



TESIS- TF185471

**SISTEM PREDIKSI KEANDALAN *REAL-TIME* PADA
MOTOR INDUKSI BERDASARKAN KESALAHAN
STATOR *INTER-TURN***

**SYAHRUL MUNIR
NRP. 02311850010010**

**DOSEN PEMBIMBING
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA INSTRUMENTASI INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**



THESIS- TF185471

**REAL-TIME RELIABILITY PREDICTION SYSTEM ON
INDUCTION MOTOR BASED ON STATOR INTER-TURN
FAULT**

**SYAHRUL MUNIR
NRP. 02311850010010**

Supervisors

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

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

**MASTER PROGRAM
INDUSTRIAL INSTRUMENTATION ENGINEERING
ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEMS ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020**

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Syahrul Munir

NRP : 02311850010010

Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S2 Teknik Fisika

Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)

Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tesis dengan judul “**Sistem Prediksi Keandalan Real-Time pada Motor Induksi Berdasarkan Kesalahan Stator Inter-Turn**” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tesis ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 3 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Syahrul Munir

NRP. 02311850010010

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

SYAHRUL MUNIR

NRP: 02311850010010

Tanggal Ujian : 13 Juli 2020

Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh :

Pembimbing:

1. Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T......
NIP. 19690507 199512 1 001

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

Penguji:

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc......
NIP. 19620822 198803 1 001

2. Dr. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes.....
NIP. 19571126 198403 2 002



Dr. Suyanto, S.T., M.T.
NIP. 19711113 195512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**SISTEM PREDIKSI KEANDALAN *REAL-TIME* PADA
MOTOR INDUKSI BERDASARKAN KESALAHAN STATOR
*INTER-TURN***

Nama Mahasiswa : Syahrul Munir

NRP : 02311850010010

Dosen Pembimbing I : Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing II : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Salah satu kegagalan yang sering terjadi pada motor induksi adalah akibat adanya kesalahan stator *inter-turn*. Kesalahan ini disebabkan oleh deteorasi yang bertahap pada insulasi pada *stator winding* yang menimbulkan hubungan arus pendek (*short-circuit*). Lama-kelamaan, kesalahan ini dapat mengakibatkan rusaknya motor induksi dalam waktu singkat jika dibiarkan. Kerusakan dari motor induksi dapat diartikan sebagai penurunan keandalan dari motor induksi tersebut. Sehingga, sangatlah penting untuk memantau keandalan sistem secara *real-time*. Oleh karena itu, pada penelitian ini diusulkan mengenai sistem prediksi keandalan secara *real-time* pada motor induksi. Tiga langkah yang perlu dilakukan yaitu perancangan estimasi kesalahan, perancangan algoritma prediksi kesalahan, dan perancangan algoritma prediksi keandalan. Perancangan estimasi kesalahan dilakukan berbasis *particle filtering* digunakan untuk mengestimasi kesalahan stator *inter-turn* dengan nilai RMSE terkecil untuk kesalahan pada arus d dan kesalahan arus q sebesar 0.0-47 dengan menggunakan 50 partikel. Selanjutnya hasil estimasi digunakan untuk menghitung prediksi kesalahan sensor melalui algoritma *exponential smoothing*. Hasil dari prediksi kesalahan sensor ini secara langsung digunakan untuk prediksi keandalan *real-time* dengan menggunakan *time interval* 1 detik dan 5 step prediksi. Sistem prediksi keandalan yang telah dirancang mampu menentukan terjadinya penurunan keandalan dari motor induksi dimana pada penelitian ini disimulasikan terjadi pada detik ke-10664 dengan kegagalan yang sebenarnya terjadi pada detik ke-11760.

Kata kunci : Motor induksi, stator *inter-turn*, prediksi keandalan *real-time*, *particle filtering*, *exponential smoothing*

REAL-TIME RELIABILITY PREDICTION SYSTEM ON INDUCTION MOTOR BASED ON STATOR INTER-TURN FAULT

Student Name : Syahrul Munir
NRP : 02311850010010
Supervisor I : Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
Supervisor II : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

ABSTRACT

One of the fault that often occurs in induction motor is the result of an stator inter-turn fault. This fault is caused by the gradual deterioration of insulation in the stator winding which cause a short-circuit. Sooner or later, this fault can cause damage to the induction motor in a short time if left unchecked. This damage of an induction motor can be interpreted as a decrease in the reliability of induction motor. So, it is very important to monitor the reliability of the system in real-time. Therefore, this research proposes a real-time reliability prediction system on induction motor. There are three steps that need to be done are designing the fault estimator, designing the fault prediction algorithm, and designing the reliability prediction algorithm. The design of error estimation based on particle filtering is used to estimate the stator inter-turn fault with the smallest RMSE value for fault at d current and q current are 0.0047 when using 50 particles. Furthermore, the estimation results are used to calculate the fault prediction via exponential smoothing algorithm. The results of this fault prediction are directly used to predict real-time reliability by using 1 interval time and 5 step prediction. The reliability prediction system that has been designed is able to determine the decrease in reliability of the induction motor which in this study was simulated to occur at 10664 seconds with the actual failure occurring at 11760 seconds.

Key words : Induction motor, stator inter-turn, real-time reliability prediction, particle filtering, exponential smoothing

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikan Tesis dengan judul “Sistem Prediksi Keandalan *Real-Time* pada Motor Induksi Berdasarkan Kesalahan *Stator Inter-Turn*”

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

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS serta Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Pascasarjana Teknik Fisika ITS yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Pascasarjana Teknik Fisika ITS
2. Bapak Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T. dan Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku pembimbing Tesis yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Dr.rer.nat. Ir. Aulia M.T. Nasution, M.Sc. selaku dosen wali yang senantiasa memberikan bimbingan kepada penulis selama perkuliahan
4. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
5. Kepada orang tua serta segenap keluarga atas kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
6. Seluruh keluarga asisten Laboratorium *Embedded and Cyber-Physical System*, terima kasih untuk semuanya.
7. Seluruh teman Tugas Akhir Laboratorium *Embedded and Cyber-Physical System*, terima kasih untuk semuanya.
8. Seluruh teman-teman mahasiswa pascasarjana Teknik Fisika, terima kasih atas dukungannya.
9. Seluruh teman-teman Departemen Teknik Fisika angkatan 2014, *Tree Fortress*, terima kasih untuk semuanya.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tesis ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tesis ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir maupun tesis bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 2 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
<i>TITLE PAGE</i>	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR NOTASI.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Motor Induksi	5
2.1.1 Transformasi Park dan Clarke.....	6
2.1.2 Pemodelan Motor Induksi	8
2.1.2.1 Kesalahan Stator <i>Inter-Turn</i>	11
2.2 <i>Extended State Observer</i>	13
2.3 <i>Particle Filtering</i>	15

2.4	<i>Exponential Smoothing</i>	17
2.5	Keandalan	18
2.6	Algoritma Prediksi Keandalan	19
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		21
3.1	Pemodelan Motor Induksi	22
3.2	Pemodelan Kesalahan Stator <i>Inter-Turn</i>	25
3.3	Perancangan Algoritma <i>Particle Filtering</i> (PF)	26
3.4	Perancangan Algoritma <i>Exponential Smoothing</i> (ES)	30
3.5	Perancangan Algoritma Prediksi Keandalan	31
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		33
4.1	Hasil Pemodelan Motor Induksi	33
4.2	Hasil Perancangan <i>Particle Filtering</i>	36
4.2.1	<i>Particle Filtering</i> dengan Jumlah Partikel 10	36
4.2.2	<i>Particle Filtering</i> dengan Jumlah Partikel 25	39
4.2.3	<i>Particle Filtering</i> dengan Jumlah Partikel 50	42
4.3	Hasil Perancangan Algoritma Prediksi Keandalan	45
BAB 5 PENUTUP		53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN		59
BIODATA PENULIS		65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor Induksi.....	5
Gambar 2.2 Sistem tiga fasa (a,b,c) dan sistem ekuivalen dua fasanya ($\alpha\beta$ dan dq)	7
Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	8
Gambar 2.4 Ilustrasi <i>winding</i> akibat adanya kesalahan stator <i>inter-turn</i>	12
Gambar 2.5 Rangkaian ekuivalen akibat adanya kesalahan <i>stator inter-turn</i>	13
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem	24
Gambar 3.3 Diagram Blok <i>Particle Filtering</i>	29
Gambar 4.1 Respon arus motor induksi dengan kemiringan $\eta_{cc} = 5 \times 10^{-4}$	33
Gambar 4.2 Respon fluks motor induksi dengan kesalahan $\eta_{cc} = 5 \times 10^{-4}$	34
Gambar 4.3 Respon kecepatan motor induksi <i>plant</i> dengan $\eta_{cc} = 5 \times 10^{-4}$	35
Gambar 4.4 Respon arus motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=10$	36
Gambar 4.5 Respon fluks motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=10$	37
Gambar 4.6 Respon kecepatan motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=10$	38
Gambar 4.7 Respon kesalahan arus <i>inter-turn plant</i> dan PF saat $N=10$	38
Gambar 4.8 Respon arus motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=25$	39
Gambar 4.9 Respon fluks motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=25$	40
Gambar 4.10 Respon kecepatan motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=25$	41
Gambar 4.11 Respon kesalahan arus <i>inter-turn plant</i> dan PF saat $N=25$	41
Gambar 4.12 Respon arus motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=50$	42
Gambar 4.13 Respon fluks motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=50$	43
Gambar 4.14 Respon kecepatan motor induksi <i>plant</i> dan PF saat $N=250$	44
Gambar 4.15 Respon kesalahan arus <i>inter-turn plant</i> dan PF saat $N=50$	44
Gambar 4.16 Respon kesalahan stator <i>inter-turn</i>	46
Gambar 4.17 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 1 detik dan 5 <i>step</i> prediksi	46
Gambar 4.18 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 1 detik dan 10 <i>step</i> prediksi	47

Gambar 4.19 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 5 detik dan 5 <i>step</i> prediksi.....	48
Gambar 4.20 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 5 detik dan 10 <i>step</i> prediksi.....	48
Gambar 4.21 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 10 detik dan 5 <i>step</i> prediksi.....	50
Gambar 4.22 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 10 detik dan 10 <i>step</i> prediksi.....	50

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Motor Induksi	23
Tabel 3.2 Parameter <i>Particle Filter</i>	27
Tabel 3.3 Parameter <i>Exponential Smoothing</i>	30

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR NOTASI

λ_{qs}	= fluks stator sumbu q (Wb)
V_{qs}	= tegangan stator sumbu q (V)
R_s	= hambatan (A)
i_{qs}	= arus stator sumbu q (A)
ω	= frekuensi arus dari stator (Hz)
λ_{ds}	= fluks stator sumbu d (Wb)
V_{ds}	= tegangan stator sumbu d (V)
i_{ds}	= arus stator sumbu d (A)
λ_{qr}	= fluks rotor sumbu q (Wb)
i_{qr}	= arus rotor sumbu q (A)
ω_r	= kecepatan sudut rotor (rad/s)
λ_{dr}	= fluks rotor sumbu d (Wb)
i_{dr}	= arus rotor sumbu d (A)
J	= momen inersia ($kg \cdot m^2$)
T_e	= torsi elektromagnetik (N. m)
B_m	= konstanta peredam (N. s/m)
T_{load}	= torsi beban (N. m)
L_s	= induktansi stator (H)
L_r	= induktansi rotor (H)
L_m	= induktansi mutual (H)
L_{ls}	= induktansi <i>leakage</i> stator (H)
L_{lr}	= induktansi <i>leakage</i> rotor (H)
p	= jumlah <i>pole</i>
θ	= posisi sudut dalam kerangka referensi (rad)
i_f	= arus hubungan pendek (A)
μ	= derajat hubungan pendek terjadi
R_f	= hambatan akibat hubungan pendek (A)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejak abad ke-19, penggunaan motor listrik terus berkembang. Saat ini motor listrik telah banyak digunakan pada berbagai bidang industri. Salah satu jenis motor listrik yang sering digunakan adalah motor induksi. Motor induksi merupakan sebuah perangkat yang mampu mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi bekerja dengan adanya arus terinduksi akibat perbedaan relatif putaran rotor dengan medan magnet yang berputar. Motor induksi lebih dipilih untuk keperluan industri dikarenakan biaya murah, mudah dirawat, dan efisiensi tinggi. Motor induksi yang digunakan secara terus-menerus dapat mengalami beberapa jenis kesalahan maupun kegagalan. Adanya kesalahan dan kegagalan ini dapat mempengaruhi performansi motor induksi tersebut.

Kesalahan yang terjadi pada motor induksi dapat dikategorikan menjadi kesalahan mekanik dan elektrik (Yektaniroumand, Azari, & Gholami, 2018). Kesalahan mekanik dapat berupa kerusakan *bearing* atau cacat pada *shaft*. Sedangkan kesalahan elektrik dapat dikategorikan lagi menjadi kesalahan stator dan rotor. Kesalahan rotor dapat berupa demagnetisasi dari magnet permanen hingga kerusakan *rotor bar*. Kesalahan stator dapat berupa cacat pada lilitan stator maupun cacat pada inti stator. Berdasarkan literatur (Kliman, Premerlani, Koegl, & Hoeweler, 2002), sekitar 35% dari kesalahan yang paling sering terjadi adalah kesalahan pada lilitan stator.

Salah satu jenis kesalahan pada lilitan stator adalah akibat adanya kesalahan *inter-turn stator winding*. Kesalahan ini disebabkan oleh deteorasi yang bertahap pada insulasi pada *stator winding* yang menimbulkan hubungan arus pendek (*short-circuit*) (Yun, Lee, Lee, Lee, & Yoo, 2009). Jika hal tersebut terjadi, maka dapat menimbulkan arus yang tinggi dan meningkatkan beban kerja motor induksi. Pada akhirnya, kesalahan ini akan mengakibatkan rusaknya motor induksi dalam waktu singkat jika dibiarkan (Williamson & Mirzoian, 1985) (Kliman et al.,

2002). Kerusakan dari motor induksi tersebut dapat diartikan sebagai penurunan keandalan dari motor induksi tersebut.

Keandalan dari sebuah sistem secara konvensional hanya ditentukan saat sistem tersebut diproduksi ataupun berdasarkan data historis. Hal ini mengakibatkan keandalan tersebut hanya terbatas pada penggunaan awal saja. Padahal, keandalan tersebut sejatinya akan menurun akibat pengoperasian sehari-hari. Sehingga, sangatlah penting untuk memantau keandalan sistem secara *real-time*, dimana kondisi lingkungan berubah-ubah (Lu, Kolarik, & Lu, 2001).

Penelitian mengenai keandalan *real-time* telah berkembang sejak awal tahun 2000-an. Secara umum, terdapat dua subjek penelitian mengenai keandalan *real-time*, yakni dengan meninjau keandalan dari sebuah sistem dan keandalan dari sebuah komponen individu. Penelitian pada lingkup keandalan dari sebuah sistem salah satunya dilakukan oleh Tanrioven (Tanrioven, Wu, Turner, Kocatepe, & Wang, 2004). Tanrioven melakukan pendekatan analisa keandalan *real-time* pada sistem transmisi tenaga dengan model fuzzy Markov. Penelitian lain juga dilakukan oleh Xu, yakni pada sistem *three-vessel water tank*, DTS200, dengan menggunakan algoritma *hidden degradation process identification* (Zhengguo Xu, Yindong Ji, & Donghua Zhou, 2008) dan juga melalui hasil prediksi kesalahan (Zhengguo Xu, Yindong Ji, & Donghua Zhou, 2009).

Pada subjek penelitian keandalan *real-time* ditinjau dari komponen, terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan. Salah satunya oleh Chinnam (Chinnam, 1999), dilakukan penelitian mengenai bagaimana mengetahui karakteristik kegagalan dari komponen tertentu. Hal ini dilakukan dengan memodelkan sinyal degradasi dari komponen tersebut menggunakan jaringan syaraf tiruan (JST). Penelitian lain juga dilakukan oleh Huitan Lu dkk. (Lu et al., 2001) untuk melakukan pendekatan dalam prediksi keandalan *real-time* yang dapat diaplikasikan dalam unit individu yang beroperasi dalam kondisi dinamis. *Exponential smoothing* dipilih untuk memprediksi variabel performansi kedepannya yang nantinya digunakan untuk menentukan keandalan sistem. Selanjutnya, Chinnam (Chinnam, 2002) mengembangkan penelitian sebelumnya dengan menggunakan pendekatan statistika dalam memodelkan sinyal degradasi. Pendekatan statistika yang dipilih adalah pendekatan orde satu dalam autokorelasi

residual serta regresi *weighted least-square*. Chinnam, bersama Mohan (Chinnam & Mohan, 2002), juga melakukan penelitian untuk melakukan estimasi keandalan secara *online* dengan menggunakan JST dan *wavelets* dari sinyal degradasi.

Dalam rangka untuk merancang sistem prediksi keandalan *real-time*, maka pada penelitian ini akan dirancang sebuah sistem untuk memprediksi keandalan dari motor induksi secara *real-time* berdasarkan hasil prediksi kesalahan stator *inter-turn*. Sistem prediksi kesalahan yang digunakan adalah *particle filtering* sebagai estimasi kesalahan dan *exponential smoothing* sebagai prediksi kesalahan. Metode *particle filtering* digunakan karena sistem motor induksi merupakan sistem non-linear. Hasil dari penelitian ini adalah sebuah contoh numerik untuk menunjukkan efektifitas dari sistem prediksi yang diusulkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan paparan latar belakang, maka permasalahan dalam penelitian ini antara lain :

- Bagaimana mendesain estimasi kesalahan pada motor induksi secara *real-time* berbasis *particle filtering*?
- Bagaimana menyusun algoritma perhitungan keandalan motor induksi secara *real-time* berbasis *particle filtering*?
- Apakah sistem prediksi keandalan yang telah dirancang mampu menentukan penurunan keandalan dari motor induksi sebelum terjadi kegagalan?

1.3 Tujuan

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Merancang desain estimasi kesalahan pada motor induksi secara *real-time* berbasis *particle filtering*.
- Merancang susunan algoritma perhitungan keandalan motor induksi secara *real-time* berbasis *particle filtering*.
- Merancang sistem prediksi keandalan yang mampu menentukan penurunan keandalan dari motor induksi sebelum terjadi kegagalan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini meliputi :

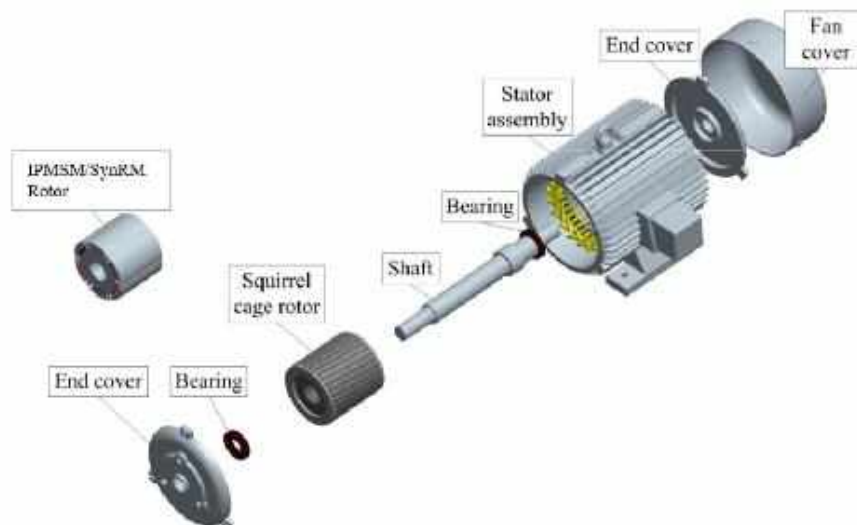
- 1 Jenis motor induksi yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa jenis *squirrel-cage*.
- 2 Kesalahan yang diuji adalah kesalahan stator *inter-turn* yang terjadi di fasa *a*.
- 3 Diasumsikan sistem hanya memiliki satu kesalahan saja pada satu waktu.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi

Motor induksi adalah salah satu jenis motor listrik, dimana motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, 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. Motor induksi sendiri secara umum dibagi menjadi 2 jenis yaitu motor induksi 1 fasa dan motor induksi 3 fasa.



