



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN PENGENDALIAN DAYA DAN OBSERVER
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB)
BERBASIS SCIG (SQUIRREL CAGE INDUCTION
GENERATOR)**

SKRIPSI

**ARNOL SINAGA
0806330711**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN PENGENDALIAN DAYA DAN OBSERVER
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB)
BERBASIS SCIG (SQUIRREL CAGE INDUCTION
GENERATOR)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ARNOL SINAGA

0806330711

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Arnol Sinaga

NPM : 0806330711

Tanda Tangan : 

Tanggal : 21 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

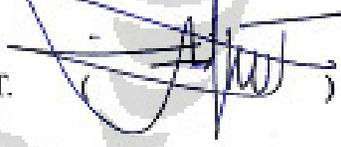
Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Arnol Sinaga
NPM : 0806330711
Program Studi : Elektro
Judul Skripsi : Perancangan Pengendali Daya dan Observer Pada
Pembangkit Tenaga Listrik Tenaga Bayu Berbasis
SCIG (Squirrel Cage Induction Generator)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Halim, M.Eng ()

Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar, M.Eng ()

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saya memohon maaf apabila terjadi kesalahan dalam penulisan skripsi ini. Saya juga menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan laporan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Abdul Halim, M.Eng, sebagai dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran dan selalu sabar untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini,
2. Dr.Ir. Feri Yusivar, M.Eng, sebagai dosen yang memberikan masukan-masukan dalam penyusunan skripsi ini,
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral,
4. Maria Lidya, Hendra, Eky, Gunawan, Dony, Jonas, Adit dan Martina yang selalu memberikan dukungan di saat saya menghadapi masalah,
5. Kurniawan widi dan Nanda sebagai teman diskusi selama proses pengerjaan laporan skripsi ini,
6. M. Azummar, Dwi Sanjaya, Titan sebagai teman satu bimbingan yang selalu memberikan dukungan dalam pengerjaan skripsi ini,
7. Teman-teman elkom 2008 yang selalu memberikan semangat,
8. Teman-teman Geropas yang selalu memberikan semangat,
9. Sahabat-sahabat saya yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu atas segala dukungan yang telah diberikan.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga laporan skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 21 Juni 2012


(Arnol Sinaga)

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Arnol Sinaga
NPM : 0806330711
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**PERANCANGAN PENGENDALIAN DAYA DAN OBSERVER
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU (PLTB)
BERBASIS SCIG (SQUIRREL CAGE INDUCTION
GENERATOR)**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencatumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 21 Juni 2012

Yang menyatakan



(Arnol Sinaga)

ABSTRAK

Nama : Arnol Sinaga
NPM : 0806330711
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Perancangan Pengendalian Daya dan Observer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) Berbasis SCIG (Squirrel Cage Induction Generator)

Penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu makin meningkat sebagai sumber energi listrik terbarukan. Salah satu permasalahan dalam pemanfaatan PLTB adalah pengendalian generator induksi. Pada penelitian ini telah dirancang pengendali *RFOC*, *Full Observer* dan pengendali daya sebagai satu kesatuan kendali generator induksi. Tipe generator induksi yang dipakai adalah SCIG. Pengendali *Rotor Flux Oriented Control (RFOC)* adalah pengendali vektor yang mengatur arus stator. RFOC terdiri dari dua bagian yaitu decoupler dan pengendali PI untuk mengendalikan arus. Pengendali *RFOC* adalah pengendali yang memerlukan masukan arus stator referensi, arus stator generator dan kecepatan putar rotor generator. Untuk mendapatkan kecepatan putar rotor generator, dalam penelitian ini didesain *full order observer* sebagai masukan pengendali RFOC sehingga tidak menggunakan sensor kecepatan. Sedangkan pengendali daya didesain agar daya keluaran generator sesuai dengan daya referensi yang diberikan. Analisa dilakukan berdasarkan hasil simulasi pada MATLAB/Simulink dan C-Mex S-Function. Berdasarkan hasil simulasi, *RFOC* yang dirancang telah berhasil mengendalikan generator dengan perubahannya arus stator sumbu q, *full observer* dapat mengestimasi state dengan error 5% pada model dan kecepatan putar dengan error 0.43% dan waktu stabil 1.4s dan pengendali daya bekerja dengan baik.

Kata kunci— Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, Gear Box, SCIG, Vector Control, RFOC, PI, PWM, Full Order Observer.

ABSTRACT

Name : Arnol Sinaga
NPM : 0806332711
Study Program : Electrical Engineering
Title : Design of Power Control and Observer on SCIG
(Squirrel Cage Induction Generator) Wind Power

The use of wind power plants as a source of renewable electric energy is increasing. One of the problems in the utilization wind turbine is the control of an induction generator. In this study, RFOC, Full Observer and Power Controller have been designed as control of induction generator. Induction generator type used is SCIG. Controlling Rotor Flux Oriented Control (RFOC) is a vector controller that regulates the stator currents. RFOC consists of two parts, decoupler and current PI controller. RFOC controller requires input reference stator current, stator current generator and the generator rotor rotational speed. In this study, instead of speed sensor, full order observer has been used to estimate generator rotor speed. Power controller is used to regulate the generator output power in accordance with the references given. In this study, verification of controller performance has been done by using simulation MATLAB/Simulink. Simulation results show that RFOC, full observer and power controller have achieved its performance. RFOC has control the generator with change of q-axis stator current. Full observer has estimate with 5% error, and rotational speed with 0.43% with 1.4s. Power control have also worked well.

Keyword : wind power, wind turbines, gear boxes, squirrel cage induction generator, power converter, three-phase load, Matlab / Simulink.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS ..	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR DAN TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Penelitian	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Potensi Angin di Indonesia	5
2.2 Model Angin	5
2.3 Model Turbin Angin	6
2.4 Model Drive Train	8
2.5 Model Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)	9
2.5.1 Model Generator Induksi Acuan Rotor	10
2.5.2 Model Dinamik pada Kerangka Referensi Stator	13
2.6 Transformasi Tiga Fasa Ke Dua Fasa	16
2.6.1 Transformasi <i>Clarke</i>	16
2.6.2 Transformasi Park	17
2.6.3 Transformasi abc ke dq	18
BAB 3 PERANCANGAN PENGENDALI SCIG DAN FULL ORDER OBSERVER	37
3.1 Pengendali Vektor Arus DQ dan Persamaan Decoupling	37
3.2 Rancangan Full Order Observer	24
3.2.1 Estimasi Arus dan Fluks	24
3.2.2 Estimasi Kecepatan	34

3.3	Pengendali Daya.....	38
BAB 4 SIMULASI HASIL RANCANGAN DAN ANALISANYA		20
4.1	Simulasi Model Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.....	20
4.1.1	Simulasi Model Angin	20
4.1.2	Simulasi Turbin Angin.....	40
4.1.3	Simulasi Gear Box.....	41
4.1.4	Simulasi Generator Induksi Tipe Squirrel Cage	42
4.1.5	Simulasi PWM	43
4.2	Simulasi dan Analisa Pengaruh Perubahan Arus Stator dengan Sensor Kecepatan	44
4.3	Simulasi dan Analisa Pengaruh Kecepatan Angin dan Observer.....	46
4.4	Simulasi dan Analisa Pengaruh Perubahan Arus Stator Sumbu q	52
4.5	Simulasi dan Analisa Pengendalian Daya.....	57
4.5.1	Daya Referensi Tetap	57
4.5.2	Daya Referensi Berubah-ubah	63
BAB 5 KESIMPULAN.....		65
DAFTAR ACUAN		67
Lampiran 1		72
Lampiran 2		73
Lampiran 3		74
Lampiran 4		75

DAFTAR GAMBAR DAN TABEL

Gambar 2.1 Hubungan C_p dan λ	7
Gambar 2.2 Gear box	8
Gambar 2.3a Generator pada sumbu d.....	10
Gambar 2.3b Generator pada sumbu d.....	11
Gambar 2.4 Transformasi Clarke	16
Gambar 2.5 Transformasi Park.....	17
Gambar 3.1. Rancangan struktur pengendali dan observer.....	37
Tabel 3.2 <i>Padé Approximation</i>	21
Gambar 3.3 Diagram Vektor Kontrol dan Decoupling.....	24
Gambar 3.4 Diagram Blok Observer	25
Gambar 4.1 Perubahan kecepatan angin terhadap waktu.....	20
Gambar 4.2 Torsi mekanik turbin.....	40
Gambar 4.3. Hubungan C_p terhadap lamda keluaran simulasi	40
Gambar 4.4 Keluaran gear box.....	41
Gambar 4.5 Perbandingan kecepatan putar mekanik dan elektrik	43
Gambar 4.6 Slip generator.....	43
Gambar 4.7 Hasil Keluaran PWM.....	43
Gambar 4.8 Struktur PLTB tanpa observer.....	45
Tabel 4.1 Pengaruh ids dan iqs terhadap sistem PLTB.....	45
Gambar 4.9 Struktur sistem PLTB dengan observer	48
Gambar 4.10 Hasil simulasi pengaruh kecepatan angin dan observer.....	51
Gambar 4.11 Hasil simulasi pengaruh perubahan arus stator sumbu q	57
Gambar 4.12 Struktur PLTB dengan pengendali daya	59
Gambar 4.13 Hasil simulasi pengendalian daya.....	62
Gambar 4.14 Hasil simulasi pengendalian daya dengan referensi berubah.....	67

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik dalam kehidupan sehari-hari semakin meningkat seiring dengan meningkatnya teknologi, bertambahnya bangunan perumahan dan industri-industri. Disamping itu ketersediaan energi fosil yaitu minyak bumi dan batubara sebagai sumber utama energi dunia semakin menipis sehingga dibutuhkan solusi-solusi untuk meminimalisasi penggunaan sumber energi fosil. Dalam perkembangan pengetahuan didapat solusi dalam mengatasi masalah tersebut dengan menemukan energi terbarukan seperti energi matahari, energi angin dan biomassa. Disisi lain energi terbarukan adalah sangat ramah lingkungan apabila dibandingkan dengan energi fosil karena energi terbarukan tidak menghasilkan zat-zat kimia yang bisa merusak lingkungan. Untuk memaksimalkan penggunaan energi terbarukan terutama yang bersumber dari angin, maka skripsi ini membahas pembangkit listrik tenaga angin/bayu.

Angin adalah salah satu sumber energi melimpah yang tersedia di alam. Pemanfaatan tenaga angin sebagai sumber energi di Indonesia sangat perlu dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di Indonesia terlebih di daerah-daerah pesisir pantai yang tidak dapat dijangkau transmisi listrik PLN. Berdasarkan hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 122 lokasi menunjukkan bahwa beberapa wilayah Indonesia memiliki kecepatan angin diatas 5 m/s yaitu Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan dan Pantai Selatan Jawa.

Dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga angin terdapat beberapa masalah yaitu efisiensi konversi energinya masih sangat rendah, kecepatan angin yang kecil dan berubah-ubah. Untuk itu dibutuhkan beberapa metode dalam merancang pembangkit listrik tenaga bayu supaya konversi energinya dapat mencapai maksimal.

Pembangkit listrik tenaga bayu yang didesain adalah menggunakan generator induksi tipe *squirrel cage* (SCIG). Generator induksi sering digunakan karena lebih murah, biaya perawatannya rendah, *robust*, dan lebih mudah diaplikasikan dengan kecepatan angin yang relatif kecil (3-6 m/s). Tapi memiliki kekurangan yaitu efisiensi konversi yang rendah dan menyerap daya reaktif dari sistem. [1]

Skripsi ini fokus pada optimasi generator induksi sebagai generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga bayu. Optimasi generator dilakukan dengan melakukan pengendalian Rotor Flux Oriented Control (RFOC) pada frame alfa/beta model generator. Dengan adanya pengendali ini maka diharapkan dapat mengendalikan generator supaya dapat bekerja maksimal.[2]

Dalam desain RFOC dibutuhkan masukan arus dan kecepatan putar rotor generator yang diakibatkan oleh putaran turbin angin, arus referensi stator. Untuk itu, skripsi ini membahas bagaimana pengaruh arus referensi stator tersebut terhadap kemampuan kerja generator dan daya yang dikeluarkannya.

Disamping itu, Skripsi ini membahas bagaimana memanfaatkan full observer sebagai alat untuk mengestimasi kecepatan putar rotor. Hal ini dilakukan untuk menghindari penggunaan sensor kecepatan yang harganya mahal [3]. Sehingga dengan mengetahui arus dan tegangan keluaran generator maka dengan menggunakan observer dapat diestimasi kecepatan putar rotor. Kecepatan putaran rotor ini sangat penting diketahui karena diperlukan dalam pengendali RFOC. Untuk itu, skripsi ini akan membahas bagaimana karakteristik kerja observer dibandingkan dengan menggunakan sensor dan pengaruh penggunaan observer terhadap kemampuan kerja generator.[4]

Skripsi ini juga membahas bagaimana kita dapat mengendalikan daya aktif dan daya reaktif sesuai dengan besar daya yang kita inginkan menggunakan pengendali PI. Dimana dalam hal ini dilakukan dengan memperhitungkan error daya referensi dan daya output untuk mengendalikan arus i_{qs} referensi (i_{qs}^*) pada RFOC. Dari penelitian ini dapat dilihat bahwa i_{qs} sebanding dengan daya aktif dan arus Id sebanding dengan daya reaktif. Dan besar arus i_{ds} dan i_{qs} memiliki batas tertentu untuk menjaga sistem tetap stabil dan observer bekerja dengan baik.[4]

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah pada skripsi ini adalah bagaimana mendesain pengendali *RFOC* untuk dapat mengendalikan generator induksi tiga fasa supaya dapat bekerja dengan maksimal. Dalam penelitian ini dapat dilihat bagaimana pengaruh besar i_{ds}^* dan i_{qs}^* pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu. Disamping itu, juga membahas bagaimana mendesain *observer* sebagai pengganti sensor untuk estimasi *state* dan besar kecepatan putaran rotor generator yang diperluakann dalam pengendali *RFOC* dan bagaimana kemampuan kinerja *observer* pada sistem. Skripsi ini juga membahas bagaimana mengendalikan daya keluaran generator.

1.3 Batasan Penelitian

Skripsi ini dibatasi pada desain sistem pengendalian generator induksi tipe squirrel cage, desain observer, dan pengendalian daya pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu dalam tingkat simulasi menggunakan *software* MATLAB. Pada simulasi pembangkit listrik tenaga bayu ini dibatasi hanya sampai sisi mesin dan tidak dihubungkan ke beban atau grid. Analisa mengenai sistem pembangkit dilakukan berdasarkan hasil simulasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Memahami model matematis komponen-komponen sistem PLTB (turbin, gearbox dan generator).
2. Memahami dan merancang simulasi sistem PLTB.
3. Memahami sistem desain *RFOC*
4. Memahami sistem desain *full observer*.
5. Memahami perancangan pengendalian daya.
6. Mengetahui batasan kemampuan sistem pengendali *RFOC* dan *observer*.
7. Menverifikasi kinerja pengendali dan *observer* yang dirancang.
8. Mengetahui pengaruh pengendali dan *observer* terhadap sistem pembangkit.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Studi literatur dengan membaca buku, jurnal tentang topik yang dibahas serta mendiskusikan dengan dosen pembimbing, dosen pendukung dan teman.
2. Menurunkan model matematis komponen-komponen PLTB.
3. Merancang sistem PLTB dengan menggunakan simulasi MATLAB/Simulink dan menggunakan program C-mex.
4. Merancang pengendali *Rotor Flux Oriented Control (RFOC)* sebagai pengendali generator induksi tipe *squirrel cage*.
5. Merancang *observer*
6. Merancang pengendali daya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima bab. Bab satu membahas mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan penelitian, metodologi penelitian dan sistematika penulisan yang dilakukan. Bab dua, membahas mengenai dasar teori yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini dan pemodelan komponen-komponen pembangkit. Bab tiga, membahas bagaimana mendesain pengendali *RFOC*, desain *observer* dan desain pengendali daya. Bab empat, menampilkan hasil simulasi dan analisa hasil simulasi. Skripsi ini diakhiri Bab lima yaitu kesimpulan dari penelitian ini.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem pembangkit listrik tenaga bayu akan mengkonversikan energi angin menjadi energi mekanik, kemudian mengubah energi mekanik tersebut menjadi energi listrik.

2.1 Potensi Angin di Indonesia

Angin adalah salah satu energi melimpah yang tersedia di alam. Pemanfaatan tenaga angin sebagai sumber energi di Indonesia sangat perlu dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di Indonesia terlebih di daerah-daerah pesisir pantai yang tidak dapat dijangkau transmisi listrik PLN. Potensi energi angin di Indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 m/s. Berdasarkan hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 122 lokasi menunjukkan bahwa beberapa wilayah Indonesia memiliki kecepatan angin diatas 5 m/s yaitu Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan dan Pantai Selatan Jawa.

Daya total yang dapat dihasilkan angin adalah sama dengan energi kinetik yang dihasilkan angin tersebut $P_t = \frac{1}{2}mV^2$, dengan m adalah massa angin dan V adalah kecepatan angin [5]

$$m = \rho \cdot A \cdot V \quad (2.1.1)$$

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.1.2)$$

Dimana:

P_t : Daya total yang disimpan angin

ρ : massa jenis angin ($1,225 \text{ kg/m}^3$)

A: luas penampang turbin angin

2.2 Model Angin

Model dari kecepatan angin secara umum adalah merupakan superposisi dari 2 komponen yaitu [1]:

$$V(t) = V_s(t) + V_t(t) \quad (2.2.1)$$

Dimana: $V_s(t)$ = komponen frequency rendah;

$V_t(t)$ = komponen turbulence (variasi frequency tinggi)

Komponen frequency rendah merupakan kecepatan angin yang sangat rendah, dapat dimodelkan dengan Weibull's distribution atau Rayleigh's distribution.

$$V_s(t) = a.v.e^{\frac{-1}{2.a.v^{-2}}} \quad (2.2.2)$$

Keterangan: v : rata-rata kecepatan angin/jam

a : parameter tergantung pada rata-rata kecepatan angin dalam waktu yang lama

Variasi kecepatan angin yang cepat $V_t(t)$ dimodelkan dengan komponen turbulence. Properties turbulence dynamic menggunakan spectrum yaitu Kaimal's spectrum. Kaimal's spectrum lebih baik digunakan untuk berhubungan dengan data eksperimen ketika turbulence ada.

2.3 Model Turbin Angin

Turbin angin adalah bagian dari pembangkit listrik tenaga bayu yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik yang akan memutar poros dari turbin tersebut.

Turbin angin memiliki *blade* yang memiliki bentuk penampang khusus yang memungkinkan terjadinya aliran angin pada satu sisi lebih cepat dari pada sisi lain saat angin melewatinya. Perbedaan kecepatan ini akan menimbulkan gaya yang menyebabkan turbin berputar.

Energy yang ada didalam angin dengan kecepatan V adalah :

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3.1)$$

Maksimum efisiensi daya pada angin adalah $\eta = \frac{16}{27}$ sehingga daya maksimum pada angin:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \left(\frac{16}{27}\right) \quad (2.3.2)$$

Apabila angin melewati turbin maka turbin akan berputar sehingga didapat daya angin yang maksimum setelah melewati turbin:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \left(\frac{8}{27}\right) \quad (2.3.3)$$

Jadi efisiensi maksimum dalam melakukan konversi energi angin menjadi energi mekanik adalah sebesar $8/27$.

Koefisien daya (C_p) adalah efisiensi dari konversi daya pada turbin angin, bergantung pada nilai *speed ratio* (λ) dan besarnya sudut pada sudu (i). *Speed ratio* adalah perbandingan antara kecepatan rotor yang dihasilkan pada low speed shaft (Ω_{wt}) dengan kecepatan angin (V) [5]:

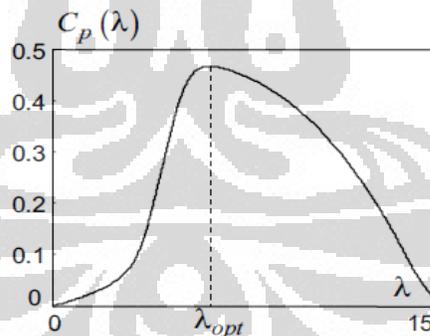
$$\lambda = R\omega_{wt}/V \quad (2.3.4)$$

Nilai koefisien daya bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08i} - \frac{0.035}{i^3 + 1}$$

$$C_p(\lambda, i) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4i - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.3.5)$$

Dari persamaan diatas didapat hubungan antara C_p dan λ yang dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Hubungan C_p dan λ

Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin sebanding dengan daya yang dihasilkan, dan kecepatan putar turbin angin pada saat itu sehingga torsi didapat seperti:

$$T = \frac{P_{wt}}{\omega_{wt}} \quad (2.3.6)$$

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (2.3.7)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.3.6), (2.3.7) dan (2.3.4) maka didapat hubungan besar torsi yang dihasilkan turbin dengan lamda dan C_p adalah

$$T = \frac{\rho \pi R^3 V^2 C_p}{\lambda} \quad (3.2.11)$$

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (3.2.12)$$

Keterangan:

T: torsi angin

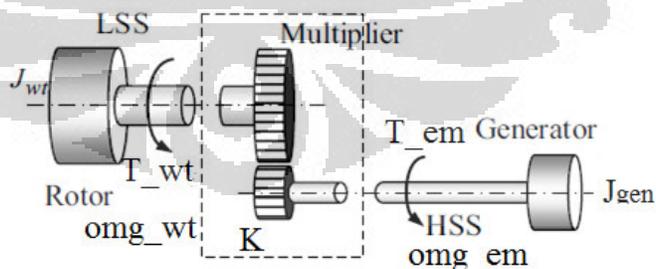
Ct: karakteristik turbin

Simulasi turbin ini dibuat dengan menggunakan program C-Mex MATLAB sesuai persamaan diatas.

2.4 Model Drive Train

Pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu ini, drive train yang digunakan adalah *one mass drive train*. Pada *one mass drive train* ini terdiri dari LSS (*Low side shaft*), gear box dan HSS (*High side shaft*). Pada gear box terdapat multiplier dimana yang menentukan besar peningkatan kecepatan dan penurunan torsi. Besar perubahan kecepatan putar dari *low speed shaft* ke *high speed shaft* akan dipengaruhi oleh momen inersia yang ada pada rotor turbin dan rotor generator dan torsi rotor turbin dan generator. Ilustrasi drive train ditampilkan pada Gambar 2.2 di bawah ini.

Model gearbox adalah: [5]



Gambar 2.2 Gear box

$$T_{em} - T_{wt} = J_{ech} \frac{d(\omega_{mg_em})}{dt} \quad (2.4.1)$$

$$\omega_{mg_em} = K * \omega_{mg_wt} \quad (2.4.2)$$

Dimana:

$$T''_{wt} = \frac{T_{wt}}{K^2} \quad (2.4.3)$$

$$J_{ech} = J_{gen} + \frac{J_{wt}}{K^2} \quad (2.4.4)$$

Keterangan:

T _{em}	= torsi elektrik (N.m)
T _{wt}	= torsi mekanik (N.m)
omg _{wt}	= kecepatan putar rotor sisi low speed shaft (rad/s)
omg _{em}	= kecepatan putar rotor sisi high speed shaft (rad/s)
J _{gen}	= momen inersia sisi low (kg.m ²)
J _{wt}	= momen inersia sisi high (kg.m ²)
K	= perbandingan gear

Simulasi turbin ini dibuat dengan menggunakan program C-Mex MATLAB sesuai persamaan diatas.

2.5 Model Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)

Generator adalah sebuah alat yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pada umumnya, generator terbagi menjadi dua tipe yaitu generator induksi dan generator magnet permanen. Generator induksi bekerja dengan prinsip elektromagnetik. Kumputan stator diberikan arus bolak-balik tiga fasa, sehingga akan menimbulkan medan magnet yang arah resultannya selalu berputar. Karena pengaruh medan magnet tersebut, akan terjadi induksi pada kumputan rotor. Karena medan magnetnya berubah-ubah, akan timbul GGL induksi pada rotor akibat perubahan fluks. GGL tersebut akan menyebabkan timbulnya medan magnet pada rotor. Interaksi antara kedua gaya tersebut, akan menimbulkan gaya Lorentz yang akan memberikan gaya kepada rotor untuk berputar. Tetapi pada generator induksi, rotor tersebut akan diputar lebih cepat dari kecepatan medan putar melawan gaya Lorentz tersebut, sehingga akan timbul arus di stator yang lebih besar dibandingkan sebelumnya.[6]

Berbeda dengan generator induksi, generator magnet permanen menggunakan magnet permanen sebagai rotornya. Prinsip kerjanya hampir sama, hanya saja generator sinkron tidak perlu menunggu rotor mengalami induksi dari

stator untuk menghasilkan medan magnet, karena rotor dibuat dengan magnet permanent.

