



TUGAS AKHIR - IF 181801

**PERANCANGAN *LUENBERGER OBSERVER*
UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR*
DI UNIT PENGGERAK KERETA API PT. INKA**

RETNO INDRIANI ARDINI
NRP. 023115 4000 017

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



FINAL PROJECT - TF 181801

LUENBERGER OBSERVER DESIGN FOR SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR IN TRAIN MOVEMENT UNIT IN PT. INKA

RETNO INDRIANI ARDINI
NRP. 023115 4000 017

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

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Retno Indriani Ardini
NRP : 023115 40000 017
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 *LUENBERGER OBSERVER* UNTUK *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 surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, April 2019

Yang mer.

METERAI
TEMPEL



EFB7AEF919617254

6000
ENAM RIBU RUPIAH



Retno Indriani Ardini
NRP. 02311540000017

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

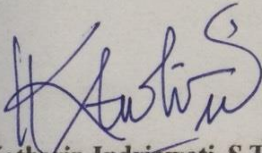
PERANCANGAN *LUENBERGER OBSERVER* UNTUK *SPEED
SENSORLESS INDUCTION MOTOR* DI UNIT PENGGERAK
KERETA API PT. INKA

Oleh:

Retno Indriani Ardini
NRP. 023115 40000 017

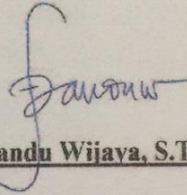
Surabaya, April 2019
Mengetahui/Menyetujui,

Dosen Pembimbing I



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

Pembimbing II



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



Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 197809022003121002

**PERANCANGAN LUENBERGER OBSERVER 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 :

RETNO INDRIANI ARDINI

NRP. 023115 40000 017

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

PERANCANGAN *LUENBERGER OBSERVER* UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR* DI UNIT PENGGERAK KERETA API PT. INKA

Nama : Retno Indriani Ardini
NRP : 0231154000017
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu W., S.T., M.Eng., Ph.D

Abstrak

Penggerak utama yang biasanya digunakan pada industri kereta listrik yaitu motor induksi. Informasi kecepatan yang dibutuhkan untuk mengendalikan kecepatan motor, biasanya diukur dengan sensor kecepatan. Namun, penggunaan sensor kecepatan dinilai kurang efektif dikarenakan keterbatasan resolusi dan harganya yang mahal. Pada tugas akhir ini dikembangkan suatu metode baru mengenai sistem kerja motor induksi tanpa sensor pada motor induksi yang dikenal sebagai *sensorless induction motor* dengan *Luenberger observer* untuk menggantikan peran sensor pada kereta PT. INKA. Pengambilan data uji tanpa beban di PT. INKA dilakukan untuk mendapatkan informasi kecepatan pada motor induksi. Setelah itu dilakukan pemodelan motor induksi, pemodelan *Luenberger observer*, pemodelan estimator kecepatan motor, variasi perubahan tegangan, serta penambahan *torsi load*. Hasil estimasi *Luenberger observer* pada motor induksi tanpa sensor didapatkan nilai arus estimasi dan riil steady pada nilai *peak* sebesar 4,41 A pada 0,39s, serta nilai fluks estimasi dan riil steady pada nilai *peak* sebesar 1,138 Wb pada 0,39s. Adapun perolehan estimasi kecepatan motor sebesar 156,56 rad/s. Diperoleh error kecepatan motor (ω_r) riil terhadap data pengukuran sebesar 0.085% dan error kecepatan motor (ω_r) estimasi terhadap data pengukuran 0,48%. Selanjutnya dari variasi perubahan tegangan yang dilakukan dari 163 volt menjadi 380 volt mengakibatkan estimasi arus dan fluks

juga ikut naik. Lalu pada pengujian terakhir yaitu pengujian dengan *torsi load* sebesar 1 Nm, 3 Nm , 6 Nm dan 10 Nm, didapatkan hubungan semakin besar *torsi load* maka *time constant* pada estimasi arus, fluks, kecepatan juga akan semakin besar.

Kata Kunci— Motor induksi, *Luenberger observer*, *sensorless*

*LUENBERGER OBSERVER DESIGN FOR SPEED
SENSORLESS INDUCTION MOTOR IN TRAIN MOVEMENT
UNIT PT. INKA*

Name : Retno Indriani Ardini
NRP : 0231154000017
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu W., S.T., M.Eng., Ph.D

Abstract

The main workhorses usually used in electric train is induction motor. Information of speed is needed to control the motor speed, usually measured by a speed sensor. But, sensors are often unefective because they have limited resolution, the price is expensive. Therefore, a new method is developed called sensorless induction motor with Luenberger observer to replace the role of sensors in train of PT. INKA. Taking test data without load at PT. INKA is carried out to obtain speed information on an induction motor. After that, induction motor modeling, Luenberger observer modeling, motor speed estimator modeling, variations in voltage changes, and the addition of torque load were performed. Luenberger observer estimation results of a sensorless induction motor, the value of actual current and estimated current steady in the peak value 4,41 A at 0,39 s and the value of actual flux and estimated flux steady in the peak value 1,138 Wb at 0,39 s. The acquisition of estimated motor speed (ω_r) is 156.56 rad/s. Taking test data without load at PT. INKA is carried out to obtain the speed information on an induction motor. Obtained the error of actual motor speed to measurement data is 0,085% and the error of estimated motor speed to measurement data is 0,48%. Furthermore, from variations in voltage changes made from 163 volts to 380 volts, the estimated current and flux also increase. Then in the last examination, namely testing with a load torque of 1 Nm, 3 Nm, 6

Nm and 10 Nm, the relationship is the greater torque load so the time constant in the estimated current, flux, speed will also be greater.

Keywords — Induction Motor , Luenberger observer, sensorless

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikan Tugas Akhir dengan judul “Perancangan *Luenberger Observer* 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
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen wali serta kepala Laboratorium Fisika Rekayasa 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 selama kuliah.
6. Kedua orang tua (Bapak Bibit Mulyono dan Ibu Lasmi) dan adik (Reza Adi Darma) atas kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
7. Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir bidang Rekayasa Instrumentasi, Ismi Putri Angraini, Eka Putri, Asmaul Husna, Ridha Tentiani.
8. Teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa.
9. Teman-teman BEM FTI ITS Torsi – Harmonika – Interaksi yang selalu memberikan dukungan serta bantuan.
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, April 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
Abstrak	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Motor Induksi.....	5
2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	8
2.3 Transformasi Clarke.....	8
2.4 Pemodelan Motor Induksi	10
2.5 <i>Luenberger Observer</i>	15
BAB III.....	17
METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Pemodelan Motor Induksi	18

3.3 Perancangan Estimator ωr	23
3.4 Pengujian Estimator ωr	24
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Hasil Uji Validasi Model.....	27
4.2 Perubahan Menggunakan Dua Tegangan Berbeda.....	33
4.3 Hasil Uji Beban	34
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Motor induksi AEEBKB (Pereira, 2019)	5
Gambar 2. 2 Bagian - bagian motor induksi (Payan, 2019)	6
Gambar 2. 3 Stator motor induksi AEEBKB (Han, 2019)	7
Gambar 2. 4 Rotor motor induksi AEEBKB (Nikbakhsh, 2019) ..	7
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	17
Gambar 3. 2 Diagram blok <i>Luenberger</i> observer.....	23
Gambar 3. 3 Skema Estimator ω_r	25
Gambar 4. 1 Respon arus <i>plant</i>	27
Gambar 4. 2 Respon fluks <i>plant</i>	28
Gambar 4. 3 Respon arus riil dan estimasi	30
Gambar 4. 4 Respon fluks riil dan estimasi.....	30
Gambar 4. 5 Respon error antara arus riil dan estimasi.....	31
Gambar 4. 6 Respon kecepatan motor aktual dan estimasi	32
Gambar 4. 7 Perubahan respon arus estimasi dan riil saat terjadi perubahan tegangan	33
Gambar 4. 8 Perubahan respon fluks estimasi dan riil saat terjadi perubahan tegangan	34
Gambar 4. 9 Respon arus riil dan estimasi ketika beban 10 Nm	35
Gambar 4. 10 Respon fluks riil dan estimasi ketika beban 10 Nm	35
Gambar 4. 11 Respon kecepatan motor riil dan estimasi ketika beban 10 Nm	36
Gambar 4. 12 Respon arus riil dan estimasi saat diberi beban 1 Nm.....	37
Gambar 4. 13 Respon fluks riil dan estimasi saat beban 1 Nm...	37
Gambar 4. 14 Respon kecepatan riil dan estimasi saat diberi beban 1 Nm	38

Gambar 4. 15 Respon arus riil dan estimasi saat diberi beban 3 Nm.....	38
Gambar 4. 16 Respon fluks riil dan estimasi saat <i>torsi load</i> 3 Nm	39
Gambar 4. 17 Respon kecepatan motor riil dan estimasi saat <i>torsi load</i> 3 Nm.....	40
Gambar 4. 18 Respon arus riil dan estimasi saat <i>torsi load</i> 6 Nm	40
Gambar 4. 19 Respon fluks riil dan estimasi saat <i>torsi load</i> 6 Nm	41
Gambar 4. 20 Respon kecepatan motor riil dan estimasi saat <i>torsi load</i> 6 Nm.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Parameter Motor Induksi 3 Fasa (Allaoui & Chafaa, 2015).....	27
Tabel 4. 2 Data kecepatan motor <i>plant</i> dan pengukuran	29
Tabel 4. 3 Data kecepatan motor estimasi dan pengukuran	32
Tabel 4. 4 <i>Time constant</i> pengujian beban	42

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam rangka pelaksanaan lebih lanjut pasal 12 ayat 2 serta pasal 17 ayat 1 Undang – Undang No.30 Tahun 2007 mengenai Energi, pemerintah mulai menetapkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Dengan adanya RUEN mendorong pemerintah untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dan pemenuhan target pengurangan polusi udara. Salah satu solusi yang dilakukan pemerintah dalam rangka mewujudkan RUEN ini yaitu pada bidang transportasi serta otomotif. Transportasi listrik merupakan moda transportasi yang sedang dikembangkan di Indonesia karena dinilai lebih ramah lingkungan. Kereta listrik, motor listrik serta kereta rel listrik (KRL) merupakan jenis moda transportasi listrik yang tengah dikembangkan di Indonesia.

Motor induksi merupakan tenaga penggerak yang sangat penting dalam industri dan digunakan dalam jumlah yang banyak. Sekitar setengah dari energi listrik yang digunakan oleh negara berkembang untuk menggerakkan motor listrik, dimana 90% nya merupakan motor induksi (Chan & Shi, 2011). Penggerak utama yang biasanya digunakan pada industri kereta listrik yaitu motor induksi. Motor induksi dipilih dikarenakan konstruksinya yang kuat, mudah dalam penggunaan serta relatif murah dari segi harganya. Motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Disebut motor induksi dikarenakan saat ada arus yang melewati lilitan akan menimbulkan arus yang terinduksi akibat adanya perbedaan putaran medan magnet akibat arus yang melewati stator dan putaran rotor. Terdapat dua jenis motor induksi yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa.

Motor induksi pada pengaplikasiannya beroperasi pada kecepatan tertentu dengan beban yang bervariasi. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem pengendalian kecepatan dengan struktur *feedback*. Informasi kecepatan dibutuhkan untuk dapat

mengendalikan kecepatan motor, biasanya diukur dengan sensor kecepatan. Namun, penggunaan sensor kecepatan di nilai kurang efektif dikarenakan keterbatasan resolusi, harganya yang mahal serta menimbulkan noise (Savoia, Mengoni, Zarri, & Casadei, 2011). Oleh karena itu mulai dikembangkan suatu metode baru mengenai sistem kerja motor induksi tanpa sensor pada motor induksi yang dikenal sebagai *sensorless induction motor*.

Saat motor induksi beroperasi menggunakan teknik *speed sensorless*, sensor kecepatan ditiadakan dan informasi kecepatan didapatkan dari estimasi berdasarkan arus dan tegangan yang masuk ke dalam motor. Estimasi dilakukan dengan menggunakan metode observer. Observer merupakan suatu metode yang dapat mengestimasi nilai variabel keadaan yang ingin diketahui dengan menggunakan model analitis. Adapun salah satu jenis observer yang dapat melakukan estimasi pada motor induksi yaitu *Luenberger Observer*.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat diambil permasalahan sebagai berikut :

- a. Bagaimana merancang *Luenberger observer* untuk aplikasi *speed sensorless induction motor* ?
- b. Bagaimana performansi estimator kecepatan berbasis *Luenberger observer* ?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah merancang sistem *speed sensorless induction motor* dengan metode *Luenberger observer* yang mampu mengestimasi kecepatan dengan menggunakan informasi arus dan tegangan yang masuk motor induksi dan mengetahui performansi estimator kecepatan berbasis *Luenberger observer* .