Gambar 2.1 Motor Induksi (Li, Xu, & Wang, 2017)

Beberapa kelebihan dari motor induksi antara lain biaya yang murah, efisiensi yang tinggi, serta perawatan yang mudah. Sedangkan kelemahan dari motor induksi yaitu tingkat kesulitan dalam mengatur kecepatan yang tinggi serta membutuhkan arus awal yang sangat tinggi.

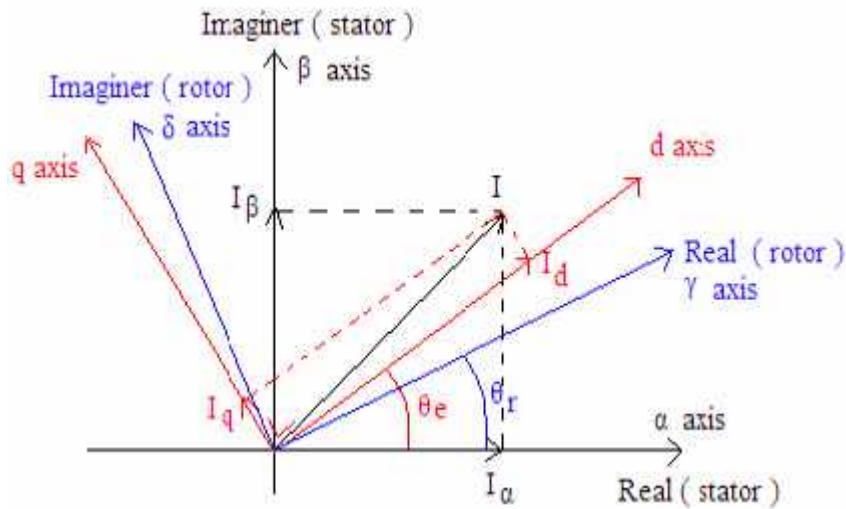
Secara umum, motor induksi memiliki 2 bagian penting, yaitu stator (bagian yang statis/diam) dan rotor (bagian yang berputar). Stator terdiri dari susunan laminasi dari aluminium atau besi tempa yang ditumpuk menjadi satu dan terdapat celah sebagai tempat lilitan (*winding*). Kawat tembaga yang dilapisi insulasi lalu dililitkan ke stator dan disusun sedemikian rupa sehingga menghasilkan fasa 120° secara elektrik. Sedangkan rotor terdiri dari laminasi baja dengan slot paralel yang ditempatkan secara aksial sebagai tempat konduktor. Pada jenis *squirrel-cage*, konduktor tersebut biasanya berupa batang tembaga, aluminium, maupun campuran. Batang konduktor tersebut dihubungkan tiap ujungnya secara mekanik maupun elektrik dengan cincin dan disusun dengan kemiringan tertentu (Theodore, 2002).

Prinsip kerja dari motor induksi adalah saat stator diberikan tegangan tiga fasa, lilitan pada stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Medan magnet yang berputar tersebut akan memotong batang pada rotor dan menciptakan perubahan fluks. Berdasarkan hukum Faraday, perubahan fluks tersebut akan menghasilkan tegangan induksi. Tegangan induksi tersebut akan menghasilkan arus yang akan mengalir dari konduktor, melewati ujung konduktor, dan bergerkan ke konduktor lain. Saat ada arus yang mengalir dalam sebuah medan magnet, maka akan menghasilkan gaya Lorentz berdasarkan aturan tangan kanan. Gaya inilah yang mengakibatkan motor induksi berputar.

2.1.1. Transformasi Park dan Clarke

Pada penelitian ini, motor induksi yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa. Sumber tegangan dapat dimisalkan dengan simbol A-B-C untuk merepresentasikan tiap fasanya. Sistem tiga fasa adalah sistem listrik AC yang menggunakan 3 penghantar yang mempunyai tegangan yang sama namun berbeda dalam sudut fasa sebesar 120° . Namun, untuk merepresentasikan tegangan pada motor induksi, dapat menggunakan tegangan dengan kerangka referensi 2 dimensi. Hal ini dilakukan agar dari tegangan yang awalnya berbentuk 3 dimensi menjadi lebih mudah dalam analisa dan perhitungan setelah diubah kedalam referensi 2 dimensi

Terdapat 2 jenis kerangka referensi 2 dimensi yang ada, yaitu kerangka $\alpha\beta$ dan kerangka dq . Kerangka $\alpha\beta$ merupakan kerangka stationer dua fasa yang terpisah 90° satu sama lain. Sedangkan kerangka dq merupakan kerangka bergerak dua fasa yang terpisah 90° satu sama lain. Kerangka $\alpha\beta$ biasa disebut sebagai *stator reference frame* dan kerangka dq sebagai *rotor reference frame*.



Gambar 2.2 Sistem tiga fasa (a,b,c) dan sistem ekuivalen dua fasanya ($\alpha\beta$ dan dq) (Gunawan, Yusivar, & Kadir, 2006)

Untuk mengubah sistem koordinat stasioner tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem koordinat dua fasa (α,β), maka diperlukan adanya transformasi Clarke. Adapun persamaan transformasi Clarke ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Sedangkan untuk mengubah sistem koordinat stasioner tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem koordinat dua fasa (d,q), maka diperlukan adanya transformasi Park. Adapun persamaan transformasi Park ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

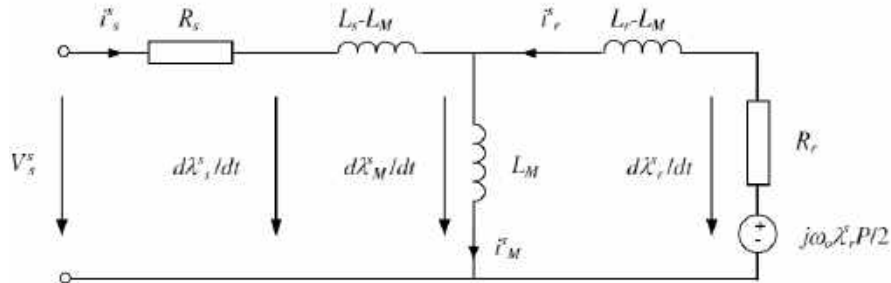
dengan

ψ = sudut antara sumbu stator fasa a dengan fasa d

2.1.2. Pemodelan Motor Induksi

Dalam memodelkan motor induksi, dapat dilakukan dengan pendekatan rangkaian ekuivalen tiga fasa pada *stator* dan *rotor*. Pendekatan ini dikenal sebagai kerangka abc dengan struktur ekuivalen seperti pada Gambar 2.3 dibawah ini.

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 penelitian ini digunakan pemodelan motor ditinjau dari kerangka acuan stator.



Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi (Chan & Shi, 2011)

Pada Gambar 2.3 menunjukkan gambar rangkaian ekuivalen dari motor induksi, dimana rangkaian tersebut berguna untuk mendapatkan persamaan yang akan dijadikan pemodelan motor induksi. Untuk mendapatkan persamaan umum dari motor induksi dalam kerangka acuan stator dapat dilihat pada persamaan (2.3) hingga (2.7) persamaan berikut:

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

$$\vec{V}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_r + (\omega_s - p\omega_r) \vec{\lambda}_r \quad (2.4)$$

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

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

Persamaan (2.3) jika dinyatakan dalam sumbu dq, menjadi:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} - \omega_s \lambda_{sq} \quad (2.7)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{sq} + \omega_s \lambda_{sd} \quad (2.8)$$

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:

$$0 = R_r i_r + \frac{d}{dt} \lambda_r + (\omega_s - p\omega_r) \lambda_r \quad (2.9)$$

Jika dinyatakan dalam sumbu dq maka persamaan (2.9) menjadi :

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rd} = -R_r i_{rd} + (\omega_s - p\omega_r) \lambda_{rq} \quad (2.10)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rq} = -R_r i_{rq} - (\omega_s - p\omega_r) \lambda_{rd} \quad (2.11)$$

Persamaan (2.5) jika dinyatakan dalam sumbu dq , maka persamaannya akan menjadi :

$$\lambda_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (2.12)$$

$$\lambda_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.6) dinyatakan dalam sumbu dq , maka persamaan akan berubah menjadi :

$$\lambda_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (2.14)$$

$$i_{rd} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{rd} - L_m i_{sd}) \quad (2.15)$$

$$\lambda_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (2.16)$$

$$i_{rq} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{rq} - L_m i_{sq}) \quad (2.17)$$

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

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rd} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{rd} - L_m i_{sd}) \right) + (\omega_s - p\omega_r) \lambda_{rq} \quad (2.18)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rq} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{rq} - L_m i_{sq}) \right) - (\omega_s - p\omega_r) \lambda_{rd} \quad (2.19)$$

Untuk mendapatkan persamaan arus stator pada sumbu d , maka persamaan (2.12) disubstitusikan ke persamaan (2.7) sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sd} + L_m i_{rd}) - \omega_s \lambda_{sq} \quad (2.20)$$

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + L_m \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_s \lambda_{sq} \quad (2.21)$$

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

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{sd} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{rd} - \omega_s \lambda_{sq} \quad (2.22)$$

Lalu persamaan (2.18) disubstitusikan ke persamaan (2.22), maka akan didapatkan persamaan berikut:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{d}{dt} i_{sd} + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} i_{sd} - \frac{L_m R_r}{L_r^2} \lambda_{rd} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s \lambda_{rq} - \frac{L_m}{L_r} p \omega_r \lambda_{rq} - \omega_s \lambda_{sq} \quad (2.23)$$

Lalu persamaan (2.13) dan (2.16) disubstitusikan ke persamaan (2.23), maka akan didapatkan persamaan berikut:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \right) \frac{d}{dt} i_{sd} + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} i_{sd} - \frac{L_m R_r}{L_r^2} \lambda_{rd} - \frac{L_m}{L_r} p \omega_r \lambda_{rq} + \frac{L_m}{L_r} \omega_s (L_r i_{rq} + L_m i_{sq}) - \omega_s (L_s i_{sq} + L_m i_{rq}) \quad (2.24)$$

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \right) \frac{d}{dt} i_{sd} + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} i_{sd} - \frac{L_m R_r}{L_r^2} \lambda_{rd} - \frac{L_m}{L_r} p \omega_r \lambda_{rq} - \omega_s i_{sq} \left(\frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r} \right) \quad (2.25)$$

$$\frac{d}{dt} i_{sd} = \frac{V_{sd}}{\sigma L_s} - \left(\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} \right) i_{sd} + \omega_s i_{sq} + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_s^2} \lambda_{rd} + p \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_s} \lambda_{rq} \quad (2.26)$$

Dimana :

$$\sigma = \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_r L_s} \quad (2.27)$$

Dengan melakukan langkah yang sama dengan sumbu d , dapat dicari nilai pada sumbu q sebagai berikut:

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (L_s i_{sq} + L_m i_{rq}) + \omega_s \lambda_{sd} \quad (2.28)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + L_m \frac{d}{dt} i_{rq} + \omega_s \lambda_{sd} \quad (2.29)$$

Persamaan (2.17) disubstitusikan pada persamaan (2.29) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{rq} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{sq} + \omega_s \lambda_{sd} \quad (2.30)$$

Setelah itu pada persamaan (2.19) disubstitusikan pada persamaan (2.30) sehingga didapatkan persamaan:

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{d}{dt} i_{sq} + \frac{L_m^2 R_r}{L_r^2} i_{sq} - \frac{L_m R_r}{L_r^2} \lambda_{rq} - \frac{L_m}{L_r} \omega_s \lambda_{rd} + \frac{L_m}{L_r} p \omega_r \lambda_{rd} + \omega_s \lambda_{sd} \quad (2.31)$$

Persamaan (2.12) dan (2.14) terakhir disubstitusikan ke persamaan (2.31) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{d}{dt} i_{sq} = \frac{V_{sq}}{\sigma L_s} - \left(\frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} \right) i_{sq} - \omega_s i_{sd} + \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_s^2} \lambda_{rq} - p \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_s} \lambda_{rd} \quad (2.32)$$

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

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

$$T_e = p \left(\frac{L_m}{L_r} \right) (\lambda_{rd} i_{sq} - \lambda_{rq} i_{sd}) \quad (2.34)$$

Sehingga akan didapat nilai berikut:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = p \left(\frac{L_m}{J L_r} \right) (\lambda_{rd} i_{sq} - \lambda_{rq} i_{sd}) - \frac{T_l}{J} \quad (2.35)$$

2.1.2. Kesalahan Stator *Inter-Turn*

Kesalahan *inter-turn* pada lilitan stator merupakan kesalahan yang disebabkan karena deteorasi dari insulasi kawat akibat adanya kombinasi dari getaran, suhu yang berlebih, ataupun kontaminasi. Jika lilitan pada stator terjadi hubungan *short-circuit*, maka arus yang besar akan terinduksi pada bagian tersebut, sehingga mengakibatkan meningkatnya suhu. Hal ini lama-kelamaan akan menimbulkan kerusakan motor dalam periode yang singkat, jika dibiarkan tidak terdeteksi (Yun et al., 2009).



Gambar 2.4 Ilustrasi *winding* akibat adanya kesalahan stator *inter-turn* (Yun et al., 2009)

Hubungan arus pendek ini dapat mengakibatkan ketidakseimbangan pada *winding* yang menghasilkan medan magnet yang tidak seimbang. Jika kesalahan stator *inter-turn* terjadi pada salah satu fasa, maka arus pada fasa tersebut akan lebih tinggi dibandingkan fasa yang lain. Selain itu, kesalahan ini juga dapat mengakibatkan perbedaan sudut fasa antara arus tegangan pada fasa yang lain (Yun et al., 2009).

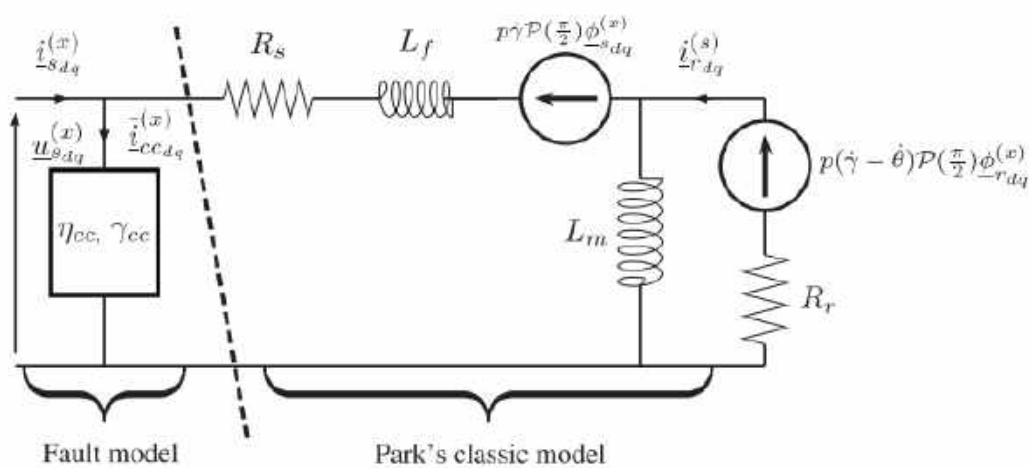
Adapun rangkaian listrik pada kesalahan stator *inter-turn* dapat dinyatakan pada Gambar 2.5, dimana arus *short-circuit* direpresentasikan dengan persamaan (Schaeffer & Bachir, 2013) :

$$i_{ccdq} = \frac{2\eta_{cc}}{3R_s} \mathcal{P}(-p\gamma) \mathcal{Q}(p\gamma_{cc}) \mathcal{P}(p\gamma) V_{dq} \quad (2.36)$$

dengan

$$\mathcal{P}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\mathcal{Q}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta)^2 & \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\theta) & \sin(\theta)^2 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$



Gambar 2.5 Rangkaian ekuivalen akibat adanya kesalahan *stator inter-turn* (Schaeffer & Bachir, 2013)

Terdapat dua parameter yang diperlukan untuk menentukan arus *short-circuit*, antara lain (Dash & Subudhi, 2010):

- Parameter lokalisasi, γ_{cc} , yang merupakan sudut antara stator yang mengalami *short-circuit* dan stator fasa *a*. Sehingga hanya terdapat tiga nilai, yaitu 0° , 120° , dan 240° yang berturut-turut mewakili stator yang mengalami *short-circuit* pada fasa *a*, *b*, dan *c*.
- Parameter deteksi, η_{cc} , yang merupakan perbandingan antara jumlah lilitan yang mengalami *short-circuit* dengan jumlah total lilitan pada keadaan normalnya. Nilai dari η_{cc} bernilai antara 0 dan 1.

2.2 Extended State Observer

Pada *particle filtering* digunakan sebuah *extended state* untuk mengestimasi keadaan (*state*) dari variabel yang tidak terukur berdasarkan model matematis sistem, sehingga observer juga dapat digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang terjadi pada suatu sistem jika kesalahan tersebut masuk dalam pemodelan. Suatu sistem umumnya dimodelkan dalam bentuk *state space*, yang dapat didefinisikan secara umum seperti persamaan sistem dibawah ini ini (Ogata, n.d.):

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.39)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.40)$$

dengan

A = matriks keadaan (*state*)

B = matriks kendali

C = matriks keluaran

D = matriks gangguan

x = vektor keadaan (*state*)

u = sinyal kontrol

y = vektor keluaran

Model matematis *observer* sama seperti model matematis pada sistem sehingga *observer* dapat mengestimasi keadaan sistem dalam bentuk persamaan ruang keadaan. Untuk mengkompensasi pengaruh arus *short-circuit* yang terjadi pada motor induksi pada waktu yang sama diperlukan modifikasi algoritma *observer* baru, algoritma tersebut dibentuk oleh (Indriawati, Agustinah, & Jazidie, 2020). Efek dari penambahan torsi beban direpresentasikan sebagai penambahan masukan vektor yang tidak diketahui bentuk vektor tersebut didefinisikan pada persamaan (2.43) dan (2.44), dimana matriks tersebut bertindak pada sistem dinamik dan pengukuran seperti yang direpresentasikan pada persamaan (2.38) dan persamaan (2.40) (Indriawati et al., 2020).

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2.41)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + F_s f_s(k) \quad (2.42)$$

Dengan:

F_s = matriks kesalahan

Selanjutnya *state* baru, ditambahkan untuk memindahkan kesalahan sensor sebagai berikut,

$$z(k + 1) = A_z T_s (y(k) - z(k)) + z(k) \quad (2.43)$$

$$z(k + 1) = -A_z T_s z(k) + A_z T_s (Cx(k) + F_s f_s(k)) + z(k) \quad (2.44)$$

Untuk A_z merupakan matriks identitas (I) untuk $A_z \in I^q$, sedangkan matriks dari pengaruh arus *short-circuit* didefinisikan sebagai $f = f_s$.

