkan dari sumber 3 fasa. (Cypress.com)

Listrik 3 fasa adalah listrik AC (alternating current) yang menggunakan 3 penghantar yang mempunyai tegangan sama tetapi berbeda dalam sudut fasa masing masing sebesar 120° . Pada motor induksi, terdapat sumbu A, sumbu B, sumbu C yang mempresentasikan fasa pada sumber 3 fasa. Selain itu pada motor induksi digunakan juga tranformasi Clarke, yang memiliki sumbu alfa(α) dan sumbu beta(β). Penggambaran sumbu-sumbu pada motor induksi dapat dilihat pada Gambar 2.1

Transformasi Clarke adalah transformasi yang digunakan pada motor induksi untuk mengubah 3 fasa menjadi 2 fasa. Transformasi clarke juga disebut dengan transformasi kerangka acuan stasioner. Motor induksi agar dapat dimodelkan sesuai dengan keadaan aslinya, pemodelan dilakukan dengan perbedaan sumbu antara tegangan dan medan magnet adalah sebesar 90° . Sehingga bentuk sumber 3 fasa pada sumbu A, sumbu B, sumbu C yang memiliki perbedaan fasa 120° tidak dapat mempresentasikan pemodelan sesungguhnya dari motor induksi 3 fasa. Selain itu dari transformasi clarke juga dapat mempelajari sifat mesin listrik tanpa kompleksitas dalam persamaan tegangan. (Cypress.com). Transformasi Clarke dapat dilakukan dengan persamaan 2.1. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat penggambaran dari perubahan sumbu A,B,C menjadi sumbu α,β , yang mempresentasikan hasil dari persamaan 2.1. (Deshmukh, Bansal, & Killedar , 2017)

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Dengan :

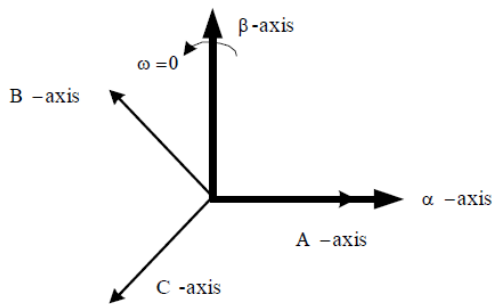
V_α = Tegangan pada sumbu alfa

V_β = Tegangan pada sumbu beta

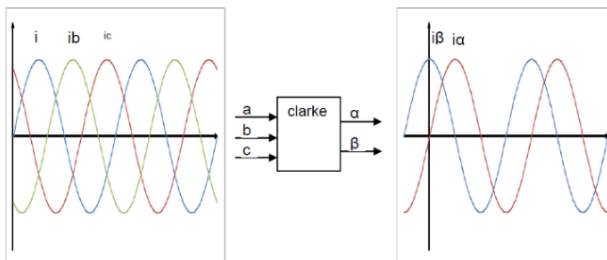
V_a = Tegangan pada sumbu A

V_b = Tegangan pada sumbu B

V_c = Tegangan pada sumbu C



Gambar 2.1 Transformasi clarke (Cypress.com)



Gambar 2. 2 Sumbu ABC dan $\alpha\beta$ (Deshmukh, Bansal, & Killedar , 2017)

2.2 Motor Induksi

Motor Induksi adalah salah satu jenis motor listrik, dengan motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi merupakan motor listrik yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotor, dengan arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi dari fluks yang berputar pada stator. Motor induksi memiliki kelebihan dan kekurangan.

Beberapa kelebihan dari motor induksi adalah :

- Bentuknya sederhana, dengan konstruksi yang cukup kuat.
- Biayanya murah dan dapat diandalkan.
- Efisiensinya tinggi
- Perawatan yang minimum.

Kelemahan, di antaranya adalah :

- Pengaturan kecepatannya berpengaruh pada efisiensinya.
- Kecepatan akan berkurang jika bebannya bertambah.

Untuk mengetahui kecepatan dari motor induksi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$N_s = \frac{120 f}{P} \quad (2.2)$$

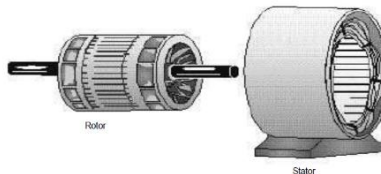
Dengan :

N_s = Kecepatan sinkron motor (rpm)

f = Frekuensi (Hz)

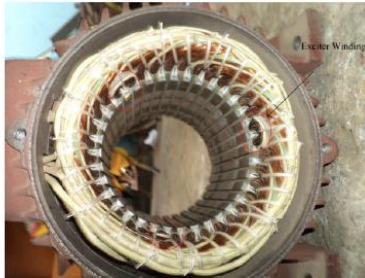
P = Pole

Pada motor induksi terdapat dua bagian penting yaitu:



Gambar 2.3 Bagian motor induksi (Deshmukh, Bansal, & Killedar , 2017)

- Stator merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat medan magnetik kepada kumparan rotornya. Bagian stator merupakan bagian input dari motor induksi. Stator terdiri dari susunan laminasi inti dengan setiap tumpukan laminasi inti ini memiliki jalur-jalur yang didalamnya terdiri dari kumparan-kumparan yang dililitkan. Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi. Tiap kumparan pada motor induksi tiga fasa tersebar dalam jalur-jalur yang disebut belitan fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis



Gambar 2.4 Stator motor induksi (Deshmukh, Bansal, & Killedar , 2017)

- Rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor. Rotor terdiri dari kumpulan lilitan kumparan tembaga. Rotor belitan yang berhubungan loop tertutup mendapatkan arus melalui fluks dalam bentuk induksi dari stator.



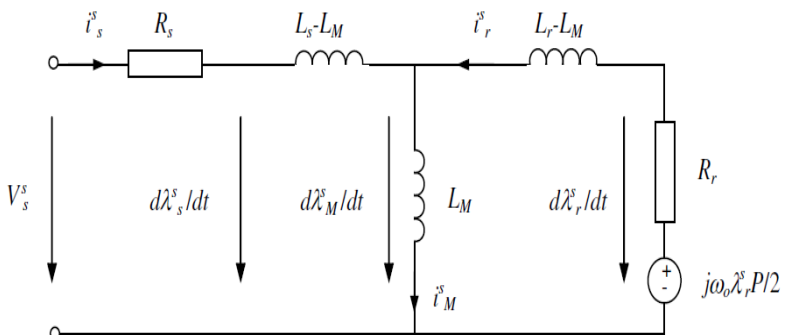
Gambar 2.5 Rotor motor induksi (Deshmukh, Bansal, & Killedar , 2017)

2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi 3-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa maka pada kumparan statornya akan mengalir arus. Arus pada setiap fasa akan menghasilkan fluks bolak balik yang berubah ubah dari fluks yang berubah ubah tersebut akan menghasilkan medan magnet yang berubah, medan magnet tersebut berubah ubah sehingga akan menimbulkan fluks yang berputar pada stator. Fluks yang berputar berubah ubah tersebut akan menembus penampang dari batang rotor, sehingga akan timbul tegangan induksi (ggl). Karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup maka ggl tersebut akan menghasilkan arus pada rotor. Arus pada rotor tersebut akan menghasilkan medan magnet pada rotor. Medan magnet rotor dan medan putar stator akan berinteraksi menghasilkan torsi yang akan menggerakkan motor. (Chan & Shi, 2011)

2.4 Pemodelan dari motor induksi

Pemodelan motor induksi dapat ditinjau sebagai kerangka acuan stator. Sehingga persamaan motor induksi dapat di cari dari rangkaian ekivalen motor induksi dengan acuan stator. Rangkaian ekivalen motor induksi di gambarkan pada Gambar 2.7 (Chan & Shi, 2011)



Gambar 2.6 Rangkaian ekivalen motor induksi (Chan, T. F., & Shi, K. (2011))

Dapat dilihat pada Gambar 2.7 yaitu gambar rangkaian ekuivalen dari motor induksi, dengan rangkaian tersebut berguna untuk mendapatkan persamaan yang akan dijadikan pemodelan motor induksi. Untuk mendapatkan persamaan umum dari motor induksi yang beracuan pada stator dapat dilihat pada persamaan (2.3) hingga (2.7)

$$\vec{V}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_s \quad (2.3)$$

$$\vec{V}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_r + j \frac{P}{2} (\omega_e - \omega_r) \vec{\lambda}_s \quad (2.4)$$

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (2.5)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s \quad (2.6)$$

Karena kerangka acuan yang digunakan pada pemodelan motor induksi pada tugas akhir ini adalah kerangka acuan stator, maka nilai $\omega_e = 0$. Persamaan (2.3) jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$ menjadi:

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \lambda_{s\alpha} \quad (2.7)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \lambda_{s\beta} \quad (2.8)$$

Karena jenis rotor dari motor induksi ini adalah squirrel cage yang terminal – terminalnya terhubung singkat, maka tegangan rotor V_r adalah nol, sehingga persamaan (2.4) menjadi:

$$0 = R_r i_r + \frac{d}{dt} \lambda_r + \frac{P}{2} j (\omega_e - \omega_r) \lambda_r \quad (2.9)$$

Jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$ ($\omega_e = 0$) maka persamaan (2.9) menjadi :

$$\dot{\lambda}_{r\alpha} = -R_r i_{r\alpha} - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.10)$$

$$\dot{\lambda}_{r\beta} = -R_r i_{r\beta} + \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.11)$$

Persamaan (2.5) jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$, maka persamaannya akan menjadi :

$$\lambda_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \quad (2.12)$$

$$\lambda_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.6) di nyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$, maka persamaan akan berubah menjadi :

$$\lambda_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \quad (2.14)$$

$$i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}) \quad (2.15)$$

$$\lambda_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \quad (2.16)$$

$$i_{r\beta} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{s\beta}) \quad (2.17)$$

Dari persamaan (2.10) disubstitusikan ke persamaan (2.15) dan persamaan (2.11) disubstitusikan pada persamaan (2.17) maka akan didapatkan bersamaan seperti dibawah ini :

$$\dot{\lambda}_{r\alpha} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \right) \quad (2.18)$$

$$\dot{\lambda}_{r\beta} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{s\beta}) + \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \right) \quad (2.19)$$

Untuk mendapatkan persamaan arus stator pada sumbu alfa, maka substitusikan persamaan (2.7) ke persamaan (2.12) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} (L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}) \quad (2.20)$$

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\alpha} \quad (2.21)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.15) ke persamaan (2.21) maka akan menjadi persamaan seperti berikut :

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{r\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{s\alpha} \quad (2.22)$$

Lalu substitusikan persamaan (2.18) pada persamaan (2.22), maka akan di dapatkan persamaan :

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\alpha} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.23)$$

Lalu persamaan (2.15) disubstitusikan pada persamaan (2.22) maka akan diperoleh persamaan :

$$i_{s\alpha} = \frac{V_{s\alpha}}{\sigma L_s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_r} \right) i_{s\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} \lambda_{r\alpha} + \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_s} \lambda_{r\beta} \quad (2.24)$$

Dengan melakukan langkah yang sama dengan sumbu alfa , dapat dicari nilai pada sumbu beta substitusikan (2.13) pada persamaan (2.8).

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} (L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}) \quad (2.25)$$

Substitusikan persamaan (2.17) pada persamaan (2.25) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\beta} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{r\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{s\beta} \quad (2.26)$$

Setelah itu pada persamaan (2.11) disubstitusikan pada persamaan (2.26) sehingga didapatkan persamaan

$$V_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + \sigma L_S \frac{d}{dt} i_{S\beta} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\beta} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.27)$$

Yang terakhir maka akan didapatkan dari substitusi persamaan (2.16) pada persamaan (2.26)

$$i_{S\beta} = \frac{V_{S\beta}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_S T_r} \right) i_{S\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\beta} + \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_S} \lambda_{r\beta} \quad (2.28)$$

Dengan :

$$L_{iS} = L_S - L_m \quad (2.29)$$

$$L_{ir} = L_r - L_m \quad (2.30)$$

$$\sigma = \frac{L_r L_S - L_m^2}{L_r L_S} \quad (2.31)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2.32)$$

Persamaan torsi elektromagnetik pada motor induksi secara umum dapat di tuliskan sebagai berikut :

$$\omega_r = \frac{T_e - T_l}{J} \quad (2.33)$$

$$T_e = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_m}{L_r} \right) (\lambda_{r\alpha} i_{S\beta} - \lambda_{r\beta} i_{S\alpha}) \quad (2.34)$$

Sehingga akan didapat nilai

$$\omega_r = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_m}{L_r} \right) (\lambda_{r\alpha} i_{S\beta} - \lambda_{r\beta} i_{S\alpha}) - \frac{T_l}{J} \quad (2.35)$$

Dari penjabaran diatas akan di dapatkan persamaan motor induksi :

$$i_{S\alpha} = \frac{V_{S\alpha}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma T_r} \right) i_{S\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\alpha} + \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_S} \lambda_{r\beta} \quad (2.36)$$

$$i_{S\beta} = \frac{V_{S\beta}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_S T_r} \right) i_{S\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\beta} + \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_S} \lambda_{r\alpha} \quad (2.37)$$

$$\lambda_{r\alpha} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{S\alpha}) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \right) \quad (2.38)$$

$$\lambda_{r\beta} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{S\beta}) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \right) \quad (2.39)$$

$$\omega_r = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_r}{L_m} \right) (\lambda_{r\beta} i_{S\alpha} - \lambda_{r\alpha} i_{S\beta}) - \frac{T_l}{J} \quad (2.40)$$

dengan :