1.4 Batasan Masalah

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

- a. Parameter motor induksi diasumsikan telah diketahui seluruhnya dengan mengacu pada motor induksi yang digunakan pada unit penggerak kereta api produksi PT. INKA, yaitu motor induksi 3 fasa jenis AEEBKB dengan kapasitas 1,5 kW dengan empat *pole*.
- b. Validasi model dilakukan dengan mengacu pada hasil pengukuran saat motor induksi beroperasi open loop.
- c. Pengambilan data dilakukan berdasarkan keadaan motor induksi tanpa beban.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Motor Induksi

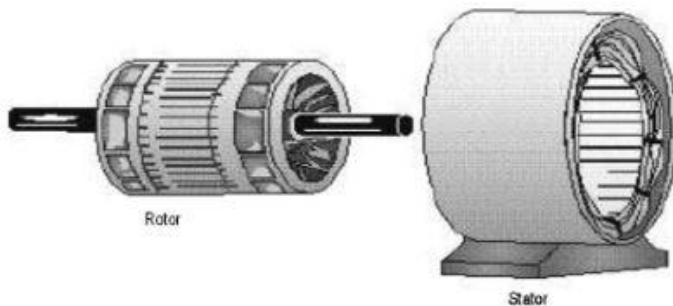
Motor induksi adalah salah satu jenis motor listrik yang umum digunakan, dimana motor induksi merupakan sebuah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (ac) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Jenis motor induksi sendiri dibagi menjadi dua jenis yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa.



Gambar 2. 1 Motor induksi AEEBKB (Pereira, 2019)

Motor induksi ini banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan yaitu konstruksinya cukup kuat dan sederhana, memiliki efisiensi yang relatif tinggi pada keadaan normal dan tidak memerlukan sikat (*brushless*) sehingga rugi – rugi gesekan (*loss*) dapat dikurangi, perawatan dan pemeliharaan dari motor induksi ini juga minimum, selain itu harga dari motor induksi

relatif murah dan keandalannya tinggi. Meskipun motor induksi ini mempunyai banyak kelebihan, motor induksi juga mempunyai beberapa kelemahan seperti efisiensi motor induksi mempengaruhi pengaturan kecepatan, penambahan beban akan menyebabkan kecepatannya berkurang.



Gambar 2. 2 Bagian - bagian motor induksi (Payan, 2019)

Pada konstruksi motor induksi sendiri terdapat dua bagian penting seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.

2.1.1 Stator

Stator merupakan bagian yang diam dari motor dan mempunyai kumparan yang dapat menimbulkan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya. Bagian stator merupakan bagian input dari motor induksi. Stator terdiri dari susunan laminasi inti dimana setiap tumpukan laminasi inti ini memiliki jalur-jalur berbentuk silindris yang didalamnya terdiri dari kumparan-kumparan yang dililitkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi. Tiap kumparan pada motor induksi tiga fasa

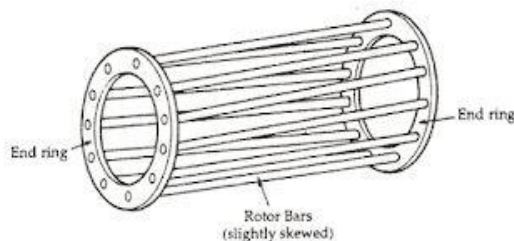
tersebar dalam jalur-jalur yang disebut belitan fasa, belitan tersebut terpisah sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapisi dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris.



Gambar 2. 3 Stator motor induksi AEEBKB (Han, 2019)

2.1.2 Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor. Rotor terdiri dari inti silinder laminasi. Slot melingkar dibagian luar setengah tertutup, dimana disetiap slot ini berisi konduktor batang aluminium atau tembaga tanpa isolulasi. Pada ujung-ujung rotor, konduktor mengalami hubung pendek oleh cincin tembaga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rotor motor induksi AEEBKB (Nikbakhsh, 2019)

2.2 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 kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator. Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi, bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun.

Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot slotnya yang dililitkan pada sejumlah kutup tertentu. Jumlah kutup ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang diinduksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutup akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan putar medan stator dan sebaliknya.

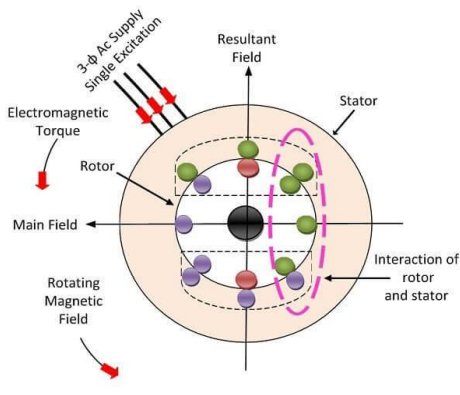
2.3 Transformasi Clarke

Sumber tegangan tiga fasa dalam istilah umum di Indonesia lebih familiar disebut dengan nama sumber tegangan R-S-T. Dan

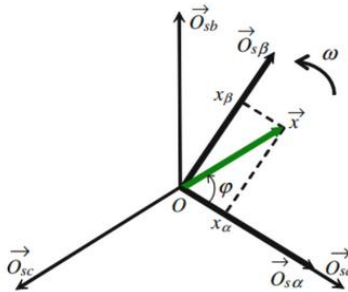
penamaan ini berasal dari penggunaan simbol R, S, dan T untuk penamaan tiap fasanya serta digunakan simbol N untuk penghantar netral. Sumber tegangan tiga fasa dalam tugas akhir ini dimisalkan dengan simbol A-B-C untuk merepresentasikan tiap fasanya. Sumber tegangan tiga fasa sendiri merupakan suatu sumber tegangan AC yang menggunakan 3 penghantar yang sama namun terpisah oleh sudut fasa sebesar 120° .

Namun, untuk merepresentasikan tegangan pada motor induksi, dibutuhkan tegangan yang terpisah oleh sudut fasa sebesar 90° yang biasa disebut dengan tegangan $(\alpha\beta)$. Oleh karena itu dibutuhkan suatu transformasi untuk mengubah analisis fasor dari bentuk 3D menjadi 2D. Fasor tiga fasa (abc) disederhanakan menjadi $(\alpha\beta)$. Penggambaran transformasi clarke tertera pada Gambar 2.6. Adapun persamaan transformasi clarke ditunjukkan pada persamaan (2.1):

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



Gambar 2. 5 Prinsip kerja motor induksi (Santos, 2018)



Gambar 2. 6 Transformasi Clarke (Zin, 2015)

2.4 Pemodelan Motor Induksi

Pemodelan motor induksi dapat ditinjau dari kerangka acuan stator atau kerangka acuan rotor dan parameter yang digunakan dalam pemodelan bisa berupa arus stator atau arus rotor serta fluks stator dan fluks rotor. Pada tugas akhir ini digunakan pemodelan motor ditinjau dari kerangka acuan stator. Sehingga persamaan motor induksi dapat ditunjukkan sebagai berikut :

Persamaan umum motor induksi diperoleh dari persamaan (2.2) hingga (2.5) yang ditunjukkan dibawah ini

$$\vec{V}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_s + \frac{P}{2} j \omega_e \vec{\lambda}_s \quad (2.2)$$

$$\vec{V}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_r + j \frac{P}{2} (\omega_e - \omega_r) \vec{\lambda}_s \quad (2.3)$$

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_r + L_m \vec{i}_r \quad (2.4)$$

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

Karena kerangka acuan yang digunakan adalah kerangka acuan stator, maka nilai $\omega_e = 0$. Persamaan (2.2) jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$ ($\omega_e = 0$), menjadi:

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \dot{\lambda}_{s\alpha} \quad (2.6)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \dot{\lambda}_{s\beta} \quad (2.7)$$

Karena jenis rotor dari motor induksi ini adalah *squirrel cage* yang terminal – terminalnya terhubung singkat, maka tegangan rotor V_r adalah nol, sehingga persamaan (2.3) menjadi:

$$0 = R_r i_r + \dot{\lambda}_r + \frac{P}{2} j (\omega_e - \omega_r) \lambda_r \quad (2.8)$$

Jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$ ($\omega_e = 0$) maka persamaan (2.8) menjadi :

$$\dot{\lambda}_{r\alpha} = -R_r i_{r\alpha} + \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.9)$$

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

Persamaan (2.4) jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$, maka persamaannya akan menjadi :

$$\lambda_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \quad (2.11)$$

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

Dari persamaan (2.5) dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$, maka persamaan akan berubah menjadi :

$$\lambda_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \quad (2.13)$$

$$i_{\alpha} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}) \quad (2.14)$$

$$\lambda_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \quad (2.15)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{s\beta}) \quad (2.16)$$

Dari persamaan (2.14) disubstitusikan ke persamaan (2.9) dan persamaan (2.16) disubstitusikan ke persamaan (2.10) maka akan didapatkan bersamaan seperti dibawah ini :

$$\dot{\lambda}_{r\alpha} = -Rr\left(\frac{1}{L_r}(\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha})\right) - \frac{P}{2}\omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.17)$$

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

Untuk mendapatkan persamaan arus stator pada sumbu alfa, maka substitusikan persamaan (2.11) ke persamaan (2.6) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + \frac{d}{dt}(L_S i_{S\alpha} + L_m i_{r\alpha}) \quad (2.19)$$

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + L_S \dot{i}_{S\alpha} + L_m \dot{i}_{r\alpha} \quad (2.20)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.14) ke persamaan (2.20) maka akan menjadi persamaan seperti berikut :

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + L_S \dot{i}_{S\alpha} + \frac{L_m}{L_r} \dot{\lambda}_{r\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{S\alpha} \quad (2.21)$$

Lalu substitusikan persamaan (2.17) pada persamaan (2.21), maka akan di dapatkan persamaan :

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + \sigma L_S \dot{i}_{S\alpha} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\alpha} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.22)$$

Lalu persamaan (2.14) disubstitusikan pada persamaan (2.22) maka akan diperoleh persamaan :

$$\dot{i}_{S\alpha} = \frac{V_{S\alpha}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma T_r}\right) i_{S\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\alpha} + \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_S} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.23)$$

Dengan melakukan langkah yang sama dengan sumbu beta , dapat dicari nilai pada sumbu beta sebagai berikut

$$V_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + \frac{d}{dt} (L_S i_{S\beta} + L_m i_{r\beta}) \quad (2.24)$$

Substitusikan persamaan (2.16) pada persamaan (2.24) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + L_S \dot{i}_{S\beta} + \frac{L_m}{L_r} \dot{\lambda}_{r\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \dot{i}_{S\beta} \quad (2.25)$$

Setelah itu pada persamaan (2.10) disubstitusikan pada persamaan (2.25) sehingga didapatkan persamaan

$$V_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + \sigma L_S \dot{i}_{S\beta} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\beta} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.26)$$

Yang terakhir disubstitusikan persamaan (2.16) ke persamaan (2.26) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{i}_{S\beta} = \frac{V_{S\beta}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_S T_r} \right) i_{S\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\beta} + \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_S} \lambda_{r\alpha} \quad (2.27)$$

Dimana :

$$\sigma = \frac{L_r L_S - L_m^2}{L_r L_S} \quad (2.28)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2.29)$$

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

$$\dot{\omega}_r = \frac{T_e - T_l}{J} \quad (2.30)$$

$$T_e = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_m}{L_r} \right) (\lambda_{r\beta} i_{S\alpha} - \lambda_{r\alpha} i_{S\beta}) \quad (2.31)$$

Sehingga akan didapat nilai

$$\dot{\omega}_r = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{L_m}{J L_r}\right) (\lambda_{r\beta} i_{s\alpha} - \lambda_{r\alpha} i_{s\beta}) - \frac{T_l}{J} \quad (2.32)$$