SCIG memiliki daya tarik yang tinggi untuk digunakan dalam pembangkit listrik tenaga angin karena biasanya menggunakan drive AC, robust, murah dan harga perawatan yang murah. Namun memiliki kekurangan yaitu efisiensi konversi yang rendah dan menyerap energi reaktif dari sistem. [1]

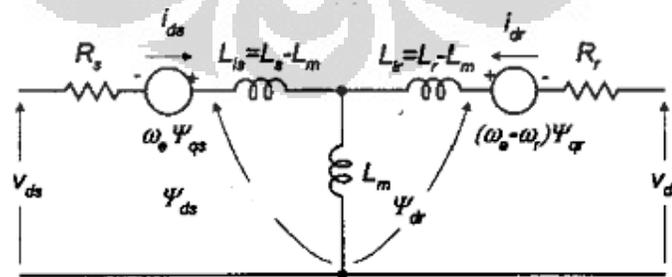
Dalam melakukan perancangan pengendali dan dalam melakukan simulasi suatu sistem, harus mengetahui bentuk model dari sistem tersebut. Dalam hal ini sistem yang digunakan adalah generator induksi. Pada perancangan sistem ini menggunakan software komputer maka dibutuhkan model matematik generator yang dapat digunakan sebagai pengganti generator dan juga sebagai dasar dalam melakukan perancangan observer dan pengendali yang akan dirancang dalam skripsi ini.

Pada pemodelan generator induksi dapat dilakukan dengan beberapa bentuk yaitu model dengan kerangka acuan stator (sumbu $\alpha-\beta$) atau rotor (sumbu dq), model dengan keluaran arus stator dan arus rotor, dan model dengan keluaran arus stator dan fluks rotor.[6]

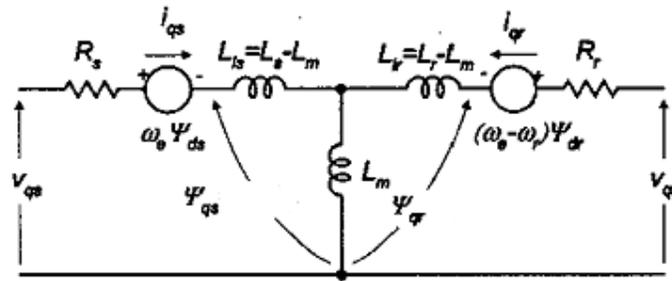
Pada skripsi ini dilakukan dua pemodelan yaitu dalam kerangka acuan rotor (sumbu dq) dan kerangka acuan stator (sumbu $\alpha-\beta$) dimana keluaran yang diinginkan adalah arus stator dan fluks rotor.

2.5.1 Model Generator Induksi Acuan Rotor.

Rangkaian ekuivalent dari generator induksi dibagi dalam 2 sumbu yaitu dalam sumbu d dan dalam sumbu q, dan dua bagian yaitu bagian rotor dan bagian stator . Hal ini ditunjukkan pada gambar dibawah. [7]



Gambar 2.3a Generator pada sumbu d



Gambar 2.3b Generator pada sumbu d

Keterangan:

V_{ds} : tegangan stator pada frame d	Ψ_{ds} : fluks stator pada frame d
V_{dr} : tegangan rotor pada frame d	Ψ_{dr} : fluks rotor pada frame d
V_{qs} : tegangan stator pada frame q	Ψ_{qs} : fluks stator pada frame q
V_{qr} : tegangan rotor pada frame q	Ψ_{qr} : fluks rotor pada frame q
I_{ds} : arus stator pada frame d	i_{dr} : arus rotor pada frame d
I_{qs} : arus stator pada frame q	i_{qr} : arus rotor pada frame q
R_s : hambatan stator	R_r : hambatan rotor
ω_s : kecepatan putar stator	ω_r : kecepatan putar rotor
L_{ls} : $L_{ss} - L_m$	L_{lr} : $L_{rr} - L_m$
L_{ss} : induktansi stator	L_{rr} : induktansi rotor
L_m : induktansi bersama	s : slip
P : pole generator	

Dari perhitungan dari model rangkaian listrik diatas (gambar 2.3a dan 2.3b) dengan menggunakan metode mesh maka didapat persamaan equivalent yaitu:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \quad (2.5.1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_e \psi_{ds} \quad (2.5.2)$$

dan

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \quad (2.5.3)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \quad (2.5.4)$$

Model generator ini adalah model generator squirrel cage dimana jenis rotor sangkar yang terhubung singkat maka tegangan rotor $V_r = 0$ sehingga persamaan (2.5.3) dan persamaan (2.5.4) menjadi:

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \quad (2.5.5)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \quad (2.5.6)$$

Dari rangkaian ekuivalent generator didapat persamaan sebagai berikut:

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.5.7)$$

$$\psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.5.8)$$

$$\psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (2.5.9)$$

$$\psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (2.5.10)$$

Per. 2.5.9 dan 2.5.10 diubah menjadi:

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} (\psi_{dr} - L_m i_{ds}) \quad (2.5.11)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} (\psi_{qr} - L_m i_{qs}) \quad (2.5.12)$$

dan dengan mensubstitusi persamaan (2.5.11) dan (2.5.12) ke persamaan (2.5.5) dan (2.5.6), didapatkan

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} (\psi_{dr} - L_m i_{ds}) + (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \quad (2.5.13)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} (\psi_{qr} - L_m i_{qs}) - (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \quad (2.5.14)$$

mensubstitusikan persamaan (2.5.7) dan (2.5.8) ke persamaan (2.5.1) didapatkan:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} + L_m \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_e L_s i_{qs} - \omega_e L_m i_{qr} \quad (2.5.15)$$

mensubstitusikan persamaan (2.5.11) dan (2.5.12) ke persamaan (2.5.15) diperoleh:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_e L_s i_{qs} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{qr} + \omega_e \frac{L_m^2}{L_r} i_{qs} \quad (2.5.16)$$

Substitusi persamaan (2.5.13) ke persamaan (2.5.15) didapatkan:

$$\frac{d}{dt} i_{ds} = \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{ds} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \psi_{dr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{qr} + \omega_e i_{qs} + \frac{v_{ds}}{\sigma L_s} \quad (2.5.17)$$

Analog dengan penurunan diatas, untuk mencari i_{sq} , maka dengan mensubstitusi persamaan (2.5.7) dan (2.5.8) ke (2.5.2), diperoleh

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + L_m \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_e L_s i_{ds} + \omega_e L_m i_{dr} \quad (2.5.18)$$

Substitusi persamaan (2.5.11) dan (2.4.12) ke persamaan (2.5.5), didapatkan:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \psi_{qr} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_e L_s i_{ds} + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} - \omega_e \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds} \quad (2.5.19)$$

Substitusi persamaan (2.5.14) ke persamaan (2.5.18) didapat:

$$\frac{d}{dt} i_{qs} = \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \psi_{qr} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{dr} - \omega_e i_{ds} + \frac{v_{qs}}{\sigma L_s} \quad (2.5.20)$$

Dari persamaan 2.5.13; 2.5.14; 2.5.17 dan 2.5.18 didapat persamaan keadaan dari generator induksi squirrel cage adalah:

$$\frac{d i_{ds}}{dt} = \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{ds} + \omega_e i_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \psi_{dr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{qr} + \frac{v_{ds}}{\sigma L_s} \quad (2.5.21)$$

$$\frac{d i_{qs}}{dt} = -\omega_e i_{ds} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{qs} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{dr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \psi_{qr} + \frac{v_{qs}}{\sigma L_s} \quad (2.5.22)$$

$$\frac{d \psi_{dr}}{dt} = \frac{1}{\tau} L_m i_{ds} - \frac{1}{\tau} \psi_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \quad (2.5.23)$$

$$\frac{d \psi_{qr}}{dt} = \frac{1}{\tau} L_m i_{qs} - \frac{1}{\tau} \psi_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \quad (2.5.24)$$

2.5.2 Model Dinamik pada Kerangka Referensi Stator

Pada model generator induksi sumbu (sumbu α - β) kumparan rotor maupun stator dapat dianggap sebagai sebuah rangkaian resistif dan induktif, dimana model rangkaian ekuivalennya hampir sama dengan model rangkaian ekuivalent sumbu dq seperti gambar 3.9 dan 3.10. Pada model generator sumbu α - β memiliki nilai ω_e (kecepatan medan magnet putar stator) adalah konstan sehingga nilai ω_e dapat dianggap sama dengan nol. Sehingga persamaan equivalent generator induksi (persamaan (2.5.1; 2.5.2; 2.5.3 dan 2.5.4)) dalam sumbu dq dapat diproyeksikan kedalam sumbu α - β menjadi: [8]

$$v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\psi_{cs}}{dt} \quad (2.5.24)$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} \quad (2.5.25)$$

$$v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\psi_{cr}}{dt} + (\omega_r) \psi_{\beta r} \quad (2.5.26)$$

$$v_{\beta r} = R_r i_{\beta r} + \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} - \omega_r \psi_{cr} \quad (2.5.27)$$

Oleh karena generator induksi yang digunakan adalah jenis *squirrel-cage* yang terminal-terminalnya terhubung singkat, maka tegangan rotor v_r^s bernilai nol, sehingga persamaan (2.5.26) dan persamaan (2.5.27) menjadi:

$$\frac{d\psi_{cr}}{dt} = -R_r i_{cr} - \omega_r \psi_{\beta r} \quad (2.5.28)$$

$$\frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = -R_r i_{\beta r} + \omega_r \psi_{cr} \quad (2.5.29)$$

Dengan mengubah persamaan (2.5.7) dan (2.5.8) sumbu dq menjadi sumbu α - β didapat sebagai berikut

$$\psi_{cs} = L_s i_{cs} + L_m i_{cr} \quad (2.5.30)$$

$$\psi_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + L_m i_{\beta r} \quad (2.5.31)$$

Dengan mengubah persamaan (2.5.9) dan (2.5.10) sumbu dq menjadi sumbu α - β didapat sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \psi_{cr} &= L_m i_{cs} + L_r i_{cr} \\ i_{cr} &= \frac{1}{L_r} (\psi_{cr} - L_m i_{cs}) \end{aligned} \quad (2.5.32)$$

dan

$$\begin{aligned} \psi_{\beta r} &= L_m i_{\beta s} + L_r i_{\beta r} \\ i_{\beta r} &= \frac{1}{L_r} (\psi_{\beta r} - L_m i_{\beta s}) \end{aligned} \quad (2.5.33)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.5.32) ke persamaan (2.5.28) didapatkan:

$$\frac{d\psi_{cr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{cr} + \frac{R_r}{L_r} L_m i_{cs} - \omega_r \psi_{\beta r} \quad (2.5.34)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.5.33) ke (2.5.29) didapatkan:

$$\frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \psi_{\beta r} + \frac{R_r}{L_r} L_m i_{\beta s} + \omega_r \psi_{cr} \quad (2.5.35)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.5.30) ke persamaan (2.5.24), maka:

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{d}{dt} i_{\alpha s} + L_m \frac{d}{dt} i_{\alpha r} \quad (2.5.36)$$

Substitusi persamaan (2.5.32) ke persamaan (2.5.36) diperoleh

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{d}{dt} i_{\alpha s} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \psi_{\alpha r} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{\alpha s} \quad (2.5.37)$$

Substitusi persamaan (2.5.28) ke persamaan (2.5.37) diperoleh

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + (\sigma L_s) \frac{d}{dt} i_{\alpha s} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{\alpha r} - \frac{L_m}{L_r} \omega_r \psi_{\beta r} \quad (2.5.38)$$

dengan

$$\sigma = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s L_r} = \text{leakage factor}$$

Substitusi persamaan (2.5.32) ke persamaan (2.5.38) didapatkan

$$\frac{d}{dt} i_{\alpha s} = \frac{1}{(\sigma L_s)} v_{\alpha s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{\alpha s} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \psi_{\alpha r} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{\beta r} \quad (2.5.39)$$

dengan $\tau = L_r / R_r = \text{rotor time constant}$

Untuk menurunkan persamaan dalam sumbu β , maka, dengan pertama kali mensubstitusi persamaan (2.5.31) ke (2.5.25) diperoleh

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{d}{dt} i_{\beta s} + L_m \frac{d}{dt} i_{\beta r} \quad (2.5.40)$$

Substitusi persamaan (2.5.33) ke persamaan (2.5.40), didapatkan

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{d}{dt} i_{\beta s} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \psi_{\beta r} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{\beta s} \quad (2.5.41)$$

Substitusi persamaan (2.5.29) ke persamaan (2.5.41), didapatkan

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + (\sigma L_s) \frac{d}{dt} i_{\beta s} - \frac{L_m}{\tau} i_{\beta r} + \frac{L_m}{L_r} \omega_r \psi_{\alpha r} \quad (2.5.42)$$

Substitusi persamaan (2.5.33) ke persamaan (2.5.42), didapatkan

$$\frac{d}{dt} i_{\beta s} = \frac{1}{\sigma L_s} v_{\beta s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{\beta s} + \frac{L_m}{\sigma L_s \tau L_r} \psi_{\beta r} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{\alpha r} \quad (2.5.43)$$

Jadi, Model dinamik generator induksi dalam kerangka referensi stator (sumbu α - β) yaitu

$$\frac{d}{dt} i_{\alpha s} = \frac{1}{\sigma L_s} v_{\alpha s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{\alpha s} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \psi_{\alpha r} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{\beta r} \quad (2.5.44)$$

$$\frac{d}{dt} i_{\beta s} = \frac{1}{\sigma L_s} v_{\beta s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) i_{\beta s} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \psi_{\alpha r} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \psi_{\beta r} \quad (2.5.45)$$

$$\frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = \frac{R_r}{L_r} L_m i_{\alpha s} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{\alpha r} - \omega_r \psi_{\beta r} \quad (2.5.46)$$

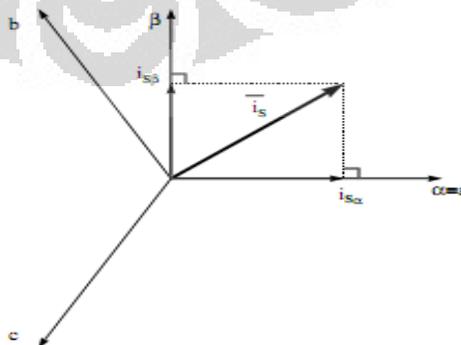
$$\frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = \frac{R_r}{L_r} L_m i_{\beta s} + \omega_r \psi_{\alpha r} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{\beta r} \quad (2.5.47)$$

2.6 Transformasi Tiga Fasa Ke Dua Fasa

Generator induksi merupakan generator tiga fasa sedangkan model generator yang digunakan pada umumnya adalah model generator dua fasa karena lebih mudah dianalisa dan diaplikasikan dalam program C-Mex. Oleh karena itu dibutuhkan suatu metode untuk mengubah model generator tiga fasa menjadi model generator dua fasa. Metode tersebut adalah metode transformasi yang terdiri dari dua metode yaitu: transformasi *Clarke* dan transformasi *Park*.

2.6.1 Transformasi *Clarke*

Transformasi *Clarke* merupakan transformasi sistem tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem dua fasa (α, β) yang stasioner atau ds (direct stationary) dan qs (quadrature stationary) dalam keadaan diam. Misalnya, suatu sinyal sinusoidal tiga fasa (abc) dengan perbedaan fasa sebesar 120, maka sinyal tiga fasa tersebut dapat diubah ke dalam dua fasa yang diam, yaitu sumbu α - β , dimana sumbu α sebagai nilai real-nya, dan sumbu β sebagai nilai imajiner-nya. Sistem transformasi clarke dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Transformasi Clarke

Arus \vec{i}_s pada gambar 2.4 diatas bila dinyatakan sebagai fungsi dari komponen tiga fasa adalah sebagai berikut:

$$\vec{i}_s = i_{sa}e^{j0^\circ} + i_{sb}e^{j120^\circ} + i_{sc}e^{j240^\circ} \quad (2.6.1)$$

dan dengan menggunakan *identitas Euler* $e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t)$, maka komponen i_{sa} dan i_{sb} dari vektor \vec{i}_s (dengan superscript s mengimplikasikan kerangka referensi stasioner/stator) dapat dinyatakan sebagai:

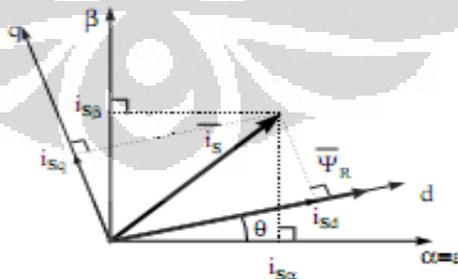
$$\begin{aligned} \vec{i}_s &= i_{sa}[\cos(0^\circ) + j\sin(0^\circ)] + i_{sb}[\cos(120^\circ) + j\sin(120^\circ)] + i_{sc}[\cos(240^\circ) + j\sin(240^\circ)] \\ &= \left(i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sb} - \frac{1}{2}i_{sc} \right) + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2}i_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sc} \right) \\ &= i_{s\alpha} + ji_{s\beta} \end{aligned}$$

sehingga persamaan dalam bentuk matriks untuk mengubah komponen tiga fasa menjadi dua fasa, adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.6.2)$$

2.6.2 Transformasi Park

Transformasi *Park* digunakan untuk mentransformasikan sistem dua fasa yang diam (α dan β) menjadi sistem dua fasa berputar yaitu *direct* (d) dan *quadrature* (q)



Gambar 2.5 Transformasi Park

Dari gambar 2.5 diatas, diketahui bahwa dengan perputaran sumbu dq maka akan didapat sudut putar sebesar θ terhadap keadaan diam. Nilai dari θ akan berubah-ubah terhadap waktu sesuai dengan perputaran dq. Jadi hubungan

antara vektor \vec{i}_s^s pada kerangka referensi stasioner dan vektor \vec{i}_s^e pada kerangka referensi yang bergerak adalah :

$$\vec{i}_s^e = \vec{i}_s^s e^{-j\theta} \quad (2.6.3)$$

persamaan di atas dapat dijabarkan menjadi:

$$\begin{aligned} i_{sd} + j i_{sq} &= (i_{s\alpha} + j i_{s\beta}) [\cos(-\theta) + j \sin(-\theta)] \\ &= [i_{s\alpha} \cos(\theta) + i_{s\beta} \sin(\theta)] + j [-i_{s\alpha} \sin(\theta) + i_{s\beta} \cos(\theta)] \end{aligned}$$

atau bila persamaan di atas dinyatakan dalam matriks, maka:

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2.6.4)$$

dan sebaliknya:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (2.6.5)$$

2.6.3 Transformasi abc ke dq

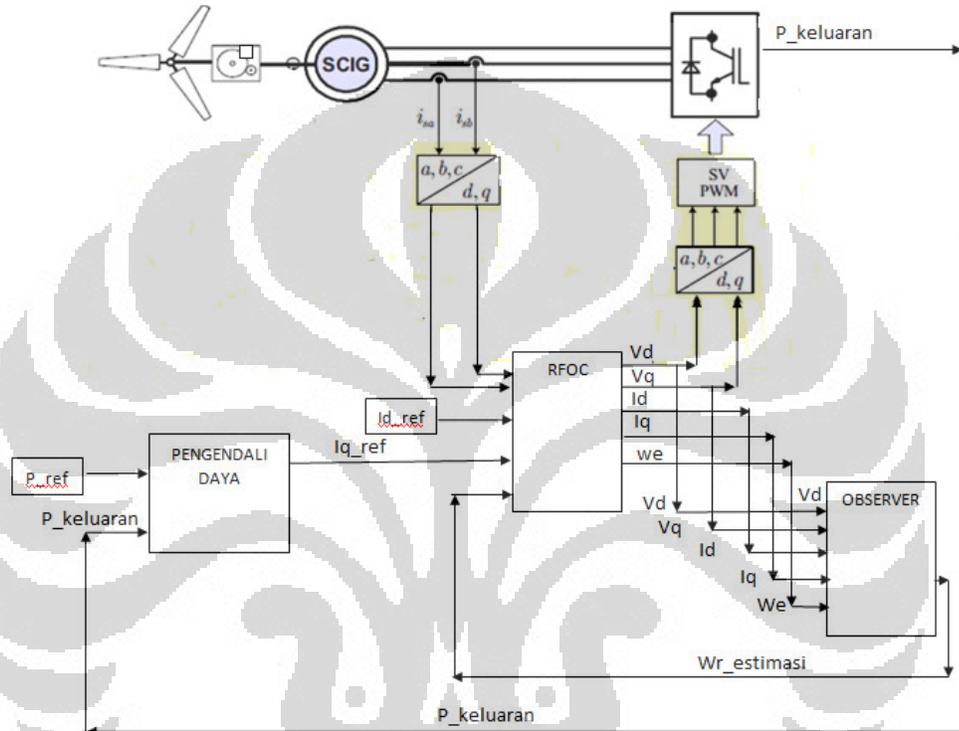
Untuk mengubah sinyal tiga fasa (abc) menjadi dua fasa berputar (dq) digunakan gabungan antara transformasi *Clarke* dan transformasi *Park* sehingga didapat persamaan:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.6.6)$$

BAB 3

PERANCANGAN PENGENDALI SCIG DAN FULL ORDER OBSERVER

Pada perancangan pengendali dan full observer yang akan didesain pada sistem ini dapat digambarkan seperti gambar berikut:



Gambar 3.1. Rancangan struktur pengendali dan observer

3.1 Pengendali Vektor Arus DQ dan Persamaan Decoupling

Dari persamaan ruang keadaan model SCIG dengan keluaran arus stator dan arus rotor dengan menggunakan beberapa asumsi maka dapat dirancang persamaan decoupling dengan tujuan untuk menghilangkan persamaan nonlinier yang terdapat pada model SCIG sehingga arus dapat dikendalikan dengan pengendali PI.

Pengendali arus dq yang digunakan adalah pengendali PI. Pengendali PI ini digunakan untuk membandingkan antara nilai referensi i_{d^*} dan i_{q^*} dengan nilai dari i_d dan i_q yang sebenarnya, dimana nilai i_d dan i_q didapat dari umpan balik dari generator induksi, untuk melihat apakah terdapat error antara referensi dan actual. Apabila terdapat error, maka error tersebut harus diminimumkan

dengan cara mengalikan error tersebut dengan konstanta proportional dan konstanta integrator. Pengendalian PI memiliki keterbatasan yaitu hanya bisa mengendalikan persamaan yang linier. Persamaan model SCIG yang didapat merupakan persamaan yang nonlinier sehingga dibutuhkan persamaan dekoupling untuk menghilangkan sistem nonlinier pada persamaan tegangan V_{sd} dan V_{sq} dari model generator. Dengan demikian maka akan didapat persamaan linier sehingga pengendali PI dapat digunakan untuk mengendalikan arus i_{ds} dan i_{qs} . Untuk itu dilakukan penurunan-penurunan dari model generator untuk mendapatkan persamaan dekoupling dan nilai PI.[1][11]

Pada vektor kontrol yang berorientasi pada fluks rotor, vektor dapat berorientasi dengan baik jika fluks dari rotor berkumpul pada frame sumbu d. Maka fluks rotor pada sumbu q dianggap menjadi nol ($\Psi_{qr} = 0$) [4]. Dengan mensubstitusikan $\Psi_{qr} = 0$ kedalam persamaan(2.5.23) dan persamaan (2.5.24) maka didapat persamaan(3.1.1) dan persamaan(3.1.2)

$$\frac{d}{dt}(\Psi_{dr}) = \frac{R_r}{L_{rr}} \cdot (-L_m i_{ds} - \Psi_{dr}) \quad (3.1.1)$$

$$p.w.r.\Psi_{dr} = -\frac{L_m.R_r}{L_{rr}}.i_{qs} - w_s.\Psi_{dr} \quad (3.1.2)$$

Dengan memasukkan $\Psi_{qr} = 0$ dan persamaan (3.1.1) ke dalam persamaan (2.5.21) maka didapat persamaan pada sumbu d sebagai berikut:

$$V_{ds} = -(R_s)i_{ds} - \sigma.L_s.\frac{d(i_{ds})}{dt} + \sigma.L_s.w_s.i_{qs} + \frac{L_m}{L_{rr}}\left(\frac{d(\Psi_{dr})}{dt}\right) \quad (3.1.3)$$

Pada persamaan sinyal kendali persamaan (3.1.3) terdapat persamaan linier dan persamaan nonlinier dimana persamaan nonlinier adalah:

$$V_{cd} = \sigma.L_s.w_s.i_{qs} + \frac{L_m}{L_{rr}}\left(\frac{d(\Psi_{dr})}{dt}\right) \quad (3.1.4)$$

Dengan memasukkan $\Psi_{qr} = 0$ dan persamaan (3.1.2) ke dalam persamaan (2.5.22) maka didapat persamaan pada sumbu q sebagai berikut:

$$V_{qs} = -R_s.i_{qs} - \sigma.L_s.\frac{d(i_{qs})}{dt} - w_s.\sigma.L_s.i_{ds} + \frac{(1-\sigma).L_s.w_s}{L_m}.\Psi_{dr} \quad (3.1.5)$$

Pada persamaan sinyal kendali terdapat persamaan linier dan persamaan nonlinier dimana persamaan nonlinier adalah:

$$V_{cq} = -ws.\sigma.Ls.ids + \frac{(1-\sigma).Ls.ws}{Lm}.\Psi dr \quad (3.1.6)$$

Pengendali PI digunakan untuk mengendalikan arus yang linier. Maka persamaan sinyal kendali harus dikurangkan dengan persamaan nonlinier sehingga didapat hanya persamaan linier pada sinyal kendali seperti berikut:

$$U_{ds} = V_{sd} - V_{cd} = -R_s.ids - \sigma.Ls.\frac{d(ids)}{dt} \quad (3.1.7)$$

$$U_{qs} = V_{sq} - V_{cq} = -R_s.iqs - \sigma.Ls.\frac{d(iqs)}{dt} \quad (3.1.8)$$