Dari persamaan (2.39) dapat didefinisikan matriks yang akan digunakan untuk mendapatkan matriks yang sudah diekspansi yang ditunjukkan pada persamaan berikut

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z T_s C & -A_z T_s + I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ A_z T_s F_s \end{bmatrix} [f_s(k)] \quad (2.45)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Sehingga persamaan (2.45) dan (2.46) dapat diubah ke dalam bentuk persamaan ruang keadaan menjadi,

$$\bar{x}(k+1) = \bar{A}\bar{x}(k) + \bar{B}u(k) + \bar{F}f_s(k) \quad (2.47)$$

$$z(k) = \bar{y}(k) = \bar{C}\bar{x}(k) \quad (2.48)$$

Selanjutnya ditambahkan *state* baru yang mengandung kesalahan sensor digunakan untuk merancang persamaan observer yang dituliskan dalam persamaan berikut

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(k+1) \\ f(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{F} \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ f(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B} \\ 0 \end{bmatrix} u + K_e [\bar{y}(k) - \hat{y}(k)] \quad (2.49)$$

$$\hat{y}(k) = \begin{bmatrix} \bar{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ f(k) \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

2.3 Particle Filtering

Particle filtering merupakan algoritma untuk mengestimasi keadaan sistem untuk sistem yang non-linier dan tidak terdistribusi secara Gaussian (Andrieu, Doucet, & Singh, 2004). Sebagai salah satu algoritma *filtering* terbaik, *particle filtering* telah banyak digunakan untuk estimasi keadaan sistem dinamik yang non-linier dalam bidang kontrol dan pemrosesan sinyal (Andrieu et al., 2004).

Particle filtering merupakan salah satu bagian dari *Bayesian filtering* yang nilai estimasinya berdasarkan metode *Monte Carlo*. Gagasan utamanya adalah mendekati perkiraan distribusi probabilitas *posterior*. Sampel \tilde{x}_t^i disebut juga sebagai partikel. Sehingga partikel menunjukkan kemungkinan nilai \tilde{x}_t^i . Setiap partikel mewakili satu keadaan hipotetis objek, dengan sampling diskrit yang sesuai dengan probabilitas. Beberapa sampel (partikel) dari *state* yang dihasilkan, masing-masing terkait dengan bobot yang mencirikan kualitas suatu partikel tertentu. Estimasi variabel didapatkan dengan menjumlahkan dari semua partikel. Adapun kunci utama dari *particle filtering* yaitu merepresentasikan fungsi *posterior density* dari partikel acak untuk menghitung nilai bobot yang akan menentukan nilai dari rata-rata (*mean*) posisi (Ki & Delp, 2009).

Terdapat beberapa algoritma untuk menunjukkan *particle filtering* dan filter yang sering digunakan adalah *Sequential Importance Resampling* (SIR). Algoritma ini dapat dilakukan secara rekursif dan akan memberikan estimasi optimal dari keadaan saat ini secara berurutan. Filter SIR akan diadopsi sebagai algoritma dasar untuk melakukan pemfilteran nonlinier (Gordon, Salmond, & Smith, 1993). Secara rinci, dapat memperkirakan sistem *state vector* menggunakan algoritma ini pada waktu nT . Adapun langkah – langkah pada *particle filtering* adalah sebagai berikut (Schön, 2010):

1. Inisialisasi

Pada tahap ini dilakukan inisialisasi parameter *particle filtering*. Selain itu, pada awal iterasi terdapat sekelompok sampel (partikel) yang akan di distribusikan secara acak dan ditentukan bobotnya berdasarkan distribusi tertentu. Dimana diasumsikan terdapat partikel acak $\{x_{p0}^i\}_{i=1}^N \sim p(x_0)$, $i = 1, \dots, N$, dimana N menunjukkan jumlah partikel dengan $t = 1$.

2. Update partikel

Update partikel dilakukan untuk membuat set partikel transisi baru. Nilai partikel selanjutnya didapatkan dengan cara mendistribusikan setiap partikel yang ada berdasarkan nilai partikel sebelumnya. Sejumlah N partikel baru dibangkitkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$x_{p_t}^i \sim p(x_t | x_{t-1}^i), \quad i = 1, \dots, N \quad (2.51)$$

Kemudian untuk $i = 1, \dots, N$, evaluasi bobot partikel berdasarkan persamaan berikut:

$$\tilde{w}_t^i = p(y_t | x_{p_t}^i) \quad (2.52)$$

Selanjutnya, nilai bobot yang baru dinormalisasikan berdasarkan total seluruh bobot saat ini. Bobot dinormalisasi oleh persamaan berikut:

$$w_t^i = \frac{\tilde{w}_t^i}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}_t^i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.53)$$

3. Resampling partikel

Setelah dilakukan pembobotan maka dilakukan resampling untuk menghindari degenerasi partikel yang tidak terpakai. Resampling dilakukan dengan membangkitkan sekumpulan partikel baru berdasarkan bobotnya.

Pada proses resampling, partikel dengan bobot yang besar ada kemungkinan terpilih beberapa kali sehingga ada beberapa partikel yang berbeda menempati posisi yang sama. Sedangkan, partikel yang memiliki bobot yang relatif rendah akan hilang dengan sendirinya. Untuk setiap $i = 1, \dots, N$, resampling partikel baru x_t^i sesuai dengan bobot partikel, dimana:

$$P = (x_t^i = x_t^k) = w_t^k, \quad k = 1, \dots, N \quad (2.54)$$

Kemudian kembali ke langkah 2.

Algoritma ini dapat dijalankan secara rekursif, dan memberikan prediksi optimal dari keadaan sekarang x_n secara sekuensial. Nilai estimasi kesalahan utama pada algoritma diatas mengandung nilai *noise* dari sistem dan pengukuran, sehingga estimasi diatas tidak dapat digunakan karena alasan akurasi. Sehingga, perlu dilakukan algoritma yang mampu mengurangi *noise* yang ada.

2.4 Exponential Smoothing

Exponential smoothing merupakan metode analisa *time-series* yang dapat digunakan untuk memperbaiki keluaran yang terganggu oleh *noise*. Selain itu, metode *Holt's* diadopsi untuk memproses prediksi kesalahan dengan asumsi bahwa kesalahan berbentuk linier. Algoritma prediksi kesalahan dapat dihitung melalui *exponential smoothing algorithm* sebagai berikut (Zhengguo Xu et al., 2009):

$$u_n = a\hat{a}_n + (1 - a)(u_{n-1} + s_{n-1}) \quad (2.55)$$

$$s_n = b(u_n - u_{n-1}) + (1 - b)s_{n-1} \quad (2.56)$$

Misalkan u_n adalah hasil estimasi yang diperhalus dan s_n adalah faktor pertumbuhan linear yang diestimasi. Diberikan hasil estimasi kesalahan \hat{a}_n ($n = 1, 2, \dots$) yang diperoleh dari sebelumnya. Dimana $0 < a < 1$ & $0 < b < 1$ adalah parameter *Holt's method* (Zhengguo Xu et al., 2009). Kondisi awal untuk *Holt's method* sebagai berikut:

$$u_1 = \hat{a}_1 \quad (2.57)$$

$$u_2 = \hat{a}_2 \quad (2.58)$$

$$s_2 = u_2 - u_1 \quad (2.59)$$

Setelah menghitung estimasi kesalahan pada saat nT dan estimasi faktor pertumbuhan, maka prediksi kesalahan dapat dihitung menggunakan algoritma berikut (Zhengguo Xu et al., 2009):

$$\bar{a}_{n+l} = u_n + s_n l T \quad (2.60)$$

Dengan

l : step prediksi

T : *time interval* untuk prediksi kesalahan

Penjelasan mengenai algoritma prediksi kesalahan adalah sebagai berikut

:

1. Step estimasi kesalahan yang diperhalus: Jika $n = 1$, atau $n = 2$, menghitung estimasi kesalahan yang diperhalus u_n menggunakan persamaan (2.57), atau (2.58). Jika $n \geq 3$ menghitung estimasi kesalahan yang diperhalus u_n menggunakan persamaan (2.54).
2. Step estimasi faktor pertumbuhan: Menghitung n -step prediksi faktor pertumbuhan s_n dengan menggunakan (2.59) jika $n = 2$, dan menghitung n -step estimasi faktor pertumbuhan s_n dengan menggunakan (2.56) jika $n \geq 3$.
3. Step prediksi kesalahan: Menghitung prediksi kesalahan \bar{a}_{n+l} dengan menggunakan persamaan (2.60).

2.5 Keandalan

Keandalan didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem atau komponen untuk melakukan fungsi yang diperlukan dalam kondisi yang ditentukan untuk waktu yang ditentukan (P. O'Connor, 2012). Menurut (Dhillon, 2005) keandalan adalah kemungkinan untuk tidak mengalami kegagalan atau dapat melaksanakan fungsinya selama periode waktu (t). Nilai fungsi *reliability* merupakan nilai probabilitas keandalan (R) bernilai $0 \leq R \leq 1$ (Ebeling, 1997), dengan nilai 0 menandakan tidak adanya kegagalan dan 1 menandakan adanya kegagalan total dari sistem.

Selain definisi kegagalan yang biasanya digunakan, yang berhubungan dengan nilai kesalahan yang mencapai batasan tertentu, definisi kegagalan lainnya yang biasa digunakan dalam literatur mengenai keandalan dinamik diambil dari (Siu, 1994). Jenis kegagalan ini didefinisikan sebagai variabel keadaan sistem yang memasuki area terlarang yang telah ditentukan berdasarkan penggunaan dari sistem.

Evaluasi keandalan dapat membantu dalam memperkirakan peluang sebuah sistem atau komponen untuk dapat melaksanakan fungsinya dalam jangka waktu tertentu dan dalam kondisi tertentu. Sistem atau komponen masih dapat beroperasi walaupun tidak dapat memenuhi fungsinya secara maksimal.

2.6 Algoritma Prediksi Keandalan

Prediksi akan selalu bersangkutan ketika melakukan evaluasi pada sebuah sistem. Hal ini dilakukan sebagai pertimbangan sebelum melakukan sebuah keputusan untuk membangun atau menggunakan sebuah sistem. Prediksi akan lebih berkaitan dengan analisa berdasarkan model dibandingkan dengan menggunakan data sebenarnya dan menyediakan dasar untuk pengujian, pembangunan dan evaluasi dari pada keandalan, kemudian dari pada itu terdapat juga bagian perawatan dan pengaturan lainnya (Blischke W & Prabhakar M, 2000).

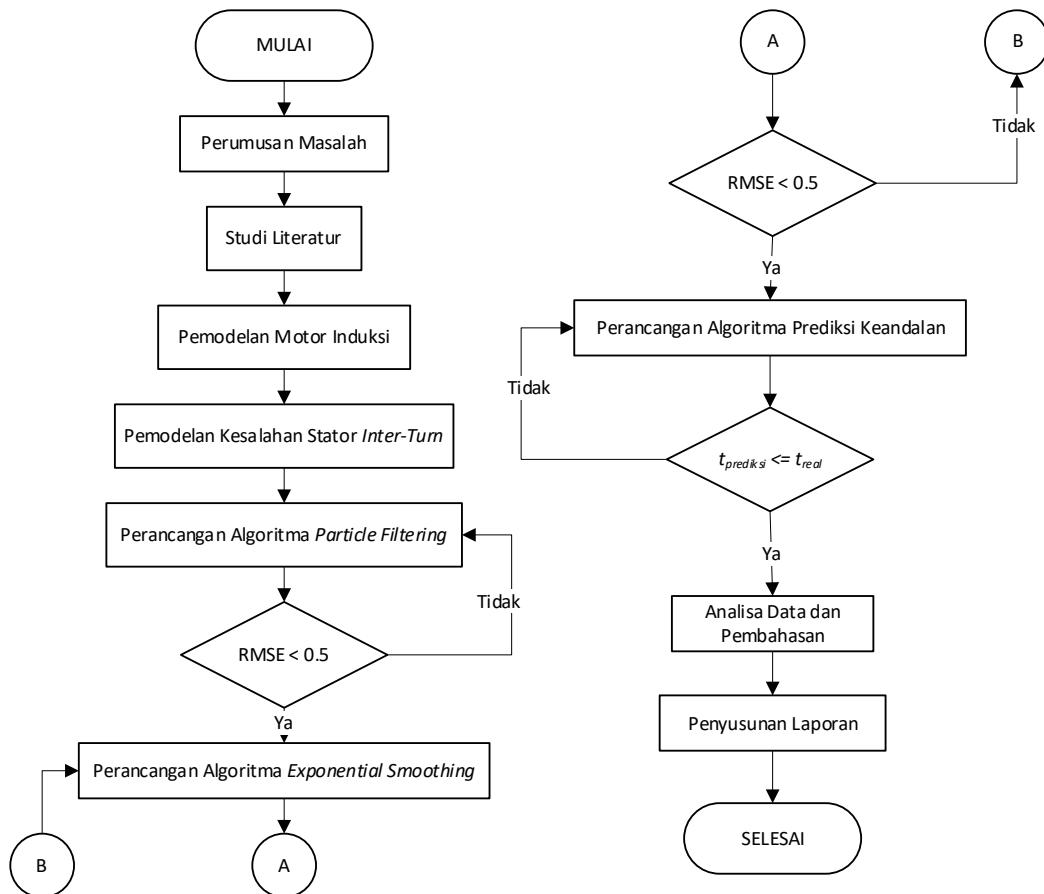
Setelah kesalahan diprediksi, keandalan pada sistem dinamik untuk beberapa waktu ke depan dapat diprediksi. Untuk memprediksi keandalan sistem, ada beberapa hal penting yang harus diperhatikan. Pertama, selain dari definisi kegagalan sebagai nilai kesalahan yang telah mencapai batas, kegagalan sistem juga didefinisikan sebagai keadaan sistem yang telah memasuki area terlarang \mathcal{M}_1 . Kedua, keadaan sistem tidak dapat diukur secara langsung, harus melalui estimasi dikarenakan kegagalan sistem didefinisikan dalam sebuah keadaan. Ketiga, kunci dari prediksi keandalan adalah prediksi kesalahan pada persamaan (2.45).

Prediksi keandalan dihitung dengan menggunakan algoritma *Reliability Prediction* (RP) yang dilakukan oleh (Zhengguo Xu et al., 2009). Algoritma RP menghitung jumlah partikel dari $\bar{X}_{n+r|n}^{(i)}$ ($i = 1, \dots, N$) yang berada di area \mathcal{M}_0 dan dinotasikan dengan N_0 . Kemudian prediksi keandalan sistem disaat $(nT, (n+r)T)$ dihitung dengan N_0/N .

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai prosedur untuk menyelesaikan masalah yang telah diidentifikasi pada penelitian ini. Pengerjaan dilakukan melalui metode teoritis, eksperimental dan komputasional dengan beberapa prosedur penelitian. Prosedur yang dilakukan secara berurutan dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Proses penelitian yang dilakukan pada pengerjaan tesis ini akan dijelaskan lebih rinci pada subbab-subbab berikut.

3.1 Pemodelan Motor Induksi

Untuk memudahkan pemodelan pada simulasi MATLAB, maka persamaan differensial dibuat dengan mengacu pada persamaan (2.18), (2.19), (2.26), (2.32), dan (2.35) dan diubah menjadi persamaan *state space*. Adapun bentuk umum dari persamaan *state space* adalah sebagai berikut:

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

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

Dimana matriks A, B, C, dan D memiliki bentuk

$$A = \begin{bmatrix} -A_{11} & \omega_s & A_{13} & A_{14}\omega_r & 0 \\ -\omega_s & -A_{22} & -A_{23}\omega_r & A_{24} & 0 \\ A_{31} & 0 & -A_{33} & \omega_s - p\omega_r & 0 \\ 0 & A_{42} & -(\omega_s - p\omega_r) & -A_{44} & 0 \\ -A_{51} * \lambda_{rq} & A_{52} * \lambda_{rd} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$D = 0 \quad (3.6)$$

Sehingga didapatkan matriks $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{m \times n}$, $x \in R^{n \times o}$ serta $u \in R^{m \times o}$ dengan n adalah 5, m adalah 2, dan o adalah 1.

Dimana:

$$x = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \lambda_{rd} \\ \lambda_{rq} \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$A_{11} = A_{22} = \frac{Lm^2Rr + Lr^2Rs}{\sigma Lr^2Ls} \quad (3.9)$$

$$A_{13} = A_{24} = \frac{LmRr}{\sigma Lr^2Ls} \quad (3.10)$$

$$A_{14} = A_{23} = \frac{pLm}{\sigma LrLs} \quad (3.11)$$

$$A_{31} = A_{42} = \frac{LmRr}{Lr} \quad (3.12)$$

$$A_{33} = A_{44} = \frac{Rr}{Lr} \quad (3.13)$$

$$A_{51} = A_{52} = \frac{P Lm}{J Lr} \quad (3.14)$$

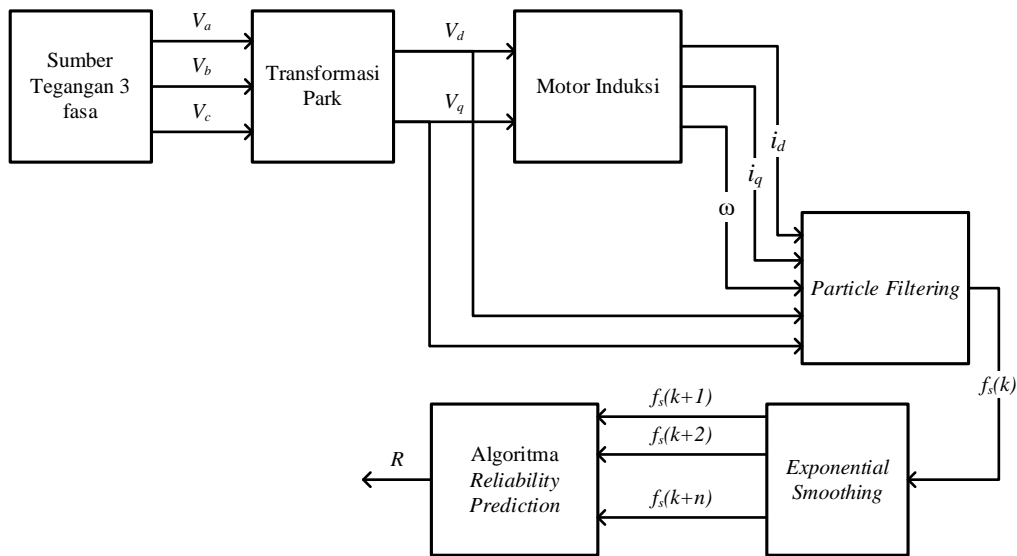
$$\sigma = 1 - \frac{Lm^2}{Lr Ls} \quad (3.15)$$

$$B_{11} = B_{22} = \frac{1}{\sigma Ls} \quad (3.16)$$

Variabel *state* dari motor induksi ini terdiri dari 5 yaitu i_{sd} , i_{sq} , λ_{rd} , λ_{rq} , dan ω_r , serta tegangan dq sebagai masukan. Sedangkan *state* yang akan diamati dan dibandingkan dengan *plant* motor induksi hanya *state* i_{sd} dan i_{sq} saja. Dari pemodelan motor induksi ini akan dihasilkan respon kontinyu. Adapun penggunaan parameter seperti pada Tabel 3.1 dikarenakan parameter pada jurnal (Allaoui, Chafaa, Laamari, & Athamena, 2015) mempunyai 2 pasangan *pole*, kapasitas sebesar 1.5kW, dan frekuensi 50 Hz dimana sama dengan motor induksi yang digunakan di PT.INKA. Adapun parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Parameter Motor Induksi

No	Nama	Nilai
1.	Induktansi MutuaI (L_m)	0,258 H
2.	Induktansi Stator (L_s)	0,274 H
3.	Induktansi Rotor (L_r)	0,274 H
4.	Resistansi Stator (R_s)	4,85 Ω
5.	Resistansi Rotor (R_r)	3,805 Ω
6.	Inersia (J)	0,031
7.	<i>Pole</i> (p)	2
8.	Kecepatan sudut elektrik (ω_s)	100 π
9.	<i>Sampling Time</i> (T_s)	10 ⁻⁴ s



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem

Dari Gambar 3.2 dapat dilihat bahwa sumber tegangan yang diberikan pada statornya merupakan sumber tegangan tiga fasa bolak-balik yang berbeda fasa 120° dan akan menghasilkan tegangan tiga fasa (V_a, V_b , dan V_c). Untuk mempermudah analisa dan perhitungan maka digunakan suatu metode yang akan mengubah tegangan tiga fasa menjadi dua fasa yaitu transformasi Park. Transformasi Park mengubah tegangan tiga fasa (V_a, V_b , dan V_c) ke dalam dua fasa dq . Tegangan dq sebagai input u bagi motor induksi. Dari pemodelan motor induksi menghasilkan 5 variabel *state* x yaitu i_{sd} , i_{sq} , λ_{rd} , λ_{rq} , dan ω_r . Keluaran *state* x dihubungkan dengan gain matriks keluaran C_d , sehingga menghasilkan y . Selanjutnya tegangan dq (u) dan y menjadi masukan bagi *particle filtering*. Keluaran dari *particle filtering* akan menghasilkan nilai estimasi \hat{x} .