Dari penjabaran di atas akan didapatkan persamaan motor induksi:

$$i_{s\alpha} \dot{=} \frac{V_{s\alpha}}{\sigma L_s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma T_r}\right) i_{s\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s T_r} \lambda_{r\alpha} + \frac{P L_m \omega_r}{2 \sigma L_r L_s} \lambda_{r\beta} \quad (2.33)$$

$$i_{s\beta} \dot{=} \frac{V_{s\beta}}{\sigma L_s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_s T_r}\right) i_{s\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s T_r} \lambda_{r\beta} - \frac{P L_m \omega_r}{2 \sigma L_r L_s} \lambda_{r\alpha} \quad (2.34)$$

$$\lambda_{r\alpha} \dot{=} -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha})\right) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.35)$$

$$\lambda_{r\beta} \dot{=} -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{s\beta})\right) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.36)$$

$$\dot{\omega}_r = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{L_m}{J L_r}\right) (\lambda_{r\alpha} i_{\beta s} - \lambda_{r\beta} i_{\alpha s}) - \frac{T_l}{J} \quad (2.37)$$

dengan :

ω_r = Kecepatan motor

$\lambda_{\beta r} \lambda_{\alpha r}$ = Flux Rotor

$i_{\beta s} i_{\alpha s}$ = Arus stator

J = Inersia Rotor

$L_s L_r$ = Induktansi stator dan Induktansi Rotor

L_m = Induktansi Mutual

$R_s R_r$ = Resistansi stator dan Resistansi Rotor

P = Jumlah pole

$V_{\beta s} V_{\alpha s}$ = Tegangan

T_l = Torsi beban

Dimana persamaan motor induksi diatas apabila diubah menjadi bentuk *state space* akan berubah menjadi

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.38)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.39)$$

Dimana

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & 0 & \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & \frac{P L_m}{2(L_r L_s - L_m^2)} \omega_r & 0 \\ 0 & -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & \frac{P L_m}{2(L_r L_s - L_m^2)} \omega_r & \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & 0 \\ \frac{R_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{P}{2} \omega_r & 0 \\ 0 & \frac{R_r L_m}{L_r} & \frac{P}{2} \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ -\frac{2}{3} \frac{P L_m}{2 J L_r} & \frac{2}{3} \frac{P L_m}{2 J L_r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = [0]$$

2.5 Luenberger Observer

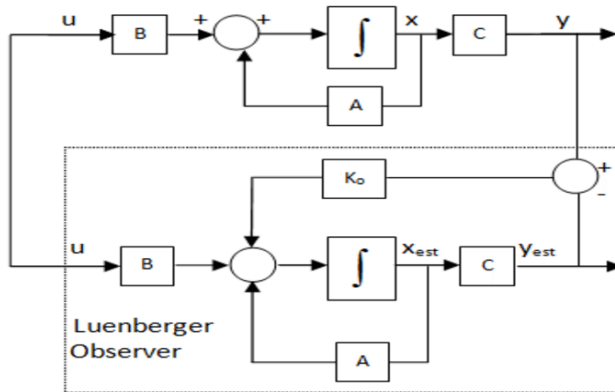
Model observer biasanya didapatkan dari penurunan persamaan motor induksi. Adapun bentuk dari *Luenberger observer* seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.40) dan (2.41).

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + K_o (y - \hat{y}) \quad (2.40)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du \quad (2.41)$$

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa \hat{y} adalah hasil estimasi keluaran dari observer, dan y keluaran dari *plant state space*. Sedangkan K_o merupakan gain dari observer pada sistem tersebut. Dan $(y - \hat{y})$ merupakan error dari sistem (perbedaan nilai aktual dan nilai hasil estimasi). Dan nilai error ini yang

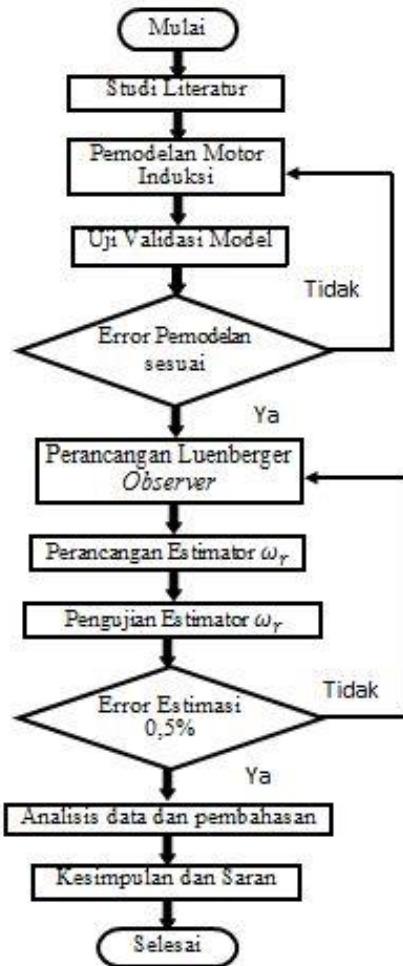
digunakan sebagai *feedback* untuk mengoreksi sistem agar model sistem mendekati dengan nilai yang diinginkan.



Gambar 2.7 Blok *Luenberger Observer* (Hussein, Salih, & Ghasm, 2017)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Secara keseluruhan metode penelitian Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

Pelaksanaan Tugas Akhir ini didahului dengan studi literatur. Studi literatur berfokus pada topik penelitian motor induksi, prinsip kerja motor induksi, transformasi Clarke, pemodelan motor induksi dan *Luenberger observer*. Langkah selanjutnya adalah memodelkan motor induksi. Pemodelan dinamik dilakukan untuk keperluan simulasi motor induksi tiga fasa. Setelah didapatkan pemodelan sistem maka akan dilakukan validasi terlebih dahulu untuk mendapatkan pemodelan yang sesuai dengan motor induksi yang ada. Langkah selanjutnya adalah pembuatan observer. Perancangan observer menggunakan *Luenberger observer* dilakukan untuk mendapatkan estimasi state dari motor induksi dengan menggunakan data arus, dan tegangan motor induksi. Pengujian *Luenberger observer* dilakukan untuk mengetahui performansi *Luenberger observer*. Setelah itu dilanjutkan dengan perancangan estimator kecepatan motor serta pengujian estimator kecepatan motor. Apabila error yang didapatkan sudah sesuai dilanjutkan analisis data dan pembahasan. Setelah itu dilanjutkan dengan penarikan kesimpulan dan pemberian saran.

3.1 Pemodelan Motor Induksi

Penelitian ini dimulai dengan mencari sumber – sumber literatur pada jurnal motor induksi, observer serta *Luenberger observer*. Referensi yang didapatkan dari studi literatur ini digunakan sebagai dasaran dalam penelitian ini. Selanjutnya pemodelan motor induksi dibuat pada software Matlab dengan asumsi semua parameter diketahui. Bentuk persamaan motor induksi yang digunakan disini seperti yang tertera di dalam persamaan (2.33) – (2.37) dimasukkan kedalam *Simulink*. Menurut (Savoia, Mengoni, Zarri, & Casadei, 2011), bentuk persamaan motor induksi yang digunakan yaitu sesuai dengan persamaan (2.38) – (2.39)

dengan

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & 0 & \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & \frac{P L_m}{2(L_r L_s - L_m^2)} \omega_r \\ 0 & -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & \frac{P L_m}{2(L_r L_s - L_m^2)} \omega_r & \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{P}{2} \omega_r \\ 0 & \frac{R_r L_m}{L_r} & \frac{P}{2} \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix}$$

dan matriks B

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

serta matriks C

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

serta matriks D

$$D = [0]$$

dapat dilihat diatas bahwa matriks A nonlinier karena terdapat nilai ω_r . Oleh karena itu, bentuk matriks A di modifikasi agar linier dengan menambahkan matriks baru ke dalam persamaan motor induksi.

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

$$y = Cx + Du \quad (3.2)$$

Sehingga dibentuk matriks state space seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.3) (3.4).

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{\alpha s} \\ \dot{i}_{\beta s} \\ \dot{\lambda}_{\alpha r} \\ \dot{\lambda}_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & -a_1 & 0 & a_2 \\ a_4 & 0 & -a_5 & 0 \\ 0 & a_4 & 0 & -a_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{P}{2} A_m & 0 \\ 0 & \frac{-P}{2} A_m \\ \frac{-P}{2} & 0 \\ 0 & \frac{-P}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{r\beta} \\ d_{r\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

dimana

$$a_1 = \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} \quad (3.5)$$

$$a_2 = \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} \quad (3.6)$$

$$a_4 = \frac{R_r L_m}{L_r} \quad (3.7)$$

$$a_5 = \frac{R_r}{L_r} \quad (3.8)$$

$$A_m = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \quad (3.9)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (3.10)$$

$$d_{r\beta} = \lambda_{\beta r} \omega_r \quad (3.11)$$

$$d_{r\alpha} = \lambda_{\alpha r} \omega_r \quad (3.12)$$

Berdasarkan bentuk state space yang baru, sistem non linier dikelompokkan menjadi satu di matriks E, sehingga bentuk matriks A dan B tetap linier. Adapun keluaran dari state space motor induksi yang sudah dimodifikasi ini terdiri dari 4 yaitu $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$, $\lambda_{\beta r}$, serta $\lambda_{\alpha r}$. State yang akan dibandingkan dengan *plant* motor induksi hanya *state* $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$ saja.

Pengujian validasi model dilakukan dengan membandingkan *output* state dari *plant* pada persamaan (2.33) – (2.37) dengan *output* state dari state space motor induksi yang sudah dimodifikasi pada persamaan (3.3) – (3.4) di *simulink* Matlab. State yang dibandingkan yaitu $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$, $\lambda_{\beta r}$, serta $\lambda_{\alpha r}$. Apabila saat dibandingkan hasilnya sama, maka error sama dengan 0 dan dapat dilanjutkan dengan perancangan *Luenberger observer*.

3.2 Perancangan *Luenberger Observer*

Pada tahap ini, perancangan *Luenberger observer* digunakan untuk mendapatkan state estimasi $\widehat{i}_{\beta s}$, $\widehat{i}_{\alpha s}$, $\widehat{\lambda}_{\beta r}$, serta $\widehat{\lambda}_{\alpha r}$ dari motor induksi dengan menggunakan input berupa tegangan dan arus. *Luenberger observer* dirancang sesuai dengan Gambar 2.7. Namun, karena terdapat matriks baru yaitu matriks E, diagram alir penyusunan *Luenberger observer* ditunjukkan seperti pada gambar 3.2. Dalam penyusunan *Luenberger observer* ini terdapat perubahan bentuk domain kontinyu menjadi domain diskrit. Penggunaan domain diskrit ini dikarenakan data yang digunakan berasal dari data pengukuran *plant*, dimana *plant* menggunakan domain diskrit. Adapun bentuk dari domain diskrit ditunjukkan pada persamaan (3.15).

$$X_d(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \quad (3.15)$$

Sehingga dilakukan perubahan domain kontinu menjadi domain diskrit seperti yang ditunjukkan pada persamaan (3.16) – (3.18).

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

$$A_d = I_{4 \times 4} + T_s \begin{bmatrix} -a_1 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & -a_1 & 0 & a_2 \\ a_4 & 0 & -a_5 & 0 \\ 0 & a_4 & 0 & -a_5 \end{bmatrix}$$

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

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

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

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

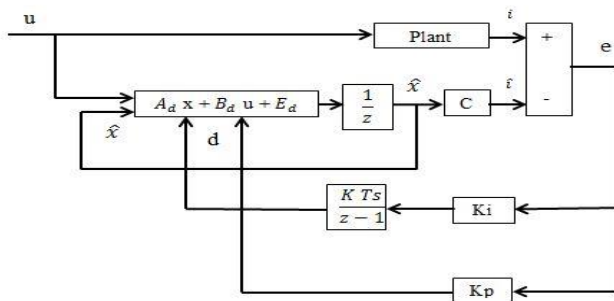
Sesuai dengan Gambar 3.2, error (e) yang ditimbulkan akibat selisih dari $(y - \hat{y})$ akan dikalikan dengan gain. Adapun gain yang digunakan disini yaitu gain Kp dan gain Ki. Gain Kp dan gain Ki berfungsi sebagai kompensator untuk mengatasi ketidakpastian yang terjadi di observer atau sebagai korektor akibat perbedaan antara output *plant* dan output estimasi. Dimana nilai dari gain Kp dan Ki didapatkan dari lqr. Adapun nilai dari gain Kp dan Ki serta Q dan R adalah sebagai berikut:

$$K_p = \begin{bmatrix} 0,9085 & 0 & 0,8633 & 0 \\ 0 & 0,9085 & 0 & 0,8633 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 0,1428 & 0 \\ 0 & -0,1428 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 9 \times 10^3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9 \times 10^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 \times 10^3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 9 \times 10^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^6 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}$$



Gambar 3. 2 Diagram blok *Luenberger* observer

Selanjutnya dilakukan pengujian *Luenberger observer*. Pada pengujian ini, *output* state dari observer dibandingkan dengan *output* state pada state space motor induksi. Nilai yang dibandingkan yaitu $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$, $\lambda_{\beta r}$, serta $\lambda_{\alpha r}$. Jika saat dibandingkan grafik *output* sama dan saling berhimpit, maka nilai $(y - \hat{y}) = 0$.