Untuk merepresentasikan sistem yang sebenarnya, maka *delay* (*dead-time*) dibutuhkan untuk mensimulasikan sistem tersebut agar mendekati sistem yang sebenarnya. Dalam domain waktu, *step-response* dari *dead-time* merupakan sinyal step yang mengalami *delay*: [8]

$$h(t) = 1(t - T_d) \quad (3.1.9)$$

dan fungsi alihnya adalah:

$$H(s) = G(s) = e^{-T_d s} \quad (3.1.10)$$

Untuk memproses *delay* yang ada dalam analisa, maka akan lebih mudah jika *delay* tersebut dinyatakan dalam bentuk fungsi rasional. Untuk mengubah *time delay* yang berbentuk eksponensial menjadi bentuk rasional, maka *Padé Approximation* dapat digunakan. *Padé Approximation* merupakan suatu metode yang paling sering digunakan untuk memperkirakan *dead-time* dengan sebuah fungsi rasional. Berikut adalah tabel yang menunjukkan fungsi alih dari *Padé Approximation* $R_{n-1,n}(s)$ dan $R_{n,n}(s)$ (dengan indeks $n-1,n$ atau n,n menunjukkan pangkat tertinggi untuk numerator dan denominator), sampai orde ke-empat: [8]

Tabel 3.2 *Padé Approximation*

n	$R_{n-1,n}(s)$	$R_{n,n}(s)$
1	$\frac{1}{1+sT}$	$\frac{2-sT}{2+sT}$
2	$\frac{6-2sT}{6+4sT+(sT)^2}$	$\frac{12-6sT+(sT)^2}{12+6sT+(sT)^2}$
3	$\frac{60-24sT+3(sT)^2}{60+36sT+9(sT)^2+(sT)^3}$	$\frac{120-60sT+12(sT)^2-(sT)^3}{120+60sT+12(sT)^2+(sT)^3}$
4	$\frac{840-360sT+60(sT)^2-(sT)^3}{840+480sT+120(sT)^2+16(sT)^3+(sT)^4}$	$\frac{1680-840sT+180(sT)^2-20(sT)^3+(sT)^4}{1680+840sT+180(sT)^2+20(sT)^3+(sT)^4}$

Penggunaan $R_{n,n}(s)$ menunjukkan adanya lompatan pada saat $t=0$ yang sangat tidak diinginkan untuk terjadi, sehingga untuk mencegah adanya lompatan pada *step response*, $R_{n-1,n}(s)$ lebih direkomendasikan untuk digunakan. Untuk *time delay* yang kecil, *Padé Approximation* orde (0,1) dapat digunakan, sehingga:

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1}{1+T_d s} \quad (3.1.11)$$

Jika pengendali didesain dengan respon delay orde satu maka sesuai dengan persamaan (3.1.11).

$$ids = \frac{1}{1+sTd} ids^* \quad (3.1.12)$$

$$iqs = \frac{1}{1+sTd} iqs^* \quad (3.1.13)$$

Untuk mendapatkan fungsi transfer dari pengendali arus digunakan respon orde satu persamaan(3.1.11) didapat persamaan berikut:

$$Gd_{pi} = \frac{Uds}{ids^* - ids} = \frac{-(Rs + \sigma.Ls.s)ids}{(1+sTd).ids - ids} = \frac{-Rs}{s.Td} - \frac{\sigma.Ls}{Td} = \frac{Ki}{s} + Kp \quad (3.1.14)$$

Sehingga didapat parameter pengendali Kp dan Ki pada pengendali arus sumbu d seperti berikut:

$$Kdi = \frac{-Rs}{Td} \quad Kdp = -\frac{\sigma.Ls}{Td}$$

$$G_{q_{PI}} = \frac{U_{qs}}{i_{qs}^* - i_{qs}} = \frac{-(R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s) i_{qs}}{(1 + s \cdot T_d) \cdot i_{qs} - i_{qs}} = \frac{-R_s}{s \cdot T_d} - \frac{\sigma \cdot L_s}{T_d} = \frac{K_i}{s} + K_p \quad (3.1.15)$$

Sehingga didapat parameter pengendali K_p dan K_i pada pengendali arus sumbu d seperti berikut:

$$K_{qi} = \frac{-R_s}{T_d} \quad K_{qp} = -\frac{\sigma \cdot L_s}{T_d}$$

Untuk mendapatkan persamaan decoupling pada sumbu d dianggap $\Psi_{qr} = 0$

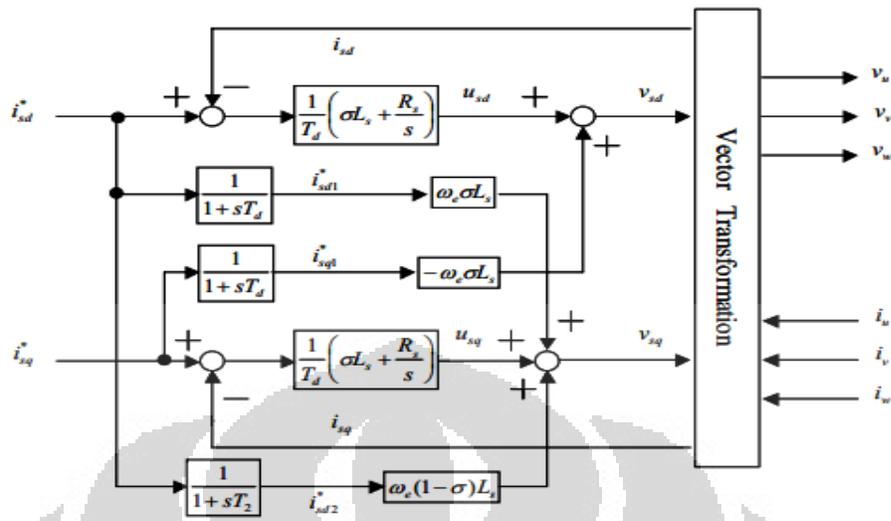
sehingga $\frac{d(\Psi_{dr})}{dt} = 0$ dengan mensubstitusikannya ke persamaan(3.1.4) maka didapat :

$$V_{cd} = \frac{\sigma \cdot L_s \cdot \omega_s}{1 + s \cdot T_d} \cdot i_{qs}^* \quad (3.1.16)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan(3.1.12) dan persamaan(3.1.1) ke dalam persamaan(3.1.6) maka didapat persamaan decoupling pada sumbu q sebagai berikut:

$$V_{cq} = -\frac{\omega_s \cdot \sigma \cdot L_s}{1 + s \cdot T_d} \cdot i_{ds}^* + \frac{(1 - \sigma) \cdot L_s \cdot \omega_s}{1 + s \cdot (L_r / R_r)} \cdot i_{ds}^* \quad (3.1.17)$$

Struktur dar RFOC yang terdiri dari pengendali arus dan observer dapat dilihat pada gambar 4.7 dibawah.

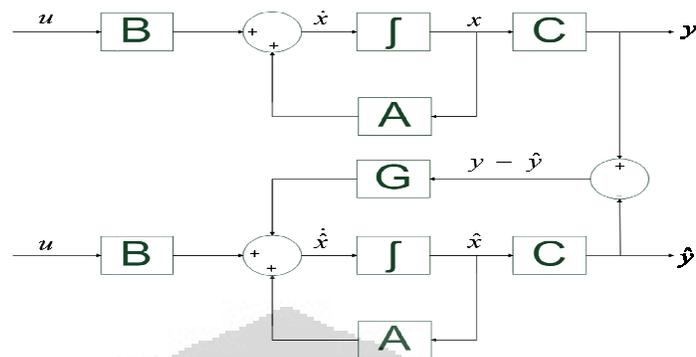


Gambar 3.3 Diagram Vektor Kontrol dan Decoupling

3.2 Rancangan Full Order Observer

3.2.1 Estimasi Arus dan Fluks

Dalam hal ini dilakukan estimasi arus dan fluks pada generator induksi yang diaplikasikan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin. Dengan menggunakan estimasi tersebut maka tidak diperlukan lagi sensor untuk mengetahui arus dan fluks pada generator. Metode estimasi yang digunakan adalah full observer. Observer adalah suatu perangkat sistem dinamik yang mengestimasi keadaan sistem berdasarkan masukan dan keluarannya dan observer dapat digunakan bersama pengendali yang didesain menggunakan state vector. Full order observer adalah observer yang digunakan untuk mengestimasi semua state variable dari plant yaitu generator dimana orde dari plant adalah sama dengan orde dari observer. Dengan masalah keterbatasan harga, ketersediaan dan akurasi dari perangkat keras yang digunakan untuk mengakses variable keadaan maka diperlukan estimasi variable keadaan yaitu observer. Keadaan yang diestimasi tersebut yang kemudian akan diumpankan ke kontroler. Model observer pertama kali diperkenalkan oleh Luenberger dengan diagram blok seperti berikut:[4]



Gambar 3.4 Diagram Blok Observer

Sistem pembangkit listrik tenaga bayu yang didesain diharapkan dapat mengestimasi kecepatan putaran rotor dari generator induksi yang digunakan sehingga tidak diperlukan lagi sensor. Untuk dapat mengestimasi kecepatan putar rotor generator maka diperlukan observer yang dapat mengestimasi fluks, arus dan kecepatan putar rotor yang diakibatkan turbin.

Perancangan observer pada penelitian ini menggunakan sumbu dq. Dimana persamaan observer didapat dari penurunan persamaan ruang keadaan generator induksi sehingga model generator yang digunakan adalah model ruang keadaan pada sumbu dq dan dengan keluaran arus stator dan fluks rotor. Penurunan persamaan observer mengacu pada [4].

Model persamaan ruang keadaan sistem secara umum adalah

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.2.1)$$

$$y = Cx \quad (3.2.2)$$

Dimana u adalah masukan, x adalah state dan y adalah keluarannya.

Jika sistem dengan persamaan ruang keadaan diatas diestimasi maka bentuk persamaan ruang keadaan dapat diubah menjadi dengan mengubah state menjadi state estimasi dan keluaran menjadi keluaran estimasi karena pada observer yang diestimasi adalah nilai keluaran dan statenya, sehingga didapat bentuk ruang keadaan:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu \quad (3.2.3)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (3.2.4)$$

Tanda topi ‘^’ menunjukkan parameter yang diestimasi, sedangkan yang tidak menggunakan tanda tersebut merupakan nilai aktual sistem.

Dengan terjadinya gangguan pada sistem mengakibatkan ketelitian dari sistem menjadi rendah maka diperlukan observer untuk mengoreksi kesalahan yang terjadi akibat dari gangguan tersebut, sehingga model ruang keadaan observer menjadi:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G(y - \hat{y}) \quad (3.2.5)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (3.2.6)$$

Dimana G adalah gain observer yang menjadi factor pengali error atau kesalahan antara y aktual dengan y estimasi. Dengan mensubstitusikan persamaan (3.2.2) dan (3.2.4) ke (3.2.5), maka:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G(Cx - C\hat{x}) \quad (3.2.7)$$

$$\dot{\hat{x}} = (A - GC)\hat{x} + Bu + GCx \quad (3.2.8)$$

Model ruang keadaan generator induksi dalam kerangka referensi dengan keluaran arus stator dan fluks rotor adalah:

$$\frac{d}{dt}x = Ax + Bu$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} & \omega_e & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \\ -\omega_e & \frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \\ \frac{1}{\tau} L_m & 0 & -\frac{1}{\tau} & (\omega_e - \omega_r) \\ 0 & \frac{1}{\tau} L_m & -(\omega_e - \omega_r) & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (3.2.9)$$

$$y = C \cdot x$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.2.10)$$

Persamaan ruang keadaan diatas persamaan (3.2.9) diubah dengan state dan keluaran yang terdiri dari dua variable yaitu arus stator dan fluks rotor. Sehingga didapat persamaan seperti:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{\psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} \vec{v}_s \quad (3.2.11)$$

$$\dot{x} = A x + B u$$

$$\vec{i}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_s \\ \vec{\psi}_r \end{bmatrix} \quad (3.2.12)$$

$$y = C x$$

Penentuan gain observer dilakukan dengan menggunakan model generator induksi dengan kerangka acuan dq dimana yang diperhitungkan dalam penentuan gain ini adalah keluaran arus stator sehingga persamaan (3.2.5) dapat diubah menjadi:

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = A \hat{x} + B u + G (\vec{i}_s - \hat{i}_s) \quad (3.2.13)$$

Matriks G adalah matriks gain observer. Mengacu pada nilai gain observer dapat dinyatakan sebagai:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix}^T \quad (3.2.14)$$

atau

$$G = \begin{bmatrix} g_1 I + g_2 J \\ g_3 I + g_4 J \end{bmatrix} \quad (3.2.15)$$

dengan:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ dan } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Untuk mencari nilai eigenvalue dari model generator induksi adalah dengan menggunakan persamaan $\det(\mu I - A) = 0$ dimana μ merupakan nilai eigenvalue-nya. Nilai eigenvalue model observer didapat dari persamaan $\det(\alpha I - (A - GC)) = 0$ dimana α merupakan nilai eigenvalue-nya. Misalkan nilai eigen observer (α) adalah sebesar perkalian factor k dengan nilai eigen generator (μ) sehingga $\alpha = k\mu$, dimana nilai k lebih besar dari satu. Maka didapat persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \det(\mu I - A) &= \det(\alpha I - (A - GC)) \\ \det(\mu I - A) &= \det(k\mu I - (A - GC)) \end{aligned} \quad (3.2.16)$$

Pada perhitungan nilai eigenvalue dari model generator induksi maka didapat persamaan karakteristik :

$$\begin{aligned} \det(\mu I - A) &= 0 \\ \det\left(\begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}\right) &= 0 \\ \det\left(\begin{bmatrix} \mu - A_{11} & -A_{12} \\ -A_{21} & \mu - A_{22} \end{bmatrix}\right) &= 0 \\ (\mu - A_{11})(\mu - A_{22}) + A_{12}A_{21} &= 0 \\ \mu^2 - A_{11}\mu - A_{22}\mu + A_{11}A_{22} + A_{12}A_{21} &= 0 \end{aligned}$$

Pada perhitungan nilai eigenvalue dari model observer maka didapat persamaan karakteristik:

$$\det(k\mu I - (A - GC)) = 0$$

$$\det\left(\begin{bmatrix} k\mu & 0 \\ 0 & k\mu \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 I + g_2 J \\ g_3 I + g_4 J \end{bmatrix} I\right)\right) = 0$$

$$\det\left(\begin{bmatrix} k\mu & 0 \\ 0 & k\mu \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 I + g_2 J & 0 \\ g_3 I + g_4 J & 0 \end{bmatrix}\right)\right) = 0$$

$$\det\left(\begin{bmatrix} k\mu - A_{11} + g_1 I + g_2 J & -A_{12} \\ -A_{21} + g_3 I + g_4 J & k\mu - A_{22} \end{bmatrix}\right) = 0$$

$$k^2 \mu^2 - A_{22} k \mu - A_{11} k \mu + k g_1 \mu I + k g_2 \mu J + A_{11} A_{22} - A_{22} g_2 J - A_{12} A_{21} + A_{12} g_3 I + A_{12} g_4 J - A_{22} g_1 I = 0$$

Dari semua komponen yang mengandung μ pada model generator dan model obeserver maka didapat:

$$-A_{11} - A_{22} = -A_{22}k - A_{11}k + kg_1 I + kg_2 J$$

$$(k-1)(A_{11} + A_{22}) = k(g_1 I + g_2 J)$$

$$\frac{(k-1)}{k}(A_{11} + A_{22}) = g_1 I + g_2 J$$

$$\frac{(k-1)}{k} \left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{33} & a_{34} \\ a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 \\ g_2 & g_1 \end{bmatrix}$$

sehingga:

$$g_1 = \frac{(k-1)}{k}(a_{11} + a_{33})$$

$$g_1 = \frac{(k-1)}{k} \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} - \frac{1}{\tau} \right)$$

$$= \frac{(k-1)}{k} \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} - \frac{R_r}{L_r} \right)$$

$$= \frac{(k-1)}{k} \frac{1}{\sigma L_s L_r} \left(-R_s L_r - \frac{L_m^2}{L_r} R_r - R_r \sigma L_s \right)$$

$$= \frac{(k-1)}{k} \frac{1}{\sigma L_s L_r} \left(-R_s L_r - \frac{L_m^2}{L_r} R_r - R_r L_s \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) \right)$$

$$= \frac{(k-1)}{k} \frac{1}{\sigma L_s L_r} (-R_s L_r - R_r L_s)$$

$$= \frac{(k-1)}{k} \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \frac{(k-1)}{k} \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \quad (3.2)$$

untuk mencari g_2 :

$$\begin{aligned}
g_2 &= \frac{(k-1)}{k}(a_{21} + a_{43}) \\
&= \frac{(k-1)}{k}(-\hat{\omega}_s - (\hat{\omega}_s - \hat{\omega}_r)) \\
&= \frac{(k-1)}{k}(-2\hat{\omega}_s + \hat{\omega}_r)
\end{aligned} \tag{3.2.18}$$

Dengan mengabaikan nilai kecepatan slip (ω_{sl}) yang kecil, maka nilai $\hat{\omega}_s$ dapat diasumsikan bernilai sama dengan $\hat{\omega}_r$, sehingga persamaan untuk g_2 menjadi

$$g_2 = -\frac{(k-1)}{k}(\hat{\omega}_r) \tag{3.2.19}$$

Dari semua komponen yang tidak mengandung μ

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} - A_{22}g_2J + A_{12}g_3I + A_{12}g_4J - A_{22}g_1I$$

$$A_{22}g_1I + A_{22}g_2J = A_{12}g_3I + A_{12}g_4J$$

$$\begin{bmatrix} a_{33} & a_{34} \\ a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 & 0 \\ 0 & g_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{33} & a_{34} \\ a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -g_2 \\ g_2 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{13} & a_{14} \\ a_{23} & a_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_3 & 0 \\ 0 & g_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{13} & a_{14} \\ a_{23} & a_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -g_4 \\ g_4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{33}g_1 & a_{34}g_1 \\ a_{43}g_1 & a_{44}g_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{34}g_2 & -a_{33}g_2 \\ a_{44}g_2 & -a_{43}g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{13}g_3 & a_{14}g_3 \\ a_{23}g_3 & a_{24}g_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{14}g_4 & -a_{13}g_4 \\ a_{24}g_4 & -a_{23}g_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{33}g_1 + a_{34}g_2 & a_{34}g_1 - a_{33}g_2 \\ a_{43}g_1 + a_{44}g_2 & a_{44}g_1 - a_{43}g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{13}g_3 + a_{14}g_4 & a_{14}g_3 - a_{13}g_4 \\ a_{23}g_3 + a_{24}g_4 & a_{24}g_3 - a_{23}g_4 \end{bmatrix}$$

$$a_{33}g_1 + a_{34}g_2 = a_{13}g_3 + a_{14}g_4$$

$$a_{34}g_1 - a_{33}g_2 = a_{14}g_3 - a_{13}g_4$$

$$a_{43}g_1 + a_{44}g_2 = a_{23}g_3 + a_{24}g_4$$

$$a_{44}g_1 - a_{43}g_2 = a_{24}g_3 - a_{23}g_4$$

$$a_{44} = a_{33} \quad a_{14} = -a_{23}$$

$$a_{34} = -a_{43} \quad a_{24} = a_{13}$$

$$a_{31} = a_{42} \quad -a_{21} = -a_{12}$$

Sehingga:

$$a_{33}g_1 - a_{43}g_2 = a_{13}g_3 - a_{23}g_4 \tag{3.2.20}$$

$$-a_{43}g_1 - a_{44}g_2 = -a_{23}g_3 - a_{13}g_4 \tag{3.2.21}$$

$$a_{43}g_1 + a_{44}g_2 = a_{23}g_3 + a_{13}g_4 \tag{3.2.22}$$

$$a_{33}g_1 - a_{43}g_2 = a_{13}g_3 - a_{23}g_4 \tag{3.2.23}$$

Apabila dilihat dari persamaan diatas (3.2.20) = (3.2.23) dan (3.2.21) = (3.2.22), dan dengan asumsi nilai $\hat{\omega}_s = \hat{\omega}_r$, maka didapat:

$$a_{33}g_1 - a_{43}g_2 = a_{13}g_3 + a_{14}g_4$$

$$-\frac{1}{\tau} \frac{(k-1)}{k} \left(\frac{-R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} g_3 + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \hat{\omega}_r g_4 \quad (3.2.24)$$

$$a_{34}g_1 - a_{33}g_2 = a_{14}g_3 - a_{13}g_4$$

$$\frac{1}{\tau} \frac{(k-1)}{k} (\hat{\omega}_r - 2\hat{\omega}_s) + (\hat{\omega}_s - 2\hat{\omega}_r) \frac{(k-1)}{k} \left(\frac{-R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \hat{\omega}_r g_3 + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} g_4 \quad (3.2.25)$$

dengan mengalikan persamaan (3.1.24) dan (3.1.25) di atas dengan $\sigma L_s L_r \tau$, maka

$$\frac{(k-1)}{k} (R_s L_r + R_r L_s) = L_m g_3 + L_m \tau \hat{\omega}_r g_4 \times \frac{1}{L_m \tau \hat{\omega}_r}$$

$$\frac{(k-1)}{k} (\sigma L_s L_r \hat{\omega}_s) = -L_m \tau \hat{\omega}_r g_3 + L_m g_4 \quad \left| \times \frac{1}{L_m} \right.$$

$$\frac{(k-1)}{k} \left(\frac{R_s R_r}{L_m \hat{\omega}_r} + \frac{R_r^2 L_s}{L_m L_r \hat{\omega}_r} \right) = \frac{g_3}{\tau \hat{\omega}_r} + g_4$$

$$\frac{(k-1)}{k} \left(\frac{\sigma L_s L_r \hat{\omega}_r}{L_m} \right) = -\tau \hat{\omega}_r g_3 + g_4$$

$$\frac{(k-1)}{k} \left(\frac{R_s R_r}{L_m \hat{\omega}_r} + \frac{R_r^2 L_s}{L_m L_r \hat{\omega}_r} - \frac{\sigma L_s L_r \hat{\omega}_r}{L_m} \right) = \frac{g_3}{\tau \hat{\omega}_r} + \tau \hat{\omega}_r g_3$$

$$\frac{(k-1)}{k (\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{R_s R_r}{L_m \hat{\omega}_r} + \frac{R_r^2 L_s}{L_m L_r \hat{\omega}_r} - \frac{\sigma L_s L_r \hat{\omega}_r}{L_m} \right) \tau \hat{\omega}_r = g_3$$

Sehingga:

$$g_3 = \frac{(k-1)}{k (\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{R_s L_r + R_r L_s - \sigma L_s L_r \tau \hat{\omega}_r^2}{L_m} \right) \quad (3.2.26)$$

Dari persamaan (3.1.24) dan (3.1.25) yang dikali dengan $\sigma L_s L_r \tau$:

$$\frac{(k-1)}{k} (R_s L_r + R_r L_s) = L_m g_3 + L_m \tau \hat{\omega}_r g_4 \times \frac{1}{L_m}$$

$$\frac{(k-1)}{k} (\sigma L_s L_r \hat{\omega}_r) = L_m \tau \hat{\omega}_r g_3 + L_m g_4 \quad \left| \times \frac{1}{L_m \tau \hat{\omega}_r} \right.$$

$$\begin{aligned} \frac{(k-1)}{k} \left(\frac{R_s L_r + R_r L_s}{L_m} \right) &= g_3 + \tau \hat{\omega}_r g_4 \\ \frac{(k-1)}{k} \left(\frac{\sigma L_s L_r}{L_m \tau} \right) &= -g_3 + \frac{g_4}{\tau \hat{\omega}_r} \\ \frac{(k-1)}{k} \left(\frac{R_s L_r + R_r L_s + \sigma L_s L_r}{L_m} \right) &= \tau \hat{\omega}_r g_4 + \frac{g_4}{\tau \hat{\omega}_r} \\ \frac{(k-1)}{k(\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{R_s L_r + R_r L_s + \sigma L_s L_r}{L_m} \right) \tau \hat{\omega}_r &= g_4 \end{aligned}$$

Sehingga:

$$g_4 = \frac{(k-1)}{k(\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{(R_s L_r \tau + R_r L_s \tau + \sigma L_s L_r) \hat{\omega}_r}{L_m} \right) \quad (3.2.27)$$

Sehingga, pada akhirnya, matriks G yang didapat yaitu:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 \\ g_2 & g_1 \\ g_3 & -g_4 \\ g_4 & g_3 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{(k-1)}{k} \left(\frac{-R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) & \frac{(k-1)}{k} (\hat{\omega}_r) \\ -\frac{(k-1)}{k} (\hat{\omega}_r) & \frac{(k-1)}{k} \left(\frac{-R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \\ \frac{(k-1)}{k(\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{R_s L_r + R_r L_s - \sigma L_s L_r \tau \hat{\omega}_r^2}{L_m} \right) & -\frac{(k-1)}{k(\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{(R_s L_r \tau + R_r L_s \tau + \sigma L_s L_r) \hat{\omega}_r}{L_m} \right) \\ \frac{(k-1)}{k(\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{(R_s L_r \tau + R_r L_s \tau + \sigma L_s L_r) \hat{\omega}_r}{L_m} \right) & \frac{(k-1)}{k(\tau^2 \hat{\omega}_r^2 + 1)} \left(\frac{R_s L_r + R_r L_s - \sigma L_s L_r \tau \hat{\omega}_r^2}{L_m} \right) \end{bmatrix} \quad (3.2.28)$$