Pada *particle filtering* diperlukan *input* dalam bentuk diskrit, sehingga perlu dilakukan pendiskritan dari pemodelan motor induksi. Setelah diubah dalam bentuk diskrit, maka selanjutnya dilakukan uji validasi. Pengujian validasi model dilakukan dengan membandingkan respon motor induksi sebagai *plant* yang kontinyu dengan respon dari persamaan yang telah diubah menjadi diskrit. Apabila perbandingan respon $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ dari motor induksi sebagai *plant* yang kontinyu dan respon dari persamaan yang diskrit memiliki *error* yang kecil maka dapat dikatakan bahwa validasi sudah menunjukkan hasil yang benar. Hal tersebut

menandakan bahwa *tracking* arus antar keduanya sudah sesuai. Sehingga dapat dilanjutkan dengan pemodelan motor induksi akibat kesalahan stator *inter-turn*.

3.2 Pemodelan Kesalahan Stator *Inter-Turn*

Pemodelan kesalahan stator *inter-turn* dilakukan dengan memodifikasi persamaan pada pemodelan motor induksi dalam keadaan normal dengan persamaan (2.36). Pada Gambar 2.5 sebelumnya, dapat dilihat bahwa kesalahan stator *inter-turn* berbentuk seperti gangguan dari pengukuran arus pada model, dimana arus yang masuk ke motor induksi sehingga persamaan (2.37) dapat dianggap sebagai gangguan yang mempengaruhi nilai keluaran y . Adapun bentuk umum dari persamaan *state space* adalah sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.17)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.18)$$

Dimana matriks A, B, C, dan D memiliki bentuk

$$A = \begin{bmatrix} -A_{11} & \omega_s & A_{13} & A_{14}\omega_r & 0 \\ -\omega_s & -A_{22} & -A_{23}\omega_r & A_{24} & 0 \\ A_{31} & 0 & -A_{33} & \omega_s - p\omega_r & 0 \\ 0 & A_{42} & -(\omega_s - p\omega_r) & -A_{44} & 0 \\ -A_{51} * \lambda_{rq} & A_{52} * \lambda_{rd} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{2\eta_{cc}}{3R_s} \mathcal{P}(-p\gamma) \mathcal{Q}(p\gamma_{cc}) \mathcal{P}(p\gamma) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Terdapat dua parameter yang diperlukan untuk menghitung nilai arus *short-circuit*, yaitu γ_{cc} dan η_{cc} . Nilai γ_{cc} merupakan sudut antara stator yang mengalami *short-circuit* dengan stator fasa a . Terdapat tiga nilai γ_{cc} , yaitu 0° , 120° , dan 240° yang berturut-turut mewakili stator yang mengalami *short-circuit* pada fasa a , b , dan c . Nilai η_{cc} merupakan perbandingan antara jumlah lilitan yang mengalami *short-circuit* dengan jumlah total lilitan pada keadaan normalnya. Nilai dari η_{cc} bernilai antara 0 dan 1.

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi prediksi keandalan *real-time* akibat kesalahan *stator inter-turn* pada stator fasa *a*. Untuk kesalahan diberikan dengan menetapkan nilai η_{cc} dalam fungsi ramp dengan kemiringan tertentu.

3.3 Perancangan Algoritma *Particle Filtering* (PF)

Perancangan *particle filtering* digunakan untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi, dengan input berupa arus dan tegangan. Pada algoritma *particle filtering* perlu dilakukan perubahan bentuk pemodelan dari domain kontinyu menjadi bentuk domain diskrit.

Sebelum melakukan perancangan algoritma *particle filtering*, perlu dilakukan perancangan persamaan ruang keadaan untuk *particle filtering* agar *particle filtering* mampu mengeluarkan nilai kesalahan sensor yang terjadi pada arus stator motor induksi. Metode yang digunakan adalah *extended state observer*.

Adapun bentuk dari persamaan *state space* yang digunakan berdasarkan matriks A, B, dan C pada pemodelan motor induksi dalam keadaan normal adalah

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(k+1) \\ f(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{F} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ f(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{B} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3.23)$$

$$\hat{y}(k) = [\bar{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ f(k) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

dengan

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ A_z T_s C & -A_z T_s + I \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\bar{C} = [0 \quad I] \quad (3.27)$$

$$\bar{x}(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Selanjutnya dilakukan langkah-langkah dari algoritma PF (*Particle filtering*) sebagai berikut:

1. Inisialisasi partikel

Pada tahap ini dilakukan inisialisasi variabel – variabel seperti ditunjukkan pada pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter *Particle Filter*

No	Nama	Nilai
1.	Jumlah Partikel (N)	50; 100; 250
2.	<i>Initial guess of state value</i> (x_0)	[0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0]
3.	Kovarian awal (P_0)	$0.001 * I_{10}$
4.	Kovarian <i>noise</i> sistem (Q)	$10^{-6} * [10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6} \ 0 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-2} \ 0;$ $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-2}]$
5.	Matriks kovarian <i>noise</i> pengukuran (R)	$[0.8^2 \ 0 \ 0;$ $0 \ 0.8^2 \ 0;$ $0 \ 0 \ 0.4^2]$

Selain itu, partikel diinisialisasi secara acak berdasarkan distribusi normal atau distribusi gaussian dengan bobot merata. Inisialisasi partikel awal dilakukan dengan cara membangkitkan sejumlah N partikel. Untuk $i = 1, \dots, N$:

$$x_{p0}(i) = x_0(i) + p, \quad p \sim \mathcal{N}(0, P_0) \quad (3.29)$$

2. Update partikel

Particle filtering merupakan persamaan stokastik yang memiliki input probabilistik (*random*) dan menghasilkan *output* yang *random* pula. Update partikel dilakukan untuk membuat set partikel transisi baru dengan cara mendistribusikan setiap partikel yang ada berdasarkan nilai partikel sebelumnya, dimana update dilakukan pada state x , pengukuran y , dan bobot.

Untuk $i = 1, \dots, N$, maka:

$$x_p(i) = A_d x(i) + B_d \cdot u \cdot w, \quad w \sim \mathcal{N}(0, Q) \quad (3.30)$$

$$y_p(i) = C_d x_p(i) \quad (3.31)$$

Kemudian update bobot partikel, bobot didasarkan pada probabilitas pengamatan yang diberikan untuk suatu partikel. Hal tersebut menunjukkan *error* antara hasil pengukuran aktual (y) dengan y_p dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tilde{w}(i) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y - y_p(i)}{R} \right)^2} \quad (3.32)$$

Dimana:

$$y = C_d x + v, \quad v \sim \mathcal{N}(0, R) \quad (3.33)$$

Selanjutnya bobot dinormalisasi berdasarkan total seluruh bobot saat ini dengan menggunakan persamaan berikut:

$$w(i) = \frac{\tilde{w}(i)}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}(i)} \quad (3.34)$$

Setelah itu dilakukan estimasi, dimana estimasi pada *particle filtering* merupakan nilai rata – rata dari nilai seluruh partikel berdasarkan setiap bobotnya. Nilai estimasi tersebut didapatkan pada saat proses resampling berhenti. Oleh karena itu, nilai estimasi didapatkan dengan menjumlahkan semua perkalian partikel dengan bobotnya masing – masing dengan persamaan berikut:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^N w(i) \cdot x_p(i) \quad (3.35)$$

3. Resampling partikel

Proses resampling bertujuan untuk menghilangkan partikel dengan bobot yang rendah. Resampling partikel baru sesuai dengan bobot partikel. Jika mengambil sampel secara acak dari distribusi ini, maka dapat memilih nilai berdasarkan probabilitas statistik yang ada, dan dengan demikian, secara rata-rata, memilih nilai dengan bobot yang lebih (probabilitas lebih tinggi). Resampling dilakukan dengan membandingkan nilai $cs(k)$ dengan sampel acak $u(j)$. Nilai $cs(k)$ merupakan *cumulative sum* w pada indeks ke- k dan didapatkan melalui persamaan berikut:

$$cs(k) = cs(k - 1) + (k) \quad (3.36)$$

Sedangkan sampel acak $u(j)$ dengan distribusi uniform diketahui melalui persamaan berikut:

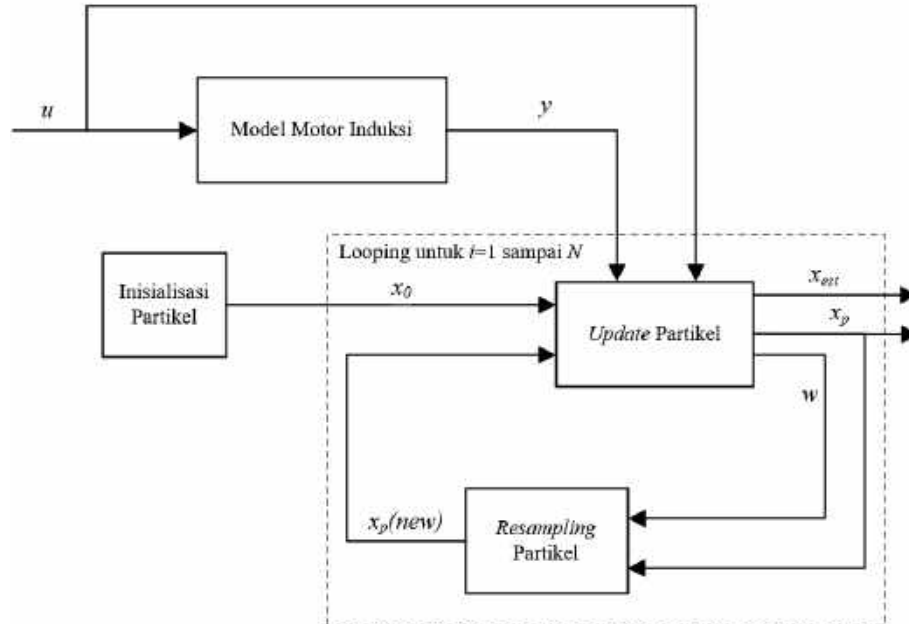
$$u(j) = \frac{(j-1) + \tilde{u}}{M}, \quad \tilde{u} \sim \mathcal{U}(0,1) \quad (3.37)$$

Dengan M merupakan panjang vektor w . Apabila nilai $cs(k)$ kurang dari sampel acak $u(j)$ maka akan *looping* ke persamaan (3.20) dengan nilai k selanjutnya. Namun, apabila nilai $cs(k)$ lebih besar dari sampel acak $u(j)$ maka menghasilkan output berupa suatu indeks k . Indeks tersebut digunakan untuk memilih partikel yang akan diestimasi. Apabila indeks j kurang dari M , maka akan kembali ke persamaan (3.21) dengan nilai j selanjutnya. Proses resampling akan berhenti saat indeks j sama dengan M . Sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$x(i) = x_p(k) \quad (3.38)$$

Dari persamaan (3.22) diketahui bahwa partikel $x(i)$ merupakan partikel x_p pada indeks ke- k . Kemudian kembali ke langkah 2 untuk setiap iterasi, dimana $x(i)$ menjadi masukan untuk proses update partikel.

Adapun diagram blok dari *particle filtering* dapat dilihat pada gambar sebagaimana berikut:



Gambar 3.3 Diagram Blok *Particle Filtering*

Nilai pembacaan arus yang diperoleh dari pemodelan *plant* sebelumnya akan digunakan sebagai masukan pada algoritma PF. Algoritma PF akan mengolah

masukannya untuk mengestimasi kesalahan. Nantinya, hasil dari keluaran algoritma PF ini diuji dengan membandingkan nilai kesalahan yang dihasilkan dari algoritma *particle filtering* dengan nilai kesalahan sesungguhnya. Adapun perbandingan antar keduanya dianalisa dengan menggunakan RMSE (*root mean square error*). RMSE adalah akar dari rata – rata total kuadrat *error* yang terjadi antara output model dan output estimasi. Output estimasi PF akan semakin baik apabila mempunyai nilai RMSE yang kecil.

3.4 Perancangan Algoritma *Exponential Smoothing* (ES)

Exponential smoothing digunakan untuk menghilangkan *noise* dari hasil estimasi kesalahan \hat{a}_n pada PF serta memprediksi nilai kesalahan kedepan yang terjadi pada motor induksi. Perancangan algoritma *exponential smoothing* dilakukan dengan metode Holt berdasarkan persamaan berikut.

$$u_n = a\hat{a}_n + (1 - a)(u_{n-1} + s_{n-1}) \quad (3.39)$$

$$s_n = b(u_n - u_{n-1}) + (1 - b)s_{n-1} \quad (3.40)$$

$$\bar{a}_{n+l} = u_n + s_n l T \quad (3.41)$$

Adapun parameter yang digunakan dalam perancangan algoritma ES adalah sebagai berikut:

Tabel 3.3 Parameter *Exponential Smoothing*

No	Nama	Nilai
1.	Konstanta <i>smoothing a</i>	0.3
2.	Konstanta <i>smoothing b</i>	0.1
3.	u_1	\hat{a}_1
4.	u_2	\hat{a}_2
5.	s_1	0
6.	s_2	$u_2 - u_1$
7.	<i>Time interval T_i</i>	1; 5; 10

Selanjutnya, dilakukan pengujian dari algoritma *exponential smoothing* menggunakan variasi nilai T_i sebesar 0.1, 0.3, dan 0.5. Kemudian hasil dari prediksi

nilai kesalahan yang dihasilkan dari algoritma *exponential smoothing* dibandingkan dengan nilai kesalahan sesungguhnya.

3.5 Perancangan Algoritma Prediksi Keandalan

Setelah didapatkan prediksi kesalahan yang terjadi, selanjutnya nilai tersebut digunakan untuk mengetahui keandalan dari motor induksi. Algoritma prediksi keandalan yang digunakan berdasarkan dari penelitian oleh Xu (Zhengguo Xu et al., 2009). Perancangan algoritma prediksi keandalan dilakukan dengan mengasumsikan motor induksi akan terjadi kegagalan saat nilai kesalahan stator *inter-turn* bernilai lebih dari 0.5, sesuai dengan literatur dari (Azgomi & Poshtan, 2013).

Hasil dari algoritma prediksi keandalan ini selanjutnya dibandingkan antara waktu saat motor induksi diprediksi gagal terhadap waktu terjadinya kegagalan yang sesungguhnya. Diharapkan, sistem prediksi keandalan ini mampu memprediksi keandalan dari sistem sebelum terjadinya kegagalan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

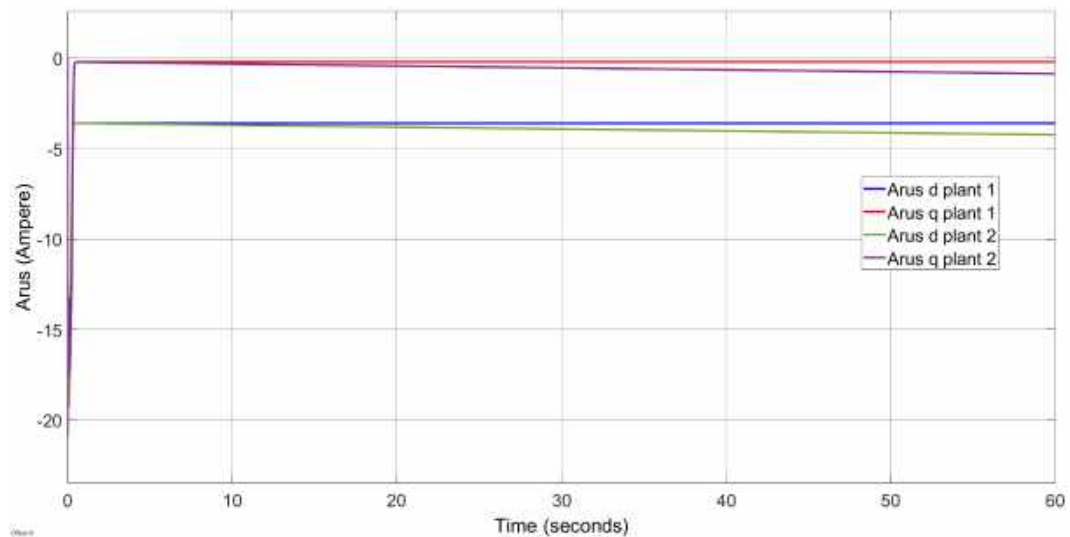
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai hasil dari simulasi sistem prediksi keandalan motor induksi menggunakan MATLAB 2019b. Terdapat tiga pengujian untuk simulasi yang dilakukan yaitu: pengujian *particle filtering*, pengujian algoritma prediksi kesalahan sensor dan pengujian algoritma prediksi keandalan *real-time*.

4.1 Hasil Pemodelan Motor Induksi

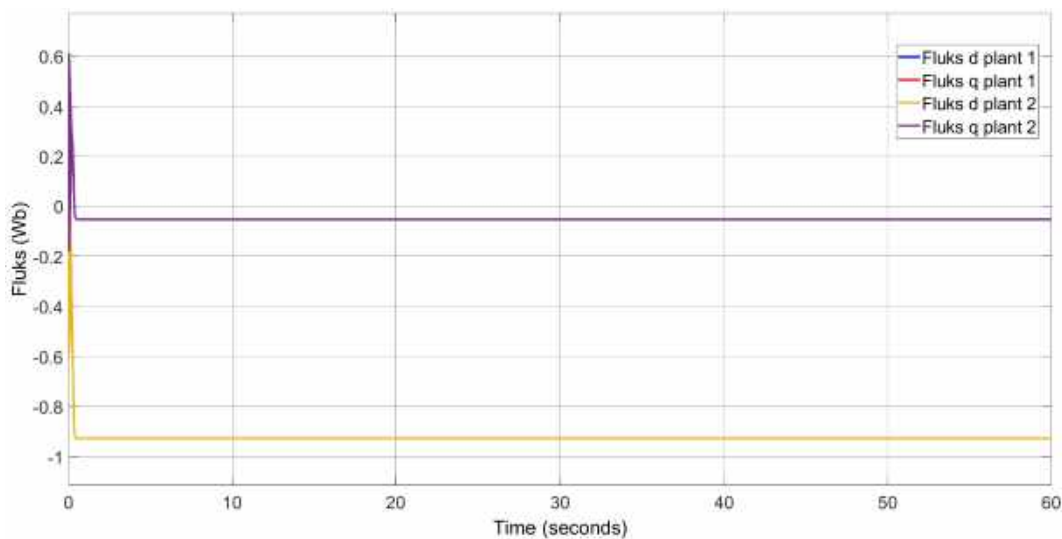
Simulasi dilakukan dengan bantuan *software* MATLAB berdasarkan persamaan model motor induksi dengan adanya kesalahan pada persamaan (3.17)-(3.22) dengan parameter yang digunakan terdapat pada Tabel 3.1. Simulasi dilakukan selama 60 detik dengan pemberian kesalahan stator *inter-turn* terjadi pada fasa *a* dengan kemiringan fungsi *ramp* parameter deteksi, η_{cc} , sebesar 5×10^{-4} . Nilai laju perubahan kesalahan ini dipilih karena keterbatasan kemampuan komputasi, sehingga dipilihlah nilai yang cukup besar.