R_S = Resistansi Stator

R_r = Resistansi rotor

L_m = Induktansi mutual

L_s	= Induktansi stator
L_r	= Induktansi rotor
$V_{S\alpha}, V_{S\beta}$	= Tegangan pada sumbu alfa dan beta
$i_{S\alpha}, i_{S\beta}$	= Arus pada sumbu alfa dan beta
$\lambda_{r\alpha}, \lambda_{r\beta}$	= Fluks pada sumbu alfa dan beta
ω_r	= Kecepatan
P	= Pole

2.5 Extended Kalman filter

Extended Kalman filter adalah suatu cara untuk mengestimasi suatu sistem yang memiliki respon nonlinier. Dikarenakan motor induksi adalah jenis motor yang memiliki sistem non-linier maka *extended Kalman filter* yang dapat digunakan untuk plant motor induksi. *Extended Kalman filter* adalah algoritma untuk mengestimasi variable dari sistem non linier. Untuk mendapatkan data *extended Kalman filter* di lakukan dua langkah yaitu *time update (predict)* dan *measurement update*. Dengan pada time update akan terdapat langkah untuk mencari prediksi state, estimasi error kovarian matriks . Pada *measurement update* terdapat langkah untuk mencari gain matriks *extended Kalman filter* , *estimasi state*, update error kovarian Berikut langkah-langkah secara terperinci : (Allaoui, Chafaa, Laamari, & Athamena, 2015) Langkah –Langkah untuk *extended Kalman filter* :

i. *Prediksi state*

$$x^*_{(k+1)} = A_d \hat{x}_{(k)} + B_d U_{(k)} \quad (2.41)$$

ii. Estimasi error kovariant matriks pada *extended Kalman filter*

$$p^*_{(k+1)} = f_{(k+1)} \hat{p}_{(k)} f^T_{(k+1)} + Q \quad (2.42)$$

Dengan :

$$f_{(k+1)} = \frac{\delta[A_d X + B_d u]}{\delta x}$$

$$f_{(k+1)} = \begin{bmatrix} 1 - T_s A_1 & 0 & A_2 T_s & A_3 T_s x_5 & A_3 T_s x_4 \\ 0 & 1 - T_s A_1 & -A_3 T_s x_5 & A_2 T_s & A_3 T_s x_3 \\ A_4 T_s & 0 & 1 - T_s A_5 & -pole x_5/2 & T_s x_4 \\ 0 & A_4 T_s & -pole x_5 T_s/2 & 1 - T_s A_5 & T_s x_3 \\ -A_6 T_s x_4 & A_6 T_s x_3 & A_6 T_s x_2 & -A_6 T_s x_1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 2 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cdot 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dengan :

Fungsi $f_{(k+1)}$ disimbolkan sebagai hasil dari df, dimana df adalah fungsi nonlinier yang di differensialkan terhadap x.

$$d_f = \hat{f}_{(k+1)} = f_{(k+1)} \quad (2.43)$$

Q = Matriks kovarian

Kovarian digunakan untuk mengukur besarnya hubungan antar variabel yang menunjukkan seberapa besar perubahan dari dua variabel acak secara bersama-sama. Matriks kovarians biasanya digunakan untuk mengetahui tingkat ketelitian dari parameter yang dicari. Matriks kovariant dapat dihitung dengan metode dan persamaan seperti dibawah ini.

$$cov(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x)(y_i - y) \quad (2.44)$$

Bila terdapat 3 data seperti dibawah ini

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \text{ dengan } n=3 \quad (2.45)$$

sehingga dari data pada persamaan 2.47 tersebut didapatkan kedalam matriks kovariannya.

$$Q = \begin{bmatrix} cov(x, x) & cov(x, y) & cov(x, z) \\ cov(y, x) & cov(y, y) & cov(y, z) \\ cov(z, x) & cov(z, y) & cov(z, z) \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Dengan :

$$Cov(x, x) = var(x)$$

$$Cov(y, y) = var(y)$$

$$Cov(z, z) = var(z)$$

Sehinga dapat tulis kovariant matriks

$$Q = \begin{bmatrix} \text{var}(x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(y, x) & \text{var}(y) & \text{cov}(y, z) \\ \text{cov}(z, x) & \text{cov}(z, y) & \text{var}(z) \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Dengan :

\sum = simbol penjumlahan

x_i = nilai data ke i

X = data rata rata nilai x

y_i = nilai data ke i

Y = data rata rata nilai y

iii. Penetapan gain matriks *extended Kalman filter*

$$K_{(k+1)} = p^*_{(k+1)} h^T_{(k+1)} [h_{(k+1)} p^*_{(k+1)} h^T_{(k+1)} + R]^{-1} \quad (2.48)$$

Dengan :

$$h_{(k+1)} = \frac{\delta[C_d X]}{\delta x} \quad (2.49)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

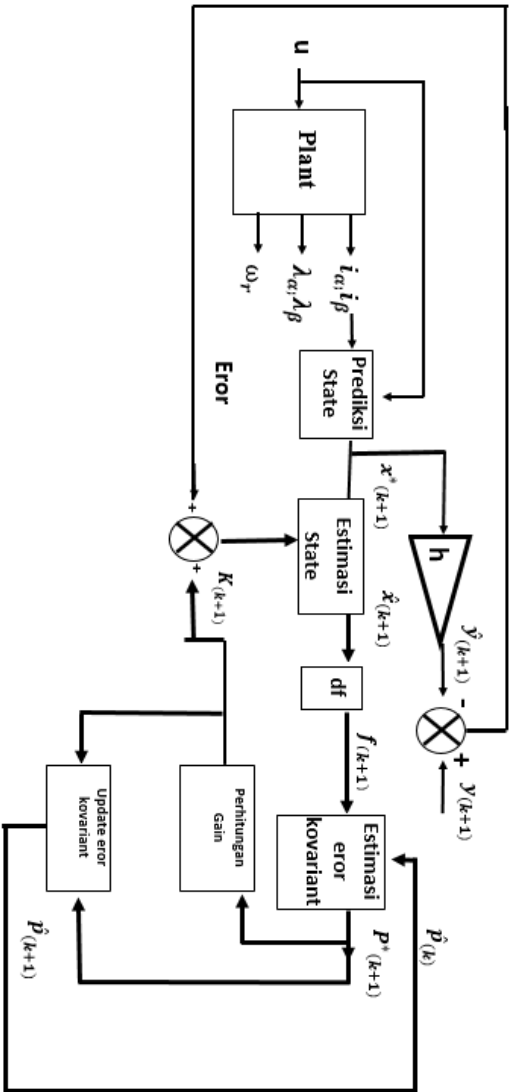
iv. Estimasi *state*

$$\hat{x}_{(k+1)} = x^*_{(k+1)} + K_{(k+1)} \{y_{(k+1)} - \hat{y}_{(k+1)}\} \quad (2.50)$$

v. *Update error kovarian*

$$\hat{p}_{(k+1)} = p^*_{(k+1)} - K_{(k+1)} h_{(k+1)} p^*_{(k+1)} \quad (2.51)$$

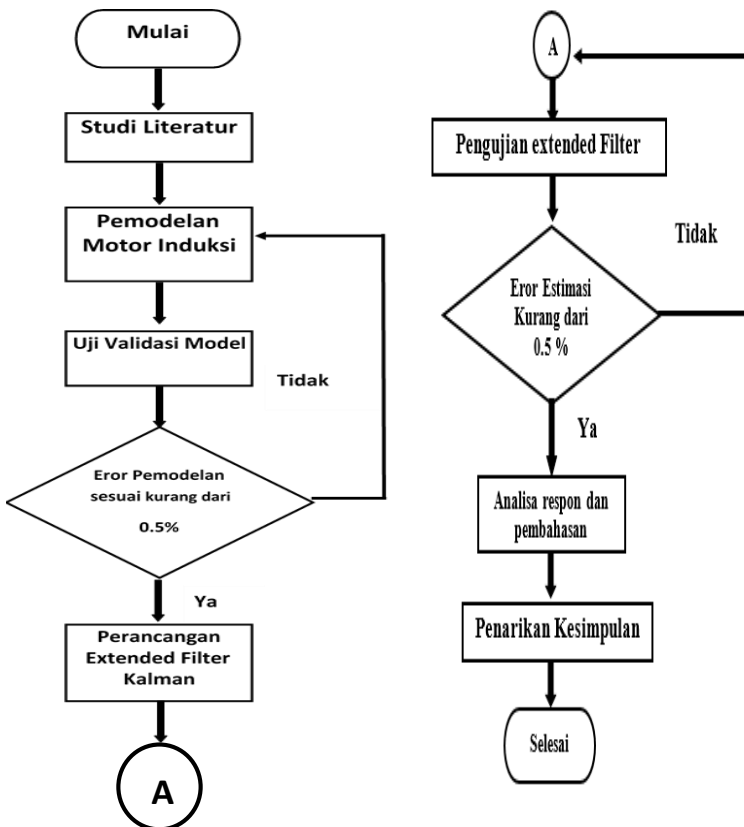
Untuk lebih jelaskan tertera pada diagram blok dari extended Kalman filter pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Skema algoritma *extended Kalman filter*

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk mendapatkan kecepatan dengan masukan dari *extended Kalman filter* berupa tegangan dan arus untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi. Berikut adalah diagram alir penelitian secara umum dalam tugas akhir ini disajikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir tugas akhir

3.1 Pengujian Tanpa Beban

Mesin induksi adalah suatu alat yang mengubah energi listrik menjadi mekanik. Pengujian tanpa beban motor induksi 3 fasa ini akan memberikan data yaitu kecepatan tanpa beban. Percobaan ini dilakukan pada frekuensi tertentu sesuai dengan jenis motor induksi dengan keadaan tahanan tiga fasa dalam keadaan yang tanpa beban.

Pada keadaan tanpa beban besar arus rotor sangat kecil dan hanya dipergunakan untuk menghasilkan torsi yang cukup kecil pula untuk mengestimasi. Bahwa apabila arus kecil maka akan semakin kecil besar kecepatannya. Pada pengukuran ini hanya diukur data kecepatan. Dengan pengujian tanpa beban ini akan diketahui nilai kecepatan motor induksi. Pengujian dilakukan seperti pada Gambar 3.2 sampai Gambar 3.4. Hasil pengujian akan dibandingkan dengan kecepatan yang didapatkan dari pemodelan dan kecepatan estimasi dari *extended Kalman filter*



Gambar 3.2 Inverter sebagai penggerak motor induksi



Gambar 3.3 Pengambilan data



Gambar 3.4 Pengambilan data dengan tachometer

3.2 Pemodelan Motor Induksi

Langkah selanjutnya dalam pembuatan tugas akhir ini setelah penentuan parameter adalah pemodelan dari motor induksi, pada simulasi matlab. Motor induksi adalah *plant nonlinier*, dengan pemodelan *state space* sebagai berikut :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.1)$$

$$Y = Cx \quad (3.2)$$

$$A = \begin{bmatrix} -A_1 & 0 & A_2 & A_3\omega_r & 0 \\ 0 & -A_1 & -A_3\omega_r & A_2 & 0 \\ A_4 & 0 & -A_5 & -pole \omega_r/2 & 0 \\ 0 & A_4 & -pole \omega_r/2 & -A_5 & 0 \\ -A_6\lambda_{\beta r} & A_6\lambda_{\alpha r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dengan :

$$A_1 = \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{\sigma L_r^2 L_s} \quad (3.3)$$

$$A_2 = \frac{L_m R_r}{\sigma L_r^2 L_s} \quad (3.4)$$

$$A_3 = \frac{P L_m}{2 \sigma L_r L_s} \quad (3.5)$$

$$A_4 = \frac{L_m R_r}{L_r} \quad (3.6)$$

$$A_5 = \frac{R_r}{L_r} \quad (3.7)$$

$$A_6 = \frac{2 P L_m}{3 \cdot 2 L_r} \quad (3.8)$$

$$\sigma = 1 - \frac{Lm^2}{Lr Ls} \quad (3.9)$$

$$B_1 = \frac{1}{\sigma L_s} \quad (3.10)$$

Dengan Matriks sebagai berikut :

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dengan

$$x = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$u = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Dengan parameter motor induksi sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Parameter motor induksi

No	Nama Parameter	Lambang	Nilai
1	Induktansi Mutual	Lm	0.258 H
2	Induktansi Rotor	Lr	0.274 h
3	Induktansi Stator	Ls	0.274 H
4	Hambatan Rotor	Rr	3.805 Ohm
5	Hambatan Stator	Rs	4.850 Ohm
6	Inersia Rotor	J	0.031Kgm ²
7	Pole	P	4
8	Time Sampling	Ts	10 ⁻⁶
9	Frekuensi	F	50 Hz