Sehingga persamaan generator induksi *full order observer* adalah:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_{ds}}{dt} = & \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) \hat{i}_{ds} + \omega_e \hat{i}_{qs} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \hat{\psi}_{dr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \hat{\psi}_{qr} \\ & + \frac{V_{ds}}{\sigma L_s} + g_1(i_{ds} - \hat{i}_{ds}) - g_2(i_{qs} - \hat{i}_{qs}) \end{aligned} \quad (3.2.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_{qs}}{dt} = & -\omega_e \hat{i}_{ds} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} \right) \hat{i}_{qs} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \hat{\psi}_{dr} + \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \hat{\psi}_{qr} \\ & + \frac{V_{qs}}{\sigma L_s} + g_2(i_{ds} - \hat{i}_{ds}) + g_1(i_{qs} - \hat{i}_{qs}) \end{aligned} \quad (3.2.30)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{dr}}{dt} = \frac{1}{\tau} L_m \hat{i}_{ds} - \frac{1}{\tau} \hat{\psi}_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \hat{\psi}_{qr} + g_3(i_{ds} - \hat{i}_{ds}) - g_4(i_{qs} - \hat{i}_{qs}) \quad (3.2.31)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_{qr}}{dt} = \frac{1}{\tau} L_m \hat{i}_{qs} - \frac{1}{\tau} \hat{\psi}_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \hat{\psi}_{dr} + g_4(i_{ds} - \hat{i}_{ds}) + g_3(i_{qs} - \hat{i}_{qs}) \quad (3.2.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds} \\ \hat{i}_{qs} \\ \hat{\psi}_{dr} \\ \hat{\psi}_{qr} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} & \omega_e & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_o \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_o & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \\ \frac{1}{\tau} L_m & 0 & -\frac{1}{\tau} & (\omega_e - \omega_o) \\ 0 & \frac{1}{\tau} L_m & -(\omega_e - \omega_o) & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds} \\ \hat{i}_{qs} \\ \hat{\psi}_{dr} \\ \hat{\psi}_{qr} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 \\ g_2 & g_1 \\ g_3 & -g_4 \\ g_4 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} - \hat{i}_{ds} \\ i_{qs} - \hat{i}_{qs} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2.33)$$

Atau

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds} \\ \hat{i}_{qs} \\ \hat{\psi}_{dr} \\ \hat{\psi}_{qr} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} & \omega_s & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_s L_r \tau} & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega_r & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r \tau} \\ \frac{1}{\tau} L_m & 0 & -\frac{1}{\tau} & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \frac{1}{\tau} L_m & -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds} \\ \hat{i}_{qs} \\ \hat{\psi}_{dr} \\ \hat{\psi}_{qr} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 \\ g_2 & g_1 \\ g_3 & -g_4 \\ g_4 & g_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} - \hat{i}_{ds} \\ i_{qs} - \hat{i}_{qs} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2.33)$$

3.2.2 Estimasi Kecepatan

Pengestimasi kecepatan putaran rotor generator pada observer didapat dari perhitungan error arus stator d dan arus stator q. Dari perhitungan nilai state tersebut maka dapat ditentukan posisi rotor dan posisi sinkron. Untuk mengestimasi kecepatan putaran rotor digunakan teorema Lyapunov. [4]

Suatu sistem model dinyatakan dengan persamaan berikut : $\dot{x} = f(x)$

$x = 0$ adalah titik keseimbangan dari persamaan $\dot{x} = f(x)$ di atas dan D adalah suatu daerah yang didalamnya terdapat $x = 0$. Apabila terdapat suatu fungsi $V : D \rightarrow R$ yang kontinu dan dapat dideferensiasikan, dan memenuhi persamaan $V(0) = 0$ dan $V(x) > 0$ dan $\dot{V}(x) \leq 0$ pada daerah D maka $x = 0$ stabil. Dan jika $\dot{V}(x) < 0$ pada daerah D maka $x = 0$ stabil asimptotik. Maka fungsi $V(x)$ di atas disebut fungsi Lyapunov. Untuk memastikan suatu fungsi adalah fungsi Lyapunov bagi sistem tersebut maka dipakai :

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \dot{x}_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} f_i(x) \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial x_1} & \frac{\partial V}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial V}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Persamaan *state space* untuk model generator induksi adalah:

$$\frac{d}{dt} x = Ax + Bu \quad (3.2.34)$$

Sedangkan *state space* untuk model observer adalah

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = \hat{A}\hat{x} + Bu + G(Cx - C\hat{x}) \quad (3.2.35)$$

Estimasi error keadaan dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}e &= Ax + Bu - \hat{A}\hat{x} - Bu - G(Cx - C\hat{x}) \\
\frac{d}{dt}e &= Ax + Bu - \hat{A}\hat{x} - Bu - GCx + GC\hat{x} \\
\frac{d}{dt}e &= (A - GC)x - \hat{A}\hat{x} + GC\hat{x} + A\hat{x} - A\hat{x} \\
\frac{d}{dt}e &= (A - GC)x - (A - GC)\hat{x} - (\hat{A} - A)\hat{x} \\
\frac{d}{dt}e &= (A - GC)e - \Delta A\hat{x}
\end{aligned} \tag{3.2.36}$$

Dengan :

$$e = x - \hat{x}$$

$$\Delta A = \hat{A} - A$$

Nilai dari ΔA yaitu:

$$\begin{aligned}
\Delta A &= \begin{bmatrix} \frac{R_s}{\sigma_s} \frac{L_m^2}{\sigma_s L_r \tau} & \omega_e & \frac{L_m}{\sigma_s L_r \tau} & \frac{L_m}{\sigma_s L_r} \hat{\omega}_r \\ -\omega_e & \frac{R_s}{\sigma_s} \frac{L_m^2}{\sigma_s L_r \tau} & \frac{L_m}{\sigma_s L_r} \hat{\omega}_r & \frac{L_m}{\sigma_s L_r \tau} \\ \frac{1}{\tau} L_m & 0 & \frac{1}{\tau} & (\omega_e - \hat{\omega}_r) \\ 0 & \frac{1}{\tau} L_m & -(\omega_e - \hat{\omega}_r) & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{R_s}{\sigma_s} \frac{L_m^2}{\sigma_s L_r \tau} & \omega_e & \frac{L_m}{\sigma_s L_r \tau} & \frac{L_m}{\sigma_s L_r} \omega_r \\ -\omega_e & \frac{R_s}{\sigma_s} \frac{L_m^2}{\sigma_s L_r \tau} & \frac{L_m}{\sigma_s L_r} \omega_r & \frac{L_m}{\sigma_s L_r \tau} \\ \frac{1}{\tau} L_m & 0 & \frac{1}{\tau} & (\omega_e - \omega_r) \\ 0 & \frac{1}{\tau} L_m & -(\omega_e - \omega_r) & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \\
\Delta A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{L_m}{\sigma_s L_r} (\hat{\omega}_r - \omega_r) \\ 0 & 0 & -(\hat{\omega}_r - \omega_r) \frac{L_m}{\sigma_s L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\hat{\omega}_r - \omega_r) \\ 0 & 0 & (\hat{\omega}_r - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \\
\Delta A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \Delta\omega_r/k \\ 0 & 0 & -\Delta\omega_r/k & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\Delta\omega_r \\ 0 & 0 & \Delta\omega_r & 0 \end{bmatrix} \\
\Delta A &= \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\omega_r J/k \\ 0 & \Delta\omega_r J \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.2.37}$$

$$\text{Dengan } c = \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} \text{ dan } J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Digunakan fungsi Lyapunov *function candidate* sebagai berikut:

$$V = e^T e + (\hat{\omega}_r - \omega_r)^2 / \delta \quad (4.2.38)$$

Dimana δ adalah konstanta positif. Turunan waktu dari V adalah:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V &= \frac{d}{dt} (e^T e) + \frac{d}{dt} [(\hat{\omega}_r - \omega_r)^2 / \delta] \\ \dot{V} &= \frac{d}{dt} (e^T) e + e^T \frac{d}{dt} (e) + \frac{2(\hat{\omega}_r - \omega_r)}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \\ \dot{V} &= \frac{d}{dt} (e^T) e + e^T \frac{d}{dt} (e) + \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \\ \dot{V} &= [(A - GC)e - \Delta A \hat{x}]^T e + e^T [(A - GC)e - \Delta A \hat{x}] + \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \\ \dot{V} &= [(A - GC)e]^T e - (\Delta A \hat{x})^T e + e^T (A - GC)e - e^T \Delta A \hat{x} + \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \\ \dot{V} &= e^T [(A - GC)]^T e - \hat{x}^T \Delta A^T e + e^T (A - GC)e - e^T \Delta A \hat{x} + \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \\ \dot{V} &= e^T [(A - GC)^T + (A - GC)] e - (\hat{x}^T \Delta A^T e + e^T \Delta A \hat{x}) + \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \quad (3.2.39) \end{aligned}$$

Bagian tengah dari persamaan diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$\hat{x}^T \Delta A^T e + e^T \Delta A \hat{x}$ dapat dituliskan kembali menjadi:

$$\begin{aligned} \hat{x}^T \Delta A^T e + e^T \Delta A \hat{x} &\Rightarrow \hat{x}^T \Delta A^T (x - \hat{x}) + (x - \hat{x})^T \Delta A \hat{x} \\ &= \hat{x}^T \Delta A^T x - \hat{x}^T \Delta A^T \hat{x} + x^T \Delta A \hat{x} - \hat{x}^T \Delta A \hat{x} \end{aligned}$$

$$\hat{x}^T \Delta A^T x - \hat{x}^T \Delta A^T \hat{x} + x^T \Delta A \hat{x} - \hat{x}^T \Delta A \hat{x}$$

$$\begin{aligned} &= \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\Delta\omega_r J/k & \Delta\omega_r J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\psi}_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\Delta\omega_r J/k & \Delta\omega_r J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\omega_r J/k \\ 0 & \Delta\omega_r J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\omega_r J/k \\ 0 & \Delta\omega_r J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\psi}_r \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Delta\omega_r \bar{i}_s J/k + \Delta\omega_r \bar{\psi}_r J \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Delta\omega_r \hat{i}_s J/k + \Delta\omega_r \hat{\psi}_r J \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta\omega_r \hat{\psi}_r J/k \\ \Delta\omega_r \hat{\psi}_r J \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\psi}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta\omega_r \bar{\psi}_r J/k \\ \Delta\omega_r \bar{\psi}_r J \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{\Delta\omega_r J \bar{i}_s \hat{\psi}_r}{k} + \Delta\omega_r J \bar{\psi}_r \hat{\psi}_r + \frac{\Delta\omega_r J \hat{i}_s \hat{\psi}_r}{k} - \Delta\omega_r J \hat{\psi}_r^2 \\
&\quad - \frac{\Delta\omega_r J \bar{i}_s \hat{\psi}_r}{k} + \Delta\omega_r \bar{\psi}_r \hat{\psi}_r J + \frac{\Delta\omega_r J \hat{i}_s \hat{\psi}_r}{k} - \Delta\omega_r J \hat{\psi}_r^2 \\
&= 2 \left[-\frac{\Delta\omega_r J \bar{i}_s \hat{\psi}_r}{k} + \Delta\omega_r J \bar{\psi}_r \hat{\psi}_r + \frac{\Delta\omega_r J \hat{i}_s \hat{\psi}_r}{k} - \Delta\omega_r J \hat{\psi}_r^2 \right] \quad (3.2.40)
\end{aligned}$$

Dan dengan mengasumsikan bahwa $\bar{\psi}_r \approx \hat{\psi}_r$, maka:

$$\begin{aligned}
\hat{x}^T \Delta A^T e + e^T \Delta A \hat{x} &= 2 \left(-\frac{\Delta\omega_r J \bar{i}_s \hat{\psi}_r}{k} + \frac{\Delta\omega_r J \hat{i}_s \hat{\psi}_r}{k} \right) \\
&= 2 \left(-\frac{\Delta\omega_r J}{k} \hat{\psi}_r \right) \left(\bar{i}_s - \hat{i}_s \right) \\
&= 2 \left[\begin{array}{cc} 0 & \Delta\omega_r / k \\ -\Delta\omega_r / k & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \hat{\psi}_{rd} \\ \hat{\psi}_{rq} \end{array} \right]^T \left[\begin{array}{c} e_{isd} \\ e_{isq} \end{array} \right] \\
&= 2 \frac{\Delta\omega_r}{k} (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) \quad (3.2.41)
\end{aligned}$$

Maka didapat differensial dari persamaan Lyapunov $V(x)$ adalah:

$$\dot{V} = e^T \left[(A - GC)^T + (A - GC) \right] e - 2 \frac{\Delta\omega_r}{k} (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) + \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \quad (3.2.42)$$

Kesalahan dinamik dari observer akan stabil jika turunan V *definite negative*. Nilai gain matrik G bernilai *semidefinit negatif*, jadi turunan V akan *definite negative* jika baris suku kedua dan ketiga dari persamaan di atas bernilai nol, sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
0 &= -2 \frac{\Delta\omega_r}{k} (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) + \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \\
2 \frac{\Delta\omega_r}{k} (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) &= \frac{2\Delta\omega_r}{\delta} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_r \\
\frac{d}{dt} \hat{\omega}_r &= \frac{\delta}{k} (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) \quad (3.2.43)
\end{aligned}$$

Dengan $K_i = \delta/k$ adalah gain integral. Persamaan estimasi kecepatan:

$$\hat{\omega}_r = K_i \int (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) dt \quad (3.2.44)$$

Dan dengan ditambah kontroler proporsional, maka:

$$\hat{\omega}_r = K_p (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) + K_i \int (\hat{\psi}_{qr} e_{ids} - \hat{\psi}_{dr} e_{iqs}) dt \quad (3.2.45)$$

Dengan:

$\hat{\omega}_r$ = estimasi kecepatan angular rotor

$e_{i_{ds}}$ = error arus stator sumbu d (A)

$e_{i_{qs}}$ = error arus stator sumbu q (A)

K_i = Konstanta gain integral

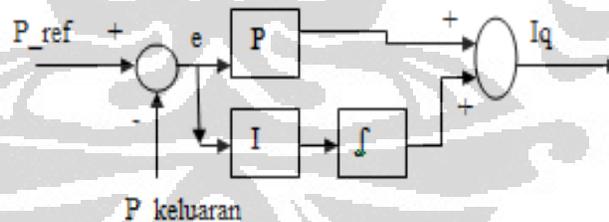
K_p = Konstanta gain proporsional

$\hat{\psi}_{dr}$ = Estimasi fluks rotor sumbu d (Wb)

$\hat{\psi}_{qr}$ = Estimasi fluks rotor sumbu q (Wb)

3.3 Pengendali Daya

Pada pengendali daya yang didesain pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu ini adalah menggunakan pengendali PI, dimana nilai konstanta P dan I ditentukan dengan menggunakan uji coba. Keluaran pengendali PI ini digunakan menjadi masukan pada pengendali RFOC sebagai pengganti arus stator q referensi. Pada pengendali ini maka daya referensi dan daya keluaran akan dibandingkan secara terus menerus sehingga errornya akan dikalikan dengan PI. Dimana hasilnya akan digunakan untuk mengendalikan arus stator q referensi sehingga error yang didapat mendekati nol sehingga daya referensi mendekati daya keluaran sistem. Struktur pengendali PI dapat dilihat pada gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3. Stuktur pengendali daya

BAB 4

SIMULASI HASIL RANCANGAN DAN ANALISANYA

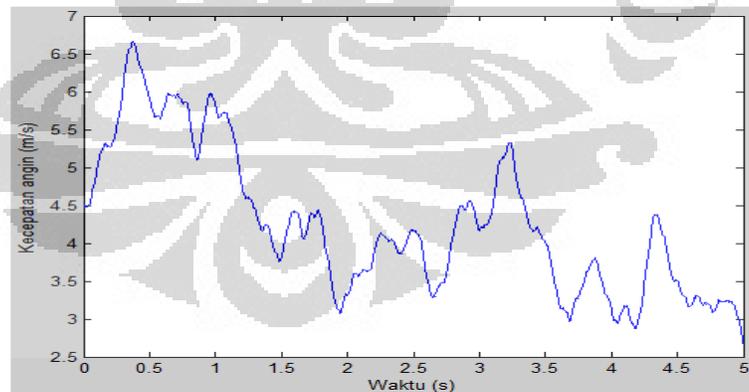
Simulasi dilakukan dengan menggunakan model sistem dari persamaan di bab 2, dan sistem observer dan pengendali yang didapat pada bab 3 dengan menggunakan Simulink Matlab. Model turbin, gearbox, generator induksi tipe squirrel cage, PWM, RFOC, observer dan pengendali daya dibuat dengan menggunakan C-MEX S-Function yang ditulis dalam bahasa C.

4.1 Simulasi Model Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Simulasi model adalah untuk menguji kebenaran simulasi model matematik yang dilakukan di bab sebelumnya. Hal ini sangat penting dilakukan sebelum mendesain pengendali.

4.1.1 Simulasi Model Angin

Dalam simulasi ini diambil rata-rata kecepatan angin sebesar 3-5 m/s sesuai dengan kecepatan angin di Indonesia. Dari simulasi (gambar 4.1) menunjukkan bahwa hasil kecepatan angin yang berubah-ubah sesuai dengan perubahan waktu dimana dari hasil simulasi didapat kecepatan minimum 2 m/s dan maksimum 6.5 m/s.



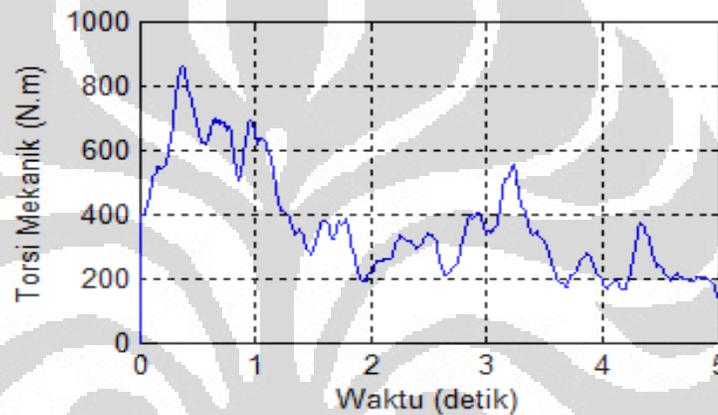
Gambar 4.1 Perubahan kecepatan angin terhadap waktu

4.1.2 Simulasi Turbin Angin

Parameter turbin angin yang digunakan adalah

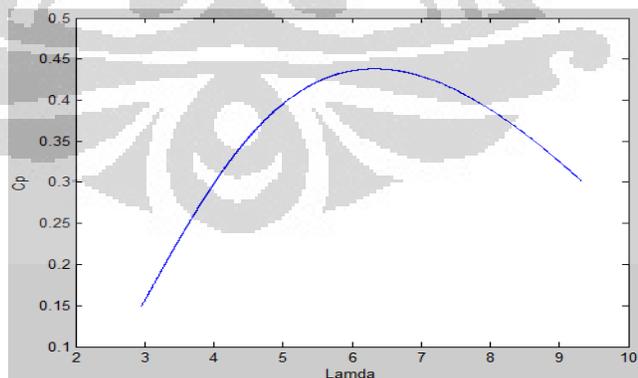
Parameter turbin angin	
Jari-Jari Sudu (m)	5
Masa Jenis Udara (kg m^3)	1.25

Dari gambar 4.2 menunjukkan grafik keluaran torsi mekanik dari turbin angin dimana besar torsi mekanik ini sebanding dengan besar kecepatan angin.



Gambar 4.2 Torsi mekanik turbin

Hubungan C_p dan lamda hasil simulasi ditunjukkan seperti gambar 4.2 dibawah:



Gambar 4.3. Hubungan C_p terhadap lamda keluaran simulasi

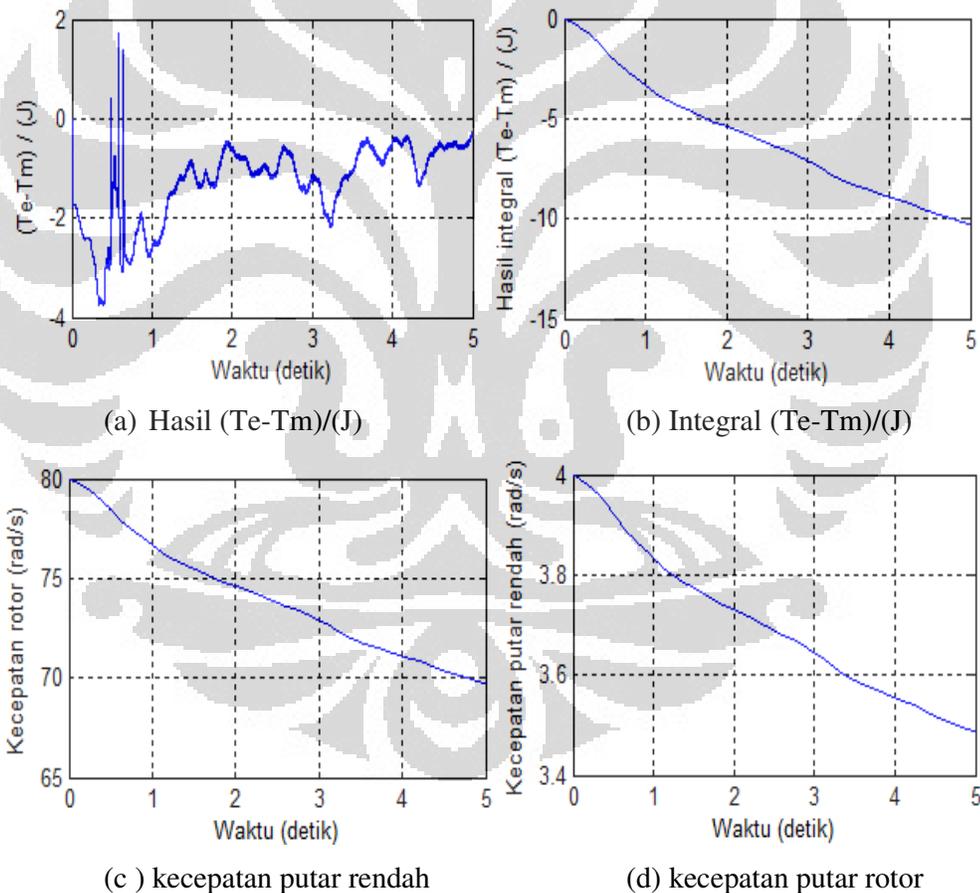
Grafik hubungan lamda diatas (gambar.4.2) menunjukkan hasil yang hampir sama baik besar maupun bentuk dengan hubungan C_p dan lamda yang ditunjukkan pada gambar 2.1, sehingga dapat dikatakan model turbin yang digunakan benar dari simulasi adalah benar.

4.1.3 Simulasi Gear Box

Parameter gearbox yang digunakan adalah

Parameter gear box	
Gearbox ratio	20
high speed shaft inertia (kg.m^2)	100
low speed shaft inertia (kg.m^2)	11

Didapat keluaran simulasi seperti pada gambar 4.4



Gambar 4.4 Keluaran gear box

Gambar 4.4 menunjukkan hasil simulasi keluaran gearbox dengan masukan I_q tetap (-3A). Dari hasil menunjukkan bahwa hasil $(T_e - T_m)/J$ adalah bernilai negatif seperti pada gambar 4.3(a) karena torsi elektrik (T_e) pada generator

bernilai negatif dan torsi mekanik bernilai positif sehingga akan menghasilkan nilai negatif. Integral dari suatu nilai negatif yang relatif konstan adalah suatu grafik menurun dengan nilai negatif seperti pada gambar 4.3 (b). Dengan demikian, maka kecepatan putar rendah pada gambar 4.3(c) dan kecepatan putar rotor pada gambar 4.3(d) menurun seiring dengan bertambahnya waktu.

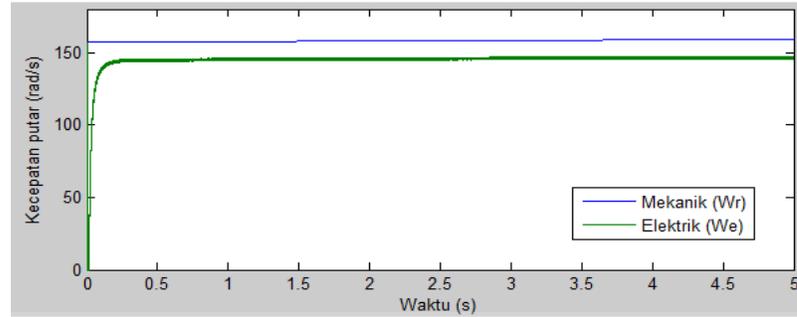
4.1.4 Simulasi Generator Induksi Tipe Squirrel Cage

Parameter generator induksi	
Rs (ohm)	2.76
Rr (ohm)	2.9
Ls (H)	0.2349
Lr (H)	0.2349
Lm (H)	0.2279

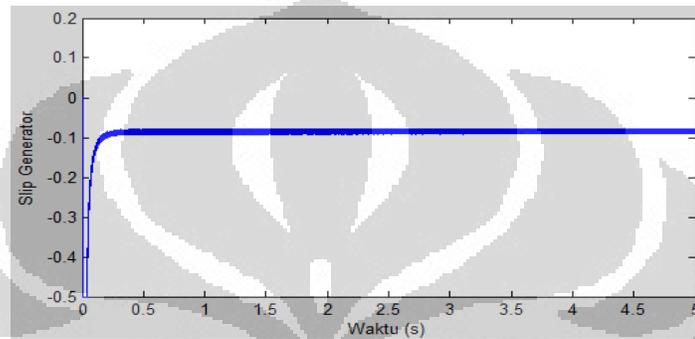
Mesin induksi bekerja saat terjadi perbedaan antara kecepatan putar mekanik dan kecepatan putar elektrik. Apabila kecepatan putar elektrik lebih besar dari kecepatan putar mekanik maka mesin tersebut bekerja sebagai motor. Apabila kecepatan putar mekanik lebih besar dari kecepatan putar elektrik maka mesin tersebut adalah generator. Dari hasil simulasi menunjukkan (gambar 4.5) bahwa kecepatan putar mekanik lebih besar dari kecepatan putar elektrik. Maka mesin bersifat generator induksi.