Gambar 4.1 Respon arus motor induksi dengan kemiringan $\eta_{cc} = 5 \times 10^{-4}$

Berdasarkan pemodelan motor induksi yang telah dilakukan, maka diketahui bahwa output dari motor pada *state* pertama dan kedua adalah nilai arus

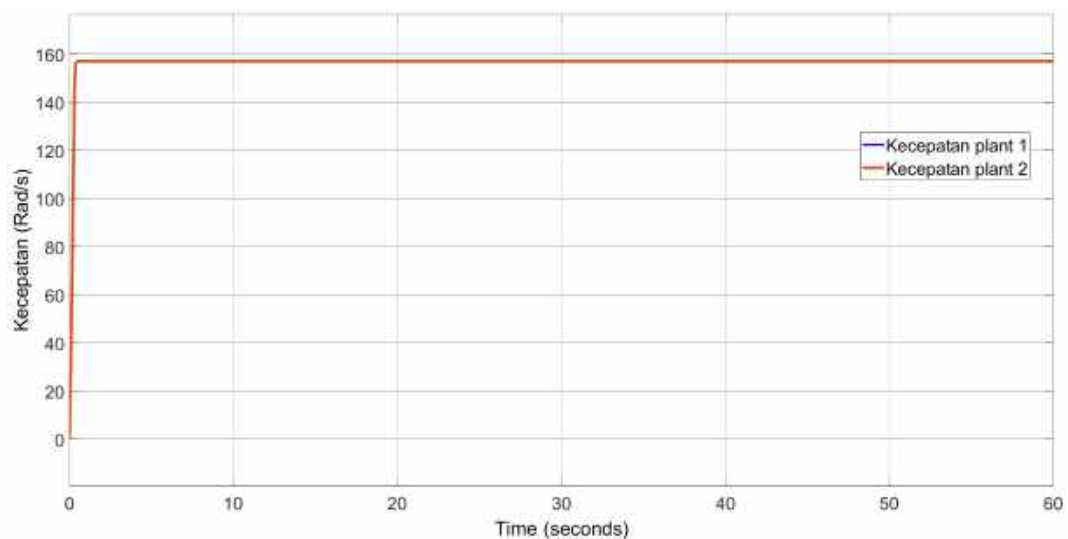
(i_{sd} dan i_{sq}). Arus dq 1 merupakan arus dq dalam keadaan normal, dan arus dq 2 merupakan arus dq saat diberikan kesalahan. Dari Gambar 4.1 didapatkan hasil bahwa pada awalnya arus mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Perubahan nilai terjadi pada waktu 0 detik hingga 0.4 detik, setelah 0,4 detik perlahan arus mulai mencapai keadaan *steady*. Dapat dilihat pada Gambar 4.1 bahwa arus i_{sd} mengalami kenaikan arus dari sebesar -20 A menjadi -3.5 A selama 0.4 detik, kemudian respon dalam keadaan *steady* pada nilai sebesar -3.59 A. Sedangkan arus i_{sq} mengalami kondisi *transien* dari -20.5 A menjadi 0.2 A selama 0.4 detik dan kemudian respon dalam keadaan *steady* pada nilai *peak* sebesar -0.2 A. Saat diberikan kesalahan pada fasa *a*, nilai kedua arus dq menurun. Hal ini disebabkan karena adanya arus *short-circuit* yang terjadi, sehingga arus stator akan berkurang.



Gambar 4.2 Respon fluks motor induksi dengan kesalahan $\eta_{cc} = 5 \times 10^{-4}$

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap keluaran *plant* motor induksi dari *state* ketiga dan keempat yaitu nilai fluks dalam sumbu dq (λ_{rd} dan λ_{rq}). Fluks dq 1 merupakan fluks dq dalam keadaan normal, dan fluks dq 2 merupakan arus dq saat diberikan kesalahan. Sama halnya dengan nilai arus, dari Gambar 4.2 juga didapatkan hasil bahwa pada awalnya fluks mengalami perubahan nilai terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Dari Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa nilai λ_{dr} mengalami keadaan transien pada awal waktu dengan puncak maksimum

0.16 Wb pada 0.02 detik. Kemudian nilainya turun dan mencapai keadaan *steady* pada saat 0.4 detik dengan nilai sebesar -0.93 Wb. Untuk nilai λ_{rq} juga mengalami hal yang sama. Pada awal waktu keadaan transien dengan puncak maksimum 0.58 Wb pada 0.02 detik. Kemudian nilainya turun dan mencapai keadaan *steady* pada saat 0.4 detik dengan nilai sebesar -0.05 Wb. Pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, ditunjukkan bahwa baik respon arus maupun respon fluks mengalami kondisi transien hingga 0.4 detik. Saat respon arus mulai dalam keadaan *steady*, respon fluks juga menunjukkan kondisi *steady*. Hal ini tersebut menunjukkan bahwa arus dan fluks saling berhubungan satu sama lain. Saat diberikan kesalahan, nilai fluks tidak berubah. Hal ini diakibatkan kesalahan stator *inter-turn* diibaratkan sebagai kesalahan pada sensor arus, sehingga nilainya tidak mempengaruhi variabel fluks.



Gambar 4.3 Respon kecepatan motor induksi *plant* dengan $\eta_{cc} = 5 \times 10^{-4}$

Selain itu, didapatkan keluaran motor induksi berupa nilai kecepatan. Kecepatan 1 merupakan kecepatan dalam keadaan normal, dan arus dq 2 merupakan kecepatan saat diberikan kesalahan. Pada Gambar 4.3 ditunjukkan bahwa pada awalnya kecepatan mengalami perubahan nilai terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Kecepatan motor induksi mengalami kenaikan mulai dari 0 detik hingga 0.45 detik dan setelah itu kecepatan mulai berada pada keadaan *steady*. Dimana kecepatan putar motor induksi berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Saat terjadi kesalahan, nilai kecepatan

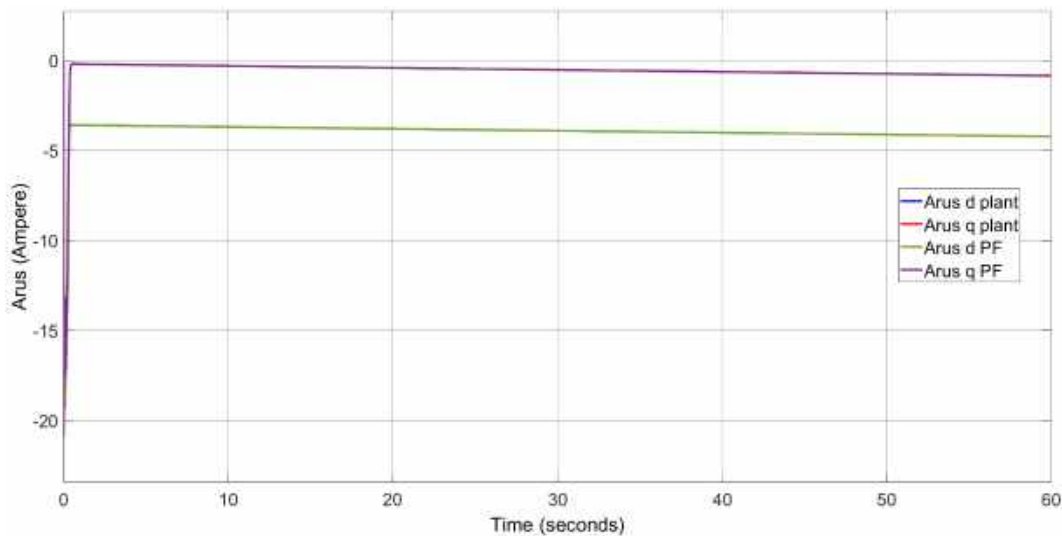
tidak berubah. Sama halnya dengan variabel fluks, hal ini diakibatkan kesalahan stator *inter-turn* diibaratkan sebagai kesalahan pada sensor arus, sehingga nilainya tidak mempengaruhi variabel kecepatan.

4.2 Hasil Perancangan *Particle Filtering*

Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap jumlah partikel yang dipakai untuk *particle filtering* yaitu 10, 25, dan 50 partikel. Pengujian dilakukan dengan memberikan kesalahan stator *inter-turn* pada fasa *a* dengan kemiringan fungsi *ramp* parameter deteksi, η_{cc} , sebesar 5×10^{-4} pada detik ke-0 dengan *initial output* 0.

4.2.1 *Particle Filtering* dengan Jumlah Partikel 10

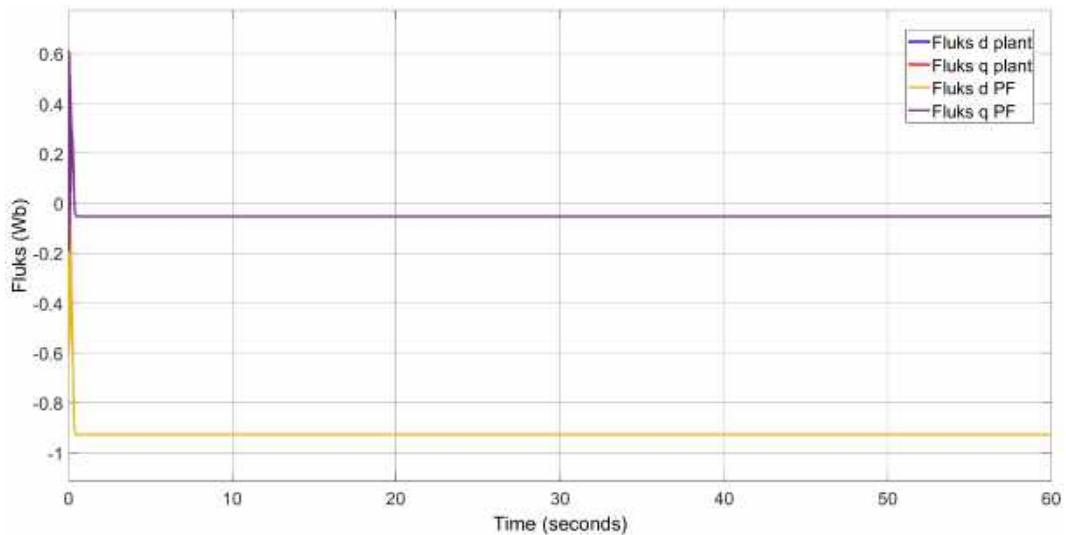
Pertama-tama, dilakukan perancangan *particle filter* dengan jumlah partikel 10 dengan adanya pengaruh kesalahan. Didapatkan respon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut:



Gambar 4.4 Respon arus motor induksi *plant* dan PF saat $N=10$

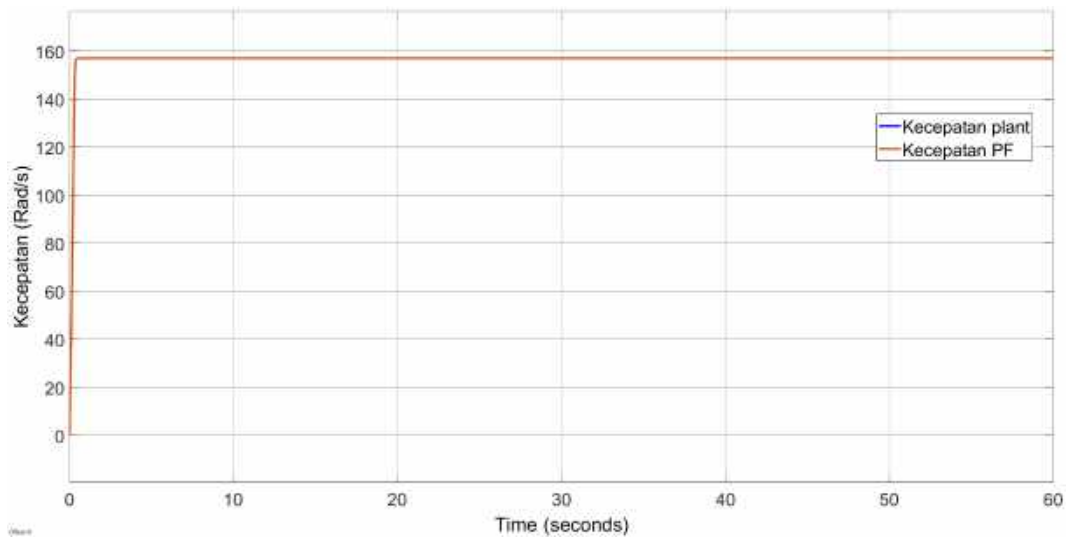
Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan antara respon arus keluaran *plant* dengan respon arus hasil keluaran PF dengan menggunakan 10 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon arus hasil simulasi PF telah mampu mengikuti hasil dari pemodelan *plant* pada sumbu *d* dan *q*. Pada awalnya kedua

respon arus mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady*. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE untuk mengetahui performansi dari PF. Adapun nilai RMSE yang didapatkan adalah sebesar 0.0074 untuk arus d dan 0.0088 untuk arus q .



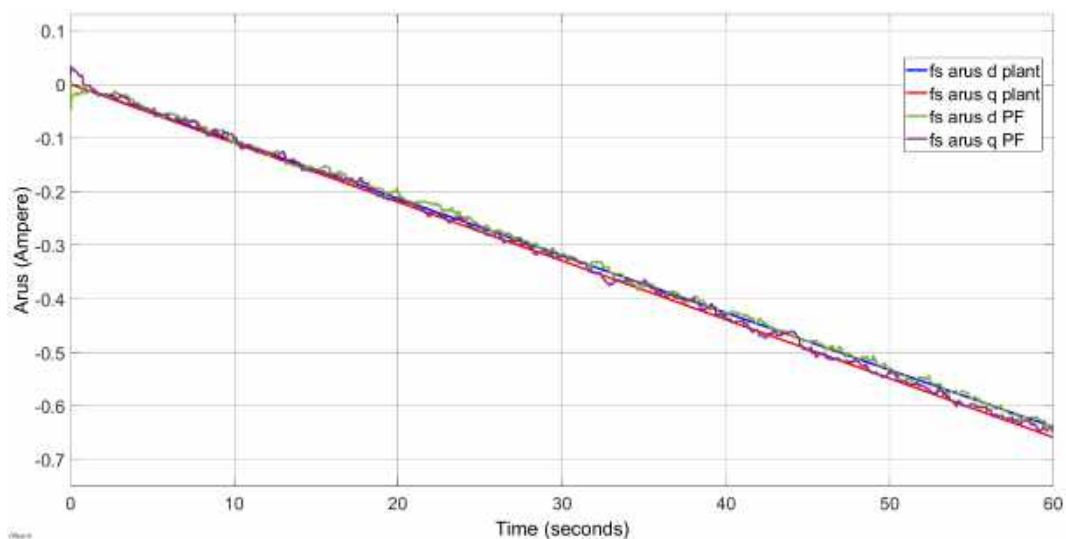
Gambar 4.5 Respon fluks motor induksi *plant* dan PF saat $N=10$

Gambar 4.5 menunjukkan perbandingan antara respon fluks keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 10 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon fluks hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant* pada sumbu d dan q . Pada awalnya kedua respon fluks mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady-state*. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE untuk mengetahui performansi dari PF. Adapun nilai RMSE yang didapatkan adalah sebesar 0.0068 untuk fluks d dan 0.0064 untuk fluks q .



Gambar 4.6 Respon kecepatan motor induksi *plant* dan PF saat $N=10$

Gambar 4.6 menunjukkan perbandingan antara respon kecepatan keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 10 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon kecepatan hasil simulasi PF telah mendekati hasil dari pemodelan *plant*. Pada awalnya kedua respon kecepatan mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady*. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE untuk mengetahui performansi dari PF. Adapun nilai RMSE yang didapatkan adalah sebesar 0.0085.

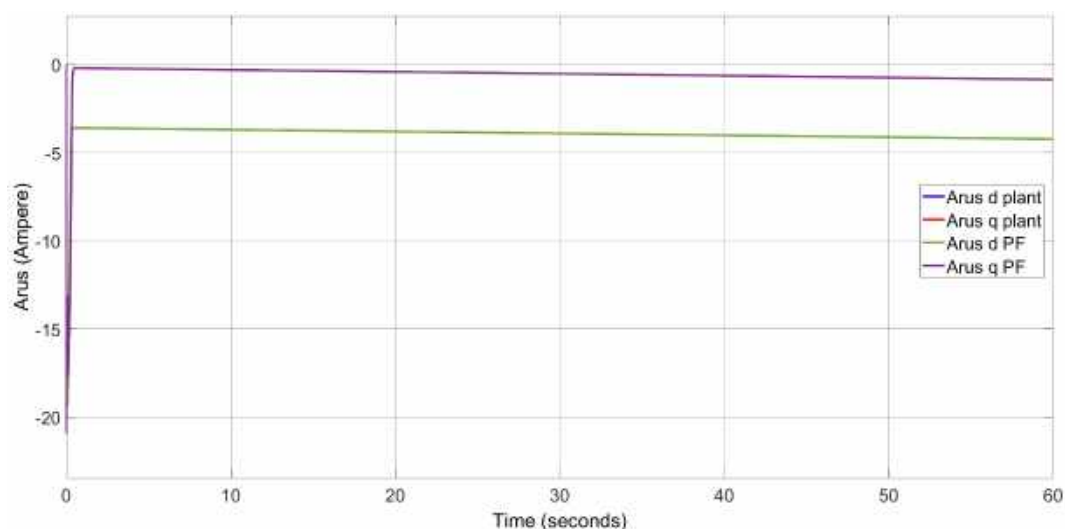


Gambar 4.7 Respon kesalahan arus *inter-turn plant* dan PF saat $N=10$

Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan antara respon kesalahan keluaran *plant* dengan respon kesalahan hasil keluaran PF dengan menggunakan 10 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon kesalahan arus hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant* pada sumbu d dan q . Pada awalnya respon kesalahan arus dari PF memiliki *noise* yang besar hingga detik ke-0.4, dan berkurang seiring dengan waktu. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE untuk mengetahui performansi dari PF. Adapun nilai RMSE yang didapatkan adalah sebesar 0.0064 untuk kesalahan arus d dan 0.008 untuk kesalahan arus q .