3.3 Perancangan *Extended Kalman Filter*

Perancangan *extended Kalman filter* digunakan untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi, dengan input berupa tegangan dan arus. Didalam algoritma *extended kalman filter* akan ada perubahan bentuk domain kontinyu menjadi bentuk domain diskrit. Matriks diskrit dari motor induksi adalah sebagai berikut :

$$A_d = I_{5 \times 5} + T_s A \quad (3.16)$$

$$A_d = I_{5 \times 5} + T_s \begin{bmatrix} -A_1 & 0 & A_2 & A_3 \omega_r & 0 \\ 0 & -A_1 & -A_3 \omega_r & A_2 & 0 \\ A_4 & 0 & -A_5 & -pole \omega_r / 2 & 0 \\ 0 & A_4 & -pole \omega_r / 2 & -A_5 & 0 \\ -A_6 \lambda_{\beta r} & A_6 \lambda_{\alpha r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_d = T_s B \quad (3.17)$$

$$B_d = T_s \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_d = C \quad (3.18)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan bentuk diskrit diatas maka akan didapatkan algoritma *extended Kalman filter* sebagai berikut :

i. *Prediksi state*

$$x^*_{(k+1)} = A_d \hat{x}_{(k)} + B_d U_{(k)} \quad (3.19)$$

$$x^*_{(k+1)} = \begin{bmatrix} 1 - (A_1 T_s) x_1 + A_2 T_s x_3 + A_3 T_s x_4 x_5 + T_s B_1 V_{\alpha s} \\ 1 - (A_1 T_s) x_2 - A_3 T_s x_3 x_5 + A_2 T_s x_4 + T_s B_1 V_{\beta s} \\ A_4 T_s x_1 + (1 - A_5 T_s) x_3 - T_s x_4 x_5 \\ A_4 T_s x_2 + T_s x_3 x_5 + (1 - A_5 T_s) x_4 \\ -A_6 T_s x_4 x_1 + A_6 T_s x_3 x_2 + x_5 \end{bmatrix}$$

ii. *Estimasi error kovarian matriks pada extended Kalman filter*

$$p^*_{(k+1)} = f_{(k+1)} \hat{p}_{(k)} f^T_{(k+1)} + Q \quad (3.20)$$

Dengan :

$$f_{(k+1)} = \frac{\delta[A_d X + B_d u]}{\delta x} \quad (3.21)$$

$$(3.22)$$

iii. Gain matriks *extended Kalman filter*

$$K_{(k+1)} = p^*_{(k+1)} h^T_{(k+1)} [h_{(k+1)} p^*_{(k+1)} h^T_{(k+1)} + R]^{-1} \quad (3.23)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$h_{(k+1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

iv. Estimasi *state*

$$\hat{x}_{(k+1)} = x^*_{(k+1)} + K_{(k+1)} \{ y_{(k+1)} - \hat{y}_{(k+1)} \} \quad (3.26)$$

Dengan :

$$y_{(k+1)} = \begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\hat{y}_{(k+1)} = h_{(k+1)} x^*_{(k+1)} \quad (3.28)$$

v. *Update error kovarian*

$$\hat{p}_{(k+1)} = p^*_{(k+1)} - K_{(k+1)} h_{(k+1)} p^*_{(k+1)} \quad (3.29)$$

R_s	= Resistansi Stator
R_r	= Resistansi rotor
L_m	= Induktansi mutual
L_s	= Induktansi stator
L_r	= Induktansi rotor
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$	= Tegangan pada sumbu alfa dan beta
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	= Arus pada sumbu alfa dan beta
$\lambda_{r\alpha}, \lambda_{r\beta}$	= Fluks pada sumbu alfa dan beta
ω_r	= Kecepatan
P	= Pole
Q dan R	= Matriks kovarian

3.4 Pengujian *Extended Kalman Filter*

Tahap pengujian pada *extended Kalman filter* ini dengan cara membandingkan output yang telah didapat dari motor induksi sebagai acuan, dengan hasil output *extended Kalman filter* sebagai

pengestimasi. *Extended Kalman filter* dapat di katakan baik apa bila bisa mendapatkan respon yang sama dengan hasil respon motor induksi atau dengan error estimasi kurang dari 0.5%. Dengan melakukan Percobaan tanpa beban pada motor induksi dengan pengambilan menggunakan alat pengukur putaran yaitu tachometer . Sehingga dari pengujian tersebut didapatkan data kecepatan yang tertera pada tabel 3.2

Tabel 3. 2 Hasil Pengukuran No load dengan Tachometer

Tegangan (volt)	Kecepatan motor induksi Pengukuran tachometer (Rpm)	Kecepatan motor induksi Pengukuran tachometer (rad/s)
378	1503	157,314
296	1500	157
263	1499	156,895
226	1498	156,790

3.5 Penambahan torsi beban pada inputan motor induksi dan *extended Kalman filter*

Pemodelan motor induksi dengan torsi beban dilakukan dengan cara menambahkan input torsi beban. Sehingga persamaan (2.36) sampai (2.40), diubah kedalam bentuk state sebagai berikut.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.30)$$

$$Y = Cx \quad (3.31)$$

$$A = \begin{bmatrix} -A_1 & 0 & A_2 & A_3\omega_r & 0 \\ 0 & -A_1 & -A_3\omega_r & A_2 & 0 \\ A_4 & 0 & -A_5 & -pole\ \omega_r/2 & 0 \\ 0 & A_4 & -pole\ \omega_r/2 & -A_5 & 0 \\ -A_6\lambda_{\beta r} & A_6\lambda_{\alpha r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{j} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Dengan

$$x = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$u = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ T_L \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

R_s	= Resistansi Stator
R_r	= Resistansi rotor
L_m	= Induktansi mutual
L_s	= Induktansi stator
L_r	= Induktansi rotor
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$	= Tegangan pada sumbu alfa dan beta

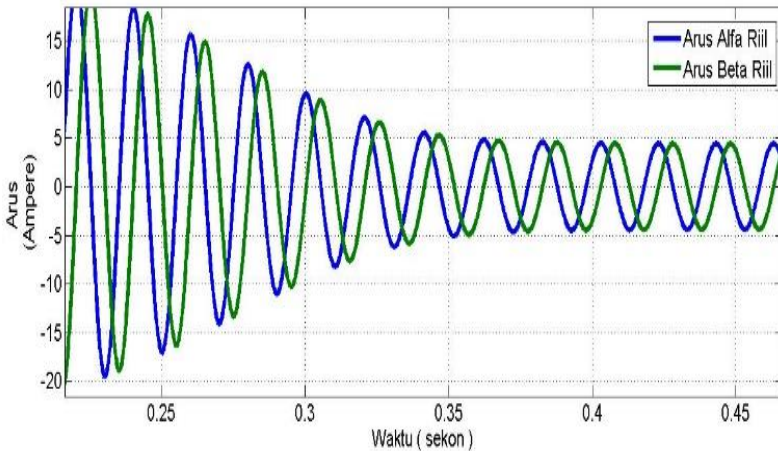
$i_{S\alpha}, i_{S\beta}$	= Arus pada sumbu alfa dan beta
$\lambda_{r\alpha}, \lambda_{r\beta}$	= Fluks pada sumbu alfa dan beta
ω_r	= Kecepatan
P	= Pole
T_L	= Torsi beban

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pemodelan Motor Induksi

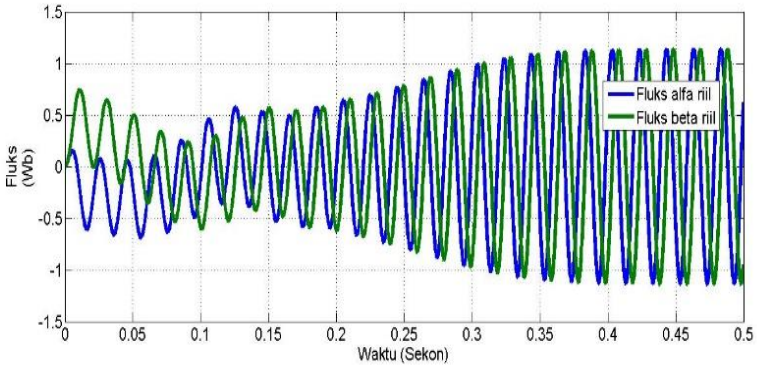
Dari hasil pemodelan motor induksi yang telah dilakukan akan didapatkan nilai arus, fluks dan kecepatan. Nilai yang tertera pada tugas akhir ini adalah nilai rms dari arus dan fluks. Digunakannya nilai rms dikarenakan hasil dari arus dan fluks berbentuk gelombang sinusoidal.



Gambar 4.1 Arus motor induksi

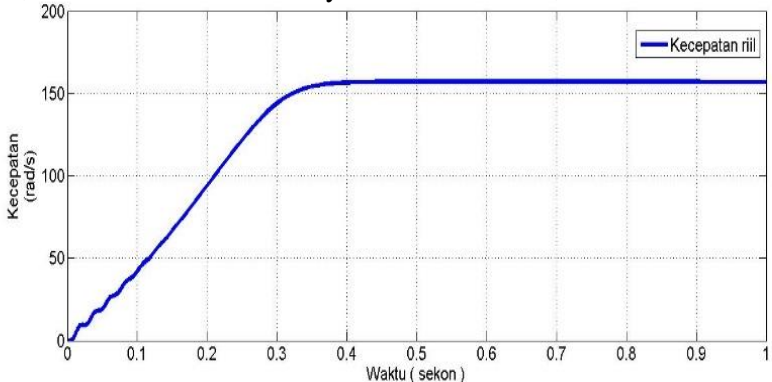
Sesuai dengan pemodelan motor induksi yang telah didapatkan saat studi literatur maka output dari motor induksi sudah berubah sumbu menjadi sumbu α dan β . Pada Gambar 4.1 dapat dilihat arus yang didapat dalam sumbu α , dan sumbu β dari pemodelan motor induksi pada awalnya tidak langsung dalam keadaan *steady*, arus mengalami perubahan nilai dahulu pada waktu 0 sekon hingga 0,35 sekon. Setelah waktu 0,35 sekon perlahan arus mulai dalam keadaan *steadynya*. Dalam waktu 0,35 sekon didapatkan nilai arus peak adalah 4,41 ampere, atau arus rms nya adalah 3,11 ampere, dan nilai arus ini sudah memasuki fasa *steady* hingga akhir waktu.

Pada state ke 3 dan ke 4 pembacaan outputan motor induksi selanjutnya adalah nilai fluks dalam sumbu α, β . Sama halnya seperti nilai arus yang di dapatkan, pada nilai fluks ini juga terjadi perubahan nilai pada tahap awal, lalu perlahan menjadi *steady*.



Gambar 4.2 Fluks motor induksi

Pada Gambar 4.2 menunjukkan saat waktu 0 sekon hingga 0,35 sekon terlihat fluks masih mengalami perubahan nilai, hingga pada waktu setelah detik ke 0,35 sekon fluks yang didapat dalam sumbu α , dan sumbu β dari pemodelan motor induksi nilai fluks peak 1,1371 Wb atau fluks rmsnya adalah sebesar 0,8040 Wb



Gambar 4.3 Kecepatan motor induksi

Pada penelitian tugas akhir ini nilai dari kecepatan adalah hasil yang dicari. Terlihat dari Gambar 4.3 kecepatan motor induksi

mulai dari 0 sekon hingga 0,35 sekon mengalami kenaikan secara perlahan, dan setelah mengalami kenaikan tersebut kecepatan mengalami keadaan *steady*nya. Pada kecepatan putar motor induksi yang di dapat 157,07 rad/s. Dan kecepatan ini *steady* hingga akhir.

4.2 Hasil *Extended Kalman Filter* (EKF)

Dengan algoritma yang telah dijelaskan pada bab dua. Dengan masukan arus pengukuran dan tegangan maka akan didapatkan estimasi kecepatan dari motor induksi tiga fasa.

Untuk nilai gain *extended Kalman filter* dengan struktur seperti dibawah ini:

$$K = \begin{bmatrix} K11 & K12 \\ K21 & K22 \\ K31 & K32 \\ K41 & K42 \\ K51 & K52 \end{bmatrix}$$

Didapatkan nilai dalam range waktu 0,05 sekon didapatkan nilai gain EKF sebesar :

$$K = \begin{bmatrix} 0,1387 & -0,000005014 \\ -0,000005014 & 0,1387 \\ 0,01508 & -0,003823 \\ 0,003267 & 0,01211 \\ 0,05292 & -0,01392 \end{bmatrix}$$

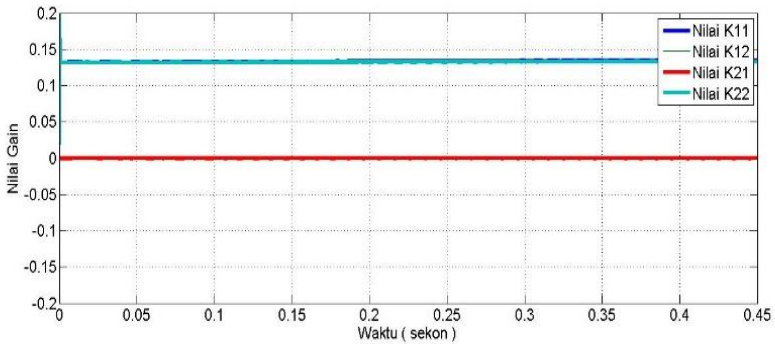
Lalu nilai dalam range waktu 0,25 sekon didapatkan nilai gain EKF sebesar :

$$K = \begin{bmatrix} 0,1389 & -0,00002059 \\ -0,00002059 & 0,1389 \\ 0,003286 & -0,01627 \\ 0,01709 & 0,002987 \\ 0,05268 & -0,02781 \end{bmatrix}$$

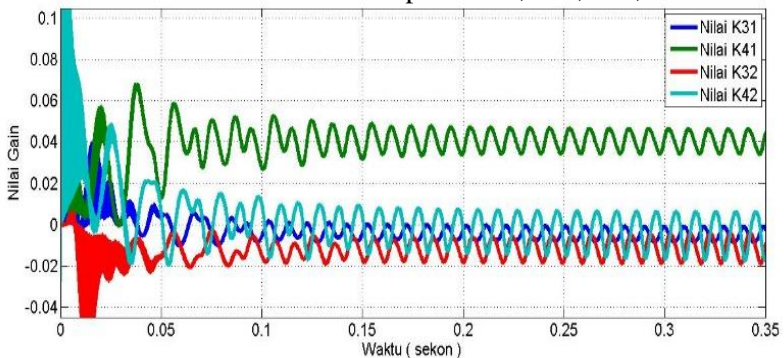
Nilai range dari waktu 1 sekon

$$K = \begin{bmatrix} 0,1344 & -0,0002607 \\ -0,0002607 & 0,1344 \\ -0,002107 & -0,009621 \\ 0,04446 & -0,01773 \\ 0,06439 & 3,676 \end{bmatrix}$$

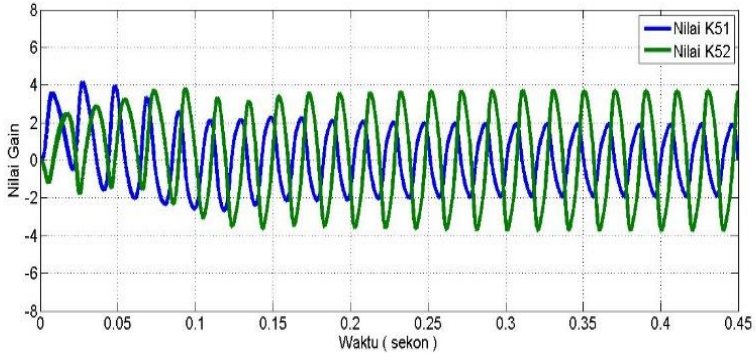
Sehingga saat diplot dalam grafik pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.6



Gambar 4.4 Gain EKF pada K11,K12,K21,K22

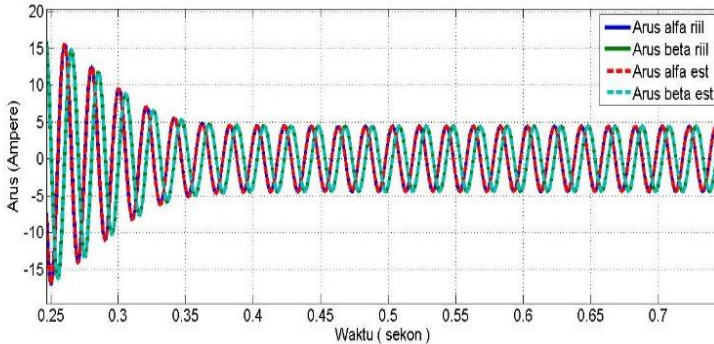


Gambar 4.5 Gain EKF pada K31,K41,K32,K42



Gambar 4. 6 Gain EKF pada K51,K52

Hasil dari estimasi *extended Kalman filter* dapat dilihat dari Gambar 4.7 hingga Gambar 4.9.

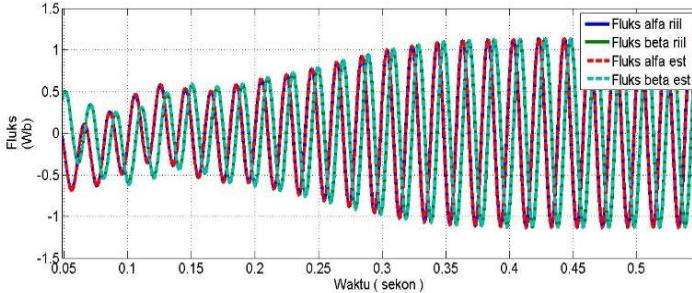


Gambar 4.7 Arus hasil motor induksi dan EKF

Extended Kalman filter harus memiliki error kurang dari 0,5% agar dapat dikatakan sebagai estimator yang baik, semakin kecil error yang didapat semakin baik hasil estimasi. Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa hasil arus dari motor induksi dan hasil arus dari *extended Kalman filter* dapat mengikuti fasanya. Arus estimasi keduanya mengalami keadaan *steady* pada waktu setelah 0,35 detik. Dalam waktu 0,35 detik didapatkan nilai arus rms nya adalah 3,11 ampere untuk hasil pemodelan, sedangkan untuk nilai estimasi didapatkan nilai arus rms sebesar 3,10 ampere, sehingga didapatkan perbedaan sebesar 0,01 dengan nilai pemodelan plant. Jadi didapatkan error sebesar 0,3%.

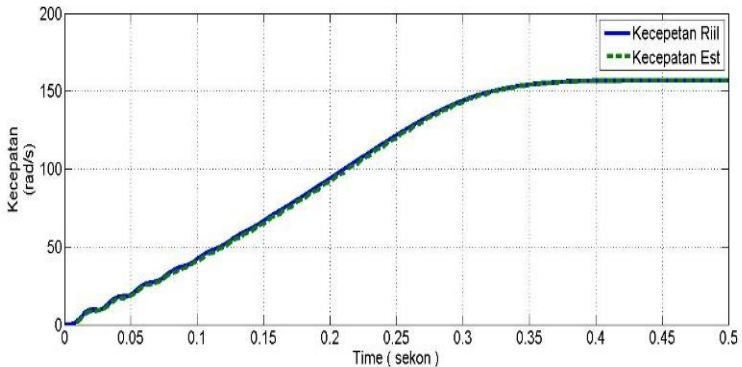
Pada *extended Kalman filter* dan juga pemodelan motor induksi state selanjutnya adalah fluks pada sumbu α, β yang terdapat pada state ke 3 dan 4. Pada Gambar 4.8 dapat dilihat perbandingan nilai antara hasil output motor induksi dengan estimasi yang dihasilkan oleh *extended Kalman filter* sudah dalam keadaan yang berkesesuaian fasanya. Nilai estimasi *extended Kalman filter* dapat mengikuti perubahan fluks. Pada waktu 0 detik hingga 0,35 detik dapat dilihat nilai fluks baik dari motor induksi ataupun dari estimasi EKF, keadaan fluks masih mengalami perubahan nilai, hingga pada waktu setelah detik ke 0,35 detik. Setelah waktu 0,35 detik dapat dilihat bahwa nilai

Fluks yang didapat dalam sumbu α , dan sumbu β dari estimasi EKF fluks rmsnya adalah sebesar 0,8044 Wb. Sehingga didapatkan perbedaan 0,0004 dengan pemodelan *plant*. Dan didapatkan error 0,04%. Perbedaan tidak nampak pada grafik, karena nilainya yang sangat kecil, sehingga diperlukan pembesaran untuk melihatnya. Dikarenakan nilai perbedaan yang sangat kecil, maka *extended Kalman filter* masih mampu mengestimasi nilai arus, fluks dan kecepatan motor induksi dengan baik.



Gambar 4.8 Fluks hasil motor induksi dan sstimasi EKF

Sensorless kecepatan pada motor induksi adalah tujuan dari penelitian tugas akhir ini, dengan menggantikan keberadaan sensor menggunakan algoritma softsensor. Pada tugas akhir ini algoritma softsensor yang digunakan adalah *extended Kalman filter*. Dengan masukan tegangan dan arus pengukuran, akan didapatkan nilai kecepatan yang ada pada motor induksi.



Gambar 4.9 Kecepatan motor induksi dan EKF

Pada Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa nilai kecepatan yang dihasilkan oleh pemodelan motor induksi dan nilai estimasi kecepatan yang dihasilkan oleh *extended Kalman filter* sama. Nilai yang didapat adalah 157,07 rad/s.

4.3 Validasi Observer *Extended Kalman Filter* (EKF)

Validasi pemodelan motor induksi dilakukan dengan membandingkan hasil dari pemodelan motor induksi, observer *extended kalman filter* dan juga hasil pengukuran di PT.Inka menggunakan metode pengujian tanpa beban, dengan hasil yang tertera pada Tabel. 4.1

Dapat dilihat pada tabel bila dibandingkan kecepatan motor induksi dari pemodelan, dan kecepatan motor induksi hasil *extended Kalman filter* dengan kecepatan motor induksi pada tachometer didapatkan hasil error rata-rata sebesar 0.1%.

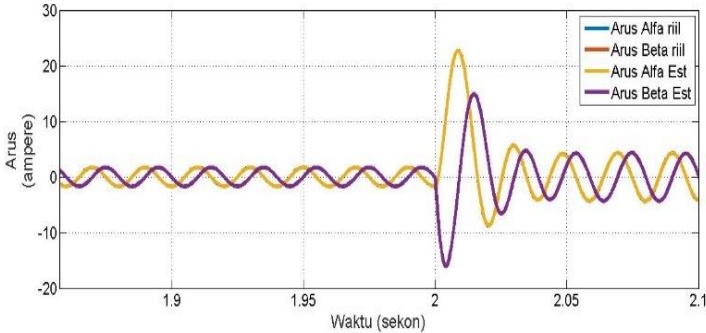
Tabel 4.1 Validasi pemodelan *extended Kalman filter* dengan alat ukur tachometer

Tegangan (Volt)	Kecepatan motor induksi Pengukuran tachometer (rad/s)	Kecepatan hasil pemodelan motor induksi (rad/s)	Kecepatan hasil extended Kalman filter motor induksi (rad/s)	Error pemodelan terhadap pengukuran %	Error EKF terhadap pengukuran %
378	157,314	157,07	157,07	0,155104	0,155104
296	157	157,07	157,07	0,04496	0,04496
263	156,895	157,07	157,07	0,11133	0,11133
226	156,790	157	157	0,111346	0,111346
Rata-rata error hasil estimasi dengan pengukuran				0,105682	0,105682

4.4 Pemodelan Dengan Perubahan Tegangan dan Frekuensi

Untuk mengetahui performansi dari pemodelan *extended Kalman filter* dapat dilakukan dengan *switch* inputan yang masuk pada pemodelan *extended Kalman filter*. *Extended Kalman filter* dikatakan baik bila dapat ngikuti perubahan dengan waktu yang cepat dan error yang kurang dari 0,5%. Variasi ini dilakukan pada dua inputan yang berbeda. Pertama pada tegangan 226 volt dan 380volt dan dengan frekuensi 40 Hz menjadi 50 Hz. Respon tersebut di gambarkan pada Gambar 4.10 hingga Gambar 4.15.

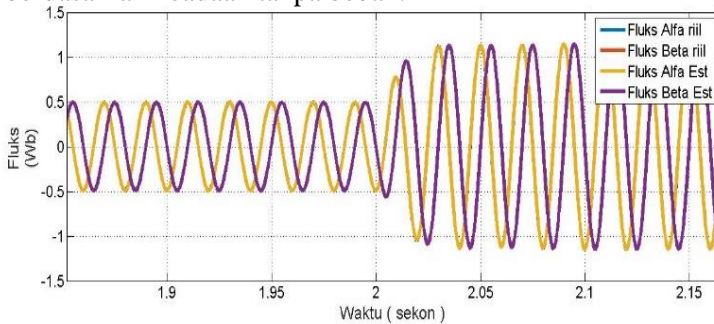
Pada Gambar 4.10 dapat dilihat arus saat diberikan variasi tegangan dimana perubahan tegangan mempengaruhi nilai arus yang terjadi. Saat 226 volt didapatkan nilai estimasi arus rms sebesar 2 ampere, dan saat 380 didapatkan nilai estimasi arus rms sebesar 3,1 ampere.



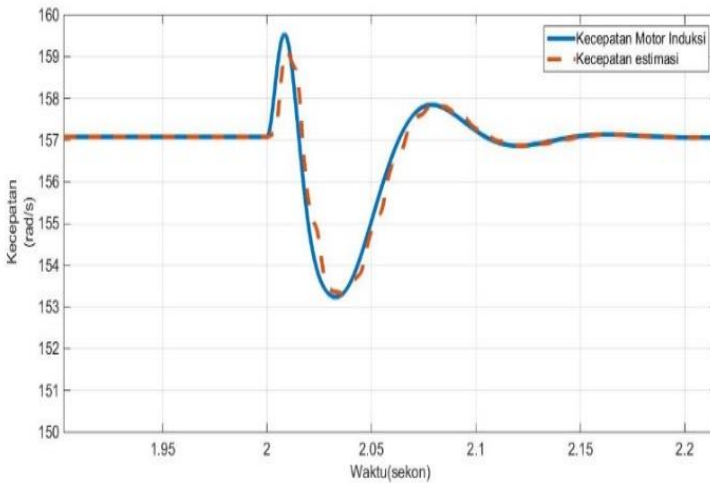
Gambar 4.10 Arus saat variasi tegangan

Pada Gambar 4.11 adalah perubahan fluks yang terjadi yaitu saat 226 volt didapatkan bahwa nilai estimasi fluks rms sebesar 0,4 Wb dan saat pada tegangan 380 volt didapatkan nilai estimasi fluks rms sebesar 0,8044 Wb.

Dari pengamatan pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa kecepatan estimasi dari *extended Kalman filter* dapat mengikuti perubahan kecepatan, yang diakibatkan oleh perubahan tegangan. Perubahan kecepatan tidak terlihat signifikan karena pengukuran berdasarkan keadaan tanpa beban.



Gambar 4.11 Fluks saat variasi tegangan

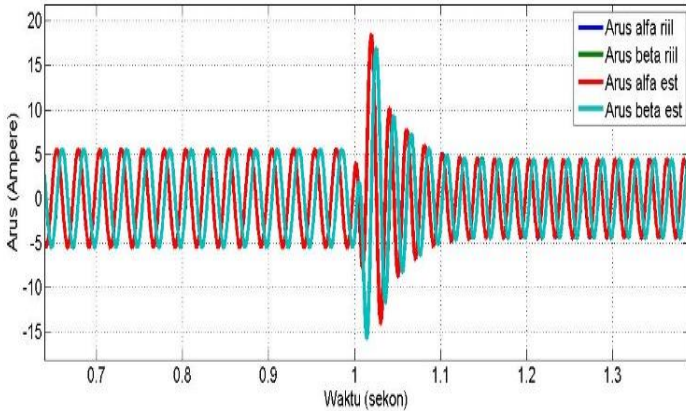


Gambar 4.12 Perubahan respon kecepatan saat terjadi perubahan tegangan

Pada Gambar 4.12 adalah hasil dari pembacaan kecepatan motor induksi dan kecepatan estimasi dari *extended Kalman filter*, dengan pada keadaan awal diberikan tegangan sebesar 226 volt, ketika pada tegangan 226 volt didapatkan nilai kecepatan 157.07 rad/s. Lalu selanjutnya diberikan tegangan input sebesar 380 volt, dengan dapat dilihat perubahan antara 226 volt menjadi 380 volt terjadi pada detik ke 2 sekon. Kecepatan akan kembali tidak stabil lagi karena pembacaan dimulai dari awal kembali, lalu akan perlahan mengalami *steady*, setelah itu akan didapatkan kecepatan pada tegangan 380 Volt sebesar 157,07 rad/s. Kecepatan akan kembali tidak stabil lagi karena pembacaan dimulai dari awal kembali, lalu akan perlahan mengalami *steady*, setelah itu akan di dapatkan kecepatan pada tegangan 380 Volt sebesar 157,07 rad/s.

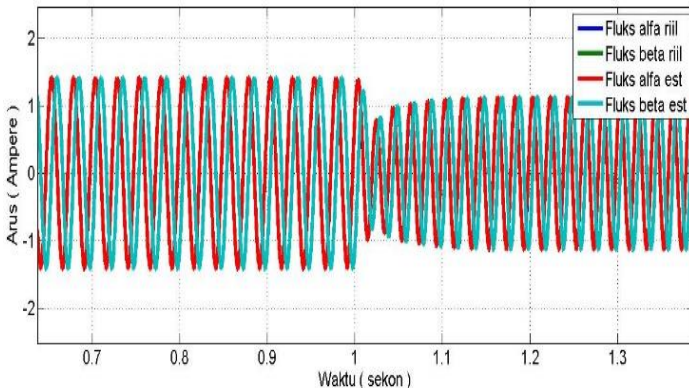
Selanjutnya adalah variasi frekuensi. Pada parameter motor induksi yang digunakan tertulis bahwa frekuensi dapat berkerja. Pada 50 Hz, pada pengujian kerja dari motor induksi ini diberikan juga frekuensi 40 Hz, sehingga akan terlihat kemampuan dari *extended Kalman filter* untuk mengestimasi. Perubahan yang terjadi pada nilai estimasi arus, fluks dan kecepatan dapat dilihat

pada Gambar 4.13 hingga Gambar 4.15 bahwa hasil estimasi dapat mengikuti perubahan yang terjadi.



Gambar 4.13 Arus variasi frekuensi

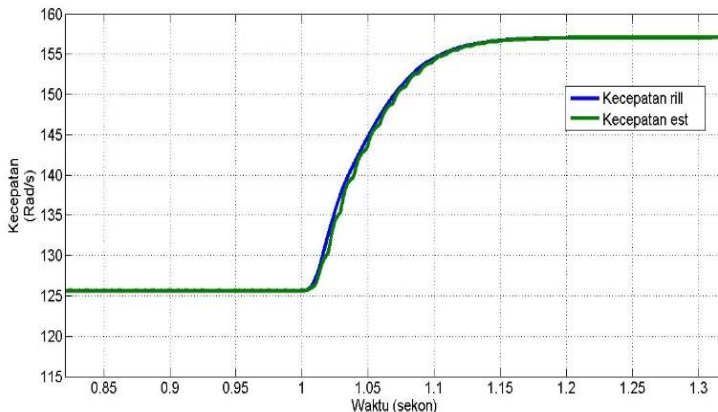
Pada Gambar 4.13 dapat dilihat apabila frekuensi diubah maka akan mempengaruhi nilai arus. Saat variasi 40 Hz didapatkan nilai estimasi arus rms sebesar 3,9 ampere. Dan saat variasi 50 Hz didapatkan nilai estimasi arus rms sebesar 3,10 ampere.



Gambar 4.14 Fluks variasi frekuensi

Pada Gambar 4.14 dapat dilihat perubahan fluks yang terjadi akibat adanya perubahan frekuensi. Didapatkan nilai fluks rms saat 40 Hz sebesar 1,01 Wb, dan saat 50 Hz didapatkan nilai estimasi rms sebesar 0,8044 Wb.

Pada Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa *extended Kalman filter* dapat mengikuti perubahan step frekuensi yang diberikan, pada saat 40 Hz didapatkan estimasi kecepatan 125,6 rad/s dan naik ketika diberikan frekuensi 50 Hz menjadi 157,07 rad/s, sehingga dapat dikatakan bahwa *extended Kalman filter* adalah metode yang baik untuk mengestimasi kecepatan motor induksi



Gambar 4.15 Perubahan kecepatan saat ada perubahan frekuensi

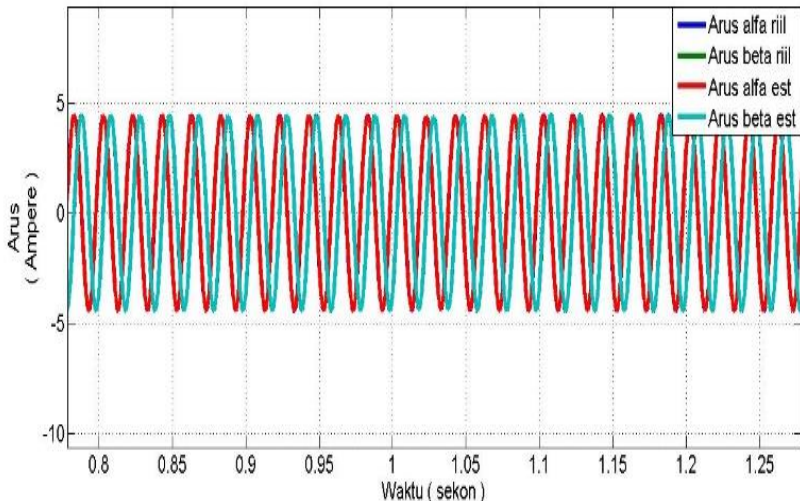
4.5 Pemodelan Dengan Adanya Torsi Beban

Untuk mengetahui performansi dari *extended Kalman filter* yang terpengaruhi oleh torsi beban, maka pada pemodelan ini akan diberikan torsi beban sebesar 1 Nm, 3 Nm dan 6 Nm. Torsi beban yang pertama diberikan adalah 1 Nm. Yang hasilnya akan ditampilkan pada Gambar 4.16 hingga Gambar 4.18.

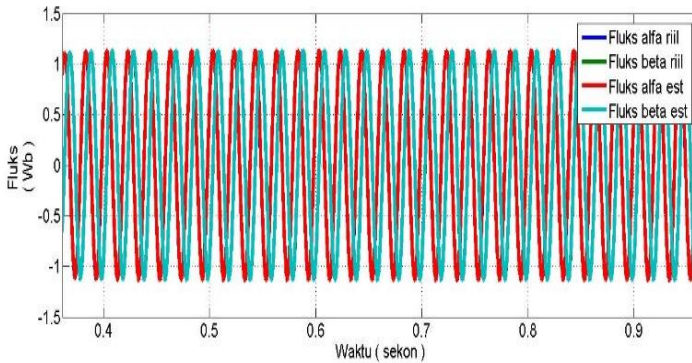
Pada Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa pada interval waktu 0,8 sekon hingga 1 sekon adalah keadaan yang diberikan saat tanpa beban. Setelah waktu 1 sekon adalah arus yang terjadi saat terdapat beban sebesar 1 Nm. Dapat dilihat pada Gambar 4.16 saat pemberian beban sebesar 1 Nm didapatkan nilai estimasi arus rms *extended kalman filter*nya sebesar 3,1 Ampere.

Selanjutnya adalah nilai state ke tiga dan keempat yaitu adalah nilai rms dari fluks baik pada sumbu alfa dan sumbu beta. Hasil fluks pada pemberian torsi beban ini dapat dilihat pada Gambar 4.17. Pada Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa saat diberikan torsi beban sebesar 1 Nm akan terdapat perbedaan fluks, yaitu nilai fluks akan semakin menurun, namun pada pemberian torsi beban 1 Nm perubahan yang terjadi kecil. Sehingga pada saat diberi torsi beban 1 Nm akan mendapatkan nilai fluks rms nya pada extended Kalman filter didapatkan nilai estimasi fluks rms sebesar 0,79 Wb.

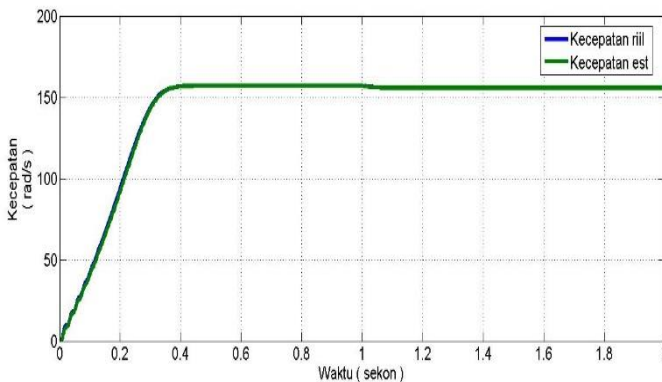
Pada Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa nilai estimasi kecepatan dari *extended Kalman* filter didapatkan 155,89 rad/s, sehingga didapatkan nilai estimasi error sebesar 0,04% . Dari Gambar 4.16 hingga Gambar 4.18 dapat dilihat bahwa pada saat diberikan variasi torsi beban sebesar 1 Nm, perubahan yang terjadi baik pada nilai arus, nilai fluks dan nilai kecepatan tidak terlalu besar, dikarenakan torsi beban sebesar 1 Nm masih dianggap terlalu kecil untuk jenis motor induksi yang digunakan pada tugas akhir ini.



Gambar 4.16 Perubahan arus dengan beban 1 Nm



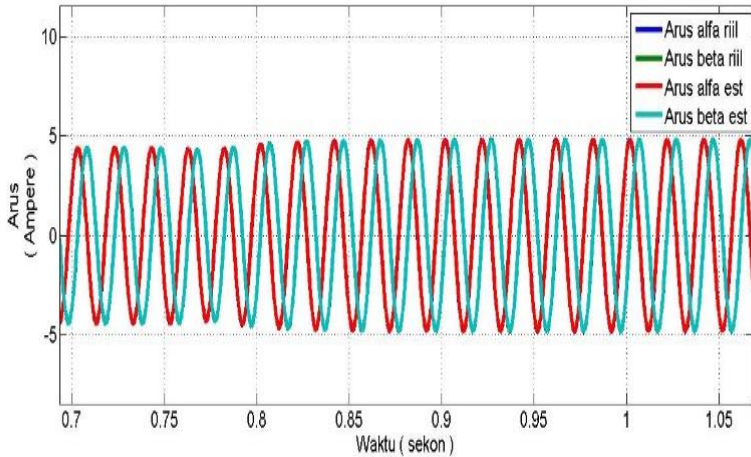
Gambar 4.17 Perubahan fluks dengan beban 1 Nm



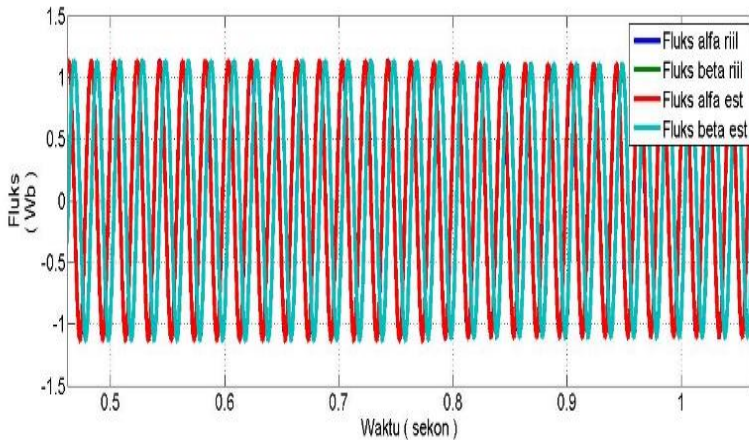
Gambar 4.18 Kecepatan saat torsi beban 1 Nm

Selanjutnya diberikan variasi torsi beban yang kedua adalah torsi beban sebesar 3 Nm. Akan dijelaskan pada Gambar 4.19 hingga Gambar 4.21.

Pada Gambar 4.19 dapat dilihat pada saat hingga 0,75 sekon adalah keadaan tanpa beban, namun setelah 0,75 sekon adalah keadaan dengan pemberian beban 3 Nm. Pemberian beban ini mempengaruhi nilai arus, dapat dilihat bahwa terjadi perubahan arus setelah 0,75 sekon. Nilai arus estimasi rms yang didapat pada saat pemberian beban 3 Nm adalah sebesar 3,4 ampere. Pada pemberian beban 3 Nm ini pada grafik sudah terlihat dengan jelas bila adanya pengaruh pemberian beban.



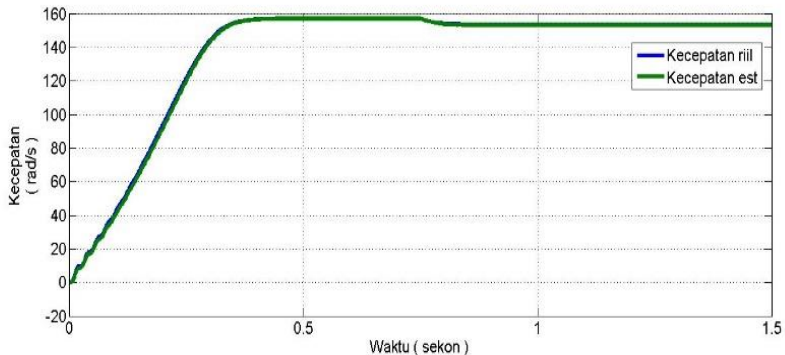
Gambar 4.19 Perubahan arus dengan torsi beban 3 Nm



Gambar 4.20 Perubahan fluks saat diberi torsi beban 3 Nm

Pada Gambar 4.20 dapat dilihat bahwa nilai fluks rmsnya setelah 0,75 sekon saat diberi beban 3 Nm, didapatkan nilai estimasi fluks rms sebesar 0,78 Wb. Pada Gambar 4.21 setelah diberikan beban sebesar 3 Nm terjadi perubahan saat 0,75 sekon dimana nilai kecepatan estimasi tanpa beban sebesar 157,07 rad/s

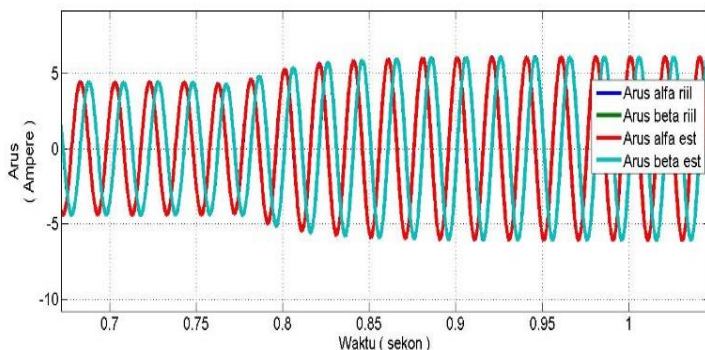
berubah menjadi kecepatan estimasi 153,4 rad/s, dengan error sebesar 0,1%, karena adanya pemberian torsi beban pada inputan.



Gambar 4.21 Perubahan kecepatan saat diberi torsi beban 3 Nm

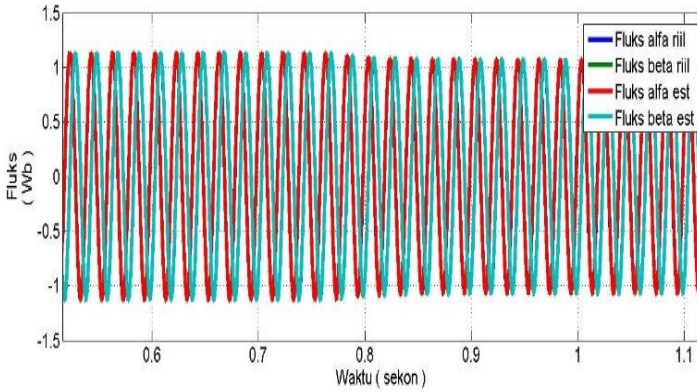
Berikutnya adalah pemberian torsi beban sebesar 6 Nm. Perubahan arus, fluks dan kecepatan akan ditunjukkan pada Gambar 4.22 hingga 4.24.

Pada Gambar 4.22 keadaan dengan memberikan beban sebesar 6 Nm pada waktu setelah 0,75 sekon, dapat dilihat bahwa pemberian torsi beban sebesar 6 Nm mempengaruhi perubahan



Gambar 4.22 Perubahan arus saat pemberian torsi beban 6 Nm

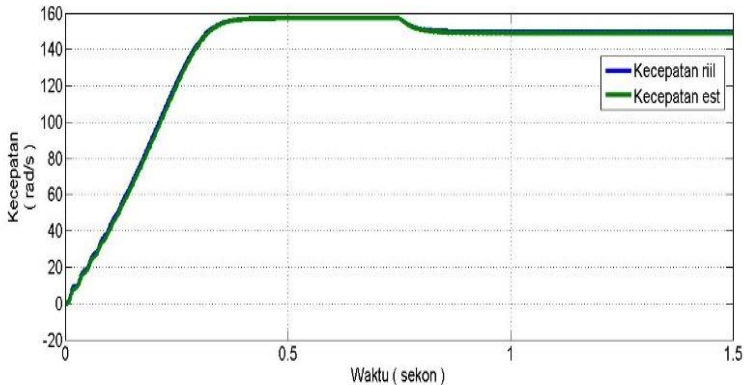
Pada Gambar 4.22 yang menunjukkan bahwa saat pemberian beban 6 Nm maka arus akan menghasilkan nilai estimasi arus rms sebesar 4,35 ampere.



Gambar 4.23 Perubahan fluks pada saat diberi torsi beban 6 Nm

Pada Gambar 4.23 menunjukkan perubahan fluks setelah 0,75 sekon keadaan telah diberi beban sebesar 6 Nm sehingga nilai estimasi fluks rmsnya menjadi 0,76 Wb.

Pada pemberian torsi beban 6 Nm didapatkan nilai kecepatan berubah sebesar 149,2 rad/s dan didapatkan error sebesar 0,2%. Yang tertera pada Gambar 4.24



Gambar 4.24 Kecepatan saat torsi beban 6 Nm

Sehingga dari pemodelan torsi beban, pada torsi beban 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm dapat disimpulkan bahwa semakin besar penambahan torsi beban yang diberikan, maka akan berbanding lurus dengan

nilai arus yang terjadi, baik pada sumbu alfa dan sumbu beta. Untuk perubahan fluks dan kecepatan, berbanding terbalik dengan besar torsi beban, semakin besar torsi beban yang diberikan maka akan semakin kecil nilai fluks. Namun semakin besar torsi yang diberikan akan menyebabkan terjadinya error estimasi kecepatan.

Dengan error yang terjadi masih dibawah 0,5%, *extended Kalman filter* dapat dikatakan masih bisa untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi dengan baik. Contoh penggunaan algoritma *extended Kalman filter* diaplikasikan pada controller VVVF (*Variable Voltage Variable Frequency*) kereta api, sebagai pengganti sensor kecepatan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan dari tugas akhir mengenai perancangan *extended Kalman filter* untuk *speed sensorless induction motor* adalah :

- a. Dengan pemberian nilai Q dan nilai R yang telah dijelaskan pada bab dua dan bab tiga, maka *extended Kalman filter* dalam keadaan tanpa beban, mendapatkan error rata-rata antara hasil estimasi dan pengukuran pada motor induksi PT.Inka (persero) sebesar 0,1%. Pada variasi pemberian beban didapatkan error sebesar 0,2%. Karena dari error yang didapat kurang dari 0,5% maka *extended Kalman filter* masih mampu mengestimasi kecepatan dengan baik.
- b. Pada tugas akhir ini didapatkan bahwa
 - Dari estimasi *extended kalman filter* didapatkan nilai arus rms sebesar 3,10 ampere, nilai fluks rms adalah 0,8044 Wb dan nilai dari kecepatan didapatkan 157,07 rad/s.
 - Hasil estimasi kecepatan *extended Kalman filter* apabila dibandingkan dengan hasil pengukuran di PT.Inka(persero), didapatkan error sebesar 0,1 %.
 - Dari hasil variasi tegangan, yang dilakukan pada tegangan 226 volt menjadi 380 volt didapatkan bahwa perubahan tegangan tidak mempengaruhi nilai kecepatan, dan estimasi dari *extended Kalman filter* dapat mengikuti perubahan yang terjadi saat diberikan perubahan.
 - Dari hasil variasi frekuensi yang dilakukan pada frekuensi 40 Hz didapatkan nilai estimasi kecepatan sebesar 125,6 rad/s dan pada saat 50Hz didapatkan nilai estimasi kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Kedua estimasi kecepatan hasilnya sama dengan nilai estimasi kecepatan yang didapatkan pada simulasi *plant*.

- c. Dari variasi torsi beban sebesar 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm. Didapatkan error yang paling besar terdapat pada variasi torsi beban 6 Nm, yaitu sebesar 0,2%. Karena error masih dibawah 0,5% maka *extended Kalman filter* masih mampu untuk mengestimasi kecepatan.

5.2 Saran

Berdasarkan tugas akhir yang telah dilakukan, terdapat saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut :

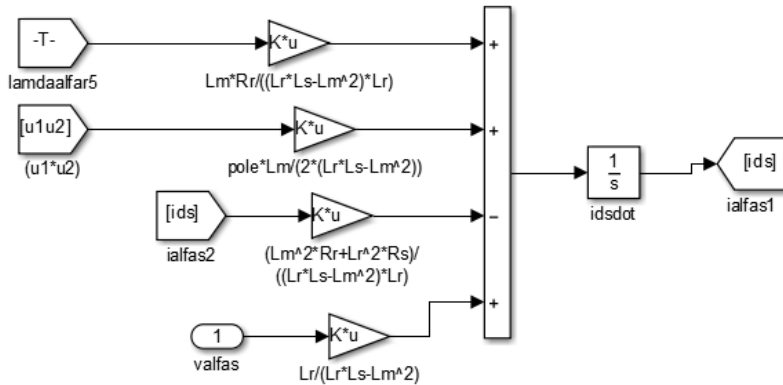
- a. Bila menggunakan *extended Kalman filter* untuk penelitian selanjutnya perlu diperhatikan baik-baik tentang transformasi yang digunakan.
- b. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan estimasi *extended Kalman filter* dengan menggunakan torsi beban yang terdapat controller untuk membuat hasil respon lebih baik.
- c. Untuk penelitian selanjutnya, sebaiknya nilai matriks kovarian bisa diatur secara otomatis nilainya, sehingga saat parameter-parameter motor induksi diubah, nilai matriks kovariannya dapat mengikuti dan menyesuaikan dengan perubahan yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

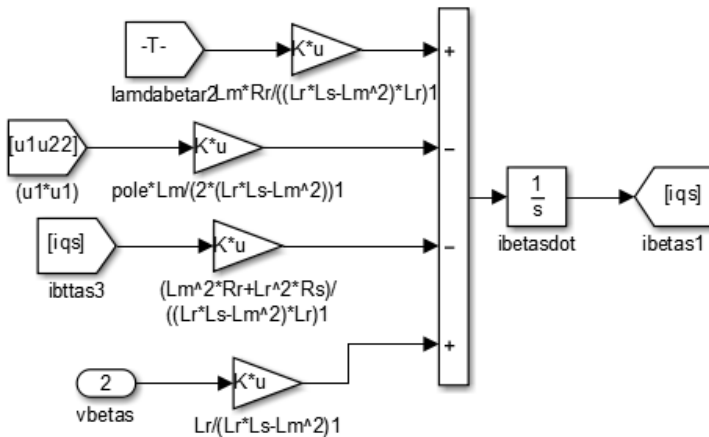
- Allaoui, S., Chafaa, K., Laamari, Y., & Athamena, B. (2015). Induction Motor State Estimation using Tuned Extended Kalman Filter.
- Anonim. (n.d.). Coordinate Transform in Motor Control. Cypress.
- Barrau, A. (2015, September 15). Non-linear state error based extended Kalman filters Non-linear state error based extended Kalman filters.
- C, M., F, P., & M, T. (n.d.). A Comparative Study of Rotor Flux Estimation in Induction Motor with a Nonlinear Observer and the Extended Kalman Filter.
- Chan, T. F., & Shi, K. (2011). *Applied Intelligent Control Of Motor Induction Motor Drive*. IEEE Press.
- Cypress.com. (n.d.). Coordinat Transform In Motor Control. www.cypress.com.
- Deshmukh, K., Bansal, K., & Killedar, A. (2017, January). Theory and Analysis of Three Phase Induction Motor using Written Pole Technology.
- Dyrcz, K., & Orłowaska, K. (2002). Influence of Kalman Filter Parameters to The Induction Motor Speed Estimation. 4.
- Gustianto, N. (2001). Pengoprasian "Restarting" Motor Induksi Tanpa Sensor Kecepatan Menggunakan Metode " Speed Adaptive Observer".
- Ibarra, R., Morenob, S., & Espinosa P, E. (2004). *Global observability analysis of sensorless induction motors*, 140.
- K.L, S., T.F, C., Y.K, W., & S.L, H. (2002, February 1). Estimation of an Induction Motor Drive Using an Optimized Extended Kalman Filter. 49.
- Meise, J. (1966). *Principles of electromechanical energy conversion*. New York.
- Meziane, S., Toufouti, R., & Benalla, H. (2008). Nonlinear Control of Induction Machines Using an Extended Kalman Filter. 5.
- Orłowaska, K., Wojsznis, P., & Kowalski, C. (n.d.). Comparative study of different flux estimators for sensorless induction motor drive," Archives of Electrical Engineering. 49.

- Orlowska, K., Wonjsznis, P., & Kowalski, C. (n.d.). Comparative study of different flux estimators for sensorless induction motor drive. 49.
- Rojas, S. I., Moreno, J., & Perez, G. E. (2003, March 21). Global observability analysis of sensorless induction motors.
- S, K., V, S., & G.devi. (n.d.). A Complete Analysis of the Performance of Extended Kalman Filter for the State Estimation of Three Phase Induction Motor on a Simulated Machine Model.
- S, M., R, T., & H, B. (2008). Nonlinear Control of Induction Machines Using an Extended Kalman Filter. 5.
- Shi, K., Wong, Y., & Ho, S. (2002, February 1). Speed Estimation of an Induction Motor Drive Using an Optimized Extended Kalman Filter.
- So, R. (2015). Extended Kalman Filter Simulink Model for Nonlinear System Modeling.
- So, R. (2015, June). Extended Kalman Filter Simulink Model for Nonlinear System Modeling.
- Tiwari, V., Das, S., & Pal, A. (2017). Sensorless Speed Control of Induction Motor Drive Using Extended Kalman Filter Observer.
- Usta, M., Akyazi, O., & Akpınar, S. (2012). Simulation of Direct Thrust Control for Linear Induction Motor Including End-Effect.

PEMODELAN MOTOR INDUKSI PERSAMAAN ARUS ALFA

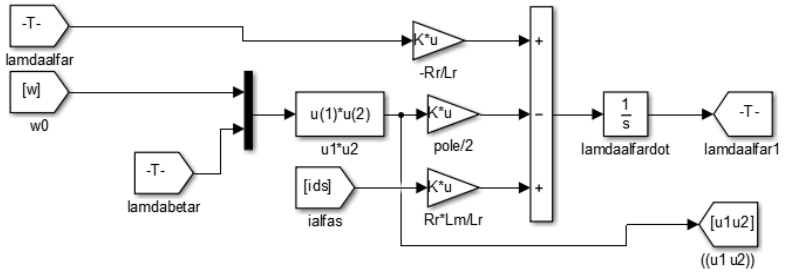


PEMODELAN MOTOR INDUKSI PERSAMAAN ARUS BETA



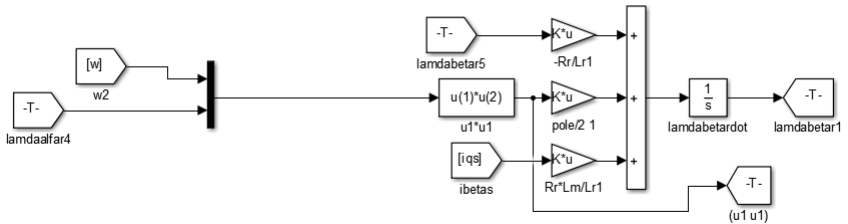
PEMODELAN MOTOR INDUKSI PERSAMAAN FLUKS

ALFA



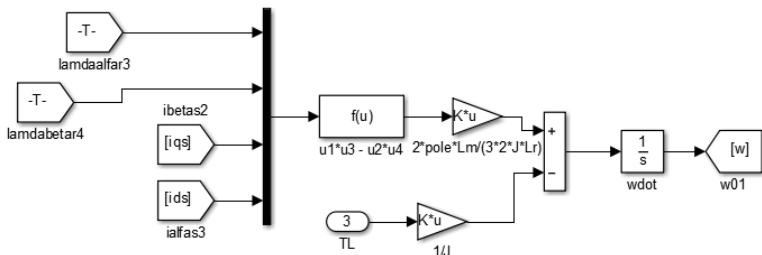
PEMODELAN MOTOR INDUKSI PERSAMAAN FLUKS

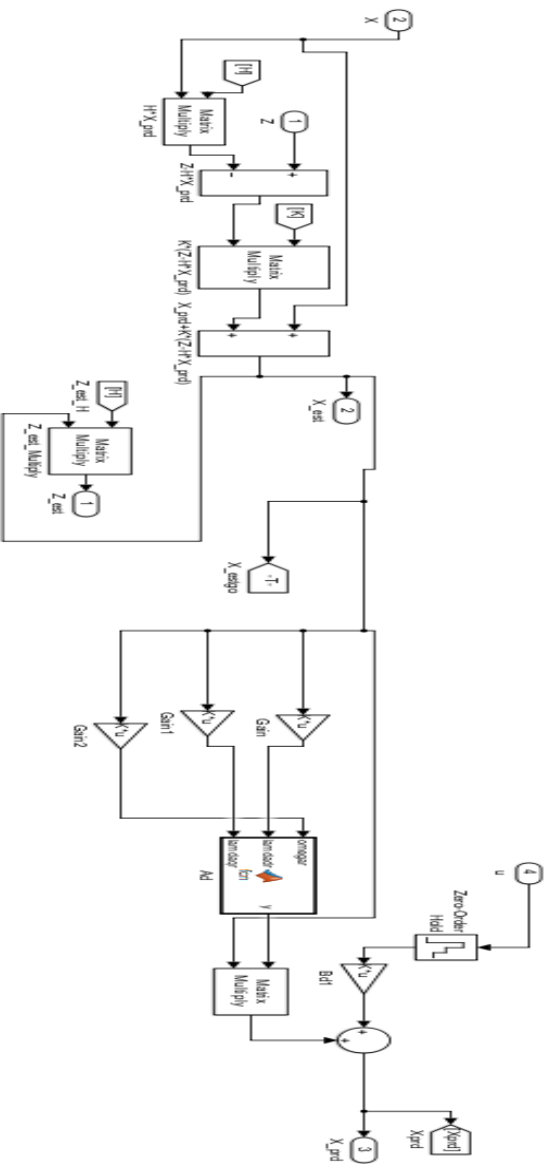
BETA



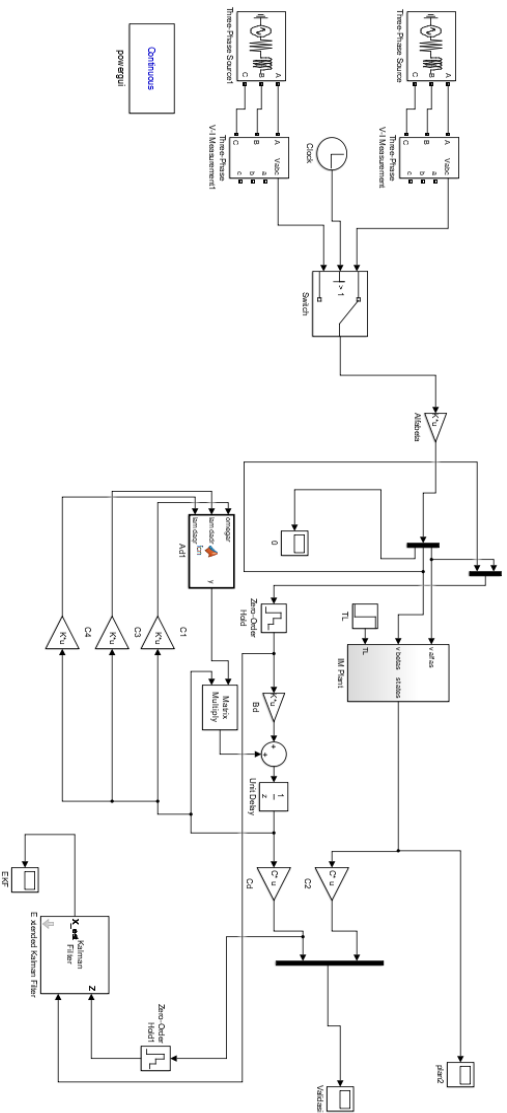
PEMODELAN MOTOR INDUKSI PERSAMAAN

KECEPATAN





PEMODELAN EXTENDED KALMAN FILTER PADA PREDIKSI STATE DAN ESTIMASI STATE



SIMULINK MATLAB R2014a KESELURUHAN SISTEM FUNGSI STEP

LAMPIRAN B

LISTING PROGRAM MATLAB R2014A m.file SISTEM MOTOR INDUKSI DAN EXTENDED KALMAN FILTER

```
Lm = 0.258;
Ls = 0.274;
Lr = 0.274;
Rr = 3.805;
Rs = 4.85;
pole = 4;
J = 0.031;
Ts = 0.000001;
Tr = Lr/Rr;
tho = 1-(Lm^2/(Lr*Ls));
Q = [ 2*10e-4 0 0 0 0; 0 2*10e-4 0 0 0; 0 0 2*10e-6 0 0; 0 0 0
2*10e-5 0; 0 0 0 0 1];
P = [ 1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0; 0 0 1 0 0; 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 1];
H=[ 1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0];
R =[0.1 0; 0 0.1];

lamdaqr=0;
omegar=0;
lamdadr =0;

a1 = (Lm^2*Rr+Lr^2*Rs)/(tho*Ls*Lr^2);
a2 = Lm*Rr/(tho*Ls*Lr^2);
a3 = pole*Lm/(2*tho*Ls*Lr);
a4 = Lm*Rr/Lr ;
a5 = Rr/Lr;
a6 = 2*pole*Lm/(3*2*J*Lr);
```

```

y = [-a1 0 a2 a3*omegar 0; 0 -a1 -a3*omegar a2 0; a4 0 -
a5 -pole*omegar/2 0; 0 a4 Pole*omegar/2 -a5 0;-a6*lamdaqr
a6*lamdadr 0 0 0];

```

```

n= length(A);

```

```

B = [ 1/(tho*Ls) 0; 0 1/(tho*Ls); 0 0; 0 0; 0 0];

```

```

C = [1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0];

```

LAMPIRAN C

LISTING PROGRAM MATLAB R2014A m.file DISKRIT SISTEM MOTOR INDUKSI DAN EXTENDED KALMAN FILTER

```
function y = fcn(omegar,lamdadr,lamdaqr)
%#codegen

Lm = 0.258;
Ls = 0.274;
Lr = 0.274;
Rr = 3.805;
Rs = 4.85;Tr = Lr/Rr;
J = 0.031;
tho = 1-(Lm^2/(Lr*Ls));
Ts = 0.000001;
Ki= tho*Ls;
Kr= (Rs*Lr^2 + Lm^2*Rr)/(Lr^2);
pole = 4;

a1 = (Lm^2*Rr+Lr^2*Rs)/(tho*Ls*Lr^2);
a2 = Lm*Rr/(tho*Ls*Lr^2);
a3 = pole*Lm/(2*tho*Ls*Lr);
a4 = Lm*Rr/Lr ;
a5 = Rr/Lr;
a6 = 2*pole*Lm/(3*2*J*Lr);

y = eye(5) + Ts*[-a1 0 a2 a3*omegar 0;
0 -a1 -a3*omegar a2 0;
a4 0 -a5 -pole*omegar/2 0;
0 a4 pole*omegar/2 -a5 0;
-a6*lamdaqr a6*lamdadr 0 0 0];
```

LAMPIRAN D
LISTING PROGRAM MATLAB R2014A m.file NON
LINIER SISTEM MOTOR INDUKSI DAN EXTENDED
KALMAN FILTER

```
function y = fcn(ids,iqs,lamdadr, lamdaqr, omegar)
```

```
%#codegen
```

```
Lm = 0.258;
```

```
Ls = 0.274;
```

```
Lr = 0.274;
```

```
Rr = 3.805;
```

```
Rs = 4.85;
```

```
J = 0.031;
```

```
pole = 4;
```

```
Ts = 0.000001;
```

```
Tr = Lr/Rr;
```

```
tho = 1-(Lm^2/(Lr*Ls));
```

```
F1 = 1-(Ts*((Rs/(tho*Ls))+(1-tho/(tho*Tr))));
```

```
F2 = Lm*Ts/(tho*Lr*Ls*Tr);
```

```
F3 = pole*Lm*Ts/(2*tho*Lr*Ls);
```

```
F4 = (Lm*Ts)/(Tr);
```

```
F5 = 1-(Ts/(Tr));
```

```
F6 = 2*pole*Lm*Ts/(3*2*J*Lr);
```

```
F_1= [F1 0 F2 F3*omegar F3*lamdaqr;
```

```
0 F1 -F3*omegar F2 -F3*lamdadr;
```

```
F4 0 F5 -Ts*omegar*pole/2 -Ts*lamdaqr;
```

```
0 F4 Ts*omegar*pole/2 F5 Ts*lamdadr;
```

```
-F6*lamdaqr F6*lamdadr F6*iqs-F6*ids 1];
```

```
y = F_1;
```

LAMPIRAN E
LISTING PROGRAM MATLAB R2014A m.file SISTEM
MOTOR INDUKSI DAN EXTENDED KALMAN FILTER
DENGAN VARIASI BEBAN

```

Lm = 0.258;
Ls = 0.274;
Lr = 0.274;
Rr = 3.805;
Rs = 4.85;
pole = 4;
J = 0.031;
Ts = 0.000001;
Tr = Lr/Rr;
tho = 1-(Lm^2/(Lr*Ls));
Q = [ 2*10e-4 0 0 0 0; 0 2*10e-4 0 0 0; 0 0 2*10e-6 0 0; 0 0 0
2*10e-5 0; 0 0 0 0 1];
P = [ 1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0; 0 0 1 0 0; 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 1];
H=[ 1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0];
R =[0.1 0; 0 0.1];
lamdaqr=0;
omegar=0;
lamdadr =0;
a1 = (Lm^2*Rr+Lr^2*Rs)/(tho*Ls*Lr^2);
a2 = Lm*Rr/(tho*Ls*Lr^2);
a3 = pole*Lm/(2*tho*Ls*Lr);
a4 = Lm*Rr/Lr ;
a5 = Rr/Lr;
a6 = 2*pole*Lm/(3*2*J*Lr);
y = [-a1 0 a2 a3*omegar 0; 0 -a1 -a3*omegar a2 0; a4 0 -
a5 -pole*omegar/2 0; 0 a4 Pole*omegar/2 -a5 0;-a6*lamdaqr
a6*lamdadr 0 0 0];
n= length(A);
B = [ 1/(tho*Ls) 0 0; 0 1/(tho*Ls) 0; 0 0 0; 0 0 0; 0 0 -(1/J)];

C = [1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0];

```



WARNING: DRAIN PLUGS PERIODICALLY TO ALLOW

TECO		3-PHASE MOTOR	
INDUSTRIAL		TYPE	
HP	1.5	AM FRAME	57
POWERS	1.5	INSUL.	B
NO.	17	INSUL.	105
NO.	27025	380V	220 V
NO.	018	440 V	380 V
NO.	032	480 V	440 V
NO.	032	575 V	480 V
NO.	032	600 V	575 V
NO.	032	660 V	600 V
NO.	032	720 V	660 V
NO.	032	800 V	720 V
NO.	032	880 V	800 V
NO.	032	960 V	880 V
NO.	032	1000 V	960 V
NO.	032	1100 V	1000 V
NO.	032	1200 V	1100 V
NO.	032	1300 V	1200 V
NO.	032	1400 V	1300 V
NO.	032	1500 V	1400 V
NO.	032	1600 V	1500 V
NO.	032	1700 V	1600 V
NO.	032	1800 V	1700 V
NO.	032	1900 V	1800 V
NO.	032	2000 V	1900 V
NO.	032	2100 V	2000 V
NO.	032	2200 V	2100 V
NO.	032	2300 V	2200 V
NO.	032	2400 V	2300 V
NO.	032	2500 V	2400 V
NO.	032	2600 V	2500 V
NO.	032	2700 V	2600 V
NO.	032	2800 V	2700 V
NO.	032	2900 V	2800 V
NO.	032	3000 V	2900 V
NO.	032	3100 V	3000 V
NO.	032	3200 V	3100 V
NO.	032	3300 V	3200 V
NO.	032	3400 V	3300 V
NO.	032	3500 V	3400 V
NO.	032	3600 V	3500 V
NO.	032	3700 V	3600 V
NO.	032	3800 V	3700 V
NO.	032	3900 V	3800 V
NO.	032	4000 V	3900 V
NO.	032	4100 V	4000 V
NO.	032	4200 V	4100 V
NO.	032	4300 V	4200 V
NO.	032	4400 V	4300 V
NO.	032	4500 V	4400 V
NO.	032	4600 V	4500 V
NO.	032	4700 V	4600 V
NO.	032	4800 V	4700 V
NO.	032	4900 V	4800 V
NO.	032	5000 V	4900 V
NO.	032	5100 V	5000 V
NO.	032	5200 V	5100 V
NO.	032	5300 V	5200 V
NO.	032	5400 V	5300 V
NO.	032	5500 V	5400 V
NO.	032	5600 V	5500 V
NO.	032	5700 V	5600 V
NO.	032	5800 V	5700 V
NO.	032	5900 V	5800 V
NO.	032	6000 V	5900 V
NO.	032	6100 V	6000 V
NO.	032	6200 V	6100 V
NO.	032	6300 V	6200 V
NO.	032	6400 V	6300 V
NO.	032	6500 V	6400 V
NO.	032	6600 V	6500 V
NO.	032	6700 V	6600 V
NO.	032	6800 V	6700 V
NO.	032	6900 V	6800 V
NO.	032	7000 V	6900 V
NO.	032	7100 V	7000 V
NO.	032	7200 V	7100 V
NO.	032	7300 V	7200 V
NO.	032	7400 V	7300 V
NO.	032	7500 V	7400 V
NO.	032	7600 V	7500 V
NO.	032	7700 V	7600 V
NO.	032	7800 V	7700 V
NO.	032	7900 V	7800 V
NO.	032	8000 V	7900 V
NO.	032	8100 V	8000 V
NO.	032	8200 V	8100 V
NO.	032	8300 V	8200 V
NO.	032	8400 V	8300 V
NO.	032	8500 V	8400 V
NO.	032	8600 V	8500 V
NO.	032	8700 V	8600 V
NO.	032	8800 V	8700 V
NO.	032	8900 V	8800 V
NO.	032	9000 V	8900 V
NO.	032	9100 V	9000 V
NO.	032	9200 V	9100 V
NO.	032	9300 V	9200 V
NO.	032	9400 V	9300 V
NO.	032	9500 V	9400 V
NO.	032	9600 V	9500 V
NO.	032	9700 V	9600 V
NO.	032	9800 V	9700 V
NO.	032	9900 V	9800 V
NO.	032	10000 V	9900 V
NO.	032	10100 V	10000 V
NO.	032	10200 V	10100 V
NO.	032	10300 V	10200 V
NO.	032	10400 V	10300 V
NO.	032	10500 V	10400 V
NO.	032	10600 V	10500 V
NO.	032	10700 V	10600 V
NO.	032	10800 V	10700 V
NO.	032	10900 V	10800 V
NO.	032	11000 V	10900 V
NO.	032	11100 V	11000 V
NO.	032	11200 V	11100 V
NO.	032	11300 V	11200 V
NO.	032	11400 V	11300 V
NO.	032	11500 V	11400 V
NO.	032	11600 V	11500 V
NO.	032	11700 V	11600 V
NO.	032	11800 V	11700 V
NO.	032	11900 V	11800 V
NO.	032	12000 V	11900 V
NO.	032	12100 V	12000 V
NO.	032	12200 V	12100 V
NO.	032	12300 V	12200 V
NO.	032	12400 V	12300 V
NO.	032	12500 V	12400 V
NO.	032	12600 V	12500 V
NO.	032	12700 V	12600 V
NO.	032	12800 V	12700 V
NO.	032	12900 V	12800 V
NO.	032	13000 V	12900 V
NO.	032	13100 V	13000 V
NO.	032	13200 V	13100 V
NO.	032	13300 V	13200 V
NO.	032	13400 V	13300 V
NO.	032	13500 V	13400 V
NO.	032	13600 V	13500 V
NO.	032	13700 V	13600 V
NO.	032	13800 V	13700 V
NO.	032	13900 V	13800 V
NO.	032	14000 V	13900 V
NO.	032	14100 V	14000 V
NO.	032	14200 V	14100 V
NO.	032	14300 V	14200 V
NO.	032	14400 V	14300 V
NO.	032	14500 V	14400 V
NO.	032	14600 V	14500 V
NO.	032	14700 V	14600 V
NO.	032	14800 V	14700 V
NO.	032	14900 V	14800 V
NO.	032	15000 V	14900 V
NO.	032	15100 V	15000 V
NO.	032	15200 V	15100 V
NO.	032	15300 V	15200 V
NO.	032	15400 V	15300 V
NO.	032	15500 V	15400 V
NO.	032	15600 V	15500 V
NO.	032	15700 V	15600 V
NO.	032	15800 V	15700 V
NO.	032	15900 V	15800 V
NO.	032	16000 V	15900 V
NO.	032	16100 V	16000 V
NO.	032	16200 V	16100 V
NO.	032	16300 V	16200 V
NO.	032	16400 V	16300 V
NO.	032	16500 V	16400 V
NO.	032	16600 V	16500 V
NO.	032	16700 V	16600 V
NO.	032	16800 V	16700 V
NO.	032	16900 V	16800 V
NO.	032	17000 V	16900 V
NO.	032	17100 V	17000 V
NO.	032	17200 V	17100 V
NO.	032	17300 V	17200 V
NO.	032	17400 V	17300 V
NO.	032	17500 V	17400 V
NO.	032	17600 V	17500 V
NO.	032	17700 V	17600 V
NO.	032	17800 V	17700 V
NO.	032	17900 V	17800 V
NO.	032	18000 V	17900 V
NO.	032	18100 V	18000 V
NO.	032	18200 V	18100 V
NO.	032	18300 V	18200 V
NO.	032	18400 V	18300 V
NO.	032	18500 V	18400 V
NO.	032	18600 V	18500 V
NO.	032	18700 V	18600 V
NO.	032	18800 V	18700 V
NO.	032	18900 V	18800 V
NO.	032	19000 V	18900 V
NO.	032	19100 V	19000 V
NO.	032	19200 V	19100 V
NO.	032	19300 V	19200 V
NO.	032	19400 V	19300 V
NO.	032	19500 V	19400 V
NO.	032	19600 V	19500 V
NO.	032	19700 V	19600 V
NO.	032	19800 V	19700 V
NO.	032	19900 V	19800 V
NO.	032	20000 V	19900 V
NO.	032	20100 V	20000 V
NO.	032	20200 V	20100 V
NO.	032	20300 V	20200 V
NO.	032	20400 V	20300 V
NO.	032	20500 V	20400 V
NO.	032	20600 V	20500 V
NO.	032	20700 V	20600 V
NO.	032	20800 V	20700 V
NO.	032	20900 V	20800 V
NO.	032	21000 V	20900 V
NO.	032	21100 V	21000 V
NO.	032	21200 V	21100 V
NO.	032	21300 V	21200 V
NO.	032	21400 V	21300 V
NO.	032	21500 V	21400 V
NO.	032	21600 V	21500 V
NO.	032	21700 V	21600 V
NO.	032	21800 V	21700 V
NO.	032	21900 V	21800 V
NO.	032	22000 V	21900 V
NO.	032	22100 V	22000 V
NO.	032	22200 V	22100 V
NO.	032	22300 V	22200 V
NO.	032	22400 V	22300 V
NO.	032	22500 V	22400 V
NO.	032	22600 V	22500 V
NO.	032	22700 V	22600 V
NO.	032	22800 V	22700 V
NO.	032	22900 V	22800 V
NO.	032	23000 V	22900 V
NO.	032	23100 V	23000 V
NO.	032	23200 V	23100 V
NO.	032	23300 V	23200 V
NO.	032	23400 V	23300 V
NO.	032	23500 V	23400 V
NO.	032	23600 V	23500 V
NO.	032	23700 V	23600 V
NO.	032	23800 V	23700 V
NO.	032	23900 V	23800 V
NO.	032	24000 V	23900 V
NO.	032	24100 V	24000 V
NO.	032	24200 V	24100 V
NO.	032	24300 V	24200 V
NO.	032	24400 V	24300 V
NO.	032	24500 V	24400 V
NO.	032	24600 V	24500 V
NO.	032	24700 V	24600 V
NO.	032	24800 V	24700 V
NO.	032	24900 V	24800 V
NO.	032	25000 V	24900 V
NO.	032	25100 V	25000 V
NO.	032	25200 V	25100 V
NO.	032	25300 V	25200 V
NO.	032	25400 V	25300 V
NO.	032	25500 V	25400 V
NO.	032	25600 V	25500 V
NO.	032	25700 V	25600 V
NO.	032	25800 V	25700 V
NO.	032	25900 V	25800 V
NO.	032	26000 V	25900 V
NO.	032	26100 V	26000 V
NO.	032	26200 V	26100 V
NO.	032	26300 V	26200 V
NO.	032	26400 V	26300 V
NO.	032	26500 V	26400 V
NO.	032	26600 V	26500 V
NO.	032	26700 V	26600 V
NO.	032	26800 V	26700 V
NO.	032	26900 V	26800 V
NO.	032	27000 V	26900 V
NO.	032	27100 V	27000 V
NO.	032	27200 V	27100 V
NO.	032	27300 V	27200 V
NO.	032	27400 V	27300 V
NO.	032	27500 V	27400 V
NO.	032	27600 V	27500 V
NO.	032	27700 V	27600 V
NO.	032	27800 V	27700 V
NO.	032	27900 V	27800 V
NO.	032	28000 V	27900 V
NO.	032	28100 V	28000 V
NO.	032	28200 V	28100 V
NO.	032	28300 V	28200 V
NO.	032	28400 V	28300 V
NO.	032	28500 V	28400 V
NO.	032	28600 V	28500 V
NO.	032	28700 V	28600 V
NO.	032	28800 V	28700 V
NO.	032	28900 V	28800 V
NO.	032	29000 V	28900 V
NO.	032	29100 V	29000 V
NO.	032	29200 V	29100 V
NO.	032	29300 V	29200 V
NO.	032	29400 V	29300 V
NO.	032	29500 V	29400 V
NO.	032	29600 V	29500 V
NO.	032	29700 V	29600 V
NO.	032	29800 V	29700 V
NO.	032	29900 V	29800 V
NO.	032	30000 V	29900 V
NO.	032	30100 V	30000 V
NO.	032	30200 V	30100 V
NO.	032	30300 V	30200 V
NO.	032	30400 V	30300 V
NO.	032		



TECO **3-PHASE INDUCTION MOTOR**

TYPE AEFBKB C-- RATING S1

OUTPUT 2 HP 1.5 kW FRAME 90L

POLES 4 INS. F ROTOR C IP 55

H Z 50

VOLTS 220V 380V 220 V 380 V

AMPS 6.08 3.52

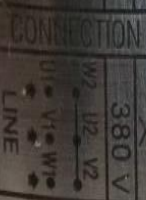
DIAGRAM LEQS-REG-111

WINDING LINE

WEIGHT 1.0 SEASINGS 6205VV

SER. NO. 0

TECO Mach. Co. Ltd



31045M092M6E8

PLAT MOTOR INDUKSI

BIODATA PENULIS



Nama penulis Ismi Putri Anggraini. Penulis dilahirkan di Nganjuk, pada tanggal 16 April 1996 sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Nganjuk, Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Payaman 02 Nganjuk hingga tahun 2009, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Nganjuk hingga tahun 2012, pendidikan menengah atas di SMAN 2 Nganjuk hingga tahun 2015, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini.

Pada bulan Juni 2019, penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Perancangan *Extended Kalman Filter* Untuk *Speed Sensorless Induction Motor* Di Unit Penggerak Kereta Api PT. INKA**. Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: ismisimmi16@gmail.com.