Pada generator kecepatan putar elektrik lebih besar dari kecepatan putar mekanik maka slip pada mesin adalah negatif sesuai dengan persamaan (4.1.1). Dari hasil simulasi (gambar 4.6) menunjukkan bahwa slip pada mesin adalah negative maka mesin tersebut bersifat generator.

$$s = \frac{(w_e - p.w_r)}{w_e} \quad (4.1.1)$$



Gambar 4.5 Perbandingan kecepatan putar mekanik dan elektrik

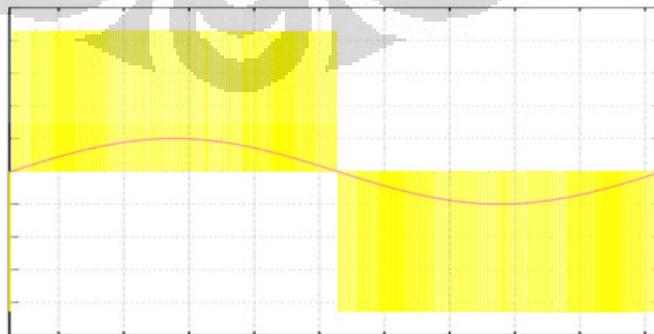


Gambar 4.6 Slip generator

4.1.5 Simulasi PWM

Parameter generator induksi	
Frekuensi Carrier (Hz)	10^4
Tegangan DC (Volt)	311

PWM digunakan pada rectifier untuk mengubah sinyal AC menjadi sinyal DC [9]. PWM memiliki keluaran ON-OFF dimana kondisi sinyal ON-OFFnya dibandingkan dengan sinyal segitiga yang telah dibentuk [10]. Hal ini dapat dilihat dari hasil simulasi pada gambar 4.6.

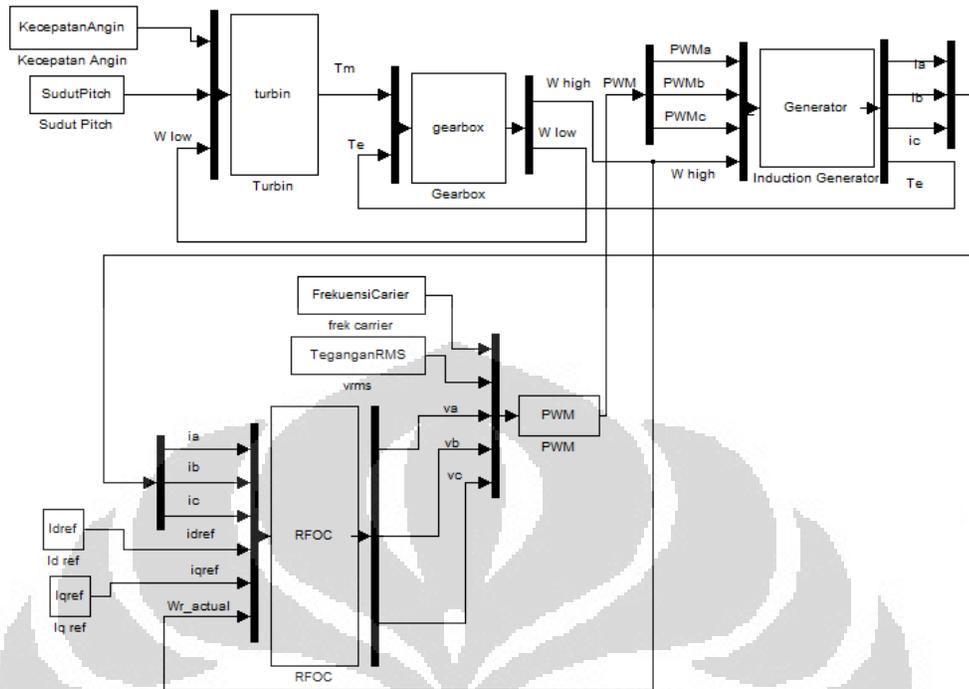


Gambar 4.7 Hasil Keluaran PWM

4.2 Simulasi dan Analisa Pengaruh Perubahan Arus Stator dengan Sensor Kecepatan

Simulasi yang dilakukan terdiri dari simulasi pengendalian generator induksi dengan sensor kecepatan pada kecepatan angin tetap (4 m/s). Dari hasil simulasi yang dilakukan dianalisa pengaruh perubahan arus stator referensi (i_{ds}^* dan i_{qs}^*) terhadap respon pengendalian generator induksi dengan menggunakan sensor kecepatan. Hal ini bertujuan untuk menentukan nilai arus stator reference yang terbaik.

Pada perancangan pengendali vector arus dan decoupling yang dibahas di bab 4.1 dapat digambarkan seperti gambar 3.1. Dimana terdapat i_{ds}^* dan i_{qs}^* sebagai masukan pada pengendali RFOC dan keluaran dari pengendali ini adalah tegangan tiga fasa yang digunakan untuk mengendalikan PWM yang digunakan untuk mengendalikan generator. Dengan menggunakan pengendali ini maka arus i_{ds} dan i_{qs} dapat dikendalikan sesuai dengan referensi yang diberikan i_{ds}^* dan i_{qs}^* . Dalam hal ini kecepatan putar rotor yang menjadi masukan RFOC adalah langsung diambil dari kecepatan putar rotor generator sebagai pengganti sensor kecepatan. Dari percobaan yang dilakukan maka i_{ds} dan i_{qs} akan sangat berpengaruh pada sistem generator yaitu slip, torsi, daya, dan lain-lain. Struktur simulasi dengan menggunakan simulink matlab dapat dilihat pada lampiran 1. Struktur dari sistem ini adalah seperti pada gambar 4.8 dibawah.



Gambar 4.8 Struktur PLTB tanpa observer

Dari percobaan-percobaan yang dilakukan dengan menjalankan simulasi seperti pada maka didapat pengaruh perubahan i_{ds} dan i_{qs} sebagai berikut:

Tabel 4.1 Pengaruh i_{ds} dan i_{qs} terhadap sistem PLTB

Pengaruh i_{ds} dan i_{qs} Pada Sistem Pembangkit Tenaga Bayu					
Ids	Iqs	Daya aktif	Daya reaktif	Slip	Torsi elektrik ROFC
1	-2	90	-60	-0.2	
	-3	105	-66	-0.305	-1.33
	-4	103	-76	-0.45	
	-5	84	-87	-0.63	-2.22
	-6	50	-96	-0.87	-2.65
2	-2	220	-220	-0.085	-1.75
	-3	300	-226	-0.135	-2.65
	-4	355	-234	-0.185	-3.5
	-5	400	-250	-0.24	-4.4
	-6	420	-266	-0.305	-5.3
3	-7	425	-280	-0.38	-6.2
	-2	360	-492	-0.056	-2.7
	-3	490	-494	-0.086	-4
	-4	610	-500	-0.118	-5.4
	-5	710	-510	-0.15	-6.6
	-6	800	-528	-0.185	-8

	-7	860	-548	-0.224	-9.3
--	----	-----	------	--------	------

Dari data hasil simulasi yang didapat menunjukkan bahwa semakin besar arus stator i_{qs}^* , maka daya aktif akan semakin besar dengan i_{ds}^* tetap. Hal ini menunjukkan bahwa arus stator i_{qs}^* sebanding dengan daya aktif. Disamping meningkatnya daya aktif, peningkatan arus stator sumbu q mengakibatkan meningkatnya daya reaktif tapi tidak sebesar peningkatan daya aktif. Dari percobaan yang dilakukan didapat bahwa i_{ds}^* dan i_{qs}^* memiliki nilai tertentu supaya sistem dapat bekerja dengan baik pada daya yang maksimal. Apabila dilihat dari data menunjukkan bahwa saat $i_{ds}^* = 1$ A dan $i_{ds}^* = 2$ A, daya aktif dan daya reaktif sangat kecil dimana daya aktif maksimum 450 untuk $i_{ds}^* = 2$ A dan daya aktif maksimum 105 untuk $i_{ds}^* = 1$ A sehingga hal ini tidak sesuai dengan yang diharapkan. Rating dari generator tiga fasa yang didesain ini memiliki besar i_{ds}^* maksimum adalah 3 A. Saat $i_{ds}^* = 3$ A maka daya keluaran generator maksimal, sehingga dapat disimpulkan bahwa arus stator sumbu d (i_{ds}^*) terbaik adalah 3 A maka dalam sistem arus sumbu d dijaga tetap sebesar 3 A. Arus stator sumbu d (i_{ds}^*) mempengaruhi arus magnetisasi (I_{mr}) sehingga arus magnetisasi pada rotor ini akan menghasilkan fluks, fluks ini akan mempengaruhi tegangan dan daya pada PLTB. Jadi dari tabel 4.1 dapat dikatakan bahwa dalam pengendalian generator induksi pada sistem pembangkit listrik tenaga angin adalah cukup hanya mengendalikan arus stator pada sumbu q (i_{qs}^*). Dengan i_{qs}^* yang terkendali maka akan dapat mengendalikan torsi elektrik, daya, slip, dan kecepatan putar rotor sesuai dengan yang diinginkan.

4.3 Simulasi dan Analisa Pengaruh Kecepatan Angin dan Observer

Pada perancangan full observer didesain untuk dapat mengestimasi semua state yang ada pada model generator induksi. Dalam hal ini, state yang diestimasi adalah arus stator dan fluks rotor pada generator induksi. Pengestimasi kecepatan putaran rotor pada generator adalah bertujuan supaya sensor tidak perlu digunakan untuk membaca besar kecepatan putar rotor generator. Kecepatan putar rotor sangat perlu diketahui untuk masukan pada sistem pengendali RFOC sehingga kecepatan putar generator ini sangat berpengaruh pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu. Masukan pada observer

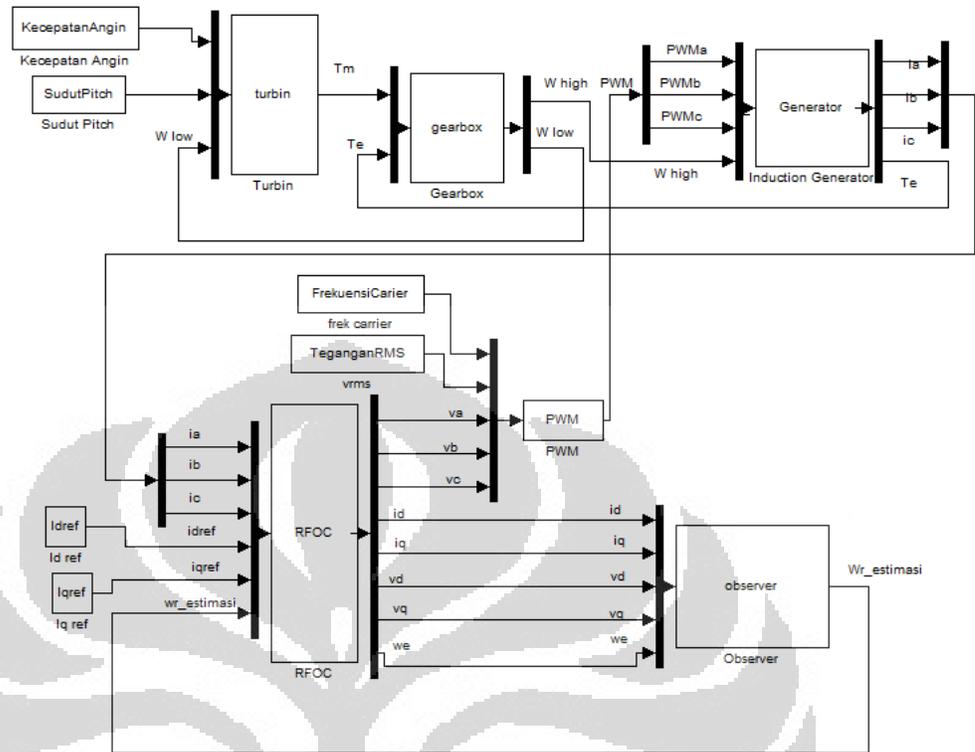
adalah arus stator d (i_{ds}), arus stator q (i_{qs}), tegangan stator d (v_{ds}), tegangan stator q (v_{qs}) dan kecepatan estimasi kecepatan putar elektrik (w_e) dari RFOC. Masukan i_{ds}^* dan i_{qs}^* akan dibandingkan dengan i_{ds} dan i_{qs} hasil estimasi sehingga menghasilkan sinyal kesalahan arus stator. Sinyal i_{ds} , i_{qs} , v_{ds} , v_{qs} dan w_e yang berasal dari *vector control* digunakan untuk mengestimasi arus stator dan fluks rotor sumbu dq. Hasil estimasi arus stator dan fluks rotor sumbu dq dan sinyal kesalahan arus stator digunakan dalam perhitungan estimasi kecepatan putar rotor generator menggunakan persamaan lyapunov.

Parameter observer yang digunakan adalah $K_{observer} = 0.95$, konstanta pengendali proporsional $K_p = 0.01$ dan konstanta pengendali integral $K_i = 120$ dengan waktu cuplikan sebesar 1×10^{-5} detik.

Pada simulasi ini dapat diketahui bagaimana pengaruh observer pada sistem pembangkit listrik tenaga angin baik terhadap waktu mencapai nilai sebenarnya dan kesalahan yang terjadi karena kecepatan putar rotor generator hasil estimasi observer digunakan dalam mengendalikan generator.

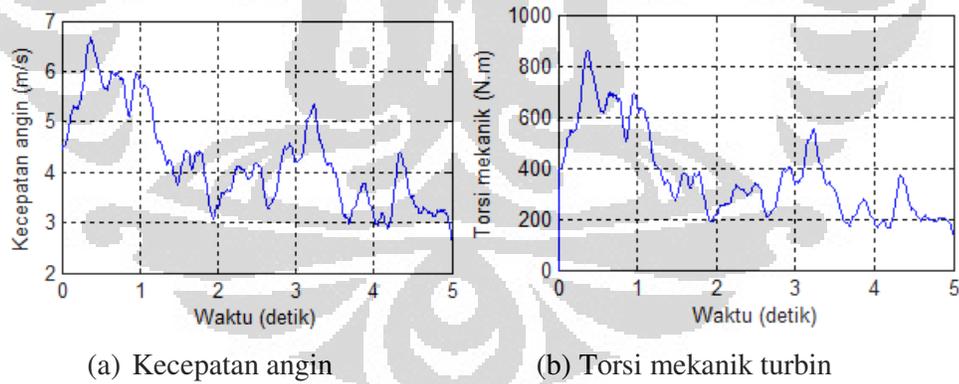
Struktur simulasi dengan menggunakan simulink matlab dapat dilihat pada lampiran 2.

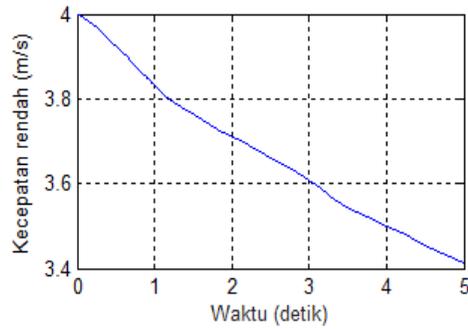
Struktur sistem ini ditunjukkan pada gambar 4.9 dibawah ini:



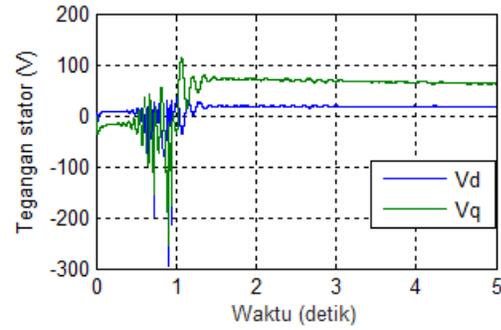
Gambar 4.9 Struktur sistem PLTB dengan observer

Hasil simulasi pengaruh kecepatan angin dan observer ditunjukkan pada gambar 4.10 dibawah ini.

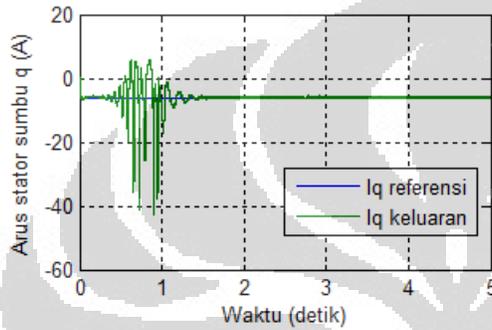




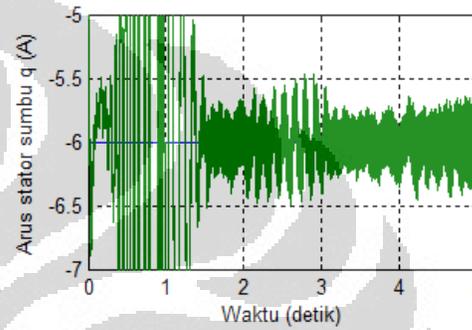
(c) Kecepatan putar rotor rendah



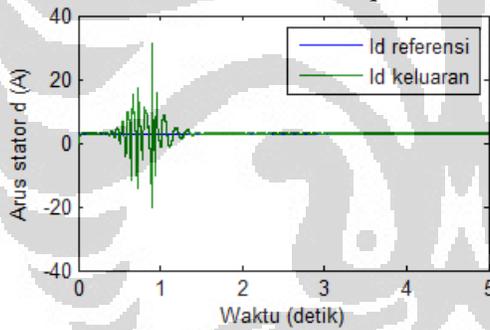
(d) Tegangan stator



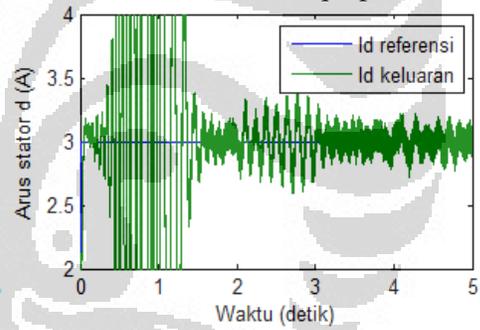
(e) Arus stator sumbu q



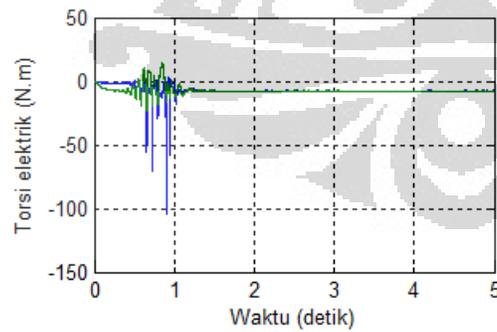
(f) Arus stator sumbu q diperbesar



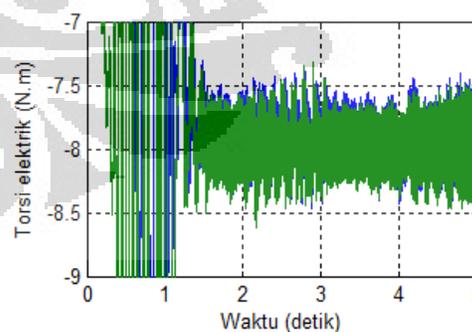
(g) Arus stator sumbu d



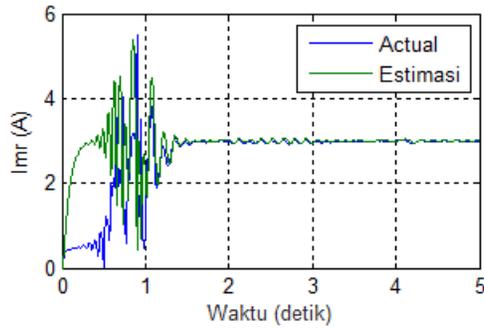
(h) Arus stator sumbu d diperbesar



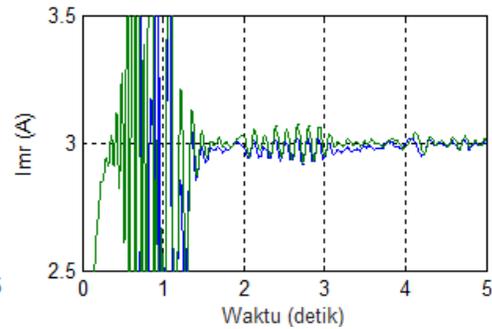
(i) Torsi elektrik



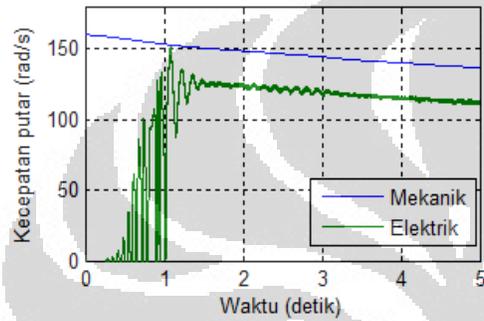
(j) Torsi elektrik diperbesar



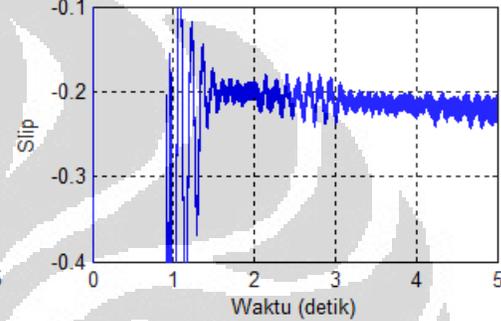
(k) Arus magnetisasi



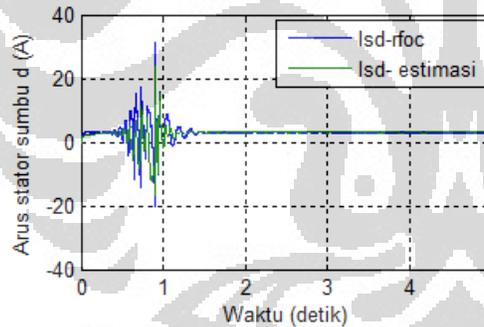
(l) Arus magnetisasi diperbesar



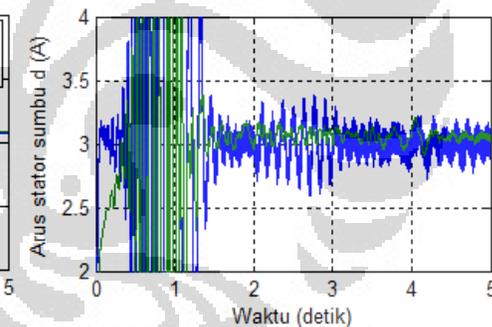
(m) Kecepatan putar rotor dan elektrik



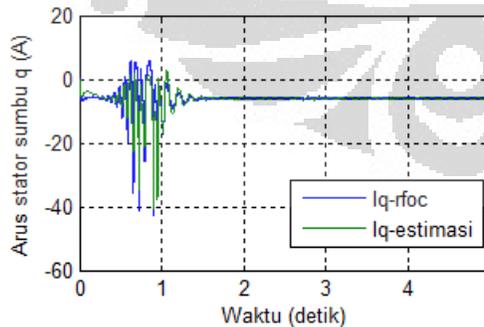
(n) slip



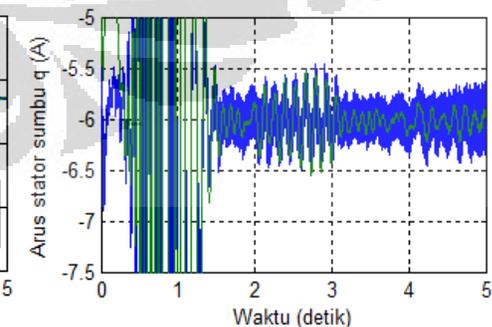
(o) Arus stator sumbu d



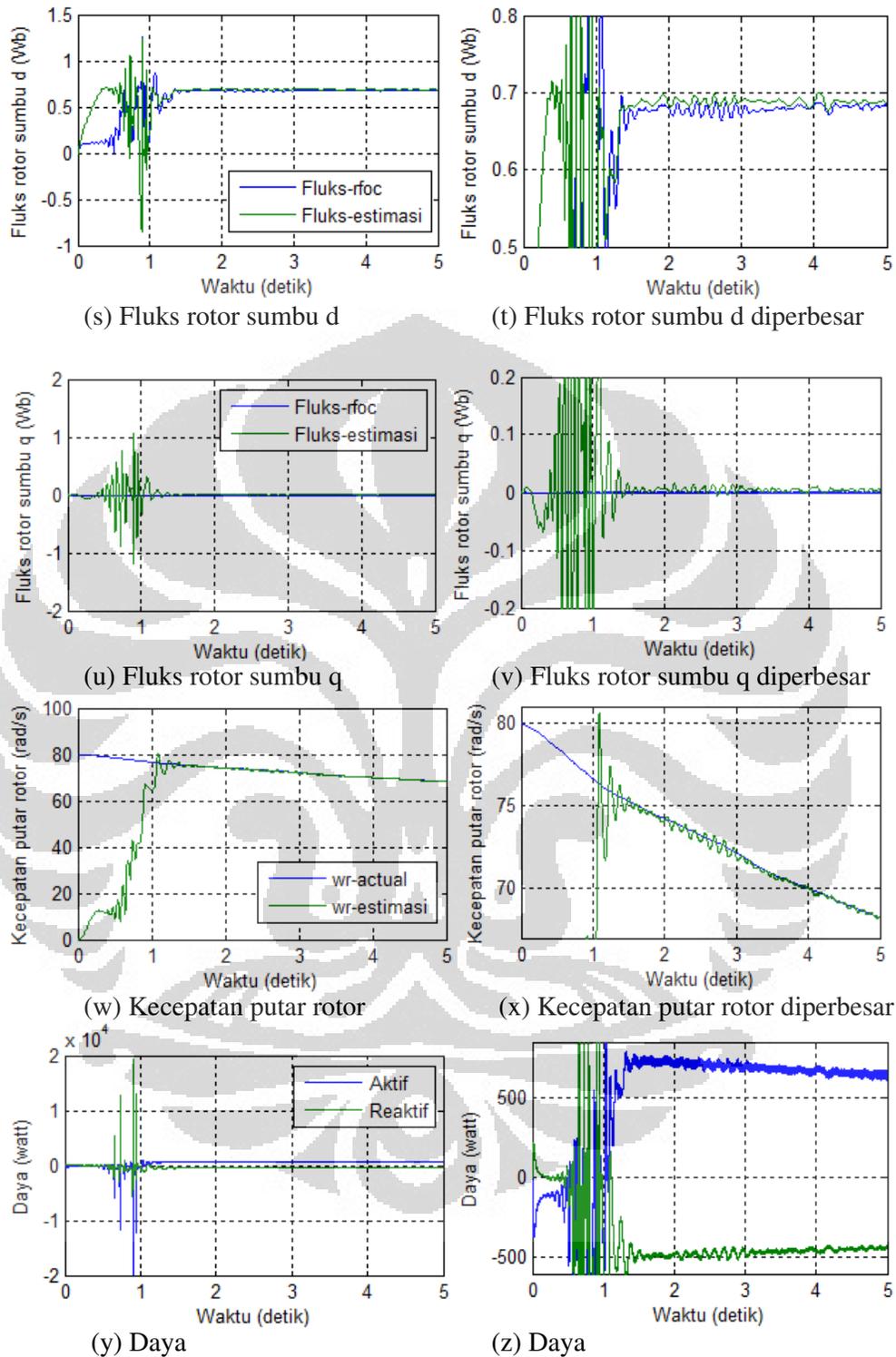
(p) Arus stator sumbu d diperbesar



(q) Arus stator sumbu q



(r) Arus stator sumbu q diperbesar



Gambar 4.10 Hasil simulasi pengaruh kecepatan angin dan observer

Dari hasil simulasi pengaruh kecepatan angin dan observer maka akan terjadi kesalahan antara referensi dengan keluaran pada RFOC dan kesalahan antara nilai sebenarnya keluaran generator dan nilai hasil estimasi observer. Pada RFOC maka kesalahan antara i_{ds}^* dengan i_{ds} adalah 3 % dan kesalahan antar i_{qs}^* dan i_{qs} adalah 3%. Pada observer maka kesalahan antara i_{ds} dan i_{ds} estimasi adalah 5% ; kesalahan antara i_{qs} dengan i_{qs} estimasi adalah 3%; fluks sumbu d dengan fluks sumbu d estimasi adalah 1.4 %; fluks sumbu q dengan fluks sumbu q estimasi adalah 0.006 Wb; dan kecepatan putar rotor generator (w_r) dengan w_r estimasi adalah 0.43%.

Dalam hal ini observer membutuhkan waktu sebesar 1.2 detik untuk mencapai nilai actual sehingga hal ini sangat mempengaruhi sistem lain pada pembangkit listrik tenaga bayu karena kecepatan putar rotor keluaran observer ini digunakan sebagai variable masukan pada pengendali sehingga keluaran sistem generator dan pengendali membutuhkan untuk waktu mencapai stabil sebesar 1.2 detik.

4.4 Simulasi dan Analisa Pengaruh Perubahan Arus Stator Sumbu q

Pada simulasi ini arus stator sumbu q (i_{qs}^*) diubah-ubah dari -5 A, -4 A dan -6 A dimana arus stator sumbu d (i_{ds}^*) dijaga tetap pada 3 A karena merupakan nilai i_{ds}^* terbaik sesuai dengan hasil tabel 4.1. Dari hubungan ini dapat dilihat bahwa keluaran dari sistem pembangkit listrik akan berubah sesuai dengan perubahan dari arus stator sumbu q tersebut. Hal ini dapat diketahui dari hubungan matematis sebagai berikut:

$$i_{sq} = \frac{T_e}{k.i_{sd}} \quad (4.4.1)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{T_e - T_m}{J} \quad (4.4.2)$$

$$P = T_e . w_r \quad (4.4.3)$$

$$w_e = p.w_r + \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{sq}^*}{i_{mr}} \quad (4.4.4)$$

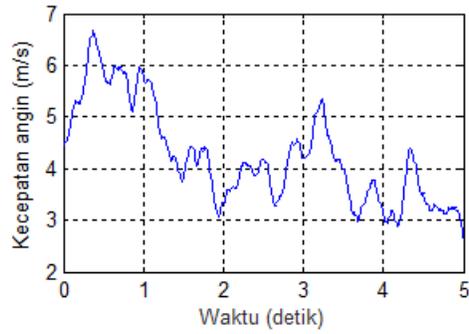
$$s = \frac{w_e - p.w_r}{w_e} \quad (4.4.5)$$

Dari persamaan (4.4.1) ditunjukkan bahwa semakin besar arus stator sumbu q maka torsi elektriknya akan semakin besar karena torsi elektrik sebanding dengan arus stator sumbu q (i_{qs}^*). Hubungan ini ditunjukkan dari hasil simulasi gambar 4.10(i) dan 4.10 (j). Karena arus stator sumbu q pada generator adalah negatif (i_{qs}^* bernilai negative) maka torsi elektrik yang dihasilkan akan bernilai negatif sesuai dengan persamaan (4.4.1). Dengan perubahan torsi elektrik tersebut maka akan mempengaruhi kecepatan putar rotor generator pembangkit sistem pembangkit tenaga bayu sesuai dengan persamaan 4.4.2. Torsi elektrik semakin negatif dan torsi mekanik keluaran turbin selalu positif maka $T_e - T_m$ akan semakin negatif. Sehingga integral dari suatu nilai yang negatif adalah membentuk grafik menurun sehingga kecepatan putar rotor generator selalu menurun seperti ditunjukkan pada gambar 4.10(w) dan 4.10(x). Karena terjadi perubahan pada torsi elektrik dan kecepatan putar rotor maka daya yang dihasilkan akan sebanding dengan perkalian torsi elektrik dan kecepatan putar rotor sesuai persamaan (4.4.3), hal ini ditunjukkan pada hasil simulasi gambar 4.10 (y) dan 4.10(z). Persamaan (4.4.4) menunjukkan pengaruh perubahan arus stator sumbu q terhadap kecepatan putar medan, hal ini menunjukkan bahwa kecepatan putar medan sebanding dengan i_{qs}^* dan besar kecepatan putar medan (w_e) akan selalu lebih kecil dari perkalian pole generator dengan kecepatan putar rotor ($p.w_r$) karena i_{qs}^* adalah bernilai negatif. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi pada gambar 4.10(m). Pada generator (w_e) lebih kecil dari ($p.w_r$) maka slip yang terjadi akan bernilai negatif sesuai dengan persamaan (4.4.5) dan ditunjukkan pada hasil simulasi gambar 4.10 (n). Maka hasil simulasi dapat dikatakan benar sesuai dengan sifat karakteristik generator yaitu memenuhi persamaan-persamaan generator.

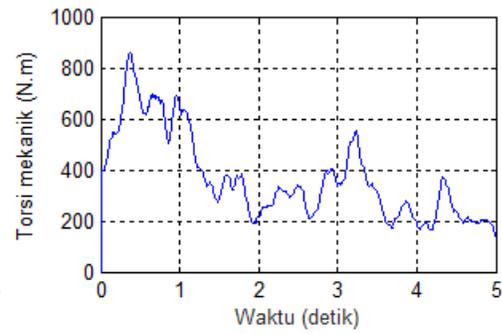
Struktur simulasi dengan menggunakan simulink matlab dapat dilihat pada lampiran 3.

Struktur sistem sistem PLTB ini ditunjukkan pada gambar 4.9.

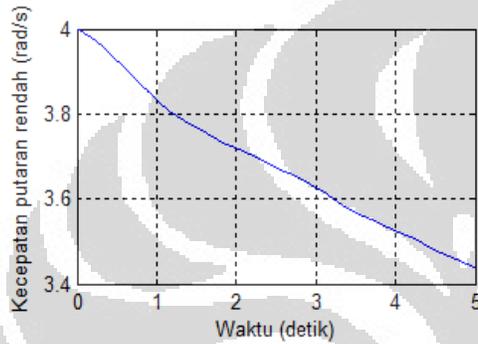
Hasil simulasi pengaruh perubahan arus stator sumbu q (i_{qs}^*) ditunjukkan pada gambar 4.11, dibawah ini.



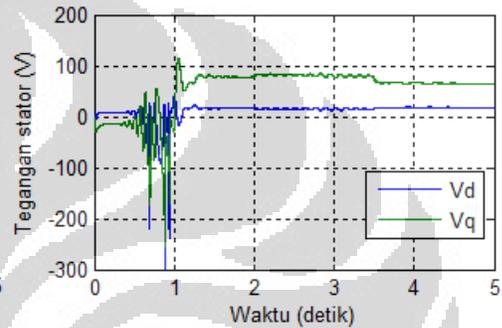
(a) Kecepatan angin



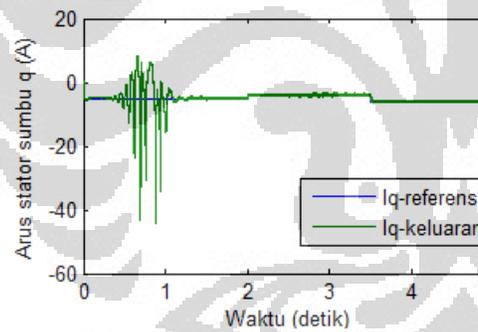
(b) Torsi mekanik turbin



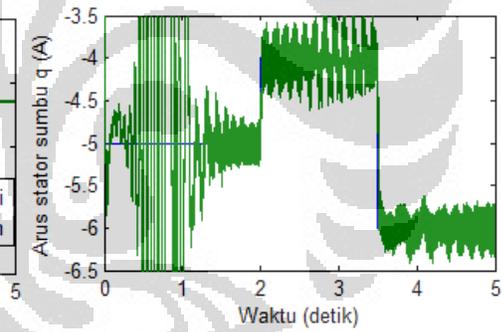
(c) Kecepatan putar rotor rendah



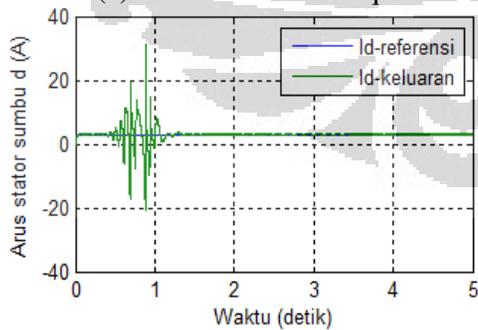
(d) Tegangan stator



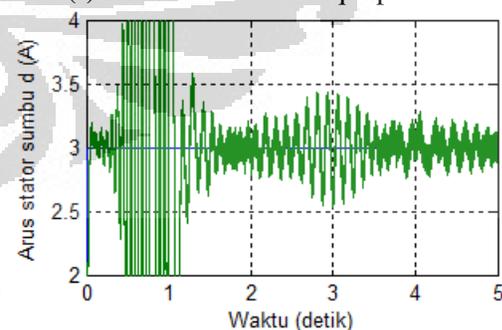
(e) Arus stator sumbu q



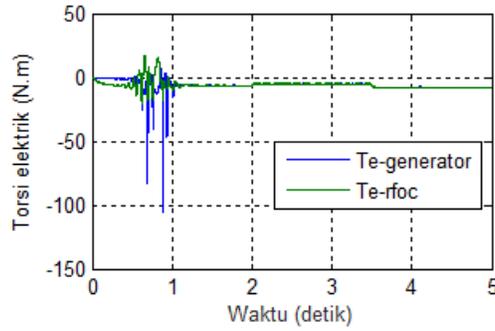
(f) Arus stator sumbu q diperbesar



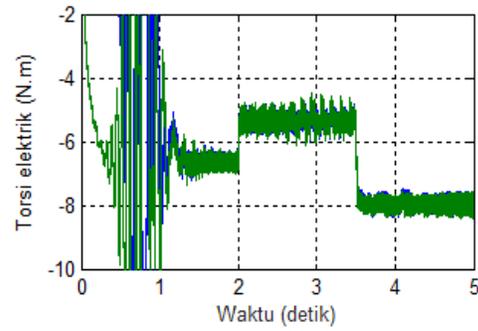
(g) Arus stator sumbu d



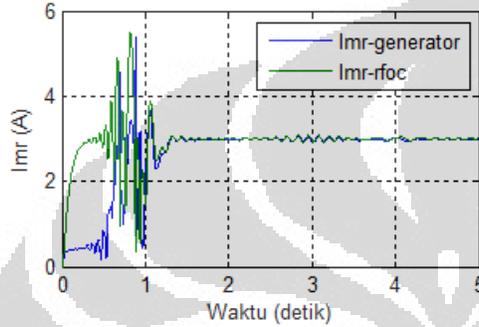
(h) Arus stator sumbu d diperbesar



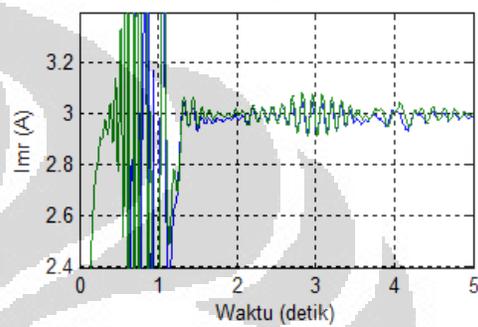
(i) Torsi elektrik



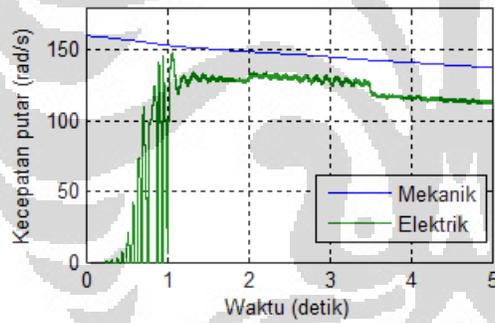
(j) Torsi elektrik diperbesar



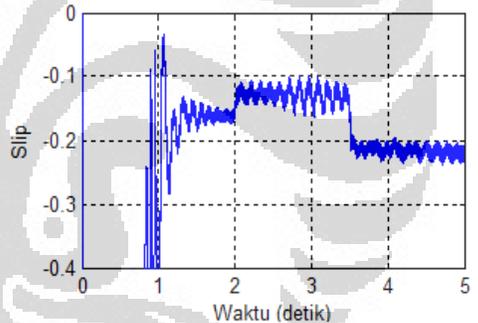
(k) Arus magnetisasi



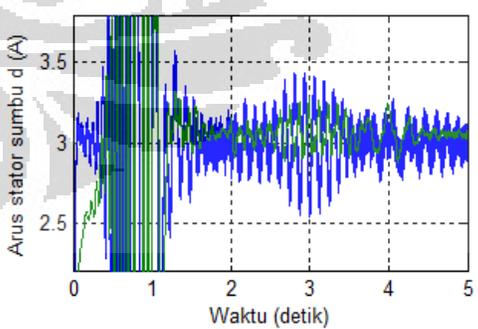
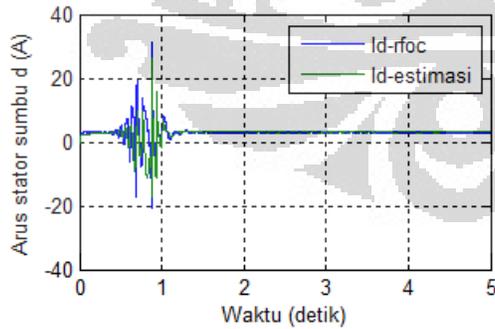
(l) Arus magnetisasi diperbesar

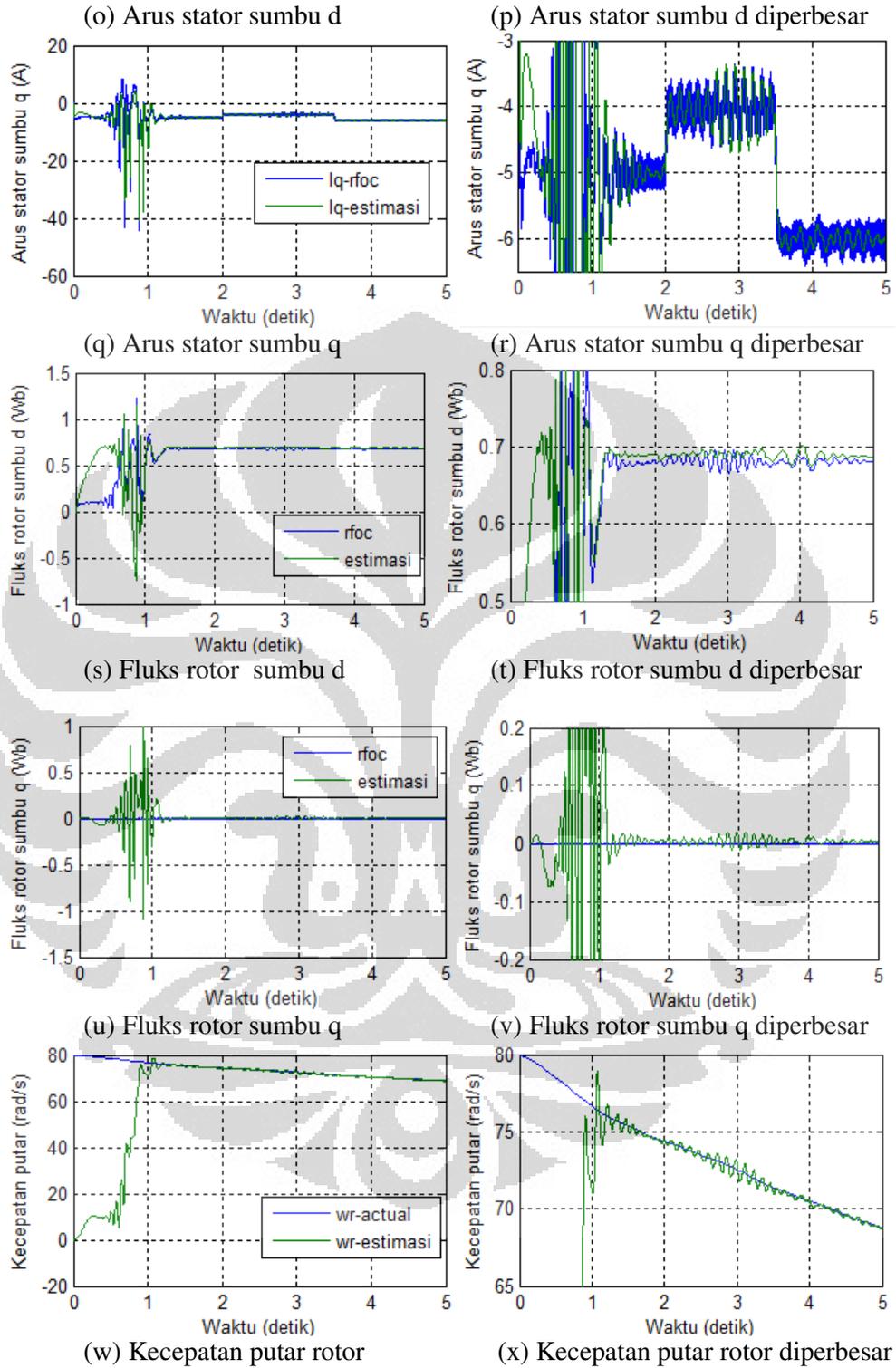


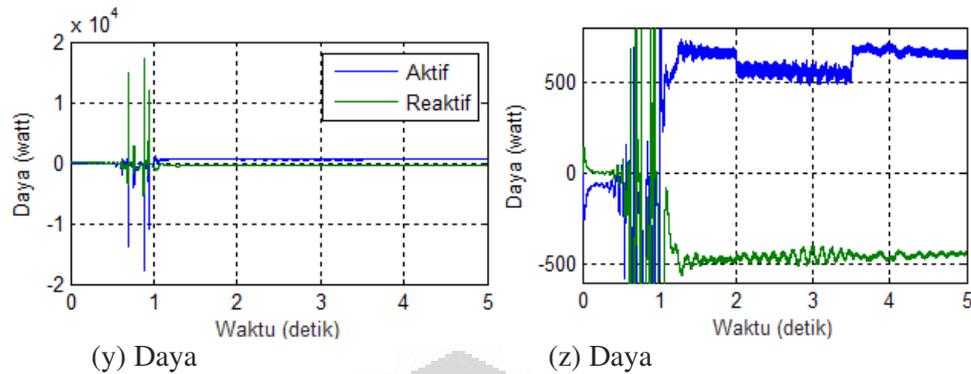
(m) Kecepatan putar rotor dan elektrik



(n) slip







Gambar 4.11 Hasil simulasi pengaruh perubahan arus stator sumbu q

Dari hasil simulasi pengaruh perubahan arus stator sumbu q, pada RFOC terjadi kesalahan antara i_{ds}^* dengan i_{ds} adalah rata-rata 3% dan kesalahan antar i_{qs}^* dan i_{qs} adalah rata-rata 6%. Pada observer terjadi kesalahan antara i_{ds} dan i_{ds} estimasi adalah rata-rata 5%; kesalahan antara i_{qs} dengan i_{qs} estimasi adalah 4%; fluks sumbu d dengan fluks sumbu d estimasi adalah rata-rata 0.29%; fluks sumbu q dengan fluks sumbu q estimasi adalah 0.006 Wb; dan kecepatan putar rotor generator (ω_r) dengan ω_r estimasi adalah 0.43%.

Dalam hal ini observer membutuhkan waktu sebesar 1.1 detik untuk mencapai nilai actual sehingga hal ini sangat mempengaruhi pengendali sehingga keluaran sistem generator dan pengendali membutuhkan waktu untuk mencapai stabil sebesar 1.1 detik.

4.5 Simulasi dan Analisa Pengendalian Daya

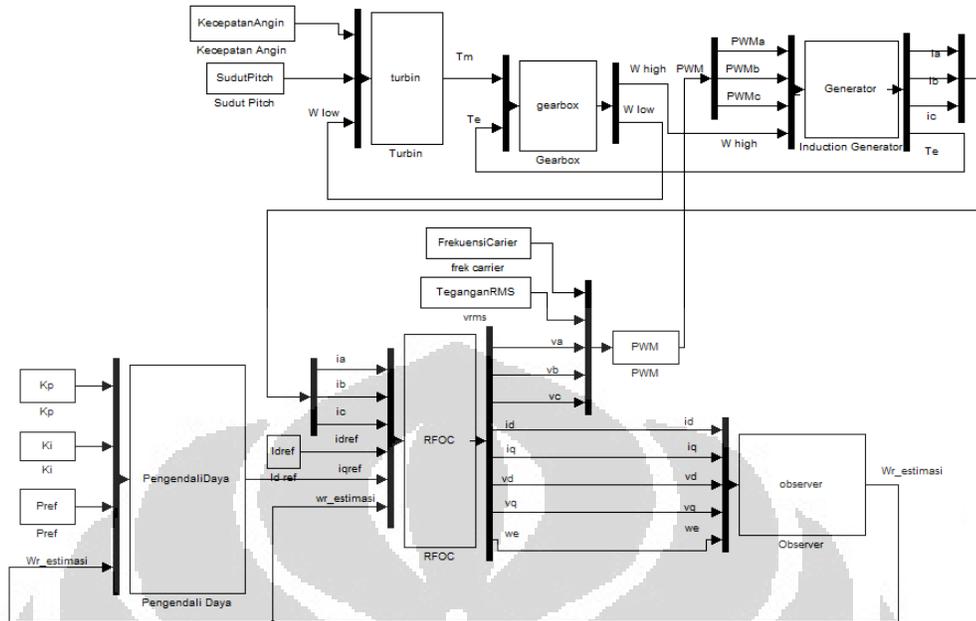
4.5.1 Daya Referensi Tetap

Pada simulasi ini, dilakukan pengendalian terhadap daya aktif sehingga daya aktif keluaran generator stabil pada daya aktif referensi yang diberikan. Hal ini bertujuan untuk menjaga daya keluaran generator tetap pada suatu nilai sehingga dapat ditransmisikan. Keluaran pengendali daya digunakan untuk mengendalikan arus stator sumbu q (i_{qs}^*) sehingga i_{qs}^* digunakan untuk mengendalikan sistem pembangkit agar menjaga daya keluaran stabil pada suatu nilai walaupun kecepatan angin berubah-ubah sedangkan arus stator sumbu d (i_{ds}^*) dijaga konstan pada besar 3 A.

Dari perbedaan daya aktif keluaran generator dengan daya aktif referensi akan menghasilkan kesalahan. Dengan menggunakan pengendali PI maka kesalahan tersebut bisa dimanfaatkan untuk mengendalikan besar i_{qs}^* yang harus dimasukkan ke pengendali RFOC supaya besar kesalahan tersebut semakin kecil hingga nol. Maka nilai i_{qs}^* akan berubah-ubah sesuai dengan besar yang dibutuhkan sistem pembangkit agar daya aktif tetap stabil, hal ini ditunjukkan pada gambar 4.11(e) dan 4.11(f). Dengan berubah-ubahnya arus stator sumbu q maka torsi elektrik keluaran generator akan berubah-ubah sesuai dengan perubahan i_{qs}^* tersebut, sesuai dengan persamaan (4.4.1) dan ditunjukkan pada hasil simulasi gambar 4.11(i) dan 4.11(j). Perubahan torsi elektrik ini akan mempengaruhi kecepatan putar rotor generator sesuai dengan persamaan (4.4.2) sehingga sistem akan menyesuaikan besar torsi elektrik dan besar kecepatan putar rotor generator sehingga akan menghasilkan besar daya yang stabil pada suatu nilai sesuai dengan persamaan (4.4.3). Persamaan (4.4.4) menunjukkan pengaruh perubahan arus stator sumbu q terhadap kecepatan putar medan dan dari persamaan ini ditunjukkan bahwa kecepatan rotor lebih besar dari kecepatan putar medan karena arus stator sumbu q selalu negatif sehingga slipnya adalah negatif, hal ini sesuai dengan hasil simulasi pada gambar 4.11(m) dan 4.11(n). Maka semua variable pada sistem akan saling mempengaruhi dengan perubahan arus stator.

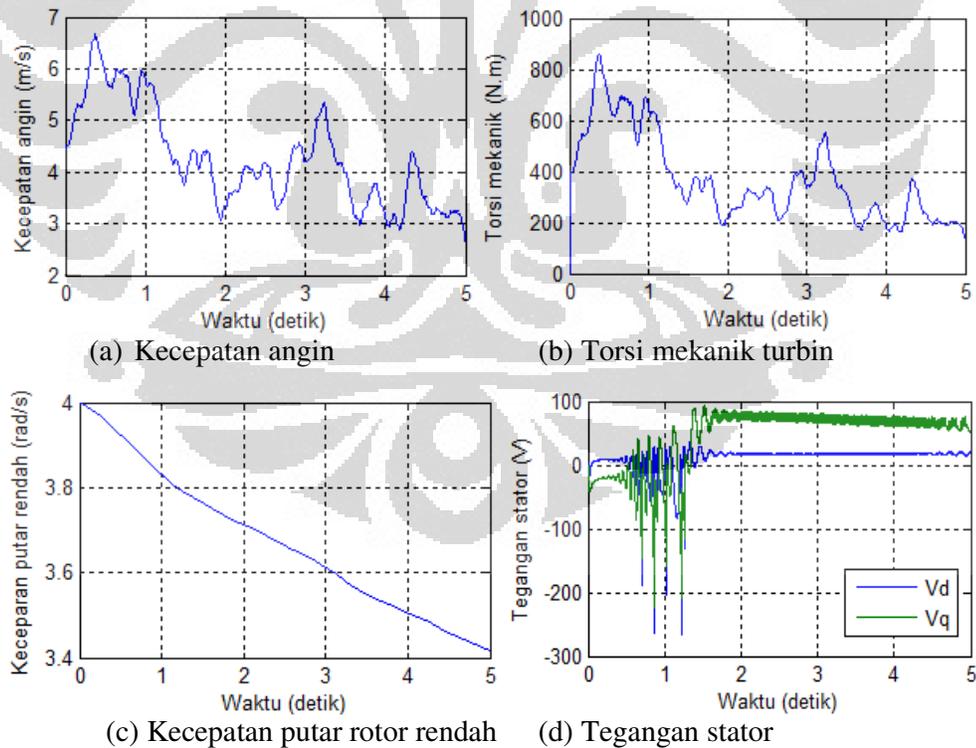
Struktur simulasi dengan menggunakan simulink matlab dapat dilihat pada lampiran 4.

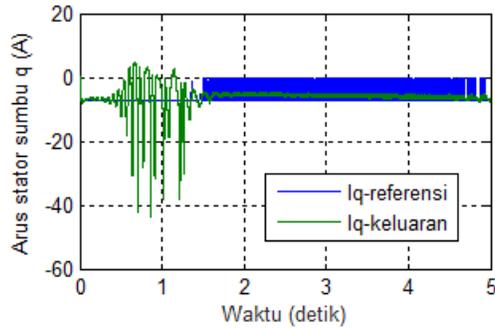
Struktur sistem PLTB dengan pengendali daya ditunjukkan pada gambar 4.13 dibawah:



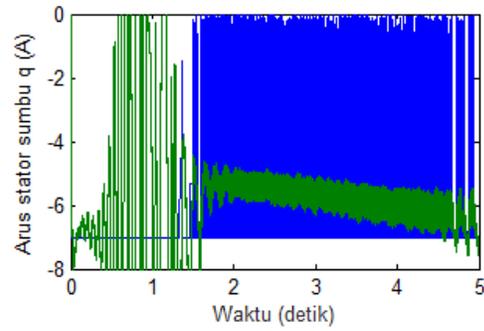
Gambar 4.12 Struktur PLTB dengan pengendali daya

Hasil simulasi pengendalian daya ditunjukkan pada gambar 4.13, dibawah ini.

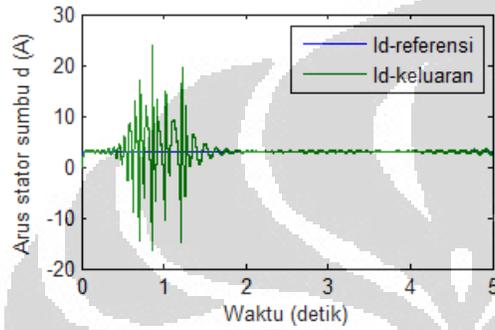




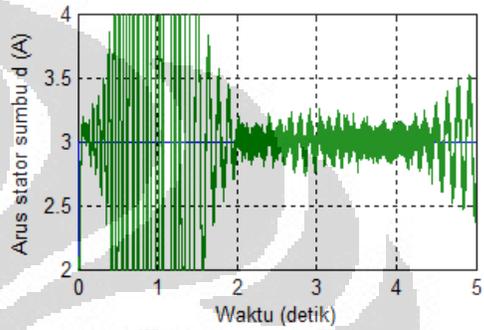
(e) Arus stator sumbu q



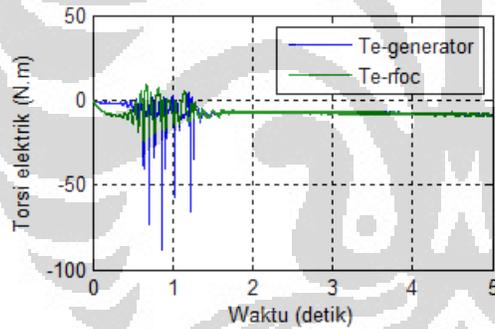
(f) Arus stator sumbu q diperbesar



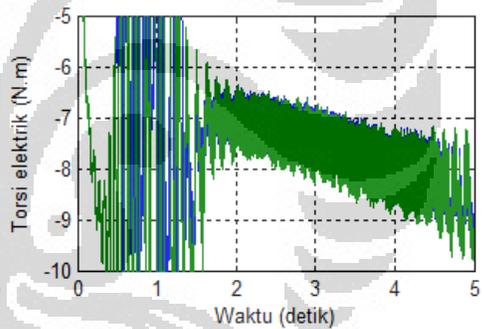
(g) Arus stator sumbu d



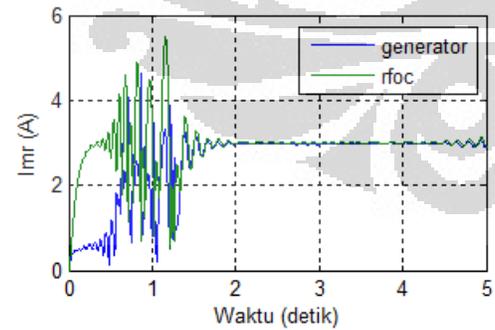
(h) Arus stator sumbu d diperbesar



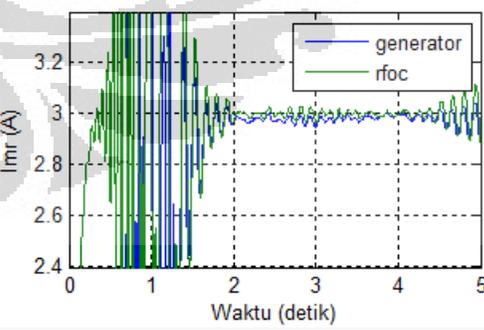
(i) Torsi elektrik



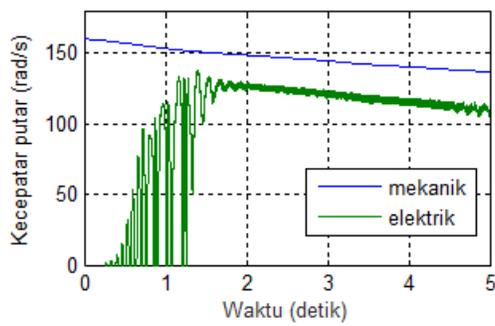
(j) Torsi elektrik diperbesar



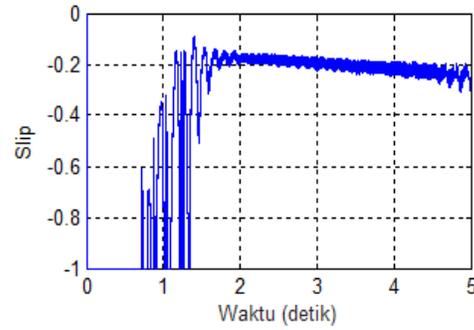
(k) Arus magnetisasi



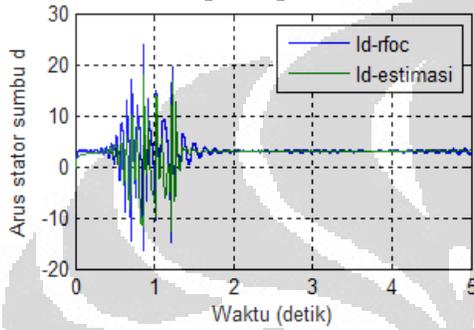
(l) Arus magnetisasi diperbesar



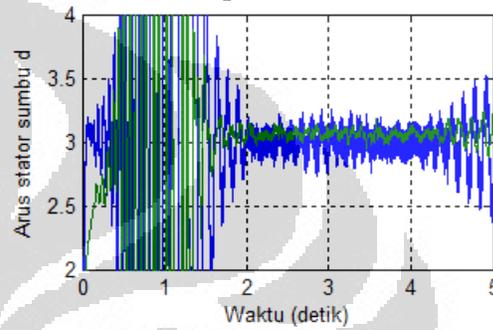
(m) Kecepatan putar rotor dan elektrik



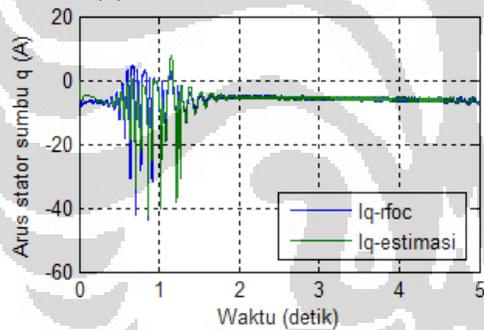
(n) slip



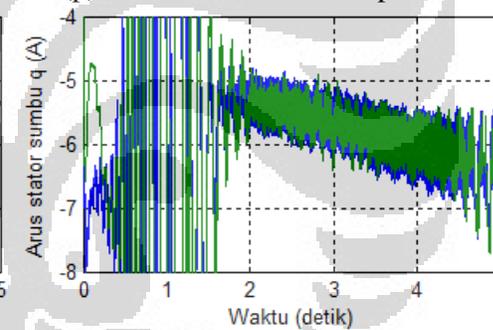
(o) Arus stator sumbu d



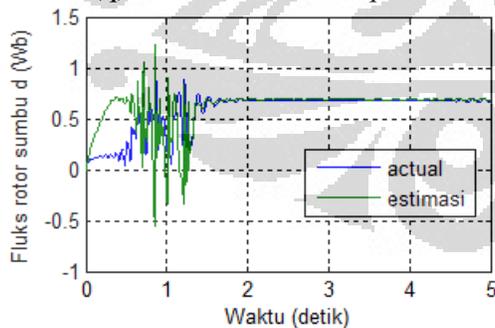
(p) Arus stator sumbu d diperbesar



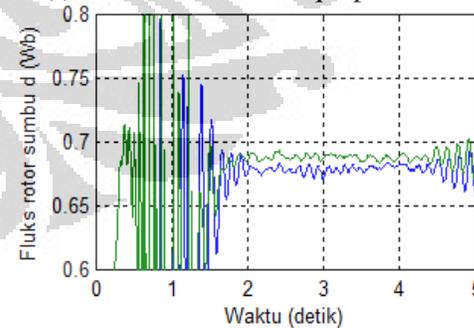
(q) Arus stator sumbu q



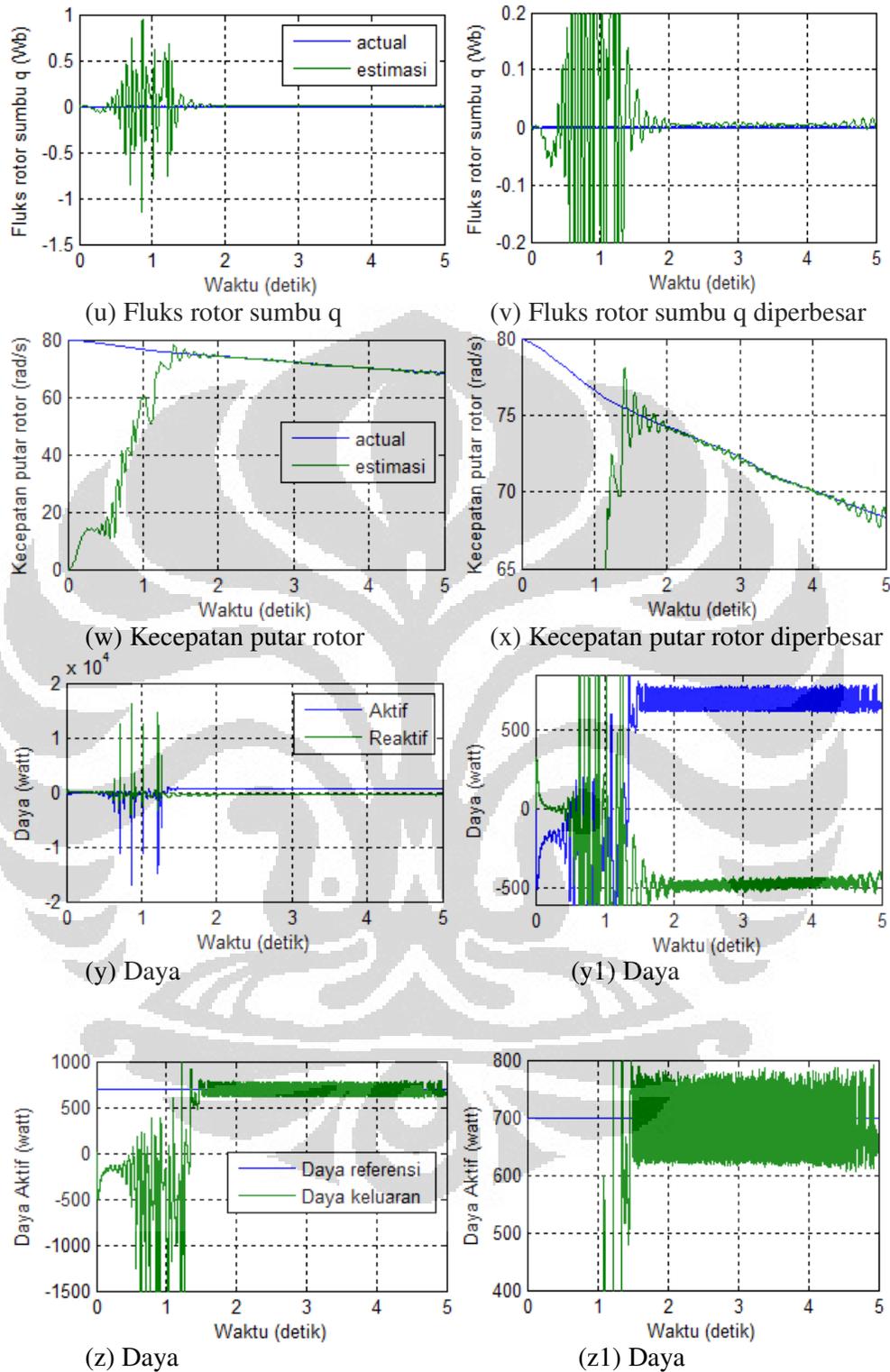
(r) Arus stator sumbu q diperbesar



(s) Fluks rotor sumbu d



(t) Fluks rotor sumbu d diperbesar



Gambar 4.13 Hasil simulasi pengendalian daya

Dari hasil simulasi gambar 4.11(z) dan 4.11(z1) menunjukkan bahwa keluaran generator sudah mengikuti referensi daya yang diberikan yaitu 700 watt sehingga dapat dikatakan hasil simulasi sesuai dengan yang diharapkan.

Dari hasil simulasi pengaruh perubahan arus stator sumbu q, pada RFOC terjadi kesalahan antara i_{ds}^* dengan i_{ds} adalah rata-rata 3% dan kesalahan antar i_{qs}^* dan i_{qs} adalah rata-rata 6%. Pada observer terjadi kesalahan antara i_{ds} dan i_{ds} estimasi adalah rata-rata 5%; kesalahan antara i_{qs} dengan i_{qs} estimasi adalah 4%; fluks sumbu d dengan fluks sumbu d estimasi adalah rata-rata 0.29%; fluks sumbu q dengan fluks sumbu q estimasi adalah 0.006 Wb; dan kecepatan putar rotor generator (w_r) dengan w_r estimasi adalah 0.43%.

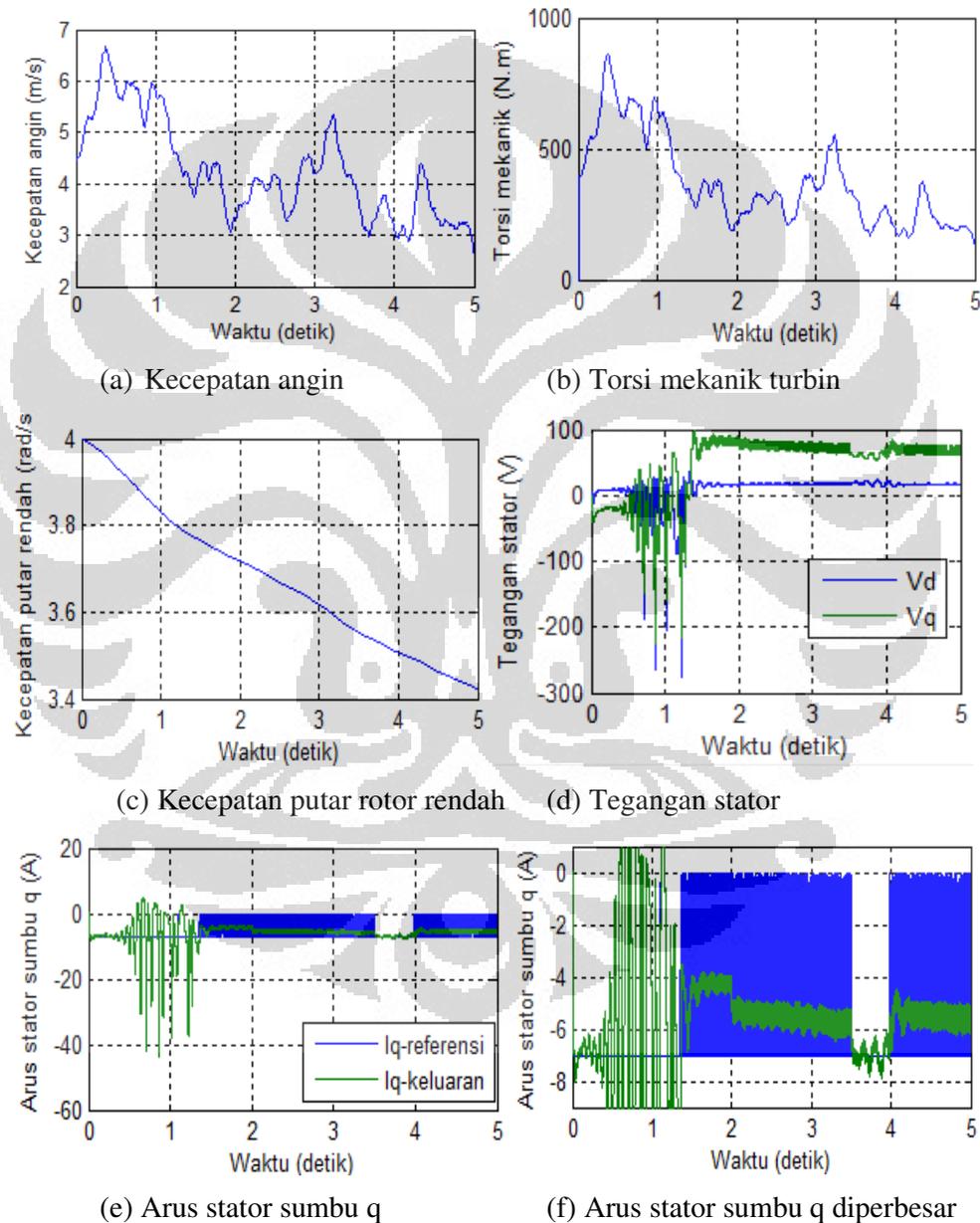
Dalam hal ini observer membutuhkan waktu sebesar 1.4 detik untuk mencapai nilai actual sehingga hal ini sangat mempengaruhi pengendali sehingga keluaran sistem generator dan pengendali membutuhkan waktu untuk mencapai stabil sebesar 1.4 detik.

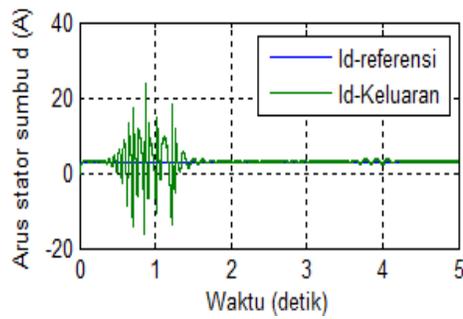
4.5.2 Daya Referensi Berubah-ubah

Percobaan ini dilakukan dengan membuat daya referensi berubah-ubah yaitu 600 watt, 700 watt, dan 650 watt. Perubahan daya referensi ini akan mengubah keluaran pengendali yang menjadi arus stator sumbu q referensi (i_{qs}^*). Perubahan ini sangat mempengaruhi sistem PLTB, dimana i_{qs}^* mengendalikan torsi elektrik keluaran generator seperti ditunjukkan pada gambar 4.12(i) dan 4.12(j), dimana bentuk perubahan i_{qs}^* sesuai dengan bentuk perubahan torsi elektrik sesuai persamaan (4.4.1). Perubahan torsi elektrik ini sangat berpengaruh pada kecepatan putar rotor sesuai dengan persamaan (4.4.2), sehingga pengendali ini bekerja dengan mengendalikan torsi elektrik dan kecepatan putar supaya hasil kalinya (daya) sesuai dengan referensi yang diberikan, persamaan (4.4.3). Perubahan arus stator sumbu q mempengaruhi kecepatan putar rotor sehingga hal ini juga berpengaruh pada kecepatan putar medan sesuai dengan persamaan (4.4.4) seperti pada gambar 4.11(m). Pada generator kecepatan rotor lebih besar dari kecepatan putar medan karena arus stator sumbu q selalu negatif sehingga slipnya adalah negatif, hal ini sesuai dengan hasil simulasi gambar 4.11(n). Perubahan arus stator sumbu q ini juga mempengaruhi kemampuan kerja observer baik error estimasi maupun waktu estimasi untuk mencapai target.

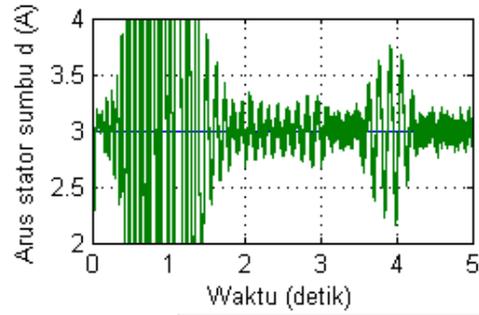
Struktur simulasi dengan menggunakan simulink matlab dapat dilihat pada lampiran 4.

Hasil simulasi pengendalian daya dengan daya referensi berubah-ubah ditunjukkan pada gambar 4.14 seperti dibawah ini.

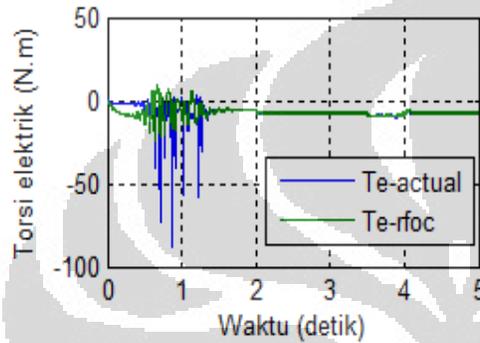




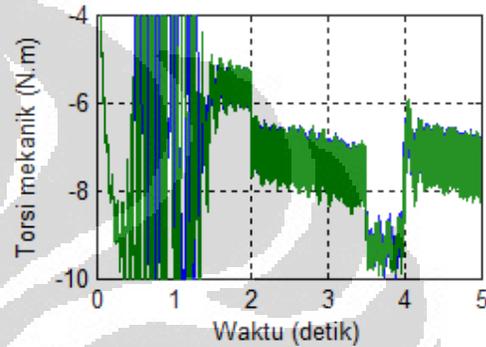
(g) Arus stator sumbu d



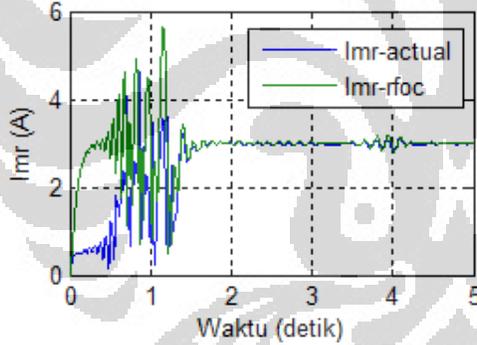
(h) Arus stator sumbu d diperbesar



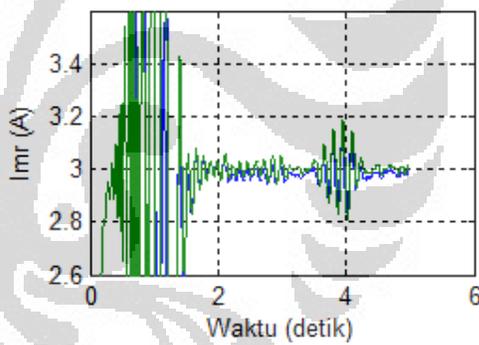
(i) Torsi elektrik



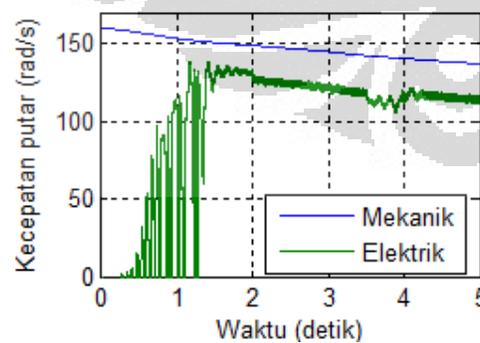
(j) Torsi elektrik diperbesar



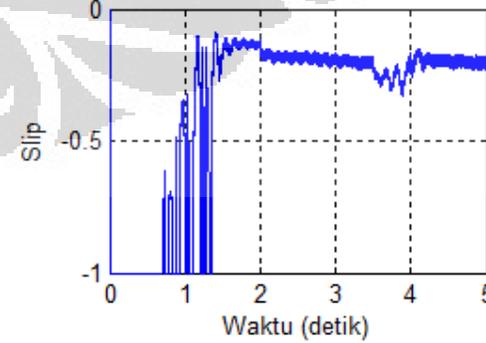
(k) Arus magnetisasi



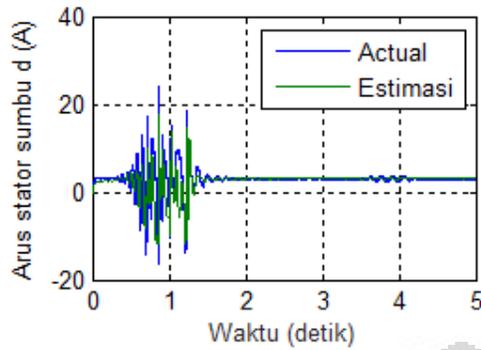
(l) Arus magnetisasi diperbesar



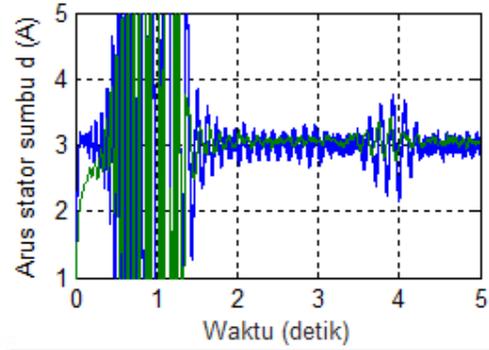
(m) Kecepatan putar rotor dan elektrik



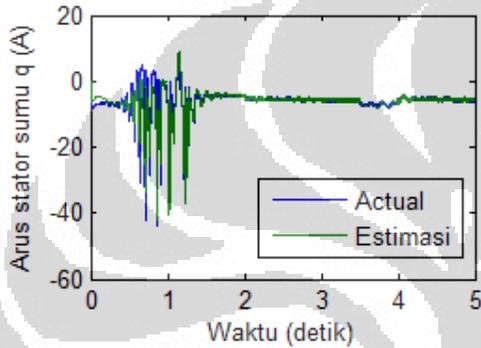
(n) slip



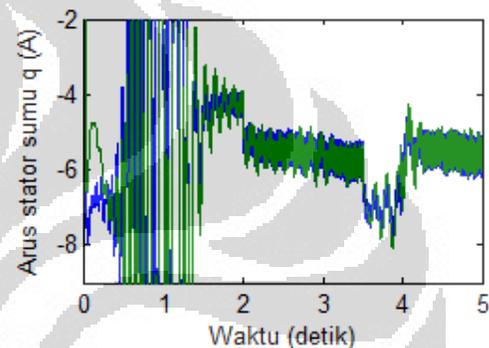
(o) Arus stator sumbu d



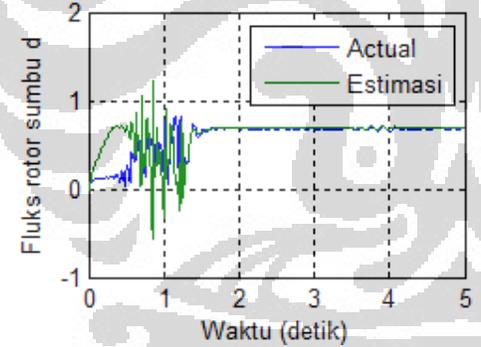
(p) Arus stator sumbu d diperbesar



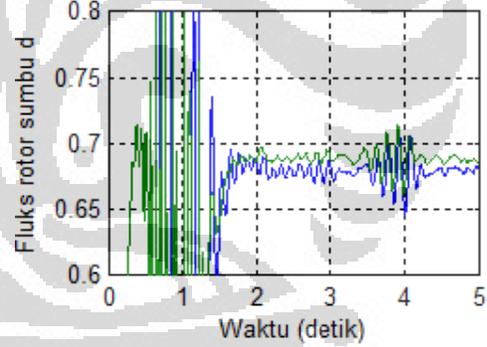
(q) Arus stator sumbu q



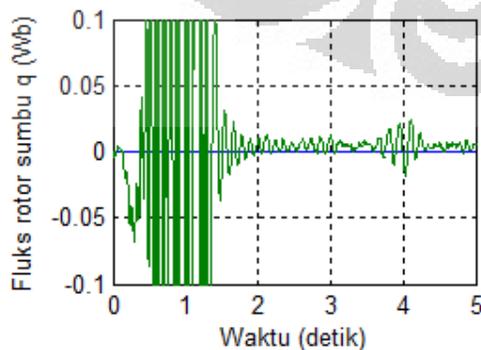
(r) Arus stator sumbu q diperbesar



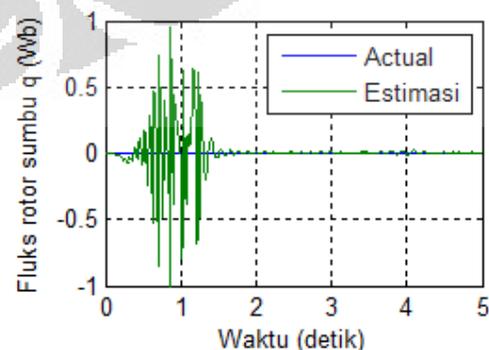
(s) Fluks rotor sumbu d



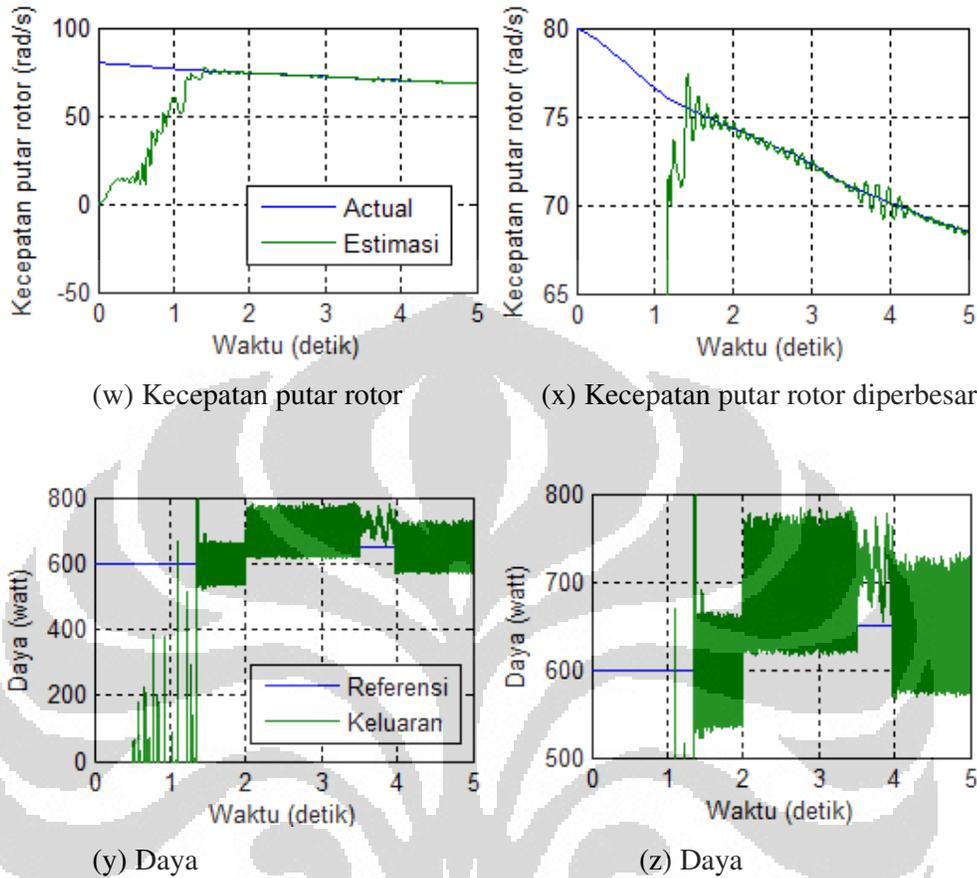
(t) Fluks rotor sumbu d diperbesar



(u) Fluks rotor sumbu q



(v) Fluks rotor sumbu q diperbesar



Gambar 4.14 Hasil simulasi pengendalian daya dengan referensi berubah

Dari keluaran hasil simulasi gambar 4.12(y) dan 4.12(z) menunjukkan bahwa keluaran daya generator mengikuti referensi daya yang diberikan dari 600 watt, 700 watt dan 650 watt. Dimana dari hasil ini menunjukkan bahwa daya keluaran mencapai stabil pada 600 watt saat waktu 1.3 detik dan saat referensi berubah menjadi 700 watt maka keluaran generator dapat langsung mengikuti perubahan yang terjadi. Tapi saat referensi berubah menjadi 650 watt keluaran daya generator tidak langsung mengikuti perubahan yang terjadi tapi beresilasi dari waktu 3.75detik hingga 3.95 detik, setelah itu mengikuti referensi yang diberikan. Hal ini terjadi karena dipengaruhi oleh observer, dimana observer membutuhkan waktu dalam melakukan proses estimasi sesuai dengan perubahan yang terjadi pada sistem. Dari keluaran hasil simulasi terjadi osilasi error rata-rata 8.57%.

Observer membutuhkan waktu dalam mengestimasi kecepatan putar rotor sehingga sangat berpengaruh pada sistem PLTB karena pada sistem pembangkit ini semua komponen-komponennya berpengaruh satu sama lain. Pada waktu 0 detik hingga 1.3 detik dan 3.75detik hingga 3.95 detik adalah waktu yang dibutuhkan observer dalam melakukan estimasi kecepatan putar rotor sehingga variabel keluaran baik kecepatan medan putar, daya, arus stator, arus magnetisasi, fluks dan tegangan mengalami ketidakstabilan pada waktu tersebut. Sistem mulai stabil setelah kecepatan putar rotor estimasi observer mencapai nilai sebenarnya.



BAB 5

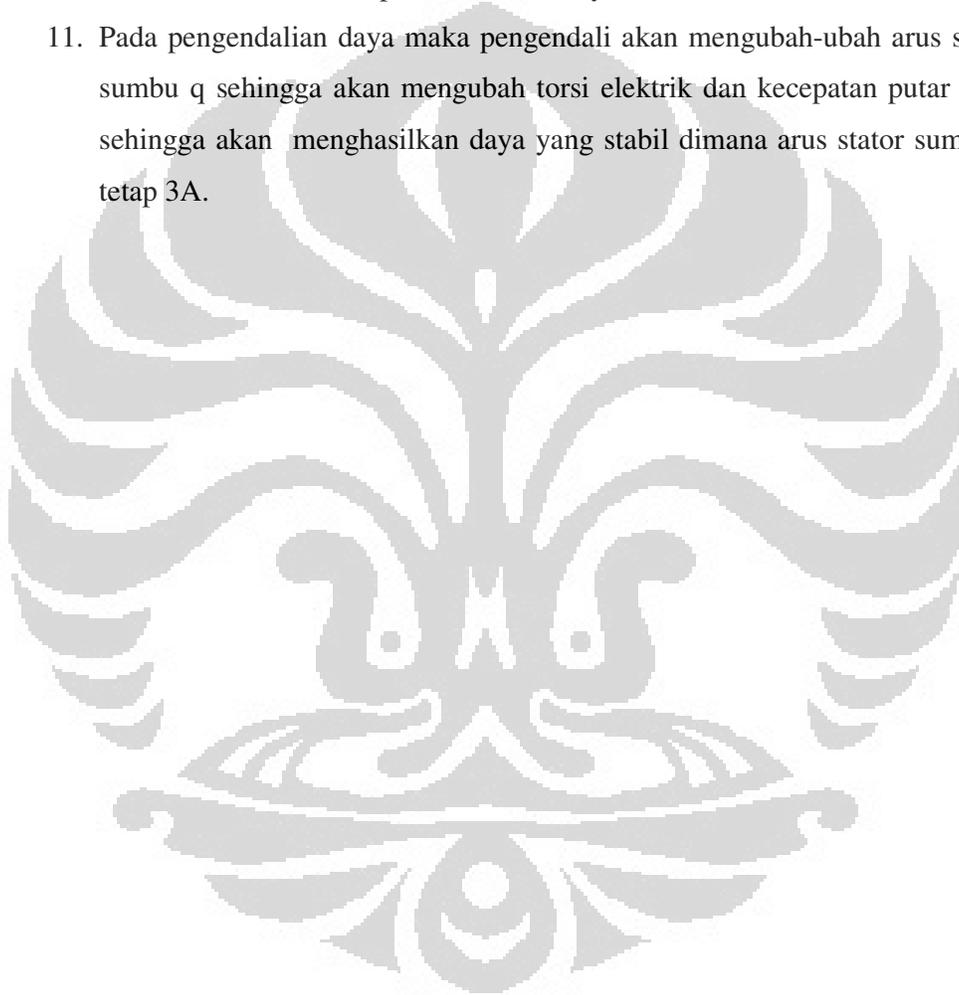
KESIMPULAN

Dari penelitian di atas dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Model matematika komponen-komponen pembangkit listrik tenaga bayu diatas dapat dikatakan benar karena sesuai dengan referensi yang diambil. Semua variable matematis komponen-komponen pembangkit listrik tenaga bayu berkaitan satu sama lain.
2. Hasil simulasi model menunjukkan bahwa hasil simulasi model komponen pembangkit listrik tenaga bayu yang satu berhubungan dengan hasil simulasi model yang lain.
3. Pengendali RFOC dan Observer yang telah didesain dapat bekerja dengan baik pada nilai arus stator sumbu d referensi adalah 3 A dan nilai arus stator sumbu q referensi antara -2 A sampai -7 A.
4. Semua variable-variabel pada sistem PLTB saling berkaitan satu sama lain, sehingga satu variabel berubah maka variabel lainnya akan berubah sesuai dengan perubahan variabel tersebut.
5. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali RFOC dan Observer dapat bekerja dengan baik. Dimana referensi yang diberikan dapat diikuti oleh keluaran sistem pengendali RFOC dan Observer dapat mengestimasi state model generator dan kecepatan putar rotor generator.
6. Semakin negatif nilai arus stator sumbu q maka torsi elektrik generator akan semakin negatif sesuai dengan bentuk arus stator tersebut. Hal ini sangat mempengaruhi kecepatan putar rotor generator sehingga berpengaruh pada daya keluaran sistem.
7. Perubahan besar arus stator sumbu d mempengaruhi arus magnetisasi sehingga akan mempengaruhi fluks, fluks ini akan berpengaruh pada tegangan dan daya pada pembangkit listrik tenaga bayu. Nilai arus stator sumbu d 1A dan 2 A tidak memiliki hasil yang maksimal tapi saat 3A memiliki nilai yg maksimal.
8. Observer sangat berpengaruh pada sistem baik terhadap error dan waktu mencapai stabil. Karena sistem stabil setelah observer mencapai nilai

kecepatan putar sebenarnya. Dimana dari percobaan didapat error rata-rata 4% dan membutuhkan waktu stabil 1.4 detik.

9. Sistem PLTB mengalami ketidakstabilan sesaat sebelum nilai estimasi observer mencapai nilai keluaran sebenarnya, dan stabil saat observer sudah mencapai nilai sebenarnya.
10. Semakin negatif arus stator sumbu q maka error estimasi akan semakin besar dan waktu mencapai nilai sebenarnya semakin lama.
11. Pada pengendalian daya maka pengendali akan mengubah-ubah arus stator sumbu q sehingga akan mengubah torsi elektrik dan kecepatan putar rotor sehingga akan menghasilkan daya yang stabil dimana arus stator sumbu d tetap 3A.

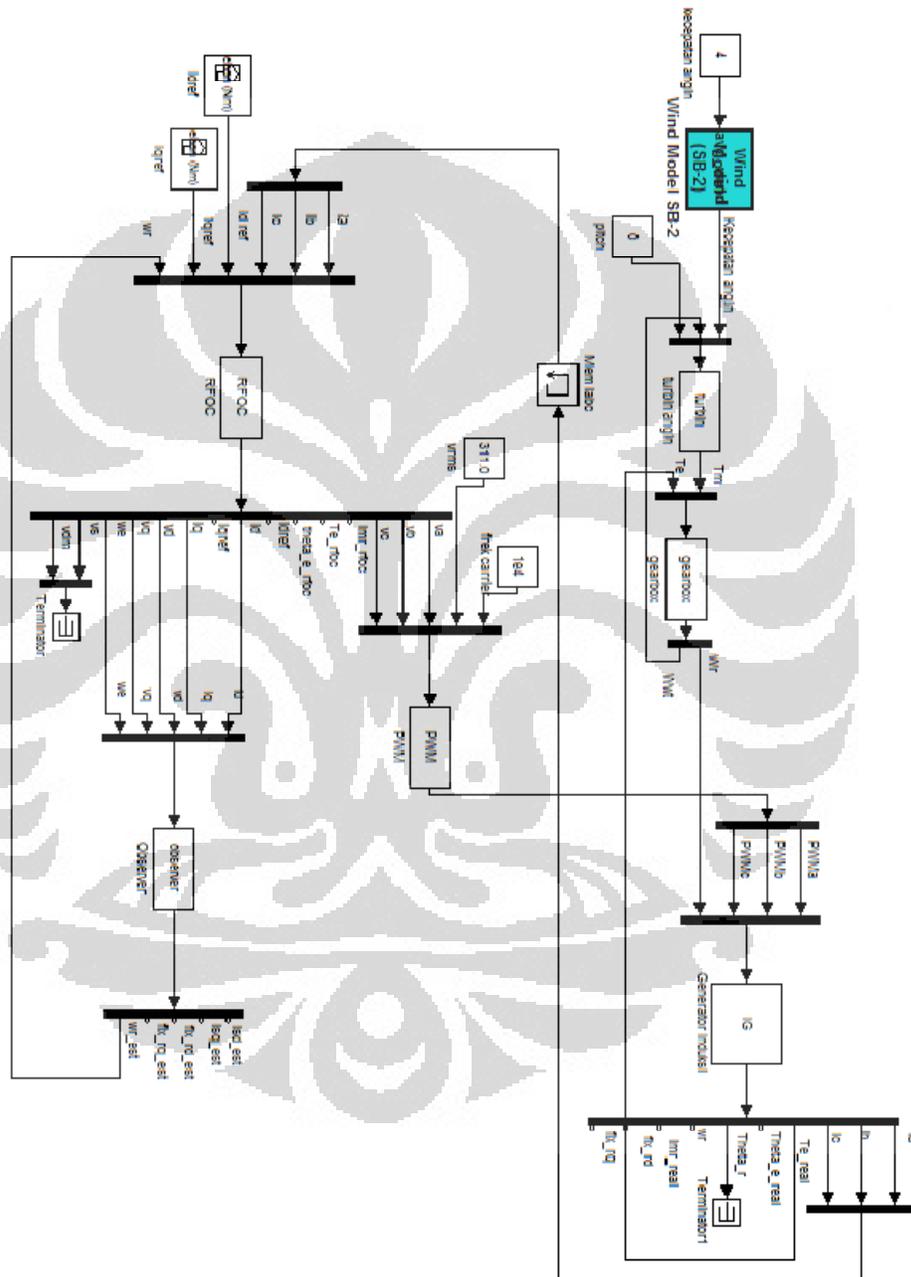


DAFTAR ACUAN

- [1] Watthana Suebkinorn, dan Bunlung Neammanee, “*An Implementation of Field Oriented Controlled SCIG for Variable Speed Wind Turbine*,” 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Application, Thailand, 2011.
- [2] R.Pena, R. Cardenas, G. Asher dan J. Clare, “*Vector Controlled Induction Machines for Stand Alone Wind Energy Applications*,” Industry Application Conf., vol. 3, pp. 1409-1415, Oktober 2000
- [3] R. Cardenas and R. Pena, “*Sensorless Vector Control of Induction Machines for Variable-Speed Wind Energy Applications*,” IEEE Trans. on energy conversion, vol. 19, pp.196-205, 2004.
- [4] Ridwan Gunawan, “Pengendalian Motor Induksi Tanpa Sensor Kecepatan Dengan Orientasi Fluks Rotor pada Performansi Kecepatan di Luar Kecepatan Nominal”, Disertasi, Universitas Indonesia, 2006.
- [5] Munteanu Iulian, Bratcu Iuliana Antoneta, Cutululis-Antonio Nicolaos, Ceang Emil. *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach*. Springer-Verlag London Limited. 2008.
- [6] Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright, Mike Hughes. “*Wind Energy Generation Modelling and Control*” , Wiley, British, 2009.
- [7] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, “*Simulink Implementation of Induction Machine Model-A Modular Approach*”, IEEE, pp. 728-734, 2003
- [8] M.Vajta, “Some Remarks on Pade-Approximations”, 3rd TEMPUS-INTCOM Symposium, 2000
- [9] John G.Kasakin, Martin F, schlecht, dan G.Vergassian, Principles of Power Electronics, Addison-Wesley, Boston, 1991.
- [10] Jin-Woo Jung, “Space Vektor PWM Inverter”, Project Mechatronic System Laboratory, 2005.
- [11] R. Cardenas, R. Pena, G. Asher, and J. Clare., “Control Strategies for Energy Recovery from a Flywheel Using a Vector Controlled Induction Machine,” Power Electronics Specialists Conf., vol. 1, pp. 454-459, June 2000

LAMPIRAN 2

Simulasi dan Analisa Pengaruh Perubahan Arus Stator Sumbu q



LAMPIRAN 3

Simulasi dan Analisa Pengaruh Perubahan Arus Stator Sumbu q