4.2.2 Particle Filtering dengan Jumlah Partikel 25

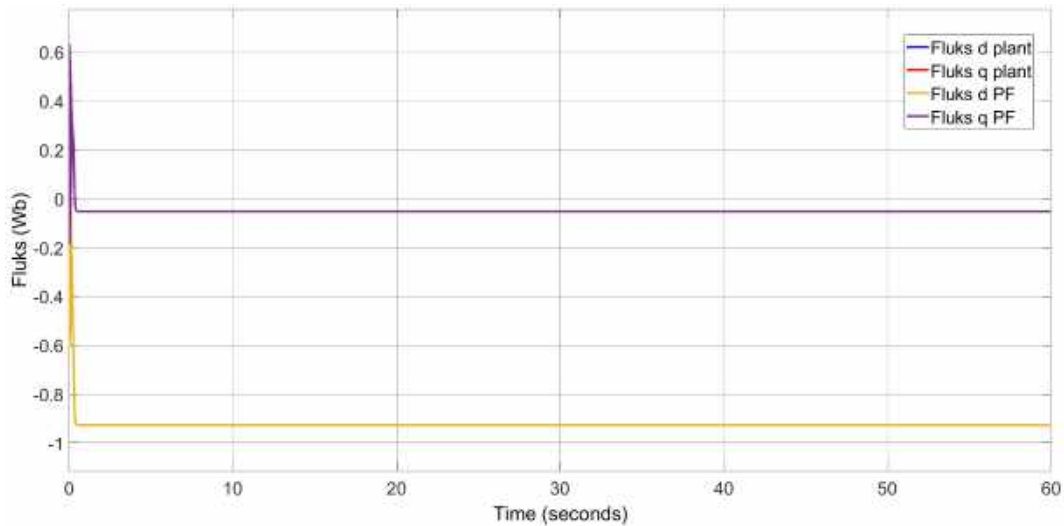
Selanjutnya dilakukan perancangan *particle filter* dengan jumlah partikel 100 dengan adanya pengaruh kesalahan. Didapatkan respon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut:



Gambar 4.8 Respon arus motor induksi *plant* dan PF saat $N=25$

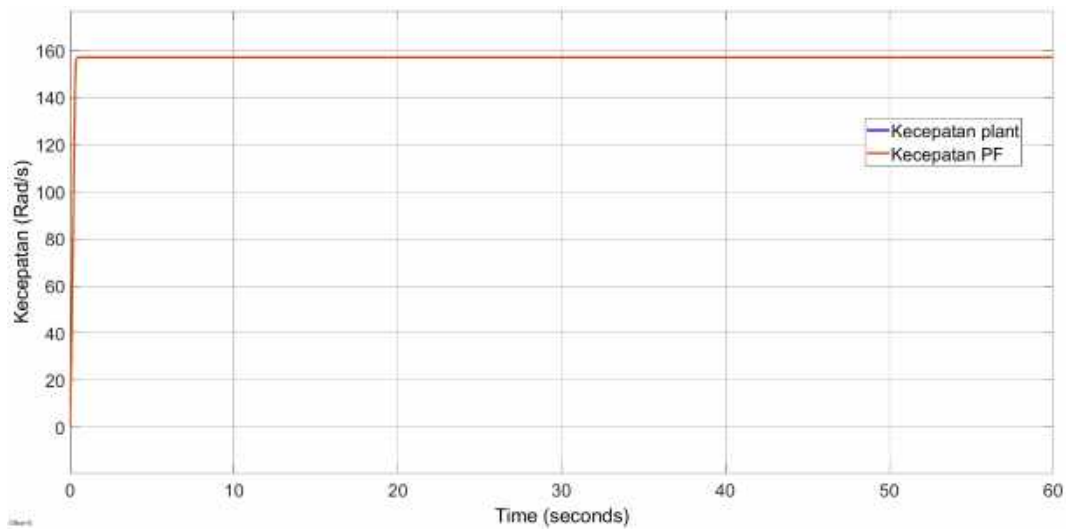
Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan antara respon arus keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 25 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon arus hasil simulasi telah mendekati hasil dari pemodelan (*plant*) pada sumbu d dan q . Pada awalnya kedua respon arus mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady*.

Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE dan didapatkan nilai RMSE sebesar 0.0072 untuk arus d dan 0.0074 untuk arus q .



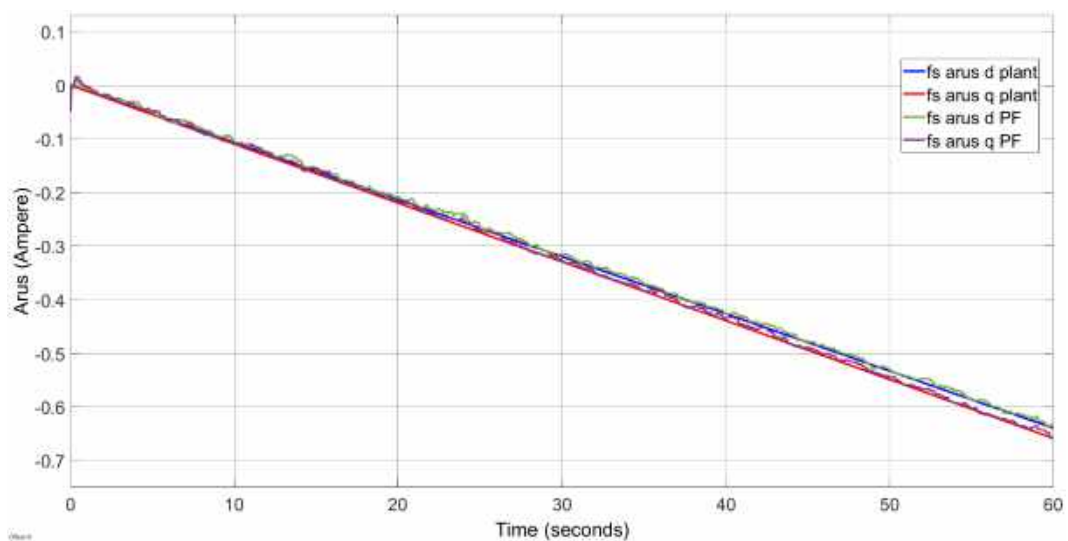
Gambar 4.9 Respon fluks motor induksi *plant* dan PF saat $N=25$

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan antara respon fluks keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 25 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon fluks hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant* pada sumbu d dan q . Pada awalnya kedua respon fluks mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady-state*. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE dan didapatkan nilai RMSE sebesar 0.003 untuk fluks d dan 0.0021 untuk fluks q .



Gambar 4.10 Respon kecepatan motor induksi *plant* dan PF saat $N=25$

Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan antara respon kecepatan keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 25 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon kecepatan hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant*. Pada awalnya kedua respon kecepatan mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady-state*. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE dan didapatkan nilai RMSE sebesar 0.0214.

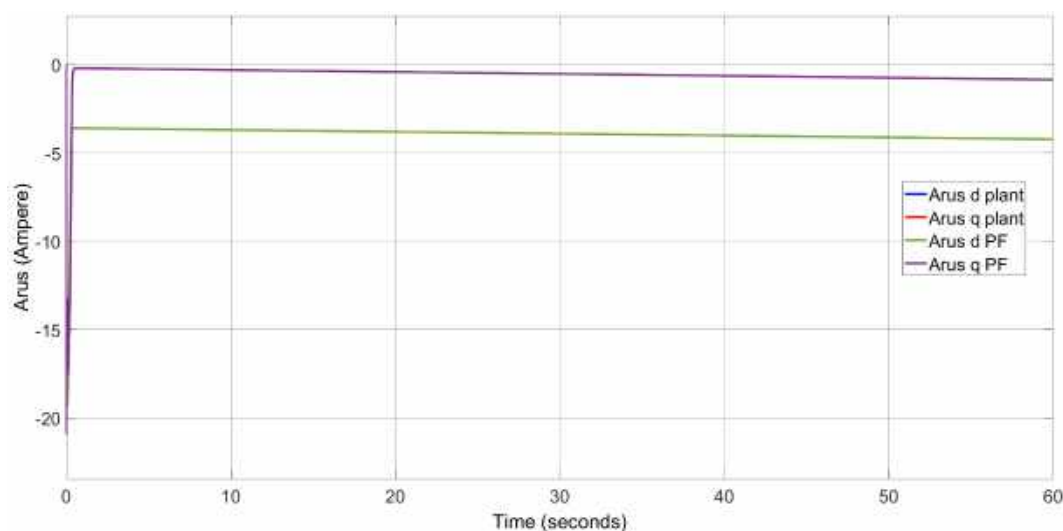


Gambar 4.11 Respon kesalahan arus *inter-turn plant* dan PF saat $N=25$

Gambar 4.11 menunjukkan perbandingan antara respon kesalahan keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 10 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon kesalahan arus hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant* pada sumbu *d* dan *q*. Pada awalnya respon kesalahan arus dari PF memiliki *noise* yang besar hingga detik ke-0.4, dan berkurang seiring dengan waktu. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE dan didapatkan nilai RMSE sebesar 0.0052 untuk kesalahan arus *d* dan 0.0055 untuk kesalahan arus *q*.

4.2.3 Particle Filtering dengan Jumlah Partikel 50

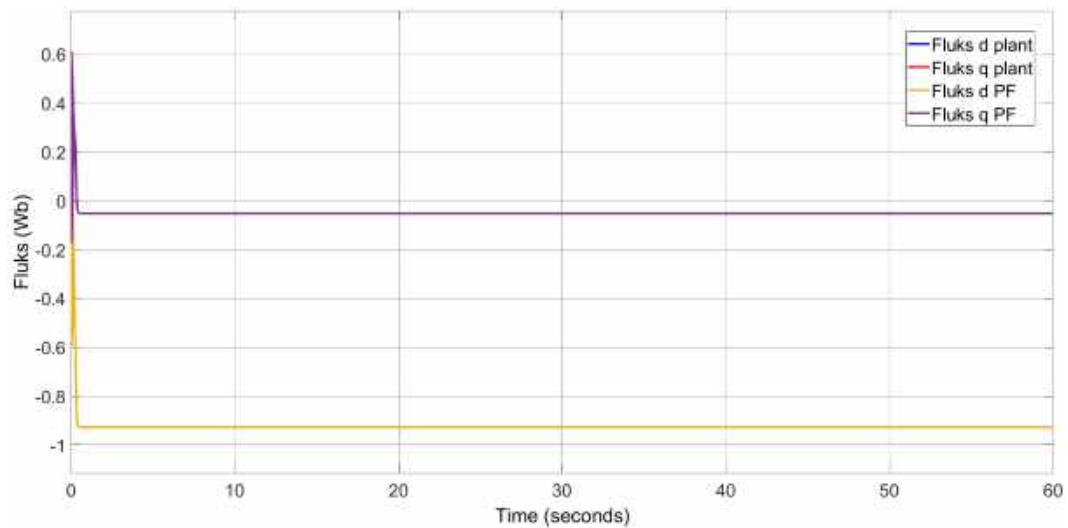
Selanjutnya dilakukan perancangan *particle filter* dengan jumlah partikel 50 dengan adanya pengaruh kesalahan. Didapatkan respon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.10 berikut:



Gambar 4.12 Respon arus motor induksi *plant* dan PF saat $N=50$

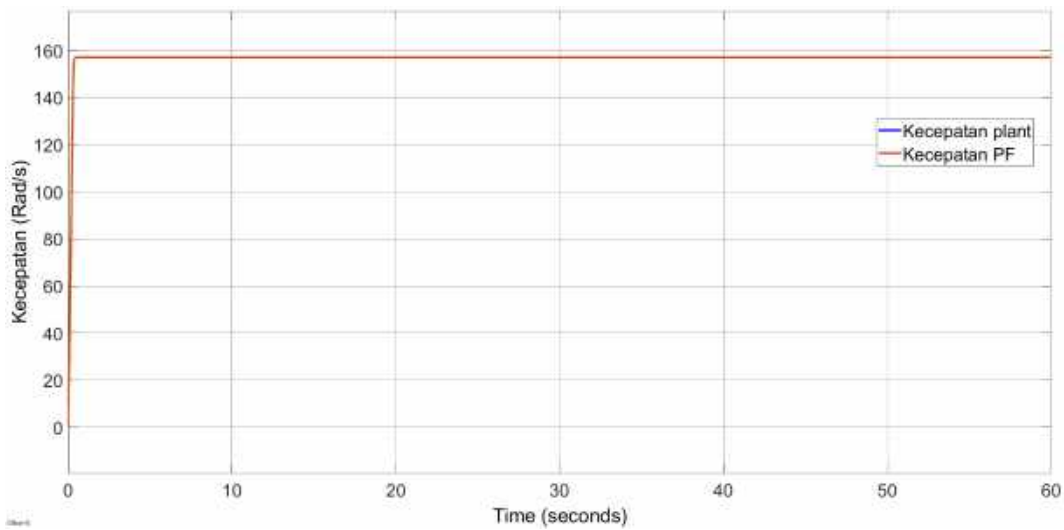
Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan antara respon arus keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 50 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon arus hasil simulasi telah mendekati hasil dari pemodelan (*plant*) pada sumbu *d* dan *q*. Pada awalnya kedua respon arus mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady*.

Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE dan didapatkan nilai RMSE sebesar 0.005 untuk arus d dan 0.0052 untuk arus q .



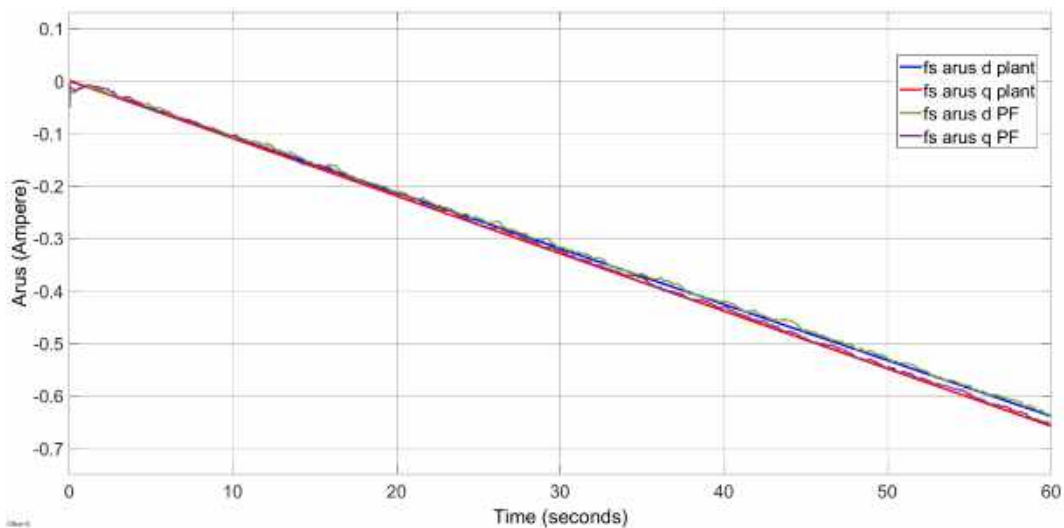
Gambar 4.13 Respon fluks motor induksi *plant* dan PF saat $N=50$

Gambar 4.13 menunjukkan perbandingan antara respon fluks keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 50 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon fluks hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant* pada sumbu d dan q . Pada awalnya kedua respon fluks mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady-state*. Dari grafik tersebut dihitung nilai RMSE dan didapatkan nilai RMSE sebesar 0.0013 untuk fluks d dan 0.0016 untuk fluks q .



Gambar 4.14 Respon kecepatan motor induksi *plant* dan PF saat N=250

Gambar 4.14 menunjukkan perbandingan antara respon kecepatan keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 50 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon kecepatan hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant*. Pada awalnya kedua respon kecepatan mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady-state*. Dari grafik tersebut dihitung nilai dan didapatkan nilai RMSE sebesar 0.0196.



Gambar 4.15 Respon kesalahan arus *inter-turn plant* dan PF saat N=50

Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan antara respon kesalahan keluaran *plant* dengan respon fluks hasil keluaran PF dengan menggunakan 50 partikel. Dari gambar tersebut diketahui bahwa respon kesalahan arus hasil simulasi PF mampu mendekati hasil dari pemodelan *plant* pada sumbu d dan q . Pada awalnya respon kesalahan arus dari PF memiliki *noise* yang besar hingga detik ke-0.2, lebih cepat dibandingkan dengan jumlah partikel 10 dan 25, dan berkurang seiring dengan waktu. Adapun nilai RMSE yang didapatkan adalah sebesar 0.0047 untuk kesalahan arus d dan 0.0047 untuk kesalahan arus q .

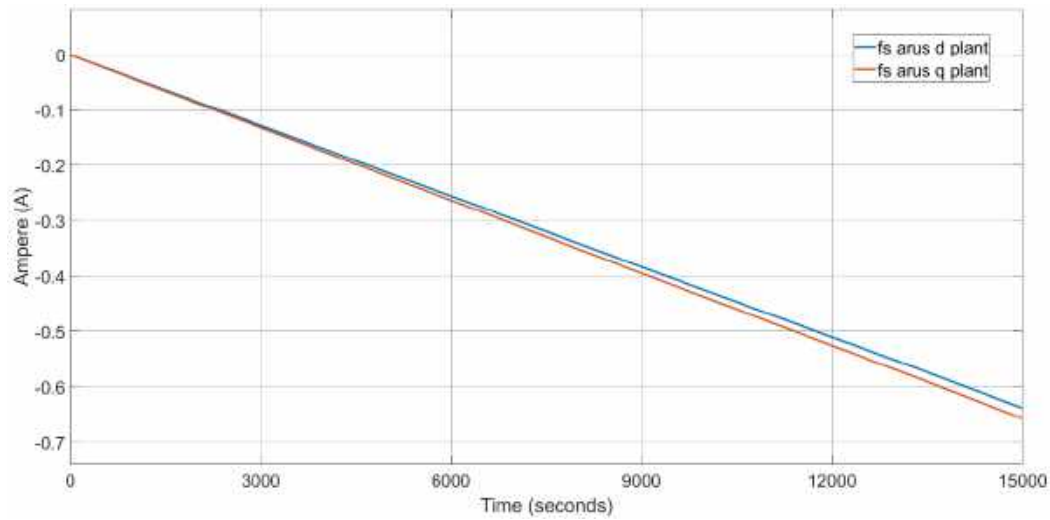
4.3 Hasil Perancangan Algoritma Prediksi Keandalan

Hasil prediksi keandalan diperoleh dengan memasukkan nilai prediksi kesalahan dari algoritma *exponential smoothing* kedalam algoritma prediksi keandalan. Adapun prediksi kesalahan diterapkan menggunakan hasil estimasi kesalahan sensor dari PF. Dari analisa sebelumnya, didapatkan hasil estimasi kesalahan sensor terbaik adalah dengan menggunakan 50 partikel. Algoritma prediksi kesalahan menggunakan algoritma *exponential smoothing* dengan metode Holt dengan parameter yang digunakan terdapat pada Tabel 3.3.

Dilakukan pengujian dengan memberikan variasi nilai T_i (*time interval*) pada algoritma *exponential smoothing*, yaitu 1, 5, dan 10 detik. Nilai *time interval* dipilih dengan berbagai variasi nilai untuk mengetahui prediksi keandalan yang dihasilkan. Dari variasi tersebut, selanjutnya dilakukan analisa terhadap hasil prediksi keandalan dengan jumlah *step* prediksi 5 dan 10 *step*. Nilai tersebut dipilih untuk mengetahui pengaruh jumlah *step* prediksi terhadap hasil prediksi keandalan nantinya.