3.3 Perancangan Estimator ω_r

Tahap selanjutnya yang dilakukan yaitu merancang estimator ω_r seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Input tegangan (u) masuk ke dalam *plant*, dan didapatkan hasil keluaran dari *plant* adalah arus (i). Tegangan (u) selain dibutuhkan sebagai masukan *plant*, juga dibutuhkan sebagai masukan pada observer. Output arus (i) yang berasal dari *plant* juga menjadi masukan atau

input pada observer. Lalu arus (i) output dari *plant* dikurangkan terhadap arus (\hat{i}) estimasi, hasil selisih keduanya disebut error (e). Error ini nantinya akan dikalikan dengan \widehat{d}_r sebelum akhirnya menjadi masukan pada estimator ω_r . Selain itu hasil fluks estimasi ($\widehat{\lambda}$) juga digunakan sebagai input pada estimator ω_r . Setelah mendapatkan dua input berupa fluks estimasi ($\widehat{\lambda}$) dan $e \widehat{d}_r$, masing masing dari input tersebut di jadikan sebagai masukan pada DRMS atau *discrete rms*. *Discrete rms* ini digunakan untuk mendapatkan nilai akar kuadrat dari rata – rata suatu fungsi yang dikuadratkan dimana fungsi yang dimaksud disini yaitu arus dan fluks. Selanjutnya keluaran dari *discrete rms* ini untuk mendapatkan nilai $\widehat{\omega}_r$ digunakan persamaan (3.11) – (3.12) yang kemudian diubah menjadi persamaan (3.19) – (3.20). Sehingga didapatkan persamaan untuk mendapatkan nilai $\widehat{\omega}_r$ yang ditunjukkan oleh persamaan (3.21).

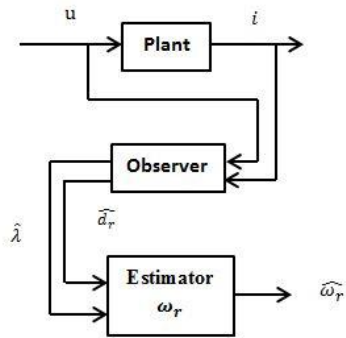
$$\widehat{d}_{r\beta} = \widehat{\lambda}_{\beta r} \widehat{\omega}_r \quad (3.19)$$

$$\widehat{d}_{r\alpha} = \widehat{\lambda}_{\alpha r} \widehat{\omega}_r \quad (3.20)$$

$$\widehat{\omega}_r = \frac{\widehat{d}_r}{\widehat{\lambda}} \quad (3.21)$$

3.4 Pengujian Estimator ω_r

Tahap selanjutnya yang dilakukan setelah perancangan estimator ω_r yaitu pengujian estimator ω_r . Pada tahap ini, hasil pengukuran kecepatan motor ω_r dari *plant* dan kecepatan motor estimasi $\widehat{\omega}_r$ akan dibandingkan dengan kecepatan motor ω_r dari hasil pengukuran di PT.INKA dibebberapa variasi tegangan. Adapun toleransi error yang digunakan disini sebesar 0,5%. Apabila saat dibandingkan error melebihi 0,5%, maka proses akan looping kembali ke tahap perancangan *Luenberger Observer* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Namun apabila error dibawah 0,5% maka dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya yaitu analisis data dan pembahasan.



Gambar 3. 3 Skema Estimator $\hat{\omega}_r$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

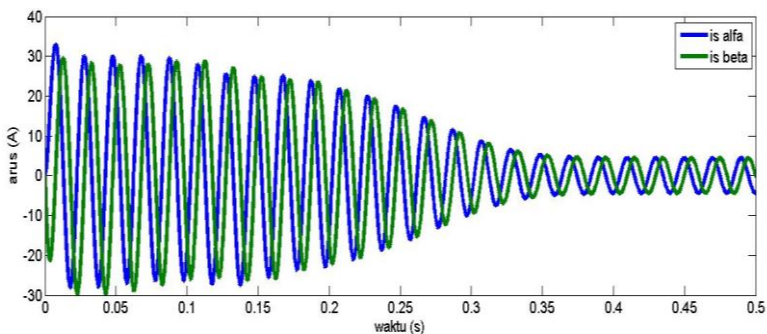
4.1 Hasil Uji Validasi Model

Simulasi yang dilakukan di Matlab untuk uji validasi model menggunakan parameter-parameter yang terdapat pada Tabel 4.1..

Tabel 4. 1 Parameter Motor Induksi 3 Fasa (Allaoui & Chafaa, 2015).

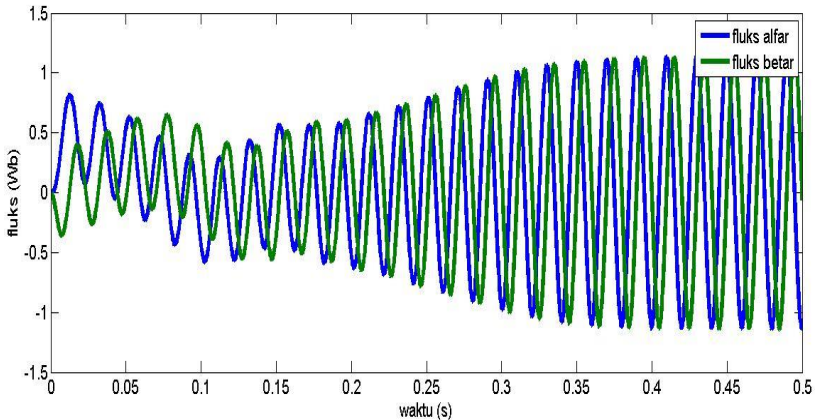
No	Nama	Nilai	Satuan
1.	Induktansi Mutual (Lm)	0,258	H
2.	Induktansi Rotor (Lr)	0,274	H
3.	Induktansi Rotor (Ls)	0,274	H
4.	Resistansi Rotor (Rr)	3,80	Ω
5.	Resistansi Motor (Rs)	4,85	Ω
6.	<i>Pole</i>	4	
7.	<i>Time Sampling</i>	1.10^{-6}	

Adapun penggunaan parameter seperti yang ditunjukkan Tabel 4.1 dikarenakan parameter pada jurnal (Allaoui & Chafaa, 2015) mempunyai empat *pole*, kapasitas sebesar 1.5kW dan frekuensi 50 Hz dimana sama dengan motor induksi yang digunakan pada saat pengambilan data di PT.INKA.



Gambar 4. 1 Respon arus *plant*

Dapat dilihat pada Gambar 4.1 terdapat arus keluaran ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) dari *plant* motor induksi. Pada gambar 4.1 ditunjukkan bahwa arus $i_{\alpha s}$ mengalami kondisi transien dari sebesar 33 A menjadi 4,5 A selama 0,39 s, setelah itu respon steady pada nilai *peak* sebesar 4.41 A. Pada Gambar 4.1 ditunjukkan pula bahwa arus $i_{\beta s}$ mengalami penurunan arus dari 30 A menjadi 4,5 A selama 0,39 s dan setelah itu konstan pada nilai *peak* sebesar 4,41 A.



Gambar 4. 2 Respon fluks *plant*

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap keluaran fluks dari *plant* motor induksi. Dapat dilihat pada Gambar 4.2, $\lambda_{\alpha r}$ naik dari kondisi 0 menuju ke 0,8 pada 0,013 detik pertama, lalu turun hingga 0,3 pada detik ke 0,11 s. Lalu kembali naik dan mulai mencapai kondisi steady di nilai *peak* sebesar 1,138 Wb pada saat 0,39 s. Sedangkan $\lambda_{\beta r}$ dari titik 0 turun hingga ke nilai -0,36 pada detik ke 0,008s, lalu mulai menukik naik hingga mencapai 0,4 pada detik ke 0,018s dan mulai steady pada nilai *peak* sebesar 1,138 pada 0,39 s. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, arus mengalami kondisi transien hingga detik ke 0,39, begitupun dengan respon fluks yang mengalami kondisi transien hingga di detik yang sama. Dan saat respon arus mulai menunjukkan keadaan steady, respon fluks juga mengalami

kondisi steady. Hal ini menunjukkan bahwa arus dan fluks saling berhubungan satu sama lain.

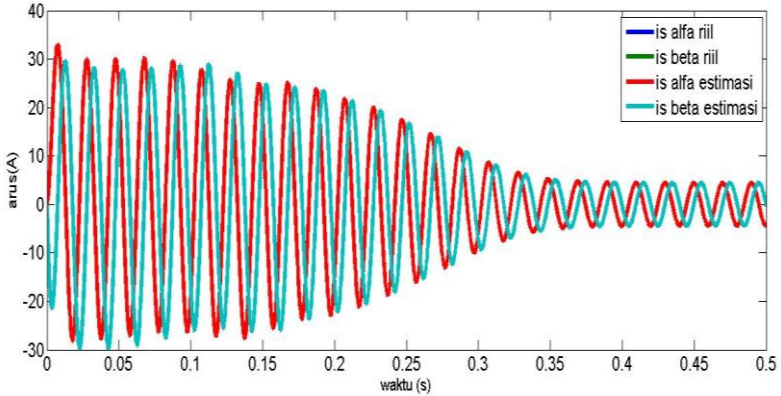
Setelah diperoleh arus dan fluks *plant*, didapatkan pula nilai kecepatan motor (ω_r) pada *plant* dibeberepa variasi tegangan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Setelah diketahui kecepatan motor (ω_r) dari *plant*, nilai kecepatan motor (ω_r) *plant* akan dibandingkan dengan nilai kecepatan motor (ω_r) hasil pengukuran, dan diperoleh rata rata error sebesar 0,085% seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data kecepatan motor *plant* dan pengukuran

No	Tegangan (V)	ω_r Plant (rad/s)	ω_r Pengukuran (rad/s)	Error (%)
1	263	157,08	156,9	0,11
2	296	157,08	157,07	0,006
3	378	157,08	157,3	0,14
Rata – rata				0,085

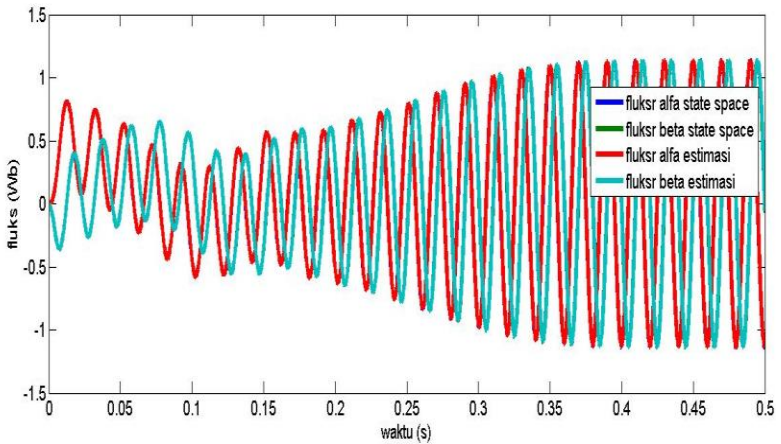
Seperti yang sudah dijelaskan di bab III, bahwa state keluaran dari observer terdiri dari $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$, λ_{ar} dan λ_{br} . State inilah yang nantinya akan digunakan untuk mendapatkan nilai error antara state riil dengan state yang diestimasi. Nilai error yang didapatkan nantinya akan mempengaruhi nilai estimasi kecepatan motor yang dihasilkan. Hasil pengujian observer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dimana diplot hasil $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$ riil dan $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$ hasil estimasi. Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa respon $i_{\beta s}$ maupun $i_{\alpha s}$ riil maupun hasil estimasi sama dan saling berhimpitan. Berawal dari keadaan transien, hingga mencapai kondisi steady. Adapun nilai *peak* $i_{\beta s}$ maupun $i_{\alpha s}$ riil dan estimasi mencapai keadaan steady sebesar 4,41 A pada detik ke 0,39 s. Namun, apabila diamati kembali secara lebih detail, terdapat perbedaan nilai $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$ riil dan $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$ dari hasil estimasi.

Namun, perbedaan nilai tersebut sangatlah kecil sehingga tidak terlihat dari Gambar 4.3.



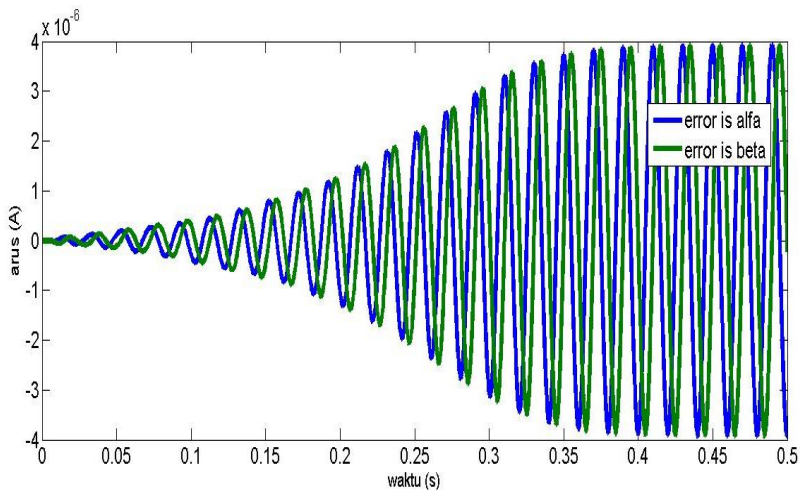
Gambar 4. 3 Respon arus riil dan estimasi

Langkah selanjutnya diplot respon hasil $\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$ riil dan $\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$ estimasi.



Gambar 4. 4 Respon fluks riil dan estimasi

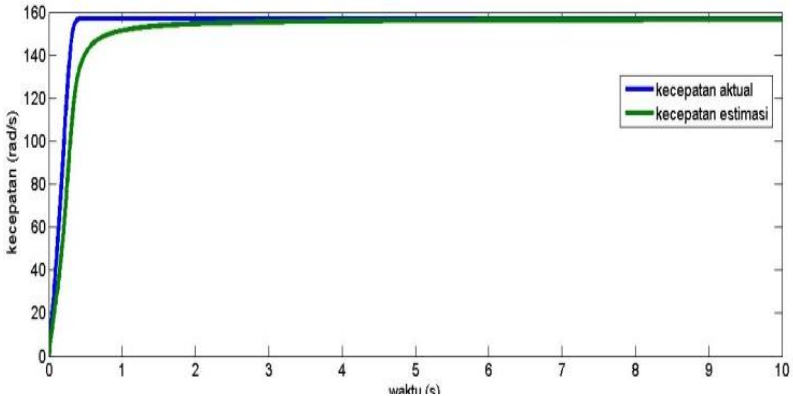
Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa respon $\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$ riil dan estimasi sama serta saling berhimpit. Berawal dari $\lambda_{\alpha r}$ riil dan estimasi mengalami kenaikan dari 0 menjadi 0,8 dan turun menjadi 0.3 pada detik ke 0.11 , lalu mencapai keadaan steady di nilai *peak* sebesar 1,138 Wb pada detik ke 0,39s seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sedangkan $\lambda_{\beta r}$ mengalami kenaikan dari 0 menuju 0,36 pada 0,008s dan steady pada nilai *peak* sebesar 1,138 Wb pada 0,39 s. Setelah mengetahui respon dari state estimasi keluaran observer, selanjutnya diplot error hasil selisih arus ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) riil dan arus ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) aktual seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Gambar 4.5 menunjukkan error ($y - \hat{y}$). Seperti yang terlihat di Gambar 4.5, error $i_{\beta s}$ dan $i_{\alpha s}$ konstan pada nilai $3,94 \times 10^{-6}$, yang mana bernilai sangat kecil.



Gambar 4. 5 Respon error antara arus riil dan estimasi

Setelah mengetahui error antara state aktual dan state estimasi, kecepatan motor (ω_r) estimasi didapatkan. Estimasi kecepatan motor (ω_r) ini akan dibandingkan dengan kecepatan

motor (ω_r) aktual atau riil dan diplot pada satu respon seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Respon kecepatan motor aktual dan estimasi

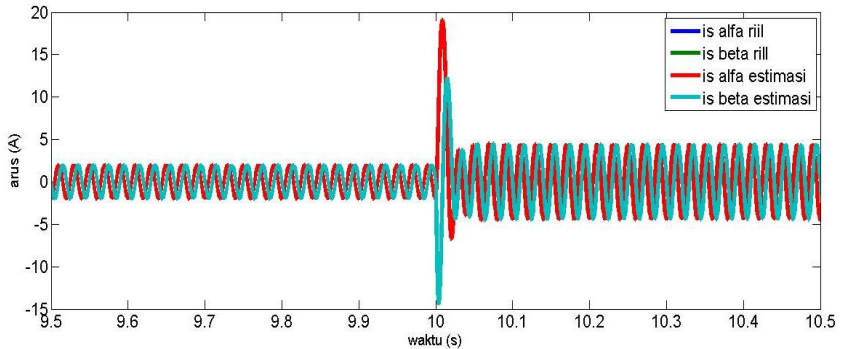
Pada gambar 4.6 tampak bahwa kecepatan motor (ω_r) aktual atau riil steady di nilai 157,08 rad/s saat diberi tegangan sebesar 380 Volt. Sedangkan estimasi kecepatan motor (ω_r) hasil observer steady di kecepatan 156,56 rad/s. Disini didapatkan gap (error) sebesar 0,52 rad/s. Adapun adanya error sebesar 0,52 ini diakibatkan oleh error hasil ($y - \hat{y}$). Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan perbandingan data ω_r dari hasil estimasi observer dengan hasil pengukuran di beberapa variasi tegangan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Data kecepatan motor estimasi dan pengukuran

No	Tegangan (V)	ω_r Estimasi (rad/s)	ω_r Pengukuran (rad/s)	Error (%)
1	263	156,15	156,9	0,48
2	296	156,28	157,07	0,50
3	378	156,56	157,3	0,47
Rata – rata				0,48

Dari Tabel 4.3 ditunjukkan bahwa hasil rata – rata error yang didapatkan dari perbandingan kecepatan motor (ω_r) dari hasil pengukuran dan kecepatan motor (ω_r) estimasi dari simulasi mempunyai error sebesar 0,48%.

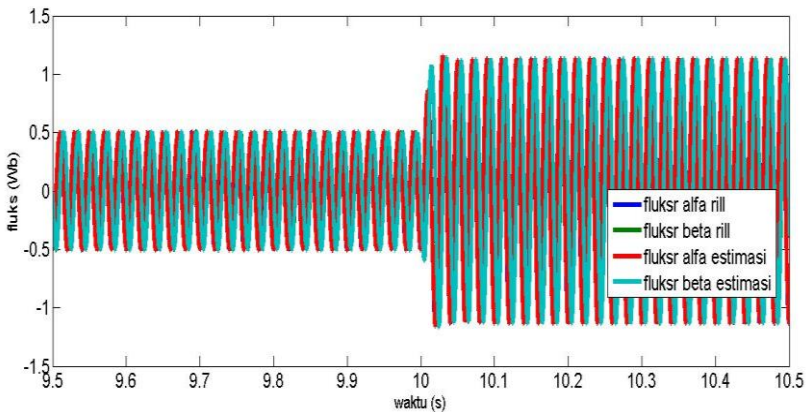
4.2 Perubahan Menggunakan Dua Tegangan Berbeda



Gambar 4. 7 Perubahan respon arus estimasi dan riil saat terjadi perubahan tegangan

Gambar 4.7 menunjukkan respon arus ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) estimasi dan riil. Di detik ke nol hingga detik kesepuluh, tegangan yang diberikan sebesar 163 volt. Dan tegangan diubah pada saat detik kesepuluh menjadi 380 volt. Dapat dilihat disini bahwa terdapat perubahan arus. Dimana pada saat tegangan 163 volt arus ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) riil maupun estimasi menunjukkan nilai *peak* sebesar 2,54 A, sedangkan ketika diubah dengan tegangan 380 volt arus ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) riil maupun estimasi naik mengalami osilasi dan steady di nilai *peak* sebesar 4,41 A. Hal ini menunjukkan hubungan bahwa kenaikan tegangan pada sumber maka akan memperbesar estimasi arus ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) dan arus riil ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$). Selanjutnya dilihat respon dari fluks riil ($\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$) dan fluks estimasi ($\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$) saat dilakukan perubahan tegangan seperti yang tertera pada Gambar 4.8. Gambar 4.8 menunjukkan respon fluks estimasi ($\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$)

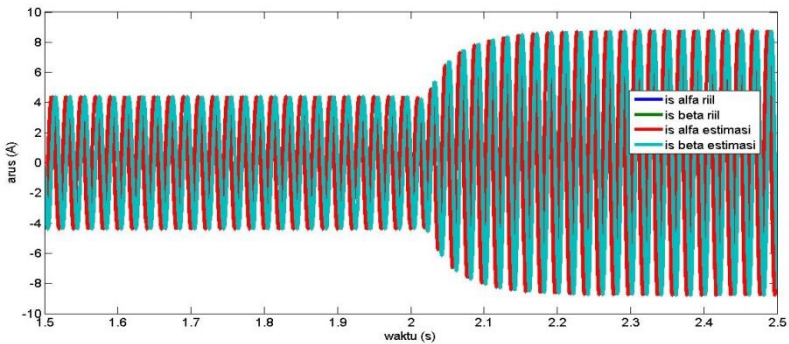
dan fluks riil ($\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$) di detik ke nol hingga kesepuluh, tegangan yang diberikan sebesar 163 volt. Dan tegangan diubah pada saat detik kesepuluh menjadi 380 volt. Dapat dilihat disini bahwa saat tegangan diubah maka terdapat perubahan pula pada fluks. Dimana pada saat tegangan 163 volt fluks didapat fluks *peak* sebesar 0,5 Wb, sedangkan ketika diubah dengan tegangan 380 volt fluks naik berosilasi dan menunjukkan keadaan steady di nilai *peak* sebesar 1,138 Wb. Hal ini menunjukkan hubungan bahwa kenaikan tegangan pada sumber maka akan memperbesar fluks estimasi dan fluks riil.



Gambar 4. 8 Perubahan respon fluks estimasi dan riil saat terjadi perubahan tegangan

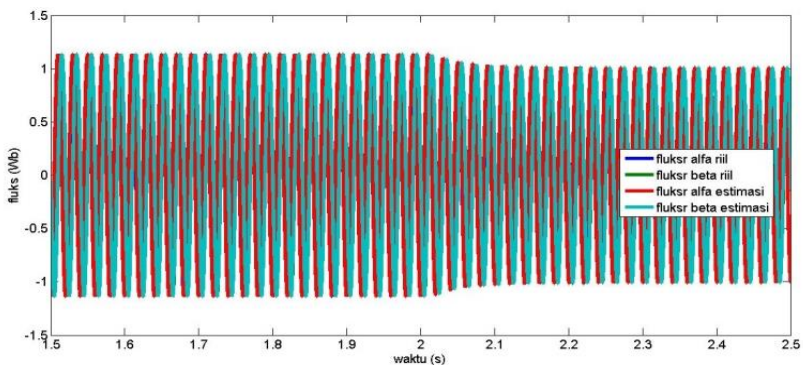
4.3 Hasil Uji Beban

Selain melakukan pengujian tanpa beban, disini juga dilakukan simulasi dengan menggunakan beban. Adapun hasil uji beban memberikan pengaruh pada arus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.



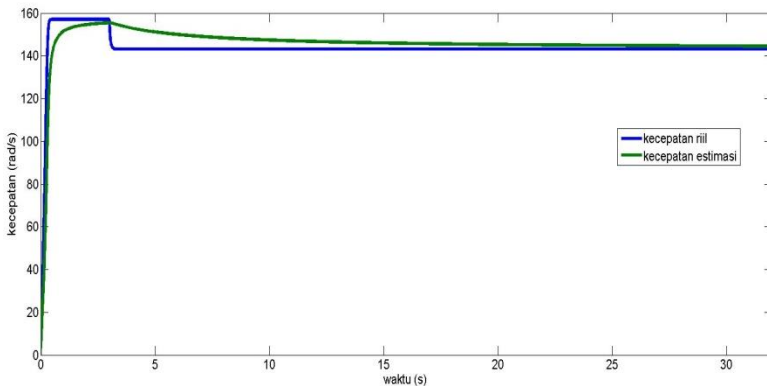
Gambar 4. 9 Respon arus riil dan estimasi ketika beban 10 Nm

Adapun Gambar 4.9 diatas menunjukkan respon arus riil dan estimasi ketika kondisi diberi beban atau *torsi load* sebesar 10 Nm. Pemberian beban dilakukan pada detik ke 2. Dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan pada grafik respon arus ketika diberi beban. Saat kondisi belum diberi beban yaitu pada detik ke 1,5 s hingga 2 s , arus menunjukkan nilai *peak* sebesar 4,41 A. Namun, ketika diberi beban pada detik ke 2 s, arus mengalami keadaan transien hingga detik ke 2,2 s, lalu mencapai kondisi steady di nilai *peak* sebesar 8,83 A. Selanjutnya dilihat pengaruh pemberian beban atau *torsi load* terhadap fluks riil dan estimasi.



Gambar 4. 10 Respon fluks riil dan estimasi ketika beban 10 Nm

Gambar 4.10 diatas menunjukkan keadaan fluks riil dan estimasi ketika diberikan beban atau *torsi load* sebesar 10 Nm. Pemberian beban dilakukan pada detik yang sama dengan arus yaitu detik ke 2s. Dapat dilihat bahwa pada detik 1,5s hingga detik ke 2s menunjukkan keadaan belum diberikan *torsi load* dimana pada kondisi ini didapatkan nilai fluks *peak* sebesar 1,138 Wb. Lalu, mulai detik ke 2s fluks diberikan *torsi load* sebesar 10 Nm. Dapat kita lihat bahwa fluks mengalami penurunan yang dimulai dengan kondisi transien hingga detik ke 2,1 s, lalu mencapai kondisi steady di nilai *peak* sebesar 1,011 Wb. Setelah itu dilihat pengaruh pemberian *torsi load* pada kecepatan motor riil dan estimasi.

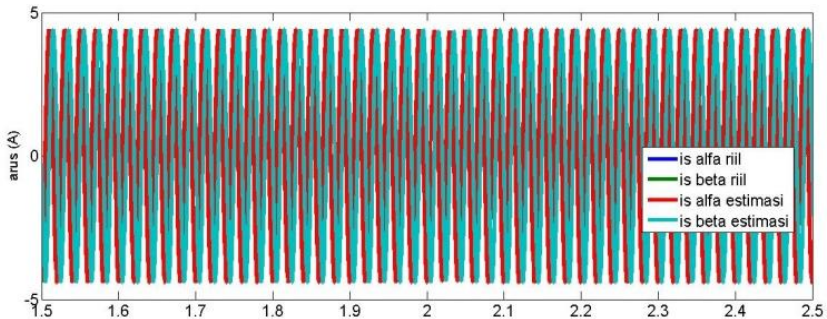


Gambar 4. 11 Respon kecepatan motor riil dan estimasi ketika beban 10 Nm

Dapat dilihat pada Gambar 4.11 menunjukkan respon kecepatan motor riil dan estimasi ketika diberikan *torsi load* sebesar 10 Nm. Pada detik ke 0 hingga 2s, yaitu kondisi ketika belum diberikan *torsi load* kecepatan riil menunjukkan berada pada nilai kecepatan 157,08 rad/s. Lalu saat detik ke 2s yaitu saat pemberian *torsi load*, kecepatan motor riil dan estimasi mengalami penurunan kecepatan. Kecepatan motor riil setelah diberi beban mencapai kondisi steady di nilai 143,15 rad/s, dan

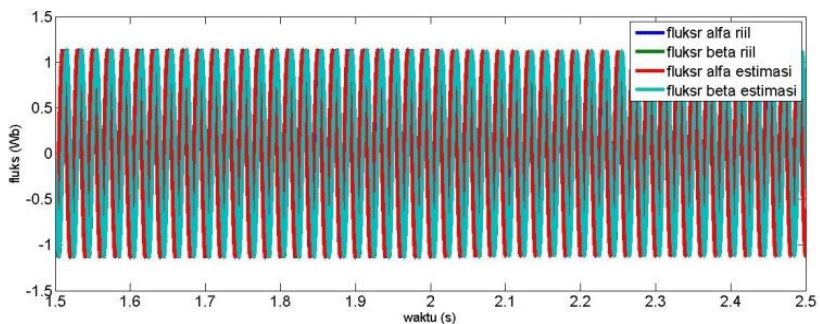
kecepatan motor estimasi setelah diberi beban mencapai kondisi steady 143,85 rad/s pada 10s , error yang didapat sebesar 0,48%.

Selain itu, dilakukan pula pengujian dengan *torsi load* bervariasi yaitu 1 Nm, 3 Nm dan 6 Nm, dan dilakukan analisis terhadap hasil arus, fluks, serta kecepatan motor pada masing masing variasi *torsi load*.



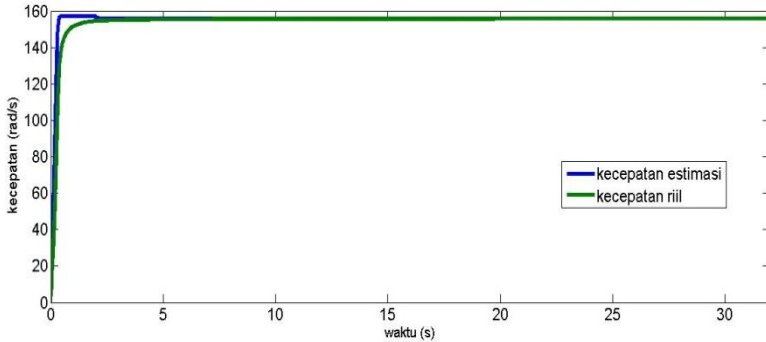
Gambar 4. 12 Respon arus riil dan estimasi saat diberi beban 1 Nm

Gambar 4.12 diatas menunjukkan respon dari arus riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 1 Nm. Adapun *torsi load* 1 Nm diberikan pada saat detik ke dua. Dan terdapat perubahan nilai arus yang mana sebelum diberi *torsi load* arus sebesar 4,41 A dan setelah diberikan *torsi load* arus berubah naik pada nilai *peak* sebesar 4,50 A dan *steady* pada detik ke 2,01 s.



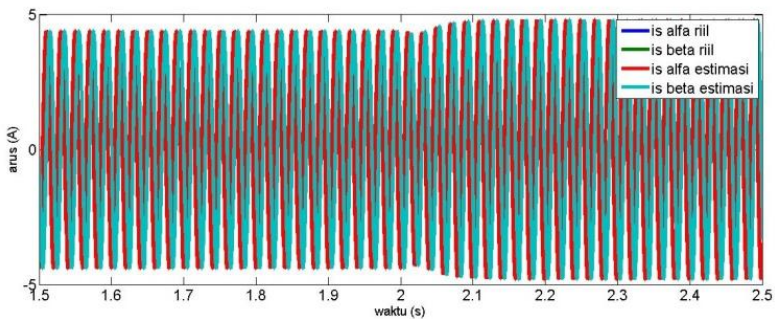
Gambar 4. 13 Respon fluks riil dan estimasi saat beban 1 Nm

Gambar 4.13 diatas menunjukkan respon fluks riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* 1 Nm. *Torsi load* ini diberikan saat detik ke dua, dan nilai fluks pun berubah dari keadaan tidak diberikan beban sebesar 1,138 Wb turun menjadi nilai *peak* sebesar 1,130 Wb dan steady pada detik ke 2,01 s.



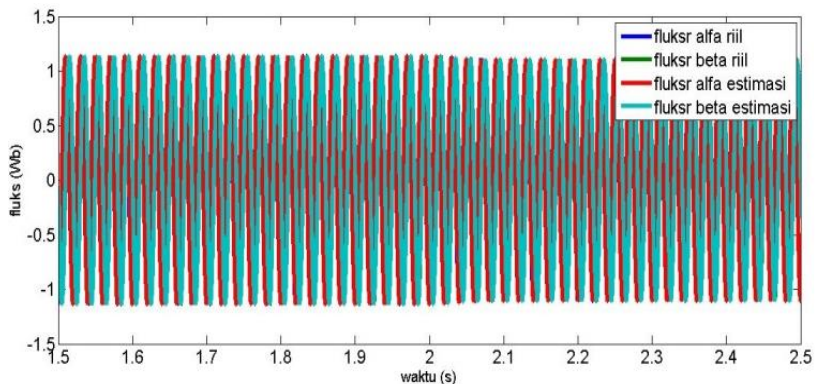
Gambar 4. 14 Respon kecepatan riil dan estimasi saat diberi beban 1 Nm

Gambar 4.14 diatas menunjukkan respon dari kecepatan motor riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 1 Nm. Adapun *torsi load* ini diberikan saat detik ke dua. Didapatkan hasil kecepatan motor riil sebesar 155,92 rad/s sedangkan respon kecepatan motor estimasi sebesar 155,8 rad/s. Didapatkan error sebesar 0,07%. Dan respon mulai mencapai keadaan steady pada detik ke 4 s.



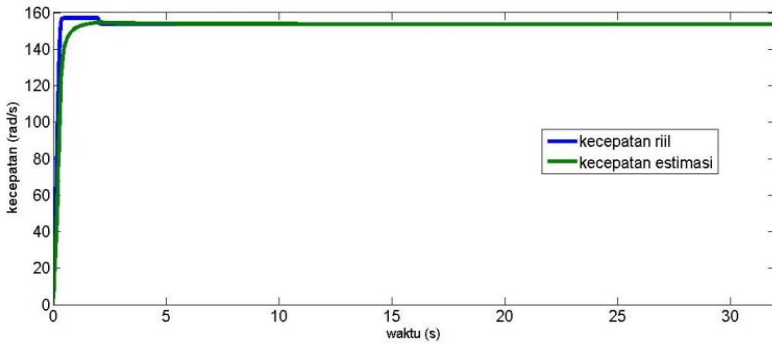
Gambar 4. 15 Respon arus riil dan estimasi saat diberi beban 3 Nm

Adapun Gambar 4.15 diatas menunjukkan respon arus riil dan estimasi ketika kondisi diberi beban atau *torsi load* sebesar 3 Nm. Pemberian beban dilakukan pada detik ke 2. Dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan pada grafik respon arus ketika diberi beban. Saat kondisi belum diberi beban yaitu pada detik ke 1,5 s hingga 2 s , arus menunjukkan nilai *peak* sebesar 4,41 A. Namun, ketika diberi beban pada detik ke 2 s, arus mengalami keadaan transien hingga detik ke 2,2 s, lalu mencapai kondisi steady di nilai *peak* sebesar 5,02 A pada detik ke 2,02 s.



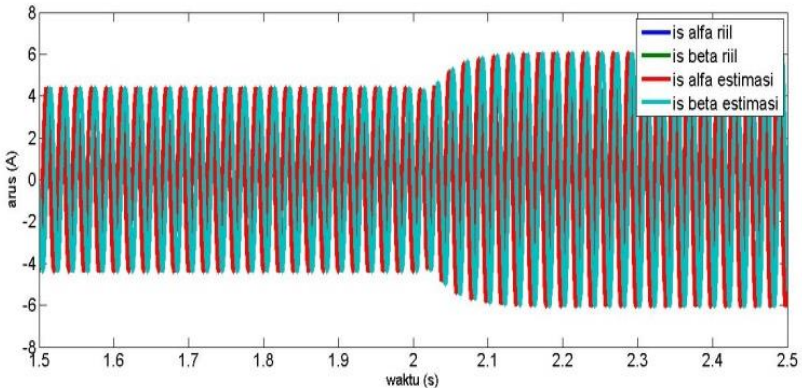
Gambar 4. 16 Respon fluks riil dan estimasi saat *torsi load* 3 Nm

Gambar 4.16 diatas menunjukkan keadaan fluks riil dan estimasi ketika diberikan beban atau *torsi load* sebesar 3 Nm. Pemberian beban dilakukan pada detik yang sama dengan arus yaitu detik ke 2s. Dapat dilihat bahwa pada detik 1,5s hingga detik ke 2s menunjukkan keadaan belum diberikan *torsi load* dimana pada kondisi ini didapatkan nilai fluks *peak* sebesar 1,138 Wb. Lalu, mulai detik ke 2s fluks diberikan *torsi load* sebesar 10 Nm. Dapat kita lihat bahwa fluks mengalami penurunan yang dimulai dengan kondisi transien hingga detik ke 2,03 s, lalu mencapai kondisis steady di nilai *peak* sebesar 1,124 Wb. Setelah itu dilihat pengaruh pemberian *torsi load* sebesar 3 Nm pada kecepatan motor riil dan estimasi.



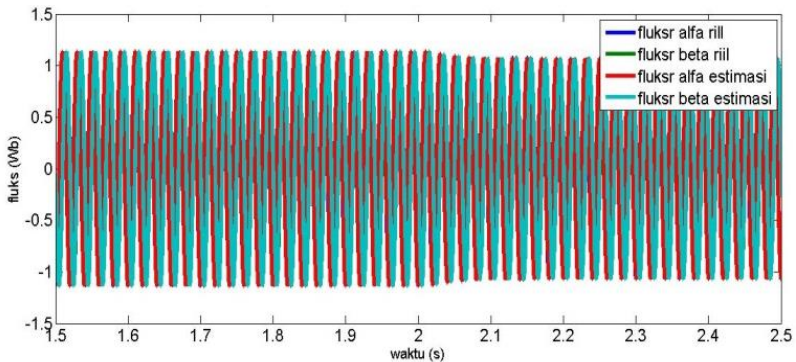
Gambar 4. 17 Respon kecepatan motor riil dan estimasi saat *torsi load* 3 Nm

Gambar 4.17 diatas menunjukkan respon dari kecepatan motor riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 3 Nm. Adapun *torsi load* diberikan saat detik ke dua. Hasil kecepatan motor riil sebesar 153,58 rad/s dan respon kecepatan motor estimasi sebesar 153,57 rad/s, serta error 0,0065%. Dan respon mulai mencapai keadaan steady pada detik ke 6,5 s.



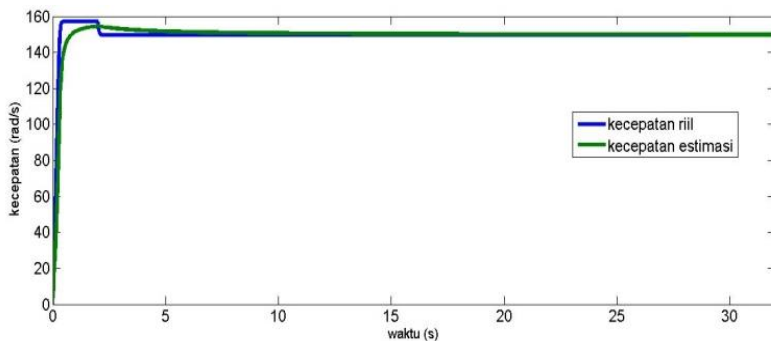
Gambar 4. 18 Respon arus riil dan estimasi saat *torsi load* 6 Nm

Gambar diatas menunjukkan respon dari arus riil dan estimator saat diberikan *torsi load* sebesar 6 Nm. Adapun *torsi load* 6 Nm diberikan pada saat detik ke dua. Dan terdapat perubahan nilai arus yang mana sebelum diberi *torsi load* arus sebesar 4,41 A dan setelah diberikan *torsi load* arus berubah naik pada nilai *peak* sebesar 6,09 A dan *steady* pada detik ke 2,18 s.



Gambar 4. 19 Respon fluks riil dan estimasi saat *torsi load* 6 Nm

Gambar 4.19 diatas menunjukkan respon fluks riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* 6 Nm. *Torsi load* ini diberikan saat detik ke dua, dan nilai fluks pun berubah dari keadaan tidak diberikan beban sebesar 1,138 Wb turun menjadi nilai *peak* sebesar 1,118 Wb dan *steady* pada detik ke 2,08 s.



Gambar 4. 20 Respon kecepatan motor riil dan estimasi saat *torsi load* 6 Nm

Gambar 4.20 diatas menunjukkan respon dari kecepatan motor riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 6 Nm. Adapun *torsi load* ini diberikan saat detik ke dua. Didapatkan hasil kecepatan motor riil sebesar 149,6 rad/s sedangkan respon kecepatan motor estimasi sebesar 149,9 rad/s. Diperoleh error sebesar 0,2%. Dan respon mulai mencapai keadaan *steady* pada detik ke 8 s.

Dari data pengujian variasi *torsi load* yang telah dilakukan diatas, diperoleh nilai *time constant* arus, fluks dan kecepatan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 *Time constant* pada pengujian beban

No.	<i>Torsi load</i>	τ_{arus}	τ_{fluks}	$\tau_{\text{kecepatan}}$
1.	1 N_m	0,01 s	0,01 s	4 s
2.	3 N_m	0,03 s	0,03 s	6,5 s
3.	6 N_m	0,07 s	0,07 s	8 s
4.	10 N_m	0,09 s	0,09 s	10 s

Jika dicermati Tabel 4.4, meskipun waktu yang dibutuhkan arus estimasi dan fluks estimasi untuk mencapai waktu *steady* cukup singkat namun waktu kecepatan motor mencapai kondisinya cukup lama. Hal ini terjadi dikarenakan nilai kecepatan motor disini berasal dari banyak nilai kecepatan yang kemudian diolah dengan metode *discrete rms*.

Pada pengujian dengan beban dengan metode *Luenberger observer* ini tidak dibutuhkan informasi *torsi beban* sebagai inputan pada observer. Sehingga tidak diperlukan perhitungan *torsi load* terlebih dahulu untuk inputan pada observer. Selain itu dari hasil pengujian, waktu respon arus, fluks serta kecepatan dapat dilihat bahwa semakin cepat atau semakin pendek waktu yang dibutuhkan untuk mencapai keadaan *steady* pada respon arus dan respon fluks maka semakin cepat pula respon kecepatan motor mencapai keadaan *steady*nya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

- Dalam perancangan *Luenberger Observer* untuk aplikasi *speed sensorless induction motor* saat diberikan tegangan sebesar 380 V didapatkan $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$ riil dan $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$ hasil estimasi steady pada nilai *peak* sebesar 4,41 A pada 0,39s dan $\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$ riil dan estimasi steady pada nilai *peak* sebesar 1,138Wb pada 0,39s. Selain itu juga didapatkan kecepatan motor (ω_r) aktual atau riil steady di nilai 157,08 rad/s dan estimasi kecepatan motor (ω_r) hasil observer steady di kecepatan 156,56 rad/s.
- Pada pemodelan *Luenberger Observer* saat dibandingkan state arus ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) riil dan estimasi didapatkan error sebesar $3,94 \times 10^{-6}$.
- Pada perancangan *Luenberger Observer* ini juga dibandingkan dengan pengambilan data dari PT. INKA dan didapatkan error kecepatan motor (ω_r) riil terhadap data pengukuran sebesar 0,085% dan error kecepatan motor (ω_r) estimasi terhadap data pengukuran 0,48%.
- Perancangan *Luenberger Observer* dengan pemberian *torsi load* sebesar 10 Nm menyebabkan arus mengalami kenaikan dari kondisi awal 4,41 A naik menjadi 8,83A, sedangkan setelah pemberian *torsi load*, fluks mengalami kenaikan dari nilai 1,138 Wb menjadi 1,011 Wb. Kecepatan estimasi dan riil mengalami penurunan yaitu didapatkan kecepatan riil sebesar 143,15 rad/s dan kecepatan estimasi sebesar 144,3 rad/s .
- Dari pengujian dengan *torsi load* sebesar 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm dan 10 Nm didapatkan error terbesar pada saat *torsi load* 10 Nm yaitu sebesar 0,48% dimana kurang dari 0,5%

sehingga estimasi dengan menggunakan metode *Luenberger* observer dapat dikatakan cukup baik.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil pengujian adalah sebagai berikut:

- Pada penelitian ini membutuhkan waktu simulasi yang lama maka dapat dilakukan studi implementasi untuk mengetahui apakah memang membutuhkan waktu komputasi yang lama.
- Penggunaan metode *discrete rms* menyebabkan *time constant* pada kecepatan motor cukup lama diraih, perlu dilakukan pengujian dengan metode lain agar didapatkan *time constant* yang lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Allaoui, S., & Chafaa, K. (2015). Induction Motor State Estimation using Tuned Extended Kalman Filter. *IEEE 978-1-4673-6673-1*.
- Chan, T.-F., & Shi, K. (2011). Applied Intelligent Control Of Induction Motor Drives. *ISBN : 978-0-470-82556-3*.
- Farza, M., & Saad, M. (2018). Adaptive observer design for a class of nonlinear systems. Application to speed sensorless induction motor. *ScienceDirect (Automatica)*, 239-247.
- Fellow, J. (2002, Aug). Sensorless Control of Induction Motor Drives. *Proceedings of the IEEE, 90 No.8*, 1359 - 1394.
- Han, Q. (2019). Stator current model for detecting rolling bearing faults in induction motors using magnetic equivalent circuits. *ScienceDirect*, 554-575.
- Hussein, A. A., Salih, S. S., & Ghasm, Y. G. (2017). Implementation of Proportional Integral Observer Techniques for Load Frequency Control of Power System. *Science Direct 109C*, 754-762.
- Ibarra-Rojasa, S. M.-P. (2004). Global observability analysis of sensorless induction motors. *Automatica, 40*, 1079 - 1085.
- Meisel, J. (1966). Principles of electromechanical energy conversion.
- Nikbakhsh, A. (2019). Classification and comparison of rotor temperature estimation methods of squirrel cage induction motors. *ScienceDirect*, 779-802.

- Orlowska-Kowalska T., W. P. (2000). Comparative study of different flux estimators for sensorless induction motor drive. *Archives of Electrical Engineering*, 49, 49-63.
- Payan, M. B. (2019). Techno-economic optimal power rating of induction motor. *Science Direct Applied Energy* , 1031-1048.
- Pereira, L. A. (2019). Performance estimation of three-phase induction motors from no-load startup test without speed acquisition. *science direct*.
- Santos, V. S. (2018). Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring. *ScienceDirect*, 237-247.
- Savoia, A., Mengoni, M., Zarri, L., & Casadei, D. (2011). A Nonlinear Luenberger Observer for Sensorless Vector Control of Induction Motors. *Acemp - Electromotion*.
- Zhang, Q. (2002, MARCH). Adaptive Observer for Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) Linear Time-Varying Systems. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, 47.
- Zin, A. A. (2015). New algorithm for detection and fault classification on parallel transmission line using DWT and BPNN based on Clarke's transformation. *ScienceDirect:Neurocomputing*, 983-993.

LAMPIRAN

M File

Lm = 0.258;

Ls = 0.274 ;

Lr = 0.274;

Rr = 3.805 ;

Rs = 4.85;

P = 4;

J = 0.031;

Ts = 1e-6;

Tr = Lr/Rr;

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

a1 = (Lm^2*Rr+Lr^2*Rs)/(tho*Ls*Lr^2);

a2 = Lm*Rr/(tho*Ls*Lr^2);

a4 = Lm/Tr ;

a5 = 1/Tr;

am = (Lm/(tho*Ls*Lr));

A = [-a1 0 a2 0; 0 -a1 0 a2; a4 0 -a5 0; 0 a4 0
-a5];

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

E = [P/2*am 0; 0 -P/2*am; -P/2 0; 0 P/2];

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

D = zeros(2,2);

sys = ss(A,B,C,D);

[sysd,G]=c2d(sys,Ts,'zoh');

Ad = sysd.a;

Bd = sysd.b;

Cd = sysd.c;

Ed = E*Ts;

Aa = [Ad Ed; zeros(2,4) eye(2)];

Ba = [Bd;0 0;0 0];

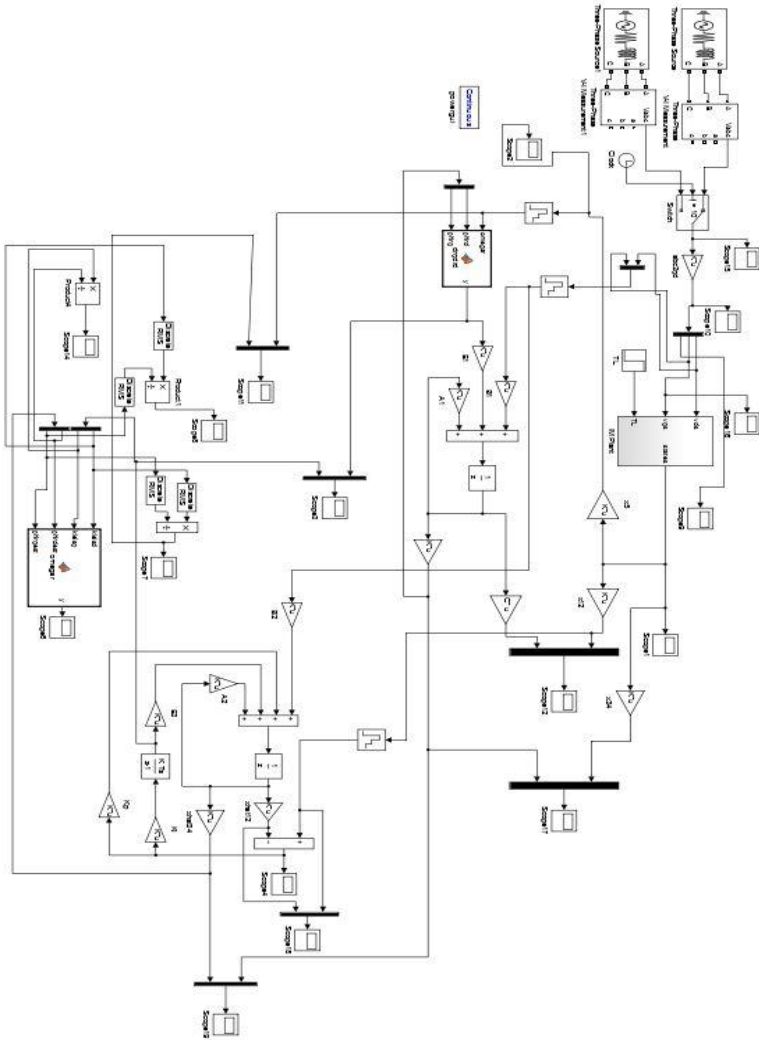
Ca = [1 0 0 0 0 0 ; 0 1 0 0 0 0];

R = eye(2)*1e-4;

Q = blkdiag(eye(4)*9e-4,eye(2)*5e-4);

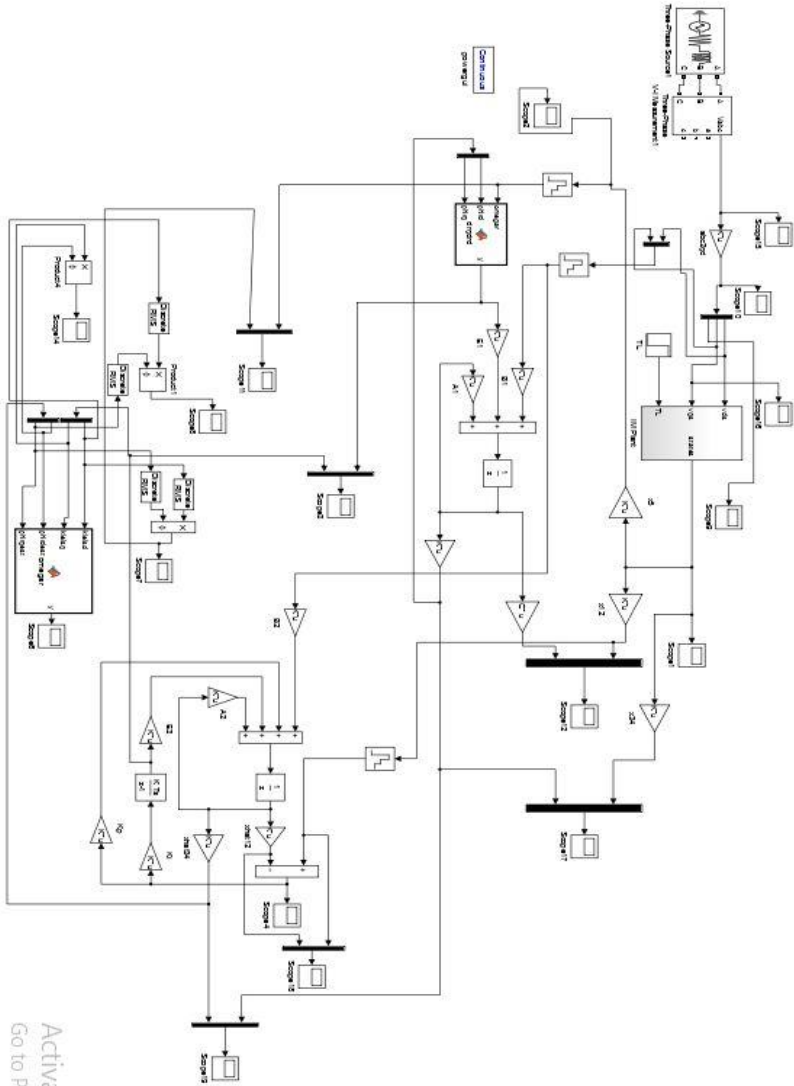
```
Z = dlqr(Aa',Ca',Q,R);  
Kp = Z(:,1:4);  
Ki = Z(:,5:6);
```

Gambar *Plant* dengan Dua Tegangan



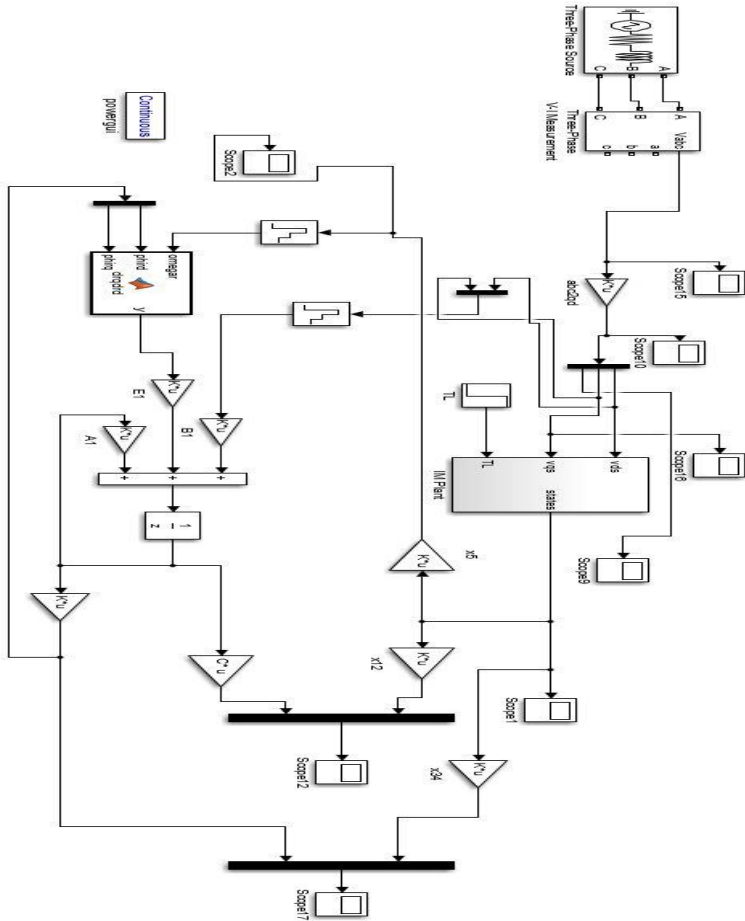
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Gambar Keseluruhan *Plant*



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Plant Motor Induksi



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Parameter Motor Induksi



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Setting Alat untuk Pengambilan Data



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Pengambilan Data Kecepatan Motor dengan Menggunakan Stroboskop

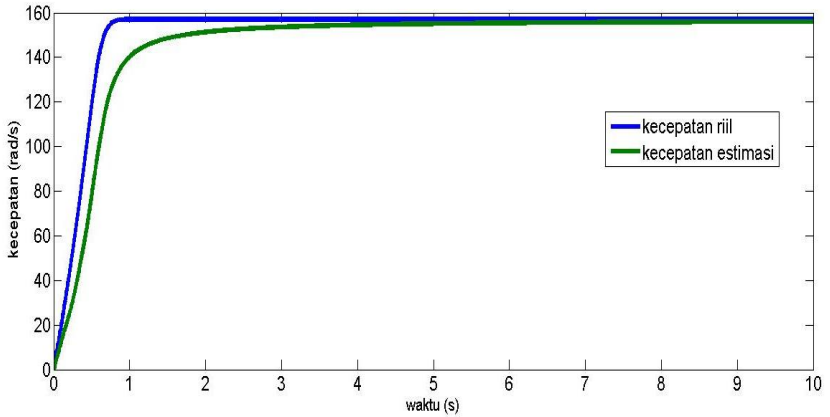


Pengambilan Data Kecepatan Motor dengan Menggunakan Tachometer

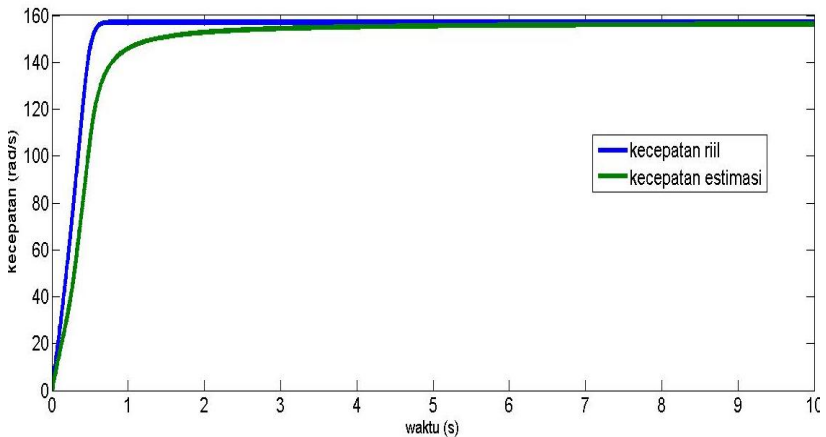


“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Hasil kecepatan motor (ωr) riil dan estimasi saat diberikan tegangan 263 Volt

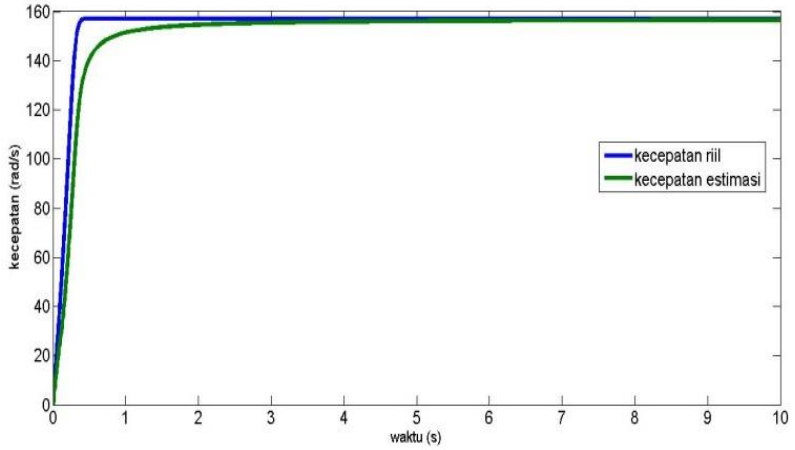


Hasil kecepatan motor (ωr) riil dan estimasi saat diberikan tegangan 296 Volt



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Hasil kecepatan motor (ω_r) riil dan estimasi saat diberikan tegangan 378 Volt



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Nama penulis Retno Indriani Ardini. Penulis dilahirkan di Pati, pada tanggal 31 Maret 1997 sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Pati, Jawa Tengah. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Panggungroyom 01 hingga tahun 2009, pendidikan menengah pertama di SMPN 3 Pati hingga tahun 2012, pendidikan menengah atas di SMAN 1 Pati 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 Luenberger Observer 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: ardiniretno@gmail.com*.