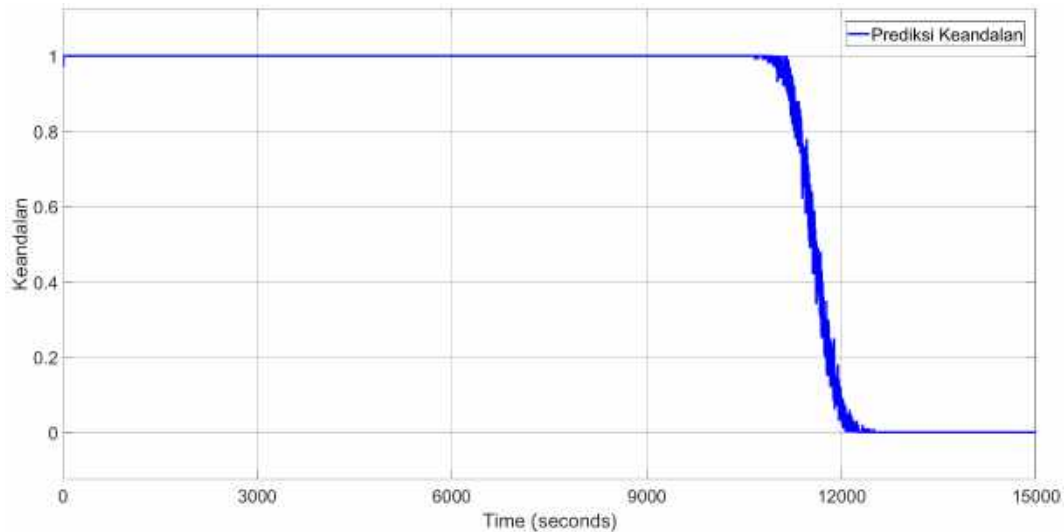
Simulasi dilakukan selama 15000 detik (lebih dari 4 jam) dengan pemberian kesalahan stator *inter-turn* terjadi pada fasa a dengan kemiringan fungsi *ramp* parameter deteksi, η_{cc} , sebesar 2×10^{-6} . Motor induksi akan terjadi kegagalan saat nilai kesalahan stator *inter-turn* bernilai lebih dari 0.5. Sebagai validasi dari hasil algoritma prediksi keandalan, nilai kesalahan plant akan menjadi acuan untuk menentukan kapan terjadinya kegagalan yang sebenarnya. Hasil dari nilai kesalahan plant dapat dilihat pada Gambar 4.22 dibawah ini. Dari gambar tersebut,

dapat diketahui bahwa nilai kesalahan stator *inter-turn* bernilai lebih dari 0.5 pada detik ke-11760.

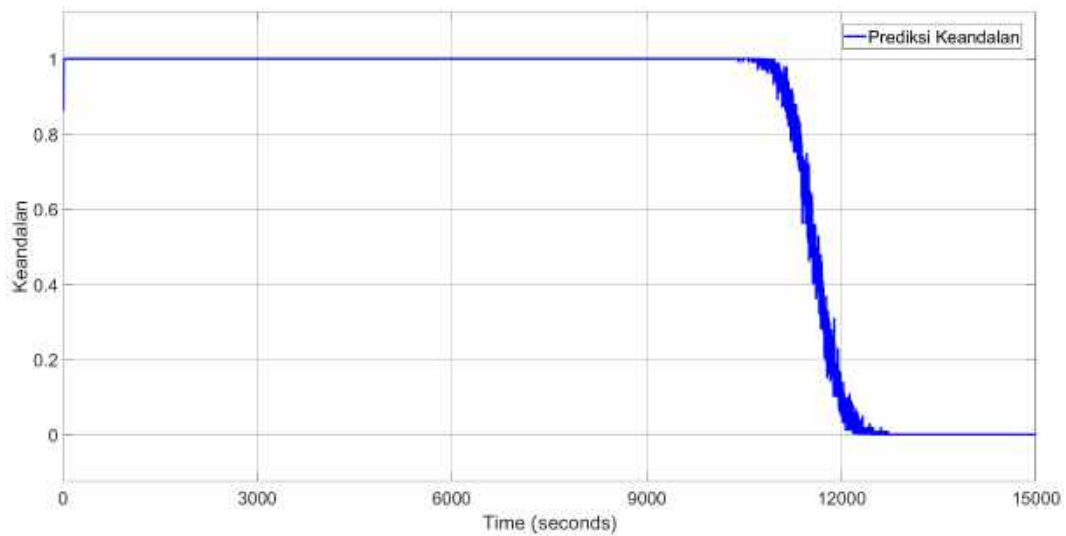


Gambar 4.16 Respon kesalahan stator *inter-turn*

Adapun hasil dari prediksi keandalan dengan menggunakan *time interval* 1 detik dengan 5 dan 10 *step* prediksi berturut-turut adalah sebagai berikut.



Gambar 4.17 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 1 detik dan 5 *step* prediksi

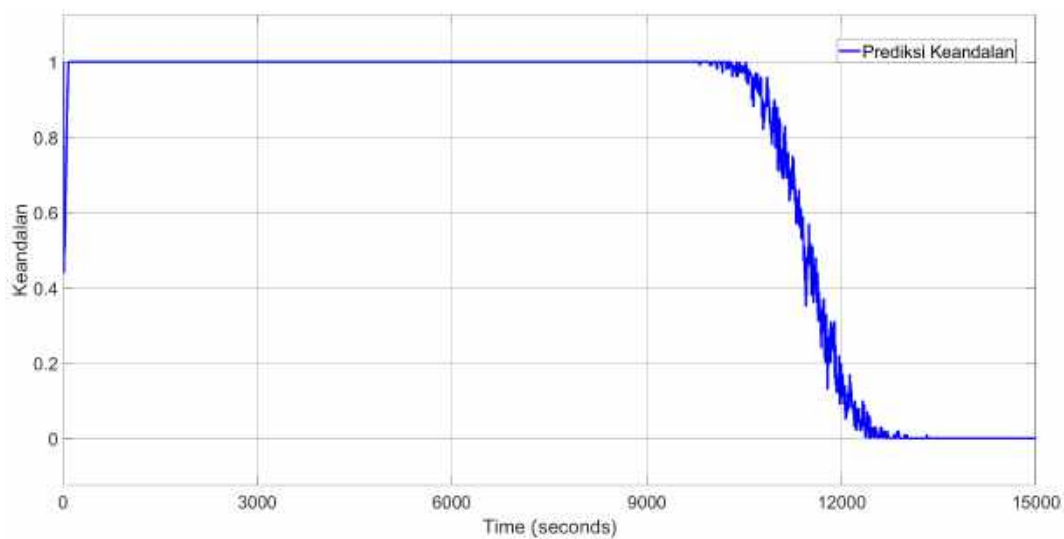


Gambar 4.18 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 1 detik dan 10 *step* prediksi

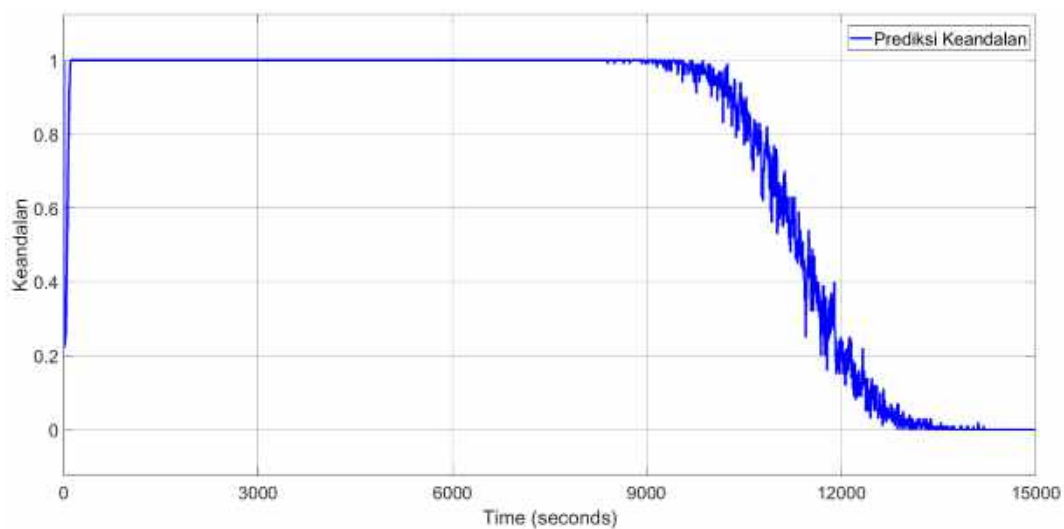
Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 menunjukkan respon prediksi keandalan motor induksi menggunakan *time interval* 1 detik dengan menggunakan 5 dan 10 *step* prediksi berturut-turut. Dari gambar diatas, dapat diketahui bahwa saat menggunakan 5 *step* prediksi, nilai prediksi turun hingga ke nilai 0.95 pada detik ke-1 dan kembali ke nilai 1 pada detik ke-7. Saat menggunakan 10 *step* prediksi, nilai prediksi turun hingga ke nilai 0.86 pada detik ke-2 dan kembali ke nilai 1 pada detik ke-12. Hasil dari algoritma prediksi keandalan bahwa algoritma ini memprediksi bahwa keandalan dari motor induksi akan menurun pada detik ke-10664 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-10476 untuk 10 *step* prediksi. Selanjutnya, nilai keandalan akan mulai menyentuh nilai 0 pada detik ke-12066 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-12180 untuk 10 *step* prediksi dan kemudian mencapai keadaan *steady* di nilai 0 pada detik ke-12496 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-12716 untuk 10 *step* prediksi. Dari nilai-nilai tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar *step* prediksi yang digunakan, semakin besar *error* dan waktu untuk mencapai keadaan *steady* pada detik awal. Selain itu, dengan semakin besar *step* prediksi yang digunakan, waktu yang dibutuhkan untuk memprediksi keandalan yang mulai turun semakin cepat, tetapi waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi *steady* saat bernilai 0 semakin lambat. Dapat disimpulkan bahwa untuk respon prediksi keandalan motor induksi menggunakan *time interval* 1 detik telah mampu

memprediksi terjadinya penurunan keandalan motor induksi sebelum terjadinya kegagalan yang sebenarnya. Dengan menggunakan 5 step prediksi, nilai *error* prediksi pada detik awal bernilai kecil dan hanya terjadi secara cepat dengan waktu memprediksi terjadinya penurunan keandalan semakin cepat.

Selanjutnya dilakukan analisa hasil dari prediksi keandalan dengan menggunakan T_i 5 detik dengan 5 dan 10 *step* prediksi berturut-turut adalah sebagai berikut.



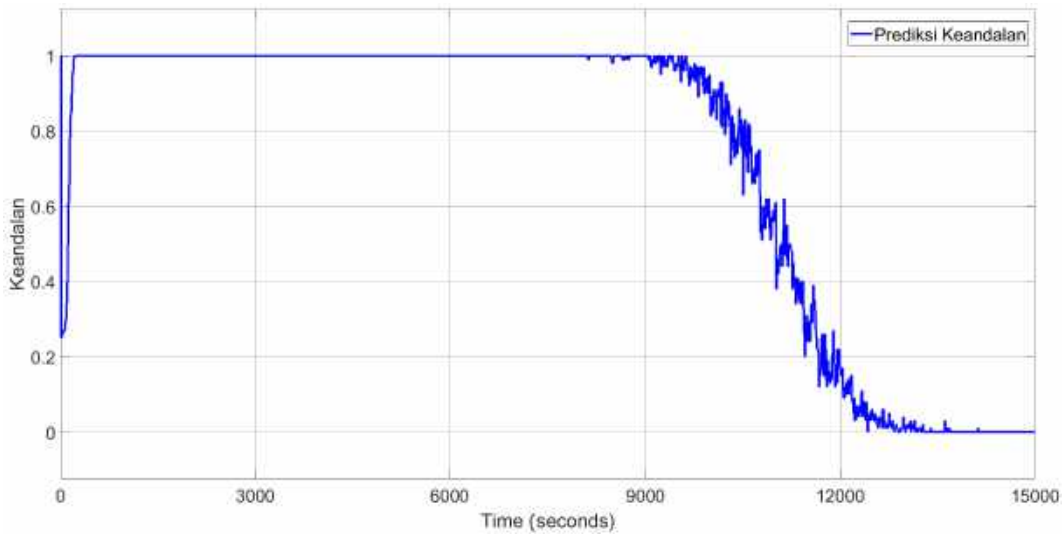
Gambar 4.19 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 5 detik dan 5 *step* prediksi



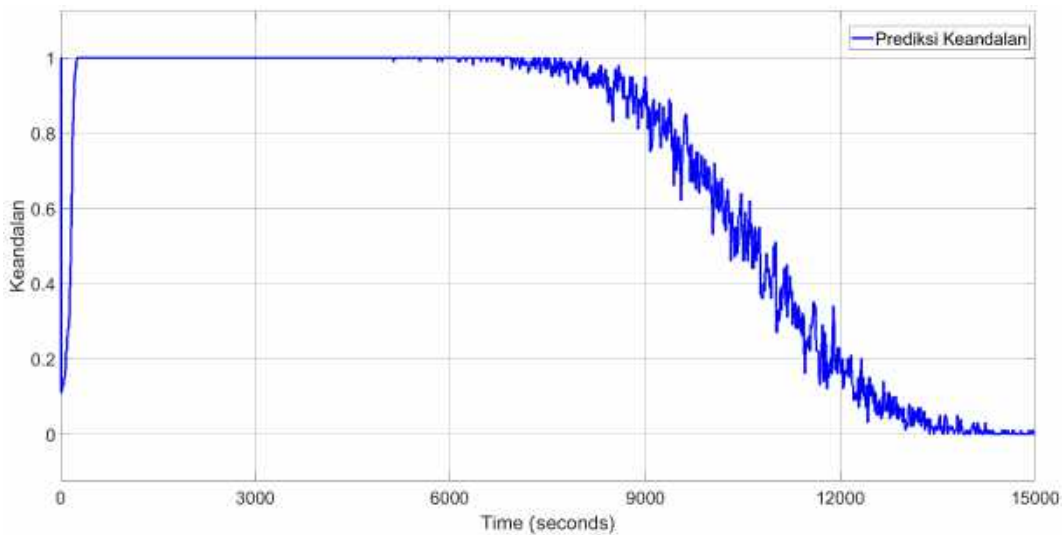
Gambar 4.20 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 5 detik dan 10 *step* prediksi

Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 menunjukkan respon prediksi keandalan motor induksi menggunakan *time interval* 5 detik dengan menggunakan 5 dan 10 step prediksi berturut-turut. Dari gambar diatas, dapat diketahui bahwa saat menggunakan 5 *step* prediksi, nilai prediksi turun hingga ke nilai 0.44 pada detik ke-5 dan kembali ke nilai 1 pada detik ke-85. Saat menggunakan 10 *step* prediksi, nilai prediksi turun hingga ke nilai 0.22 pada detik ke-5 dan kembali ke nilai 1 pada detik ke-105. Hasil dari algoritma prediksi keandalan bahwa algoritma ini memprediksi bahwa keandalan dari motor induksi akan menurun pada detik ke-9810 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-8400 untuk 10 *step* prediksi. Selanjutnya, nilai keandalan akan mulai menyentuh nilai 0 pada detik ke-12420 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-12870 untuk 10 *step* prediksi dan kemudian mencapai keadaan *steady* di nilai 0 pada detik ke-13320 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-14405 untuk 10 *step* prediksi. Dari nilai-nilai tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar *step* prediksi yang digunakan, semakin besar *error* dan semakin lama waktu untuk mencapai keadaan *steady* pada detik awal. Selain itu, dengan semakin besar *step* prediksi yang digunakan, waktu yang dibutuhkan untuk memprediksi terjadinya penurunan keandalan semakin cepat, tetapi waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi *steady* ke nilai 0 semakin lambat. Dapat disimpulkan bahwa untuk respon prediksi keandalan motor induksi menggunakan *time interval* 5 detik juga telah mampu memprediksi terjadinya penurunan keandalan motor induksi sebelum terjadinya kegagalan yang sebenarnya. Tetapi, hasil dari prediksi keandalan lebih baik saat menggunakan *time interval* 1 detik jika dilihat dari *error* prediksi keandalannya.

Selanjutnya dilakukan analisa hasil dari prediksi keandalan dengan menggunakan T_i 10 detik dengan 5 dan 10 *step* prediksi berturut-turut adalah sebagai berikut.



Gambar 4.21 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 10 detik dan 5 *step* prediksi



Gambar 4.22 Respon prediksi keandalan motor induksi dengan T_i 10 detik dan 10 *step* prediksi

Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 menunjukkan respon prediksi keandalan motor induksi menggunakan *time interval* 10 detik dengan menggunakan 5 dan 10 *step* prediksi berturut-turut. Dari gambar diatas, dapat diketahui bahwa saat menggunakan 5 *step* prediksi, nilai prediksi turun hingga ke nilai 0.25 pada detik ke-10 dan kembali ke nilai 1 pada detik ke-210. Saat menggunakan 10 *step* prediksi, nilai prediksi turun hingga ke nilai 0.11 pada detik ke-5 dan kembali ke nilai 1 pada detik ke-250. Hasil dari algoritma prediksi keandalan bahwa algoritma ini

memprediksi bahwa keandalan dari motor induksi akan menurun pada detik ke-8110 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-5130 untuk 10 *step* prediksi. Selanjutnya, nilai keandalan akan mulai menyentuh nilai 0 pada detik ke-12420 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-13370 untuk 10 *step* prediksi dan kemudian mencapai keadaan *steady* di nilai 0 pada detik ke-14130 untuk 5 *step* prediksi dan detik ke-14970 untuk 10 *step* prediksi. Dari nilai-nilai tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar *step* prediksi yang digunakan, semakin besar *error* dan semakin lama waktu untuk mencapai keadaan *steady* pada detik awal. Selain itu, dengan semakin besar *step* prediksi yang digunakan, waktu yang dibutuhkan untuk memprediksi terjadinya penurunan keandalan semakin cepat, tetapi waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi *steady* ke nilai 0 semakin lambat. Dapat disimpulkan bahwa untuk respon prediksi keandalan motor induksi menggunakan *time interval* 10 detik juga telah mampu memprediksi terjadinya penurunan keandalan motor induksi sebelum terjadinya kegagalan yang sebenarnya. Tetapi, hasil dari prediksi keandalan lebih baik saat menggunakan *time interval* 1 detik jika dilihat dari *error* prediksi keandalannya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diberikan kesimpulan dari penelitian ini, antara lain:

- Telah dirancang desain estimasi kesalahan pada motor induksi secara *real-time* berbasis *particle filtering* dengan menggunakan 50 partikel dengan RMSE untuk kesalahan pada arus d dan arus q sebesar 0.0047.
- Telah dirancang susunan algoritma perhitungan keandalan motor induksi secara *real-time* berdasarkan hasil prediksi kesalahan berbasis *exponential smoothing* dengan menggunakan *time interval* 1 detik dan 5 step prediksi.
- Telah dirancang sistem prediksi keandalan yang mampu menentukan terjadinya penurunan keandalan dari motor induksi dimana pada penelitian ini disimulasikan terjadi pada detik ke-10664 dengan kegagalan yang sebenarnya terjadi pada detik ke-11760.

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu dengan menggunakan algoritma estimasi kesalahan yang lebih baik sehingga hasil dari prediksi keandalan dapat lebih akurat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Allaoui, S., Chafaa, K., Laamari, Y., & Athamena, B. (2015). Induction Motor State Estimation using Tuned Extended Kalman Filter. *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416676>
- Andrieu, C., Doucet, A., & Singh, S. S. (2004). Particle Methods for Change Detection , System Identification , and Control. *Proceedings of the IEEE*, 92(3), 423–438.
- Azgomi, H. F., & Poshtan, J. (2013). Induction motor stator fault detection via fuzzy logic. *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2013*, (May). <https://doi.org/10.1109/IranianCEE.2013.6599711>
- Blischke W & Prabhakar M. (2000). *Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Chan, T. F., & Shi, K. (2011). *Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives. Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives*. <https://doi.org/10.1002/9780470825587>
- Chinnam, R. B. (1999). On-line reliability estimation of individual components, using degradation signals. *IEEE Transactions on Reliability*, 48(4), 403–412. <https://doi.org/10.1109/24.814523>
- Chinnam, R. B. (2002). On-line reliability estimation for individual components using statistical degradation signal models. *Quality and Reliability Engineering International*, 18(1), 53–73. <https://doi.org/10.1002/qre.453>
- Chinnam, R. B., & Mohan, P. (2002). Online reliability estimation of physical systems using neural networks and wavelets. *International Journal of Smart Engineering System Design*, 4(4), 253–264. <https://doi.org/10.1080/10255810215021>
- Dash, R. N., & Subudhi, B. (2010). Stator inter-turn fault detection of an induction motor using neuro-fuzzy techniques. *Archives of Control Sciences*, 20(3), 363–376. <https://doi.org/10.2478/v10170-010-0022-7>
- Dhillon, B. S. (2005). *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*.
- Ebeling, C. (1997). *An Introduction To Reliability and Maintainability*

- Engineering. Boston: McGraw-Hill.
- Gordon, N. J., Salmond, D. J., & Smith, A. F. M. (1993). Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. *IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing*, *140*, 107–113.
- Gunawan, R., Yusivar, F., & Kadir, Z. A. (2006). Field Oriented Control of An Induction Motor Speed Sensorless with Current Vector Controller , direct-quadrature Current Compensator and Full Order Observer In direct-quadrature Axis. *Proceedings of IJJSS*.
- Indriawati, K., Agustinah, T., & Jazidie, A. (2020). Robust Observer-Based Fault Tolerant Tracking Control for Linear Systems with Simultaneous Actuator and Sensor Faults: Application to a DC Motor System. *International Review on Modelling and Simulations*, *8*, 410–417.
- Ki, N. K., & Delp, E. J. (2009). New Models For Real-Time Tracking Using Particle Filtering. *Proceedings of SPIE*, *7257*.
- Kliman, G. B., Premerlani, W. J., Koegl, R. A., & Hoeweler, D. (2002). A new approach to on-line turn fault detection in AC motors, 687–693.
<https://doi.org/10.1109/ias.1996.557113>
- Li, C., Xu, D., & Wang, G. (2017). High efficiency remanufacturing of induction motors with interior permanent-magnet rotors and synchronous-reluctance rotors. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2017*, 2–7. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8080993>
- Lu, H., Kolarik, W. J., & Lu, S. S. (2001). Real-time performance reliability prediction. *IEEE Transactions on Reliability*, *50*(4), 353–357.
<https://doi.org/10.1109/24.983393>
- Ogata, K. (n.d.). *Modern Control Engineering* (3rd ed.). Prentice-Hall.
- P. O'Connor, A. K. (2012). *Practical Reliability Engineering* (the 5th ed). West Sussex: John Wiley & Sons.
- Schaeffer, E., & Bachir, S. (2013). Modeling Induction Machine Winding Faults for Diagnosis. In *Electrical Machine Diagnosis* (pp. 23–68).
- Schön, T. B. (2010). *Solving Nonlinear State Estimation Problems Using Particle Filters - An Engineering Perspective Abstract*.

- Siu, N. (1994). Risk assessment for dynamic systems: An overview. *Reliability Engineering and System Safety*, 43(1), 43–73. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(94\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0951-8320(94)90095-7)
- Tanrioven, M., Wu, Q. H., Turner, D. R., Kocatepe, C., & Wang, J. (2004). A new approach to real-time reliability analysis of transmission system using fuzzy Markov model. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 26(10), 821–832. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2004.07.004>
- Theodore, W. (2002). *Electrical Machines, Drives, and Power Systems* (5th ed.). Prentice Hall.
- Williamson, S., & Mirzoian, K. (1985). Analysis of Cage Induction Motors with Stator Winding Faults Line-End Coils of Induction Motors, (July), 50–51.
- Yektaniroumand, T., Azari, M. N., & Gholami, M. (2018). Optimal Rotor Fault Detection in Induction Motor Using Particle-Swarm Optimization Optimized Neural Network. *International Journal of Engineering*, 31(11), 1876–1882. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.11b.11>
- Yun, J., Lee, K., Lee, K. W., Lee, S. Bin, & Yoo, J. Y. (2009). Detection and classification of stator turn faults and high-resistance electrical connections for induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(2), 666–675. <https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2013557>
- Zhengguo Xu, Yindong Ji, & Donghua Zhou. (2008). Real-time Reliability Prediction for a Dynamic System Based on the Hidden Degradation Process Identification. *IEEE Transactions on Reliability*, 57(2), 230–242. <https://doi.org/10.1109/TR.2008.916882>
- Zhengguo Xu, Yindong Ji, & Donghua Zhou. (2009). A New Real-Time Reliability Prediction Method for Dynamic Systems Based on On-Line Fault Prediction. *IEEE Transactions on Reliability*, 58(3), 523–538. <https://doi.org/10.1109/tr.2009.2026785>

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran A (M-File Sistem Prediksi Keandalan Motor Induksi)

```
clc;
clear;

Lm = 0.258;
Ls = 0.274;
Lr = 0.274;
Rr = 3.805;
Rs = 4.85;
pole = 2;
J = 0.031;
Ts = 1e-6;
Tr = Lr/Rr;
tho = 1-(Lm^2/(Lr*Ls));
delta=Lm/Lr;
Lf=tho*Ls;

B = [ 1/Lf 0; 0 1/Lf; 0 0; 0 0; 0 0];

C=[1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0; 0 0 0 0 1];
D = zeros(2);

a=0.4;
b=0.6;

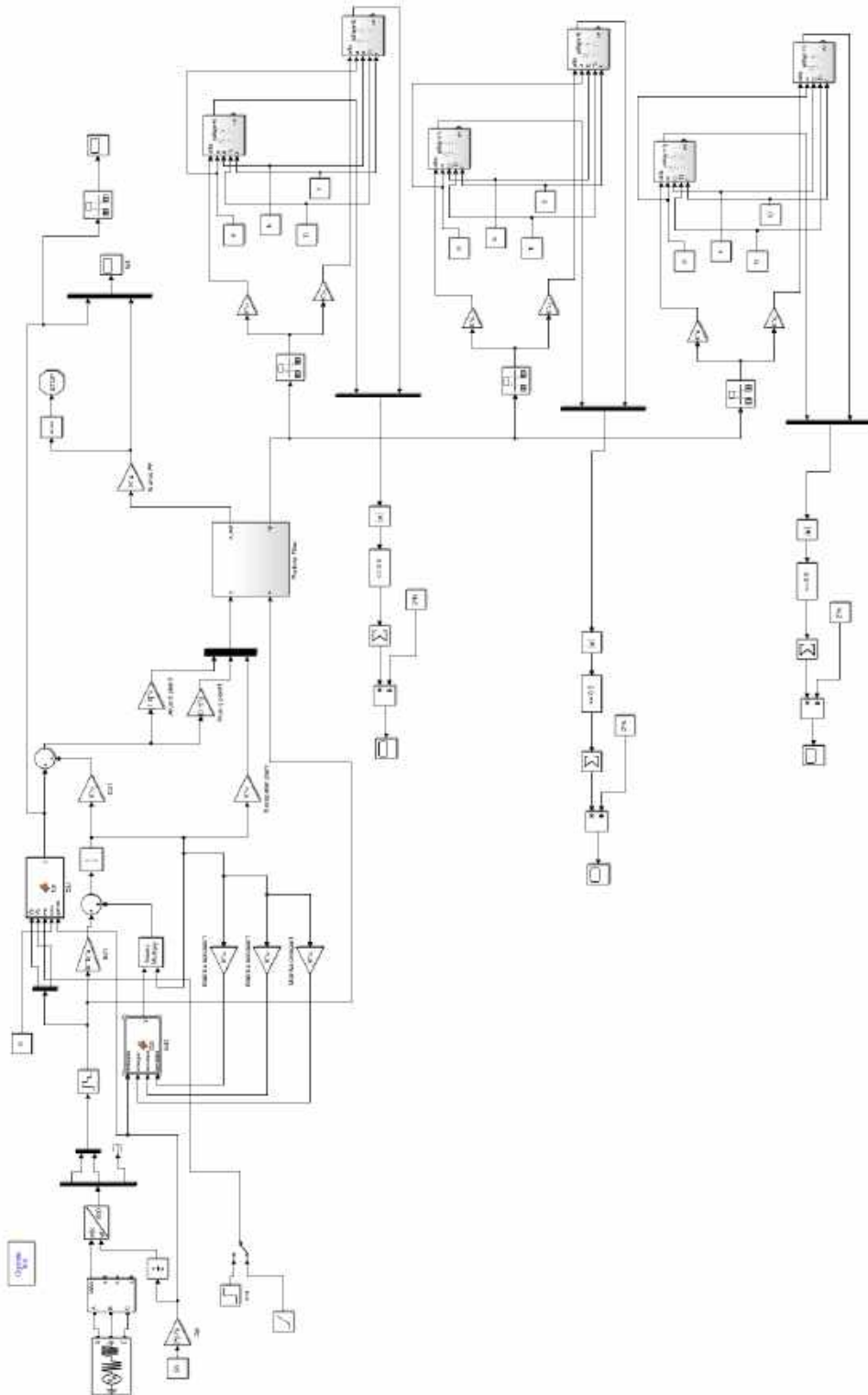
Ti=0.1;

N=250; % particle

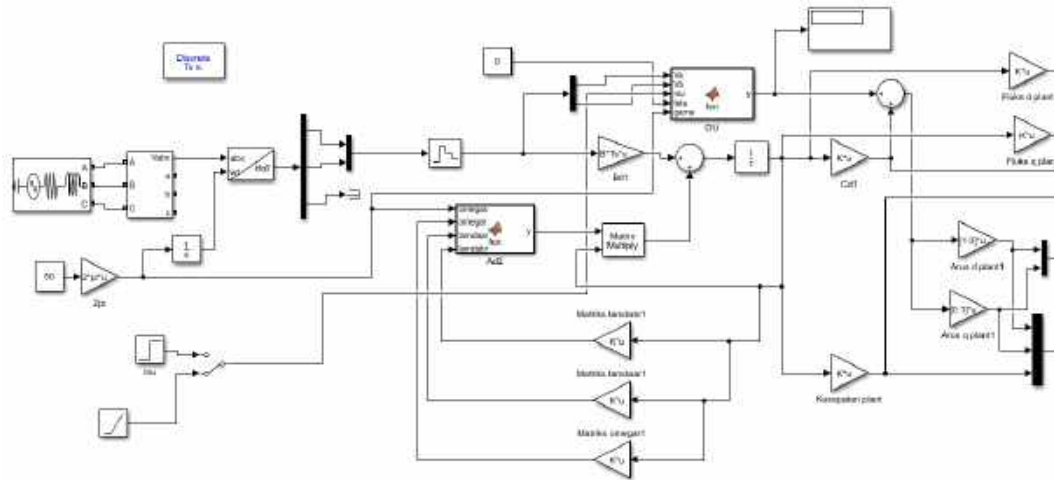
x0 = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]'; % Initial guess of the state
value
P0=0.001*eye(10);
Q= 1e-6*[1e-6 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
        0 1e-6 0 0 0 0 0 0 0 0;
        0 0 1e-6 0 0 0 0 0 0 0;
        0 0 0 1e-6 0 0 0 0 0 0;
        0 0 0 0 1e-6 0 0 0 0 0;
        0 0 0 0 0 1e-6 0 0 0 0;
        0 0 0 0 0 0 1e-6 0 0 0;
        0 0 0 0 0 0 0 1e-6 0 0;
        0 0 0 0 0 0 0 0 1e-2 0;
        0 0 0 0 0 0 0 0 0 1e-2];
R = [0.8^2 0 0;0 0.8^2 0; 0 0 0.4^2]; % Measurement noise R1
naik, inv(R) turun
nx=size(P0,2);
xp0 = repmat(x0,1,N)+sqrt(P0)*randn(nx,N); % 1.
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

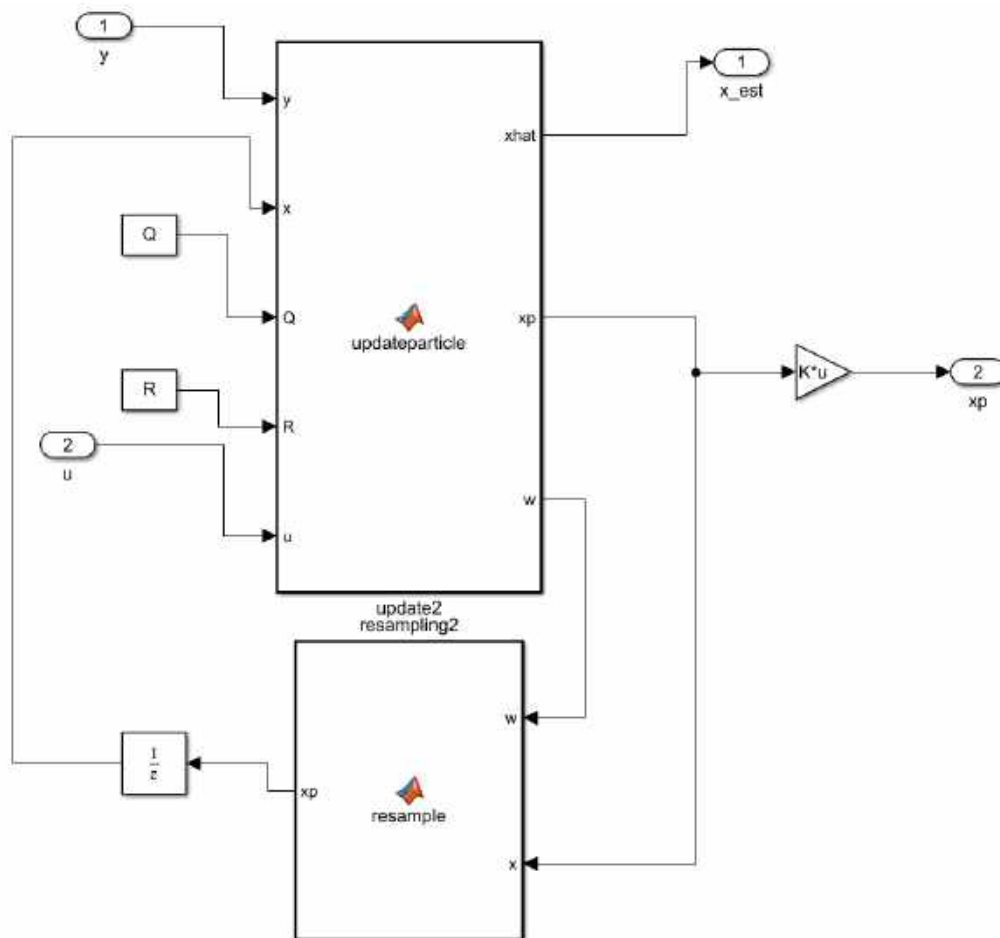
Lampiran B (Simulink Keseluruhan Sistem)



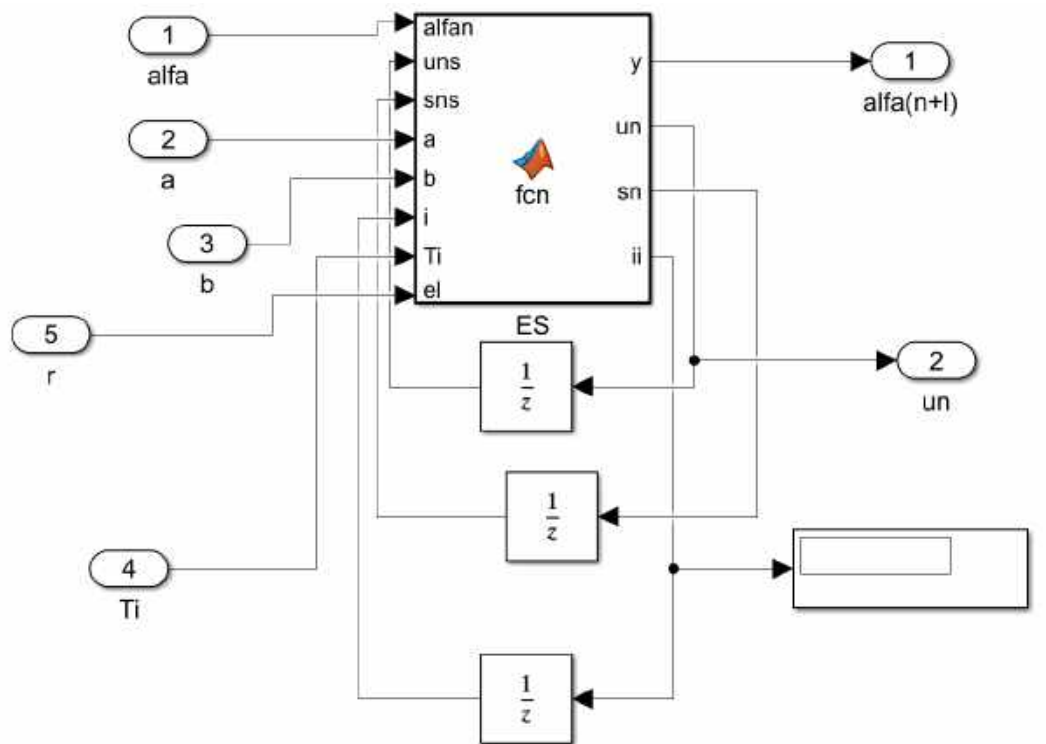
Lampiran B1 (Simulink Model Motor Induksi)



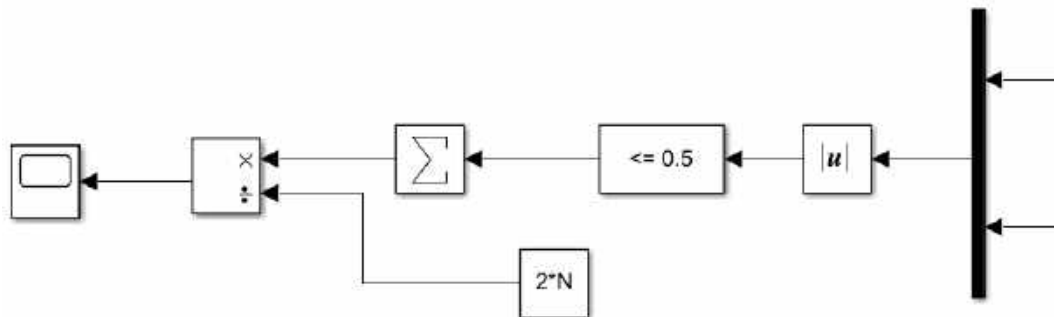
Lampiran B2 (Simulink Particle Filtering)



Lampiran B3 (Simulink Exponential Smoothing)



Lampiran B4 (Simulink Algoritma Prediksi Keandalan)



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Nama penulis Syahrul Munir dilahirkan di Sidoarjo, 15 Februari 1996 dari ayah bernama H. Ali Thoah (Alm.) dan ibu bernama Ummu Salamah. Saat ini penulis tinggal di Bebekan Masjid Gg II No. 34 RT 05 RW 02 Kecamatan Taman Kabupaten Sidoarjo. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di MI Roudlotul Banat (2002-2008), SMPN 1 Taman (2008-2011), SMAN 15 Surabaya (2011-2014), pendidikan sarjana di Program Studi S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2014-2018), dan sedang menempuh pendidikan magister S2 Teknik Fisika FTIRS di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dari 2018 hingga sekarang.

Pada bulan Juli 2020, penulis telah menyelesaikan Tesis dengan judul **Sistem Prediksi Keandalan Real-Time pada Motor Induksi Berdasarkan Kesalahan Stator Inter-Turn**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, maupun ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai Tesis ini, maka dapat menghubungi penulis melalui email : syahrul.mnr15@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan