



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN KENDALI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU DFIG (*DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR*)
BERBASIS KENDALI VEKTOR DAN *PARTICLE SWARM*
*OPTIMIZATION***

SKRIPSI

**DWI SANJAYA
0806455181**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN KENDALI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU DFIG (*DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR*)
BERBASIS KENDALI VEKTOR DAN *PARTICLE SWARM*
*OPTIMIZATION***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**DWI SANJAYA
0806455181**

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

ii

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Dwi Sanjaya
NPM : 0806455181

Tanda Tangan : 
Tanggal : 19 Juni 2012

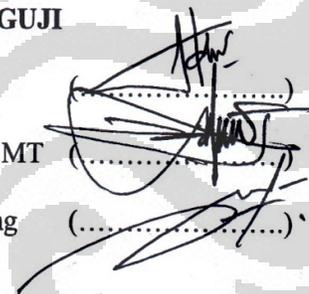
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Dwi Sanjaya
NPM : 0806455181
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Perancangan Kendali Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) Berbasis Kendali Vektor Dan *Particle Swarm Optimization*

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. Ridwan Gunawan, MT
Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar M. Eng



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 19 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT 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, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini,
2. Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT. dan Dr. Ir. Feri Yusivar M. Eng. selaku dosen penguji yang memberikan masukan yang sangat berarti untuk skripsi ini,
3. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral,
4. M. Azumar, Arnold Sinaga, M. Titan Kemal Latief dan Yunan Ari Yuwono yang telah banyak membantu selama proses pengerjaan laporan skripsi ini, dan
5. Sahabat-sahabat saya yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu atas segala dukungan yang telah diberikan.

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

Depok, 19 Juni 2012

Penulis

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

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

Nama : Dwi Sanjaya
NPM : 0806455181
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 KENDALI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU DFIG (*DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR*)
BERBASIS KENDALI VEKTOR DAN *PARTICLE SWARM*
*OPTIMIZATION***

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 19 Juni 2012
Yang menyatakan



(Dwi Sanjaya)

ABSTRAK

Nama : Dwi Sanjaya
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Perancangan Kendali Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) Berbasis Kendali Vektor Dan *Particle Swarm Optimization*

Sehubungan dengan semakin meningkatnya perhatian mengenai emisi gas CO₂ dan berkurangnya bahan bakar fosil, energi terbarukan menjadi topik utama dalam pembahasan ekonomi. Salah satu sumber energi terbarukan yaitu energi yang dapat diekstraksi dari angin. Skripsi ini membahas mengenai rancangan pengendalian daya pada sistem pembangkit listrik tenaga bayu. Tipe generator induksi yang dipergunakan adalah *doubly fed induction generator* (DFIG). Tujuan pengendalian daya ini agar daya yang dihasilkan generator dapat maksimum.

Melalui pengendalian *inverter DC-AC* PWM yang dikoneksikan antara kutub rotor DFIG dan tegangan DC, DFIG dapat dioperasikan untuk kecepatan bervariasi tetapi dengan frekuensi stator yang konstan. Saat kecepatan angin dibawah rata-rata, DFIG mengendalikan daya turbin angin untuk mengikuti titik kerja terbaik dan ketika kecepatan angin diatas rata-rata, sudut *pitch* dari kincir turbin disesuaikan untuk membatasi daya yang diperoleh dari angin.

Sebagai strategi pengendali terdepan, kendali vektor melalui *decoupling* d-q untuk DFIG dengan menggunakan *inverter DC-AC* telah diaplikasikan pada sistem turbin angin berbasis *self-tuning* pengendali PID dengan *particle swarm optimization* (PSO). Dibawah orientasi pengendali *stator-flux oriented control* (SFOC), untuk pengendali konverter bagian rotor, komponen d rotor (v_{rd} , i_{rd}) mengendalikan daya reaktif dari stator (arus eksitasi rotor) sementara komponen q rotor (v_{rq} , i_{rq}) mengendalikan daya aktif dari stator (daya listrik). Algoritma PSO telah diaplikasikan pada pengendali PID di kendali vektor untuk mengoptimalkan *tuning* parameternya.

Kata kunci : DFIG, PSO, *Inverter DC-AC*, PID, SFOC, Kendali vector

ABSTRACT

Name : Dwi Sanjaya
Study Program : Electrical Engineering
Title : Design Power Control of Wind Turbine System with Doubly Fed Induction Generator Based Vector Control and Particle Swarm Optimization

Due to increasing concerns about CO₂ emissions and the shortage of fossil fuels, renewable energy has become a major topic in economic discussions. One renewable source is energy that can be extracted from the wind. This paper covers the design power control of wind turbine system. Type of induction generator which used in this paper is *doubly fed induction generator*. The purpose power control of wind turbine system to maximize the output power of generator.

Through the control of *DC-AC* PWM inverter connected between the DFIG rotor and DC voltage, a DFIG can operate at variable speed but constant stator frequency. Below rated wind speed, the DFIG controls the wind turbine power to track the best operating point and above rated wind speed, the pitch angle of the turbine blades is adjusted to limit the power captured from the wind.

As an advanced control strategy, decoupled d-q vector control for DFIG using *DC-AC* inverter is applied to wind turbine system based self-tuning PID controller with particle swarm optimization (PSO). Under a stator-flux oriented control (SFOC), for the rotor-side converter controller, the rotor d-component (i.e. v_{rd} , i_{rd}) controls the stator reactive power (rotor excitation current), while the rotor q-component (i.e. v_{rq} , i_{rq}) controls the stator active power (electrical power). PSO algorithm is applied to PID Controller in vector control to optimize tuning parameter.

Keywords : DFIG, PSO, DC-AC Inverter, PID, SFOC, Vector Control

DAFTAR ISI

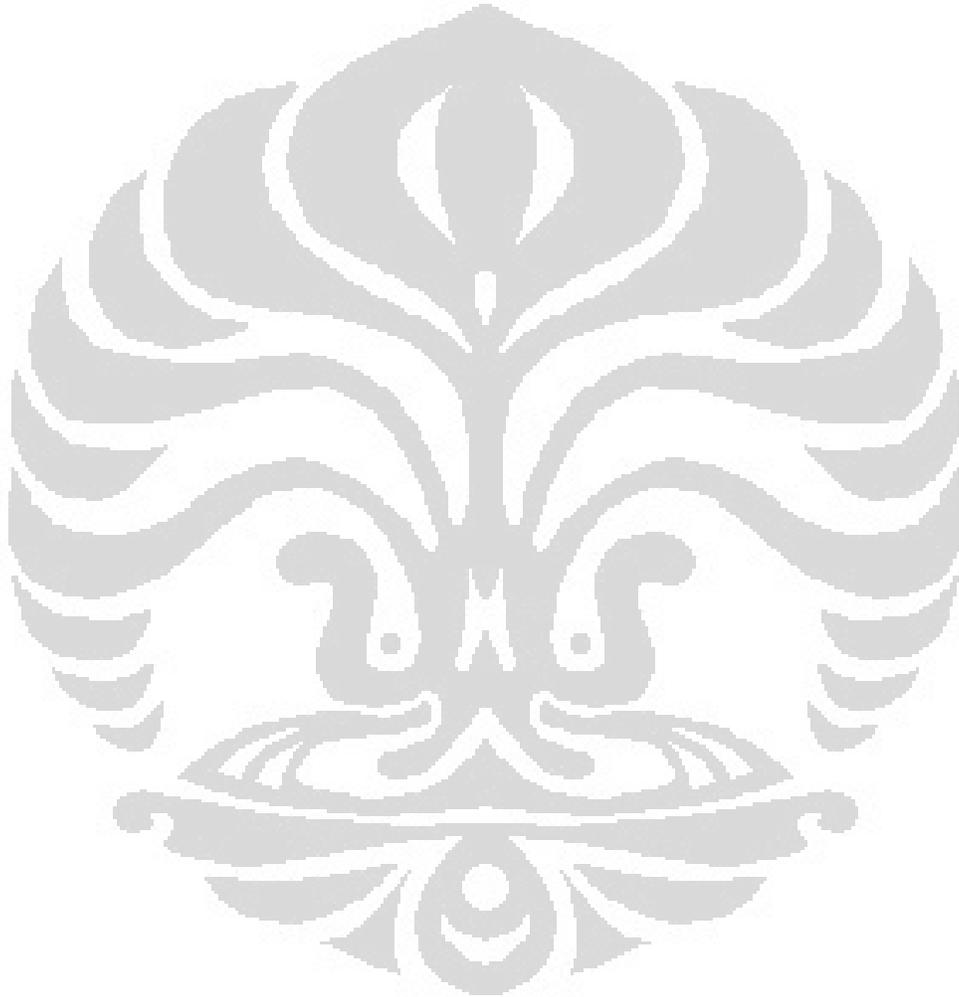
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR PERSAMAAN	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Penelitian.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Metodologi Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).....	6
2.2 Angin.....	9
2.2.1 Energi Kinetik.....	12
2.2.2 Daya Angin.....	12
2.3 Turbin Angin	13
2.3.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH).....	14
2.3.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV).....	15
2.4 Drive Train	15
2.5 <i>Inverter DC-AC</i>	16
2.6 Generator Induksi	16
2.6.1 Sejarah perkembangan generator induksi.....	16
2.6.2 Prinsip Kerja Generator Induksi	17
2.7 Pengendalian Sistem PLTB.....	21
2.7.1 Kendali Vektor.....	21
2.7.2 <i>Pitch Control</i>	22
2.8 Particle Swarm Optimization (PSO).....	23

BAB 3 PERANCANGAN KENDALI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU DFIG (<i>DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR</i>) BERBASIS KENDALI VEKTOR DAN PSO	27
3.1 Angin.....	27
3.1.1 Komponen Deterministik	28
3.1.2 Komponen Stokhastik	30
3.2 Turbin Angin	30
3.3 Drive Train	31
3.4 <i>Inverter DC-AC</i>	32
3.5 <i>Doubly Fed Induction Generator</i>	33
3.5.1 Kerangka Acuan.....	33
3.5.2 Model <i>Doubly Fed Induction Generator</i>	35
3.5.3 Variabel <i>State Doubly Fed Induction Generator</i>	39
3.6 Perancangan Pengendali.....	41
3.6.1 <i>Pitch Control</i>	41
3.6.2 Kendali Vektor.....	42
3.7 Model Beban	49
3.8 Tuning Pengendali PID dengan Particle Swarm Optimization	49
3.8.1 Algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i>	49
3.8.2 <i>Tuning</i> Parameter Pengendali PID dengan PSO	51
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS HASIL	54
4.1 Analisis Hasil Simulasi Sistem PLTB Untuk Torsi Konstan.....	55
4.2 Analisis Hasil Simulasi Sistem PLTB Untuk Torsi Berubah-ubah	57
4.3 Analisis Hasil Simulasi Sistem PLTB Terhubung Turbin Angin.....	60
4.4 Analisis Hasil Simulasi Uji Perbandingan Tuning Pengendali PID Dengan Algoritma PSO dan Tuning Dengan Fitur PID <i>Tuner</i>	64
BAB 5 KESIMPULAN.....	67
DAFTAR ACUAN.....	68
LAMPIRAN	70

DAFTAR GAMBAR

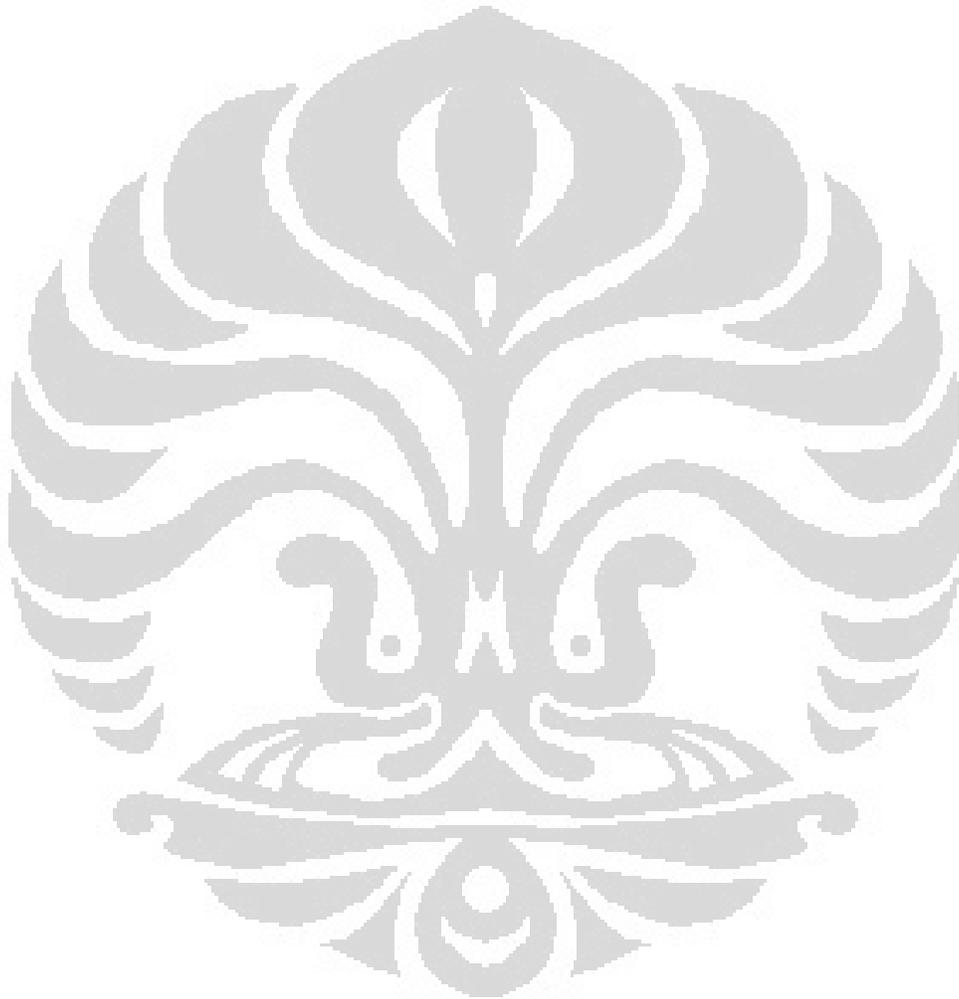
Gambar 2.1. Ilustrasi Sistem PLTB	6
Gambar 2.2. Konfigurasi umum dari jenis-jenis generator sistem PLTB	7
Gambar 2.3. Ilustrasi aliran angin.....	10
Gambar 2.4. Profil umum geseran angin.....	11
Gambar 2.5. Kurva tekanan dan kecepatan angin	12
Gambar 2.6. Turbin angin sumbu horizontal dan vertikal	14
Gambar 2.7. Skema <i>inverter</i> gelombang penuh tiga fasa.....	16
Gambar 2.8. Kurva karakteristik torsi.....	19
Gambar 2.9. Diagram blok dari skema kendali vektor pada sistem PLTB	22
Gambar 3.1. Diagram blok simulasi kecepatan angin	29
Gambar 3.2. Grafik respon keluaran blok kecepatan angin	29
Gambar 3.3. Model simulasi turbin angin	31
Gambar 3.4. Model mekanik <i>drive train two mass</i>	31
Gambar 3.5. Model simulasi <i>drive train two mass</i>	32
Gambar 3.6. Model simulasi Inverter <i>DC-AC</i>	33
Gambar 3.7. Hubungan abc-dq.....	34
Gambar 3.8. <i>Doubly Fed Induction Generator</i> 2 kutub 3 fasa.....	35
Gambar 3.9. Rangkaian Ekuivalen <i>Doubly Fed Induction Generator</i> sumbu dq	37
Gambar 3.10. Model simulasi <i>Doubly Fed Induction Generator</i>	41
Gambar 3.11. Diagram blok pengendali sudut (<i>pitch control</i>).....	42
Gambar 3.12. Referensi <i>frame</i> dalam kendali vektor SFOC.....	44
Gambar 3.13. Diagram blok kendali vektor sisi rotor.....	47
Gambar 3.14. Diagram blok simulasi penentuan sudut slip referensi.....	48
Gambar 3.15. Model simulasi beban	49
Gambar 3.16. Diagram blok simulasi model pengendali PID dengan PSO	53
Gambar 3.17. <i>Flowchart</i> algoritma <i>tuning</i> pengendali PID dengan PSO	53
Gambar 4.1. Grafik kecepatan putar rotor dari generator untuk torsi konstan.....	55
Gambar 4.2. Grafik tegangan <i>line</i> terminal sisi kutub stator generator untuk torsi konstan	55
Gambar 4.3. Grafik karakteristik daya aktif kutub stator dan daya mekanik untuk torsi konstan	56
Gambar 4.4. Grafik daya reaktif kutub stator untuk torsi konstan.....	57
Gambar 4.5. Grafik torsi masukan ke generator berubah-ubah.....	58
Gambar 4.6. Grafik kecepatan putar rotor dari generator untuk torsi berubah-ubah	58
Gambar 4.7. Grafik tegangan <i>line</i> terminal sisi kutub stator generator untuk torsi berubah-ubah.....	59
Gambar 4.8. Grafik karakteristik daya aktif kutub stator dan daya mekanik untuk torsi berubah-ubah	59
Gambar 4.9. Grafik daya reaktif kutub stator untuk torsi berubah-ubah	60
Gambar 4.10. Grafik torsi masukan ke generator terhubung turbin angin	61
Gambar 4.11. Grafik kecepatan putar rotor dari generator untuk sistem PLTB terhubung turbin angin	61
Gambar 4.12. Grafik karakteristik keluaran turbin angin	62
Gambar 4.13. Grafik kecepatan angin berubah-ubah dan <i>pitch angle</i>	62
Gambar 4.14. Grafik perbandingan karakteristik daya aktif dan daya mekanik sistem PLTB terhubung turbin angin	63

Gambar 4.15. Grafik daya reaktif kutub stator untuk sistem PLTB terhubung turbin angin.....	64
Gambar 4.16. Grafik <i>error</i> untuk <i>tuning</i> pengendali PID dengan PSO	65
Gambar 4.17. Grafik <i>error</i> untuk <i>tuning</i> pengendali PI dengan PI <i>tuner</i>	65
Gambar 4.18. Grafik perbandingan karakteristik daya aktif dan daya mekanik untuk <i>tuning</i> pengendali PID dengan PSO	66
Gambar 4.19. Grafik perbandingan karakteristik daya aktif dan daya mekanik untuk <i>tuning</i> pengendali PI dengan PI <i>tuner</i>	66



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan performa sistem PLTB berdasarkan tipe generator. 8



DAFTAR PERSAMAAN

(2.1)	10
(2.2)	12
(2.3)	13
(2.4)	13
(2.5)	13
(2.6)	13
(2.7)	18
(2.8)	19
(2.9)	20
(2.10)	20
(2.11)	23
(2.12)	23
(2.13)	25
(2.14)	26
(2.15)	26
(2.16)	26
(3.1)	27
(3.2)	28
(3.3)	28
(3.4)	28
(3.5)	28
(3.6)	28
(3.7)	30
(3.8)	30
(3.9)	30
(3.10)	30
(3.11)	30
(3.12)	32
(3.13)	32
(3.14)	32
(3.15)	33
(3.16)	34
(3.17)	34
(3.18)	34
(3.19)	34
(3.20)	34
(3.21)	34
(3.22)	36
(3.23)	36
(3.24)	36
(3.25)	36
(3.26)	36
(3.27)	36
(3.28)	37
(3.29)	37
(3.30)	38

(3.31)	38
(3.32)	38
(3.33)	38
(3.34)	38
(3.35)	38
(3.36)	38
(3.37)	39
(3.38)	39
(3.39)	39
(3.40)	39
(3.41)	39
(3.42)	40
(3.43)	40
(3.44)	41
(3.45)	41
(3.46)	41
(3.47)	41
(3.48)	42
(3.49)	42
(3.50)	43
(3.51)	43
(3.52)	43
(3.53)	43
(3.54)	44
(3.55)	44
(3.56)	45
(3.57)	45
(3.58)	45
(3.59)	45
(3.60)	45
(3.61)	45
(3.62)	45
(3.63)	46
(3.64)	46
(3.65)	47
(3.66)	47
(3.67)	47
(3.68)	47
(3.69)	50
(3.70)	50
(3.71)	52
(3.72)	52
(3.73)	52

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut data *World Wind Energy Association* (WWEA) yaitu mengenai total pertumbuhan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di dunia, dapat dilihat bahwa kapasitas sistem PLTB meningkat dua kali lipat setiap tiga tahun. Berdasarkan data tahun 2011, kapasitas total dari sistem PLTB telah mencapai 239.000 MW. Di Indonesia sendiri, Mengacu pada kebijakan energi nasional, maka sistem PLTB ditargetkan mencapai 250 megawatt (MW) pada tahun 2025.

Penggunaan *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) dalam aplikasi sistem PLTB menjadi perhatian utama dalam proses implementasinya karena keuntungan yang dapat diperoleh dari sistem ini. Keuntungan dari sistem PLTB dengan menggunakan DFIG diantaranya:

- Pengendalian daya yang menyeluruh dengan menggunakan pengendali konverter bagian rotor dan pengendali konverter bagian beban
- Kecepatan rotor dapat divariasikan $\pm 33\%$ dari kecepatan sinkron mesin
- Konverter dengan topologi sistem ini dapat mengalokasikan daya sekitar 25% hingga 30% dari daya total yang dihasilkan oleh generator untuk memenuhi kebutuhan daya dari kutub rotor ketika kecepatan angin dibawah rata-rata. Hal ini akan meningkatkan efisiensi sistem.
- Pengendalian daya aktif dan reaktif dengan kemampuan menjaga frekuensi listrik agar tetap konstan dapat dicapai dengan menggunakan pengendali pada bagian konverter.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi unjuk kerja sistem PLTB. Salah satunya adalah ketidakstabilan tegangan, daya keluaran generator, maupun frekuensi dikarenakan kecepatan angin yang berubah-ubah terhadap waktu dan tidak dapat diprediksi besarnya. Untuk itu, PLTB memerlukan suatu skema pengendalian untuk menjaga ketidakstabilan dan mengendalikan kinerja pembangkit saat beroperasi. Pengendalian sistem PLTB dapat

dilakukan dengan pengendali torsi, *pitch control*, kendali vektor dan pengendali daya.

Pengendali torsi (*torque control*) berfungsi untuk mengendalikan perubahan torsi yang dihasilkan turbin angin akibat putaran turbin yang selalu berubah-ubah. *pitch control* digunakan untuk mengendalikan gerak maju baling-baling (*pitch*) di turbin angin ketika kecepatan angin melebihi kecepatan nominal. Kendali vektor (*vector control*) berfungsi untuk mengendalikan tegangan tanpa dipengaruhi oleh frekuensi listrik dan mekanis sistem. Sedangkan, pengendali daya (*power control*) bertujuan agar turbin angin menghasilkan daya output yang stabil tanpa dipengaruhi oleh kecepatan angin.

Pada penelitian ini digunakan skema kendali vektor yang digunakan untuk mengendalikan daya dari sistem PLTB. Kendali vektor diaplikasikan untuk sisi kutub rotor dari generator dengan menggunakan orientasi pengendali *stator flux oriented control* (SFOC) sebagai dasar proses *decoupling* tegangan rotor. Kendali vektor untuk sisi kutub rotor dari generator digunakan untuk memastikan daya yang berasal dari energi potensial angin dapat secara maksimal dikonversi menjadi daya listrik dan meminimalkan daya reaktif. Skema pengendalian kecepatan untuk sistem PLTB diaplikasikan pada bagian aktuator turbin angin yaitu dengan menggunakan *pitch control* untuk membatasi daya yang dihasilkan dari energi potensial angin dengan mengatur arah sudut *pitch*. Algoritma *particle swarm optimization* (PSO) pada sistem PLTB digunakan untuk optimasi skema kendali vektor yaitu dengan memaksimalkan proses *tuning* parameter dari pengendali PID.

1.2 Perumusan Masalah

Sistem PLTB dengan menggunakan *doubly fed induction generator* (DFIG) yang dirancang, disimulasikan, dan dianalisis pada penelitian ini adalah sistem PLTB menggunakan kendali vektor untuk sisi rotor dengan optimasi pengendali memakai algoritma PSO dalam proses *tuning* pengendali PID. Model sistem PLTB dengan kendali vektor ini diaplikasikan untuk sistem yang tidak terhubung dengan sistem jaringan tenaga listrik (*isolated system*). Skema sistem PLTB untuk *isolated system* disimulasikan untuk

model dengan torsi masukan generator dalam kondisi konstan, torsi masukan generator berubah-ubah dan untuk torsi masukan generator terhubung dengan turbin angin. Kendali vektor untuk sisi rotor digunakan untuk memaksimalkan daya aktif yang dihasilkan oleh generator berdasarkan daya mekanik yang diberikan serta meminimalkan daya reaktif. Variasi torsi yang diberikan ke generator digunakan untuk melihat performa pengendali yang telah dirancang dimana diharapkan kendali vektor mampu mempertahankan daya aktif dari generator agar sesuai dengan daya mekanik yang dihasilkan oleh torsi masukan. Perbandingan kinerja dari kendali vektor dengan proses *tuning* secara langsung dan *tuning* parameter dengan algoritma *particle swarm optimization* (PSO) dilakukan dengan harapan didapatkan hasil maksimal dari proses pengendalian dengan menggunakan kendali vektor.

1.3 Batasan Penelitian

Penelitian dibatasi untuk perancangan kendali daya pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) berbasis kendali vektor dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Pembahasan di dalam penelitian ini mengenai proses rancang bangun sistem PLTB dan pengendalinya, simulasi sistem PLTB, dan analisis mengenai sistem PLTB tersebut berdasarkan hasil simulasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Memahami dan merancang simulasi sistem PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG).
2. Mendesain model pengendali daya untuk sistem PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG).
3. Memahami fungsi sistem kendali vektor yang digunakan pada sistem PLTB.
4. Memahami algoritma *particle swarm optimization* (PSO) sebagai metode optimasi *tuning* pengendali PID dari sistem kendali vektor yang telah diaplikasikan.

5. Mengetahui karakteristik daya yang dihasilkan untuk sistem PLTB untuk torsi konstan, torsi berubah-ubah dan torsi masukan terhubung turbin angin.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang dipergunakan dalam penelitian ini antara lain, adalah : studi literatur, permodelan matematik sistem PLTB, aplikasi model matematik ke dalam model simulasi dengan bantuan program MATLAB/Simulink, penyusunan model simulasi sistem PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG), analisa data hasil simulasi dan penyusunan skripsi.

Studi literatur dilakukan untuk mencari referensi buku, thesis, skripsi dan jurnal ilmiah yang sesuai dengan topik pembahasan. Permodelan matematik sistem PLTB dilakukan untuk mendapatkan model matematik yang sesuai dan dapat merepresentasikan sistem PLTB. Aplikasi model matematik ke dalam blok-blok model simulasi yang dilakukan melalui program MATLAB/Simulink. Pembuatan simulasi sistem PLTB dilakukan berdasarkan blok-blok model simulasi yang telah dibuat. Tahap selanjutnya yaitu menganalisa karakteristik keluaran dari model simulasi. Penyusunan skripsi dilakukan berdasarkan karakteristik data yang telah dianalisa.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada bab satu, membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, batasan penelitian, dan metodologi penelitian. Pada bab dua, diberikan dasar teori yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini. Pada bab ini dijelaskan mengenai sistem pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), energi angin, turbin angin, *drive train*, inverter *DC-AC*, sejarah dan prinsip kerja generator induksi, pengendalian sistem PLTB dan *particle swarm optimization* (PSO). Pada bab tiga, membahas mengenai proses perancangan sistem PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG) dan pengendalinya, dimana terdapat pembahasan mendalam mengenai tiap bagian dari sistem PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG), permodelan sistem kendali vektor dengan orientasi pengendali menggunakan *stator flux oriented control*

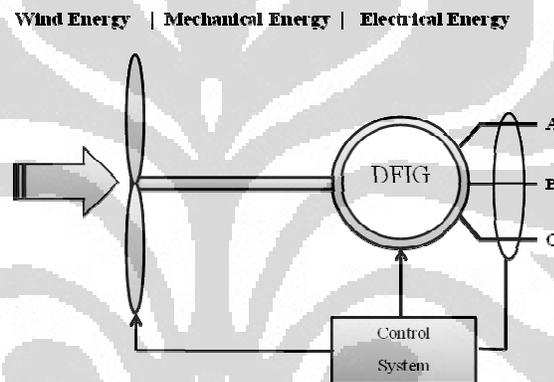
(SFOC) dan penjelasan algoritma PSO untuk proses *self-tuning* pengendali PID. Pada bab empat, penulis membahas mengenai hasil simulasi dan analisa sistem PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG) berbasis kendali vektor dan *particle swarm optimization* (PSO) untuk torsi konstan, torsi berubah-ubah dan torsi masukan terhubung turbin angin serta studi perbandingan antara tuning PID menggunakan algoritma PSO dan secara langsung. Skripsi ini diakhiri pada bab lima yang berisi mengenai kesimpulan dari penelitian ini.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Prinsip kerja dari sebuah sistem pembangkit listrik tenaga bayu terdiri dari dua proses konversi, yakni konversi energi kinetik yang berasal dari energi potensial angin menjadi putaran mekanis yang dilakukan oleh rotor turbin angin, kemudian konversi putaran mekanis tersebut menjadi energi listrik yang dilakukan oleh generator. Gambar 2.1. mengilustrasikan prinsip dasar dari kerja sistem PLTB.



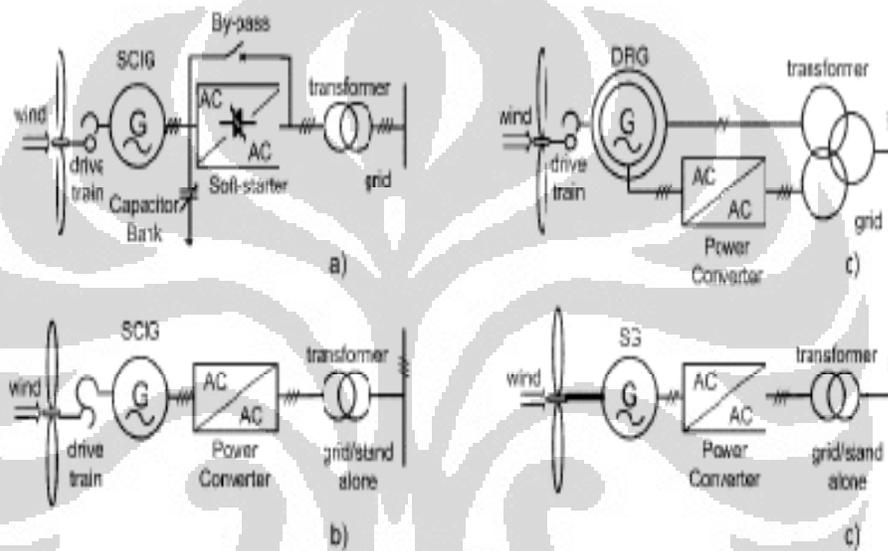
Gambar 2.1. Ilustrasi sistem PLTB

Dalam aplikasinya terdapat tiga jenis generator yang sudah diimplementasikan pada sistem PLTB. Perbedaan utama diantara ketiganya adalah pada sistem pembangkitannya dan efisiensi aerodinamika dari rotor. Ketiga Jenis generator yang sudah diaplikasikan pada PLTB adalah:

1. *Squirrel cage induction generator*
2. *Doubly fed (wound rotor) induction generator*
3. *Direct drive synchronous generator*

Konfigurasi umum dari sistem PLTB dengan menggunakan *squirrel cage induction generator* yaitu terdiri dari sebuah generator induksi konvensional jenis *squirrel cage* yang dikopel secara langsung dengan *grid* seperti digambarkan pada Gambar 2.2. a dan b. Jumlah daya maksimum yang dibangkitkan oleh PLTB akan sangat mempengaruhi variasi slip dan

kecepatan rotor dari generator induksi tipe *squirrel cage*. Namun, variasi kecepatan rotor ini sangat kecil, hanya sekitar satu sampai dua persen, karena itulah jenis PLTB yang menggunakan sistem pembangkitan semacam ini biasa dikenal sebagai PLTB kecepatan tetap atau kecepatan konstan. Generator induksi *squirrel cage* yang digunakan pada PLTB biasanya mampu bekerja pada dua kecepatan yang berbeda (tetapi konstan) dengan mengubah jumlah pasangan kutub dari lilitan stator. Pada Gambar 2.2. ditampilkan konfigurasi umum dari jenis-jenis generator yang sudah diaplikasikan pada sistem PLTB.



Gambar 2.2. Konfigurasi umum dari jenis-jenis generator untuk sistem PLTB
 a) *fixed speed squirrel cage induction Generator*. b) *variable speed squirrel cage induction generator*. c) *variable speed doubly fed induction generator*. d) *variable speed direct drive synchronous generator*

Sistem PLTB dengan menggunakan *Doubly fed (wound rotor) induction generator* (Gambar 2.2.c) dan *Direct drive synchronous generator* (Gambar 2.2.d) merupakan sistem PLTB yang dapat beroperasi pada kondisi kecepatan putaran yang berubah-ubah. Untuk memungkinkan dilakukannya operasi kecepatan yang berubah-ubah, kecepatan mekanis dari rotor dan frekuensi listrik dari *grid* harus dipisah (*decouple*). Pada *doubly fed induction generator*, digunakan sebuah *voltage source converter* untuk menyuplai lilitan

rotor tiga fasa dimana tegangan masukan *voltage source converter* berasal dari tegangan *grid* dengan pulsa referensi adalah sinyal pwm yang telah dipisahkan (*decouple*) antara frekuensi mekanis dan elektrik dari rotor serta frekuensi elektrik stator dan *grid*. Dengan cara ini, frekuensi elektrik rotor dan *grid* serta stator bisa disesuaikan secara terpisah dari kecepatan mekanis rotor. Pada *Direct drive synchronous generator*, generator secara keseluruhan dipisahkan dari *grid* dengan menggunakan sebuah konverter elektronika daya dimana umumnya dipakai sebuah *voltage source converter*, seperti sebuah IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) bridge. Sisi generator dapat berupa sebuah *voltage source converter* atau sebuah penyearah diode. Generator tersebut dieksitasi dengan menggunakan sebuah lilitan eksitasi atau magnet permanen.

Tiga jenis utama generator ini memiliki keunggulan dan kelemahannya masing-masing. Kelebihan dari sebuah sistem PLTB dengan kecepatan turbin konstan adalah bahwa arsitekturnya relatif sederhana. Oleh karena itu, harga dari PLTB dengan kecepatan konstan cenderung lebih rendah dari turbin dengan kecepatan berubah-ubah. Sedangkan kelebihan utama dari PLTB dengan kecepatan berubah-ubah adalah adanya jumlah energi lebih yang bisa dibangkitkan pada sebuah lingkup kecepatan angin yang spesifik.

Jika kita membandingkan antara kedua sistem PLTB dengan kecepatan putaran yang berubah-ubah, maka dapat dilihat bahwa pada konsep *doubly fed induction generator* memiliki kelebihan jika dibandingkan dengan *Direct drive synchronous generator* dari sisi standar generator yang diperlukan dan konverter yang digunakan. Kelemahan konsep ini yaitu perawatan yang lebih intensif diperlukan untuk menjaga kinerja sistem. Perbandingan kinerja dari masing-masing tipe PLTB berdasarkan generator yang digunakan disajikan pada Tabel 2.1., yaitu [3] :

Tabel 2.1. Perbandingan performa sistem PLTB berdasarkan tipe generator

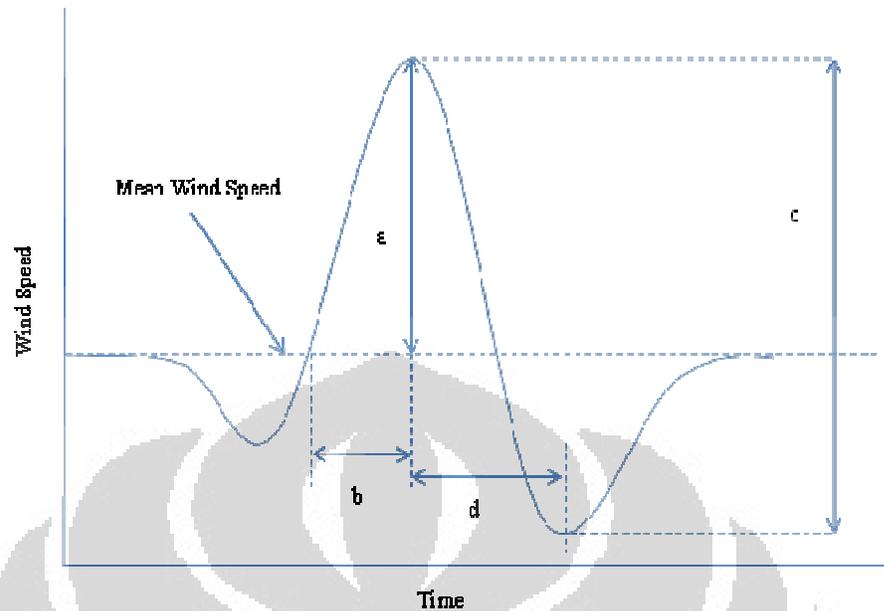
	<i>Squirrel cage</i>	<i>Doubly fed</i>	<i>Direct drive</i>
Kelebihan	Sederhana dan kuat	Tekanan mekanis lebih sedikit	Tekanan mekanis lebih sedikit
	Lebih murah	Tidak terlalu berisik	Tidak terlalu berisik
	Efisien secara	Efisien secara	Efisien secara

	elektris	aerodinamis	aerodinamis
	Generator standar	Generator standar	Tidak ada gearbox
		Cukup menggunakan konverter kecil	
Kelemahan	Kurang efisien secara aerodinamis	Kurang efisien secara elektrik	Kurang efisien secara elektrik
	Terdapat gearbox	Terdapat gearbox	Membutuhkan konverter yang besar
	Terdapat tekanan mekanis	Mahal	Mahal
	berisik		Menggunakan generator yang besar
			Generator kompleks

2.2 Angin

Angin merupakan udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara ini disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh sinar matahari. Akibat perbedaan suhu maka terjadi perputaran udara dari kutub utara ke garis khatulistiwa menyusuri bumi ataupun sebaliknya.

Gerakan angin mengakibatkan timbulnya energi kinetik dimana energi ini dapat dikonversi menjadi energi listrik ataupun mekanik dengan bantuan turbin angin. Aliran angin bisa diilustrasikan sesuai Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Ilustrasi aliran angin

Keterangan:

a : Amplitudo

c : Nilai maksimum angin

b : Rise Time

d : Waktu saat angin turun

Angin mempunyai profil geseran (*wind shear profile*) atau profil kecepatan ketika mengalir melewati benda padat, misalnya permukaan bumi. Di permukaan bumi, kecepatan relatif angin terhadap permukaan bumi sama dengan nol. Kemudian kecepatan ini menjadi semakin tinggi sebanding ketinggian dari permukaan bumi. Ada dua jenis profil geseran angin yang biasa digunakan untuk menghitung energi, yaitu: profil geseran angin eksponensial (*exponential wind shear profile*) dan profil geseran angin kekasaran permukaan (*surface roughness wind shear stress*). Gambar 2.4., menunjukkan profil geseran fluida eksponensial yang dijabarkan dengan rumus berikut [4]:

$$v = v_{ref} \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

Keterangan :

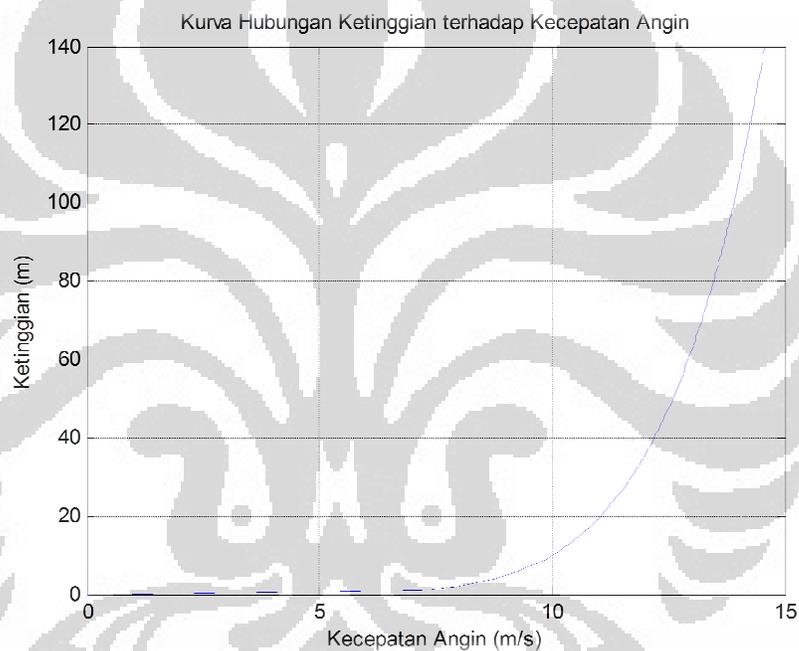
v : Kecepatan angin pada ketinggian h (m/s)

h : Ketinggian dari permukaan tanah sampai hub turbin angin (m)

v_{ref} : Kecepatan angin referensi saat pengukuran dilakukan (m/s)

h_{ref} : Ketinggian referensi (m)

Dari persamaan (2.1), didapatkan grafik hubungan ketinggian terhadap kecepatan angin (Gambar 2.4.). Untuk v_{ref} dan h_{ref} masing-masing 10 m/s dan 10 m. Profil geseran fluida eksponensial tergantung pada kekasaran permukaan. Untuk fluida secara umum α mempunyai nilai 1/7. Profil angin pada daerah yang memiliki banyak pepohonan seperti perkebunan atau hutan, nilai α dapat mencapai 0,3 sedangkan untuk laut atau daerah-daerah yang terbuka α bernilai 0,1 [5].



Gambar 2.4. Profil umum geseran angin

Ketinggian (h) didefinisikan tinggi dari permukaan tanah terhadap hub turbin angin. Dari Gambar 2.4 terlihat bahwa ketinggian mempengaruhi kuantitas kecepatan angin. Saat kecepatan angin 10 m/s maka ketinggian mencapai 10 meter. Untuk ketinggian 120 meter didapatkan kecepatan angin sebesar 14,2 m/s.

Data angin bisa didekati dengan suatu fungsi kontinyu berupa distribusi *Weibull* untuk mendapatkan prediksi yang akurat mengenai keluaran turbin angin dan juga untuk mengetahui karakteristik pola angin.

2.2.1 Energi Kinetik

Besarnya energi kinetik pada angin dinyatakan dengan rumus empiris :

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

Keterangan:

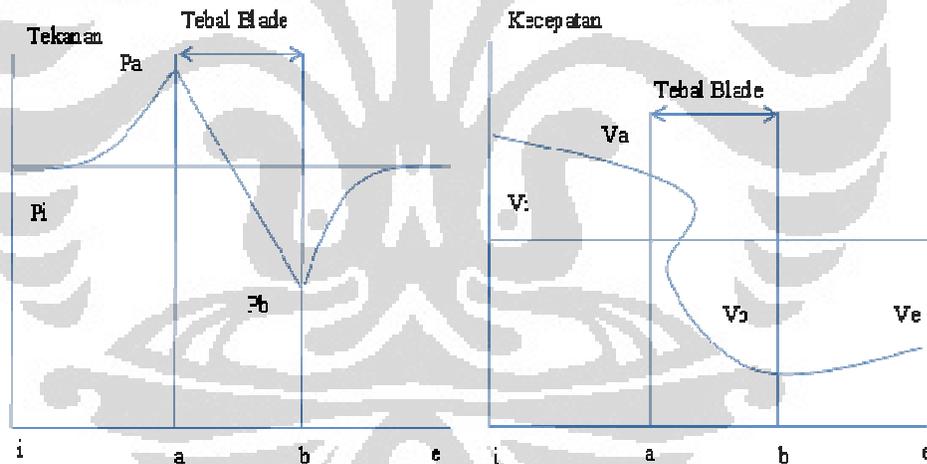
E_k : Energi kinetik angin (Joule)

m : Aliran massa angin (Kg/s)

v : Kecepatan angin (m/s)

2.2.2 Daya Angin

Daya maksimum turbin angin adalah besarnya daya total yang diserap oleh *blade* turbin angin. Gambar 2.5. menunjukkan kurva keadaan tekanan dan kecepatan angin yang melewati rotor turbin angin. Jika tebal *blade* turbin diasumsikan a-b, kecepatan dan tekanan angin akan berkurang setelah melewati *blade*. Artinya, kecepatan angin keluar lebih kecil dibandingkan kecepatan angin saat menuju *blade*.



Gambar 2.5. Kurva tekanan dan kecepatan angin.

Dari grafik tekanan terlihat tekanan saat angin belum melewati blade (P_a) memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tekanan saat angin melewati blade P_b atau ($P_a > P_b$). Untuk grafik kecepatan angin terlihat bahwa kecepatan angin saat angin belum melewati blade (V_a) memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kecepatan saat angin melewati blade V_b atau ($V_a > V_b$). Hal ini terjadi karena energi kinetik dari angin telah

diserap oleh turbin yang dikonversikan menjadi energi mekanik. Besar daya angin nominal P_{nom} adalah:

$$P_{nom} = E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.3)$$

Jika harga aliran massa angin dinyatakan sebagai :

$$m = \rho Av \quad (2.4)$$

Sehingga akan didapat persamaan besar daya angin nominal yaitu :

$$P_{nom} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.5)$$

Namun menurut *Betz law* tidak seluruhnya daya angin nominal yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik dimana dipengaruhi oleh faktor koreksi yang dinyatakan dalam koefisien daya C_p sehingga dapat dinyatakan bahwa besar daya total yang dapat dikonversikan dari energi angin menjadi energi mekanik dalam persamaan berikut [6]:

$$P_{tot} = \frac{1}{2}\rho\pi r^2 v^3 C_p \quad (2.6)$$

Keterangan :

P_{tot} : Daya total angin (Watt)

m : Aliran massa angin (Kg/s)

v : Kecepatan angin yang melewati turbin (m/s)

ρ : Massa jenis udara (Kg/m³)

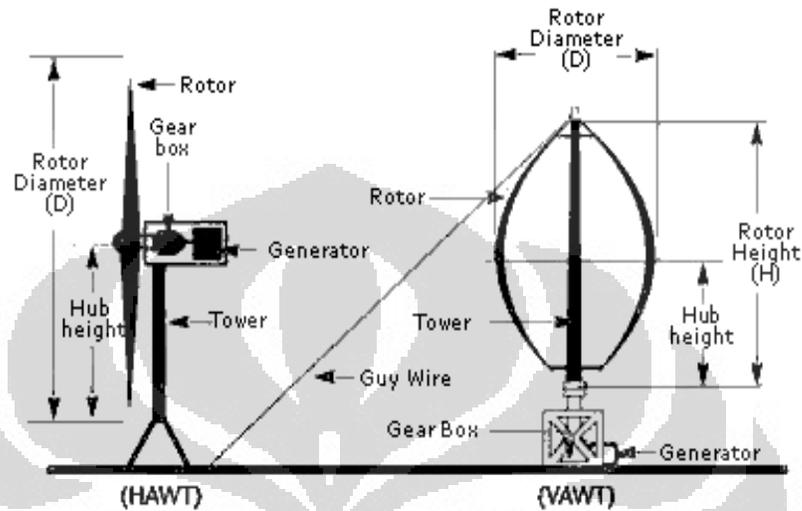
r : Radius dari blade turbin angin (m)

C_p : Koefisien daya (*constant*)

2.3 Turbin Angin

Turbin angin merupakan satu bagian terpenting pembangkit listrik tenaga angin. Turbin angin adalah komponen mekanik yang mengkonversikan kecepatan angin menjadi daya poros. Turbin angin mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus di mana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi di depan sudu. Perbedaan tekanan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar.

Turbin angin dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan arah sumbu, yaitu: vertikal dan horizontal. Perbedaan kedua kelompok ini dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Turbin angin sumbu horizontal dan vertikal.

2.3.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)

Turbin angin sumbu horizontal disingkat TASH memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang dihubungkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah roda gigi yang mengubah putaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar.

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi pada bagian belakang maka turbin diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Sebagian besar TASH merupakan mesin *upwind* (melawan arah angin) untuk meminimalkan dampak turbulensi yang dapat menyebabkan kerusakan struktur menara dan realibilitas.

2.3.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal (TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah.

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta roda gigi bisa ditempatkan di dekat tanah. Sehingga, menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Disisi lain, sejumlah desain TASV menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) dapat ditimbulkan saat kincir berputar.

Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah sehingga menghasilkan energi angin yang rendah. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasang menara turbin kira-kira 50 persen dari tinggi bangunan dan merupakan titik optimal bagi energi angin maksimal dan turbulensi angin minimal.

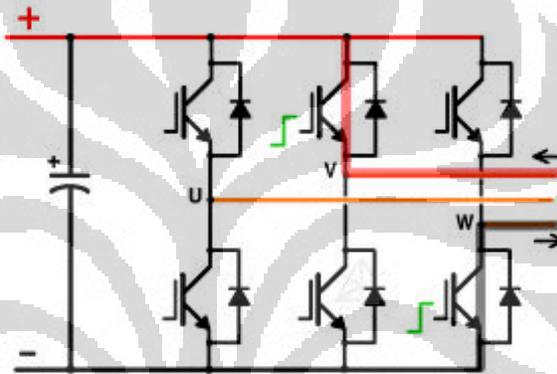
2.4 Drive Train

Drive Train merupakan salah satu komponen mekanik yang digunakan sebagai penghubung turbin angin dengan generator. Pada *drive train* dipasang roda gigi yang berfungsi untuk mengubah putaran rendah turbin angin menjadi putaran tinggi.

Untuk menjaga putaran poros generator setelah roda gigi agar bekerja pada titik aman ketika kecepatan angin maksimal maka dipasang *brake sistem*. Alat ini bekerja untuk mencegah kerusakan generator (kawat generator putus, *overheat*, dan lain-lain) akibat putaran yang tinggi saat kecepatan angin melebihi kecepatan nominal.

2.5 Inverter *DC-AC*

Inverter atau pengubah *DC* ke *AC* (konverter *DC-AC*) merupakan suatu rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan listrik arus searah (*DC*) menjadi tegangan listrik arus bolak-balik (*AC*) satu fasa atau tiga fasa. Komponen utama dari rangkaian *inverter* hampir sama dengan rangkaian *rectifier* yang membedakannya hanya adanya *switch* yang dipasang secara paralel dengan IGBT Diode. Gambar 2.7. merupakan rangkaian *inverter* tiga fasa tiga lengan yang menggunakan IGBT sebagai saklar elektronik.



Gambar 2.7. Skema *inverter* gelombang penuh tiga fasa

2.6 Generator Induksi

2.6.1 Sejarah perkembangan generator induksi

Pembangkitan energi listrik secara umum sejauh ini masih didominasi oleh penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber utama pembangkitannya diantaranya yang berasal dari minyak bumi, gas bumi dan batu-bara. Penggunaan sumber non-fosil seperti energi cahaya matahari, panas bumi dan nuklir telah diaplikasikan pada sistem pembangkitan energi listrik namun masalah-masalah seperti biaya investasi, dampak terhadap lingkungan dan efisiensi dari daya yang dihasilkan masih menjadi pembahasan yang perlu dikaji ulang. Kebutuhan energi yang terus meningkat dan semakin berkurangnya sumber energi konvensional mengakibatkan semakin

meningkatnya usaha pengembangan dan penggunaan sumber energi terbarukan, terutama setelah kenaikan harga bahan bakar selama periode 1970an. Penggunaan mesin induksi sebagai sebuah generator menjadi semakin populer untuk sumber energi terbarukan yang membutuhkan konversi energi dari mekanik menjadi energi listrik. Adanya konsumsi daya reaktif, tuntutan menghasilkan daya aktif semaksimal mungkin dan pengaturan tegangan yang buruk di bawah kecepatan yang bervariasi adalah tantangan-tantangan terbesar dalam penggunaan generator induksi. Walaupun demikian adanya perkembangan pada alat-alat konverter telah memfasilitasi pengendalian dari keluaran daya aktif dan reaktif generator induksi.

2.6.2 Prinsip Kerja Generator Induksi

Generator induksi atau disebut juga generator asinkron adalah mesin listrik yang dapat mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik. Penamaan induksi didasarkan pada tegangan yang timbul pada stator, yang nantinya akan menghasilkan medan magnet stator dan arus stator, diinduksikan pada kumparan stator dan tidak dihubungkan secara langsung dengan menggunakan bahan konduktor tertentu. Sedangkan penamaan generator asinkron atau tak serempak karena kecepatan medan putar pada stator tidak sama dengan kecepatan putar rotor. Perbedaan kecepatan inilah yang disebut dengan kecepatan slip.

Suatu mesin induksi terdiri dua bagian utama yaitu kumparan stator dan kumparan rotor. Konstruksi statornya berupa kumparan yang harus disesuaikan dengan jumlah fasa yang akan digunakan. Konstruksi rotor yang bisa digunakan untuk mesin induksi ada dua jenis yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar (*squirrel cage*). Rotor belitan menggunakan kumparan yang berbentuk lilitan dari kawat dan memungkinkan dihubungkannya bagian rotor dengan komponen listrik lain seperti hambatan, kapasitor atau pengatur tegangan (*voltage source converter*). Pada rotor sangkar tidak terdapat kumparan, konstruksinya hanya terdiri dari batang-batang logam yang dirangkai sedemikian rupa sehingga batang-batang logam tersebut melintang disepanjang permukaan rotor untuk kemudian ditiap ujung

batang-batang logam tersebut disatukan dengan menggunakan cincin. Rotor jenis ini tidak dapat dihubungkan dengan komponen listrik.

Kumparan stator mesin induksi tiga fasa dengan masukan tegangan listrik arus bolak-balik (AC) tiga fasa akan mengalirkan arus listrik disepanjang kumparan tersebut. Arus listrik yang mengalir dalam kumparan stator akan menimbulkan medan magnet keluar dari kumparan stator. Karena tegangan yang diaplikasikan pada kumparan stator merupakan tegangan tiga fasa dengan konstruksi kumparan yang disesuaikan, maka resultan medan magnet dari ketiga fasa tersebut setiap waktunya akan berubah-ubah. Perubahan resultan medan magnet setiap waktunya ini akan terlihat seperti suatu medan magnet yang berputar.

Besarnya kecepatan medan putar (kecepatan sinkron) pada stator ini tergantung dari frekuensi tegangan bolak-balik (AC) yang diberikan seperti direpresentasikan pada persamaan berikut ini:

$$n_s = \frac{120f_e}{P} \quad (2.7)$$

Keterangan :

N_s : Kecepatan sinkron atau kecepatan medan putar stator (rpm)

f_e : Frekuensi tegangan bolak-balik (AC) yang diberikan pada stator (Hz)

P : Jumlah kutub stator

Medan magnet yang berputar ini kemudian akan menimbulkan fluks pada bidang rotor yang besarnya berubah-ubah setiap waktunya ($d\phi/dt$) akibat dari perubahan besarnya medan magnet dari kumparan stator. Dengan adanya perubahan fluks pada kumparan rotor setiap waktunya, maka akan timbul GGL induksi pada rangkaian rotor. Karena rangkaian rotor merupakan suatu rangkain tertutup, maka akan timbul arus listrik bolak-balik (AC) pada kumparan rotor. Arus listrik hasil induksi tegangan pada kumparan rotor ini menyebabkan timbulnya gaya *Lorentz* pada rotor akibat interaksi arus pada kumparan rotor dengan medan magnet putar dari kumparan stator. Dengan adanya gaya *Lorentz*, maka mesin ini bisa dikatakan menghasilkan torsi yang digunakan untuk memutar rotor pada suatu kecepatan tertentu (n_m).

Dalam kondisi tersebut maka akan terdapat perbedaan antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan putar rotor (n_m). Perbedaan antara

kedua kecepatan tersebut yang dinormalisasikan pada kecepatan medan putar stator dinamakan slip seperti dinyatakan pada persamaan berikut ini:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.8)$$

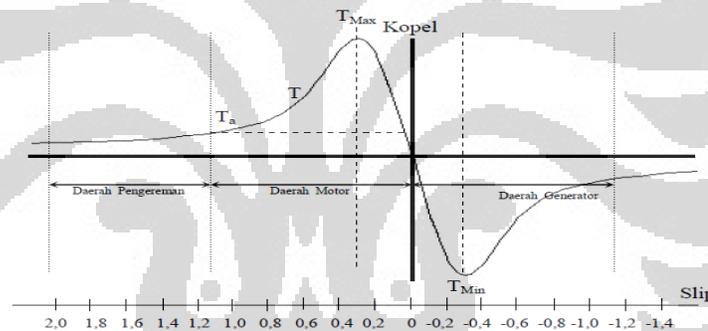
Keterangan:

N_s : Kecepatan sinkron atau kecepatan medan putar pada stator (rpm)

N_r : Kecepatan putar rotor (rpm)

s : Slip (*constant*)

Sesuai dengan penjelasan diatas, berarti mesin ini akan menghasilkan gaya yang searah dengan arah putarnya. Dalam kondisi ini, berarti mesin ini bekerja sebagai motor dengan kecepatan putar rotornya lebih rendah daripada kecepatan medan putar pada stator (slip bernilai positif). Gambar 2.8. berikut ini memperlihatkan karakteristik torsi yang diinduksikan oleh motor asinkron dalam fungsi besar slip.



Gambar 2.8. Kurva karakteristik torsi

Jika rotor mesin asinkron yang beroperasi sebagai motor diberi gaya dari luar dengan arah gaya yang sama dengan arah putaran rotornya oleh suatu *prime mover*, maka kecepatan putar rotor pada suatu saat akan melampaui kecepatan sinkronnya sehingga nilai slip menjadi negatif. Dalam keadaan ini, maka mesin asinkron tidak lagi bekerja sebagai motor, melainkan bekerja sebagai generator dengan menyuplai daya aktif yang diterima mesin dari *prime mover* kembali ke sistem tenaga listrik dimana statornya terhubung.

Pada kondisi operasi dengan slip negatif, maka torsi yang dihasilkan oleh mesin asinkron berubah menjadi negatif (melawan torsi yang diberikan *prime mover*) dengan karakteristik.

Ketika mesin asinkron beroperasi sebagai generator, maka aliran daya aktif pada mesin menjadi berlawanan dari operasi mesin sebagai motor dengan aliran daya reaktif yang tetap. Jadi, generator asinkron akan menyerap arus reaktif dari sistem dimana statornya terhubung untuk menginduksikan tegangan eksitasi pada rotor sehingga pada rotor akan mengalir arus eksitasi. Arus eksitasi ini yang kemudian akan menginduksikan tegangan kembali pada kumparan statornya. Generator asinkron yang beroperasi dalam kondisi seperti ini dinamakan self excited induction generator. Oleh karena itu, sistem dimana generator induksi terhubung harus dapat menyediakan cukup daya reaktif untuk mengeksitasi generator induksi. Jika generator terhubung pada suatu beban resistif murni (menyerap daya aktif), maka eksitasi ini akan berfungsi untuk mengkonversikan energi mekanik dari *prime mover* menjadi energi listrik melalui suatu sirkuit magnetic antara rotor dan stator (induksi tegangan pada kumparan stator).

Tegangan dan frekuensi yang diinduksikan pada rotor pada mesin asinkron merupakan fungsi dari slip seperti pada persamaan berikut ini:

$$V_r \approx sV_s \quad (2.9)$$

$$f_r = sf_s \quad (2.10)$$

Keterangan:

V_r : Tegangan yang diinduksikan pada rangkaian rotor (Volt)

V_s : Tegangan yang diaplikasikan pada kumparan stator (Volt)

f_r : Frekuensi tegangan induksi pada rangkaian rotor (Hz)

f_s : Frekuensi tegangan yang diaplikasikan pada kumparan stator (Hz)

Dengan demikian, jika slip berubah akibat dari perubahan kecepatan putar rotor, maka frekuensi tegangan stator (yang terhubung dengan beban) dapat dijaga konstan dengan mengendalikan frekuensi tegangan pada rotornya sesuai dengan perubahan tersebut. Perubahan tegangan juga terjadi akibat dari perubahan slip dan untuk menjaga agar tegangannya konstan, maka pengaturan eksitasi dapat dilakukan. Kedua pengaturan tersebut bisa dilakukan untuk mesin asinkron yang menggunakan rotor belitan karena rotor dengan konstruksi seperti ini dapat dihubungkan dengan suatu rangkaian diluar mesin itu sendiri (seperti pengendali). Oleh karena itu, generator asinkron biasanya

diaplikasikan untuk mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik dengan *prime mover* yang memiliki kecepatan tidak konstan seperti turbin angin dan turbin air.

2.7 Pengendalian Sistem PLTB

Sistem PLTB dengan menggunakan *doubly fed induction generator* merupakan salah satu konfigurasi sistem pembangkitan menggunakan turbin angin yang memungkinkan sistem bekerja pada kecepatan angin yang berubah-ubah. Terdapat beberapa pengaturan yang dapat dilakukan pada sistem PLTB jenis ini sehingga dapat menghasilkan kemampuan beroperasi pada kecepatan angin yang tidak tetap dan juga pada kondisi beban berfluktuasi.

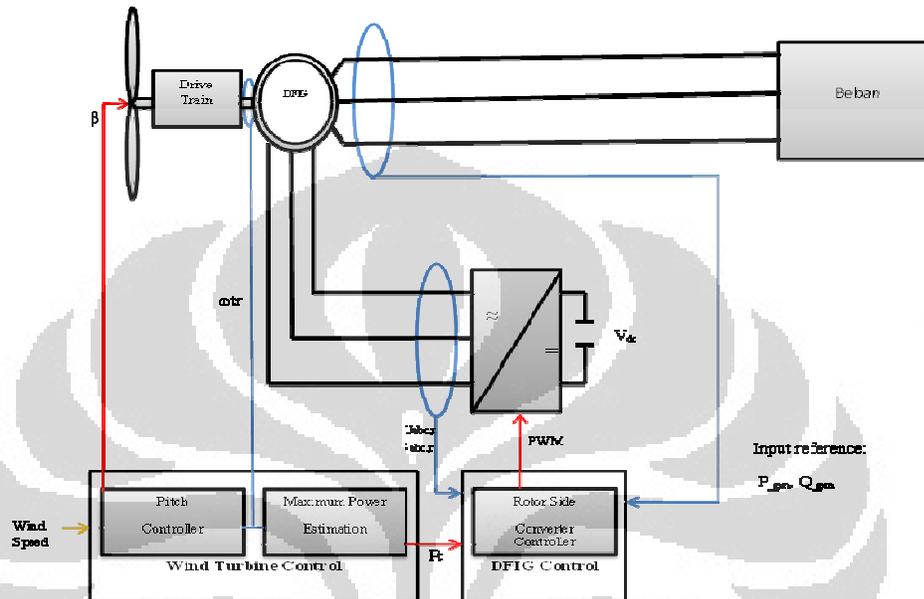
Skema pengendalian yang dapat diimplementasikan pada PLTB kecepatan berubah-ubah adalah kendali vektor dan pengendalian gerak maju baling-baling (*pitch control*). Kendali vektor dapat direalisasikan dengan mengatur daya dari generator atau torsi dari generator. *pitch control* adalah sebuah metode pengendalian yang biasa digunakan untuk mengatur daya aerodinamis turbin.

2.7.1 Kendali Vektor

Teknik kendali vektor telah umum diaplikasikan untuk *doubly fed induction generator* dengan menggunakan inverter *DC-AC*. Skema kendali vektor untuk sisi rotor menjamin pengendalian *decouple* dari daya aktif dan reaktif yang diambil dari generator. Nilai referensi dari daya aktif sisi rotor P_{tot_ref} didapat melalui perhitungan energi kinetik dari kecepatan angin. Perhitungan matematis daya maksimum dari angin diambil melalui pendekatan berdasarkan daya nominal yang dikonversi dari energi kinetik angin dan koefisien daya C_p yang menentukan berapa besar faktor koreksi dari daya nominal yang dapat diubah menjadi daya mekanik. Untuk kecepatan angin diatas nilai yang ditentukan, skema *pitch control* mengambil alih pengendalian turbin angin untuk membatasi keluaran daya. Walaupun demikian, skema kendali vektor akan bersama-sama bekerja dengan *pitch*

control pada daerah kecepatan angin yang tinggi yang menghasilkan berkurangnya fluktuasi pada daya keluaran turbin angin.

Skema kendali vektor sisi rotor yang didisain untuk sistem PLTB, diperlihatkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Diagram blok dari skema kendali vektor pada sistem PLTB

Keterangan:

- $i_{abc,r}$: Arus tiga fasa rotor (ampere)
- $U_{abc,r}$: Tegangan tiga fasa rotor (volt)
- P_t : Daya total yang telah dikonversi dari energi angin (watt)
- ω_r : Kecepatan putar rotor (rpm)
- β : *Pitch angle*
- P_{gen} : Daya aktif generator referensi (watt)
- Q_{gen} : Daya reaktif generator referensi (*VAR*)

2.7.2 Pitch Control

Model aerodinamis dari turbin angin telah menunjukkan bahwa efisiensi aerodinamis sangat dipengaruhi oleh variasi dari *pitch* kincir angin turbin dengan memperhatikan arah dari angin atau terhadap bidang dari rotasi. Perubahan kecil pada sudut *pitch* bisa menimbulkan efek yang signifikan pada keluaran daya.

Pada kecepatan angin rendah sampai menengah, turbin seharusnya akan mencoba untuk memproduksi daya sebanyak mungkin, dengan demikian secara umum tidak perlu untuk merubah sudut *pitch*. Sudut *pitch* hanya harus berada pada nilai optimumnya untuk memproduksi daya maksimum. Pada kecepatan angin yang tinggi, kontrol *pitch* memberikan sebuah cara yang sangat efektif dalam pengaturan daya aerodinamis dan beban yang dihasilkan rotor sehingga batasan-batasan disain tidak dilewati.

2.8 Particle Swarm Optimization (PSO)

Sejak pertama kali diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995, PSO telah mengalami kemajuan yang sangat pesat dan telah banyak diterapkan dalam berbagai masalah pencarian. Pada umumnya peningkatan algoritma PSO bertujuan untuk meningkatkan sifat konvergen dan divergen dari algoritma tersebut.

PSO terdiri dari kumpulan-kumpulan partikel yang bergerak pada ruang pencarian. Partikel-partikel ini bergerak mencari solusi. Posisi partikel merupakan hasil dari posisi partikel sebelumnya ditambah dengan kecepatan pergerakannya. Kecepatan partikel ditentukan dengan rumus sebagai berikut.

$$v_i(t^+) = \chi(v_i(t) + c_1 \text{Rand}() (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 \text{Rand}() (p_g(t) - x_i(t))) \quad (2.11)$$

$x_i(t)$ merupakan vektor posisi partikel ke- i ($i = 1, 2, 3, \dots$) pada iterasi ke- t ($t = 0, 1, 2, \dots$). $v_i(t)$ merupakan kecepatan partikel ke- i pada iterasi ke- t , χ merupakan faktor konstiksi yang bernilai kurang dari 1, c_1 dan c_2 adalah faktor akselerasi yang mengatur distribusi dari pengaruh komponen kognitif dan sosial, p_i dan p_g adalah *local best* dan *global best*, $x_i(t)$ adalah posisi partikel ke- i pada iterasi ke- t dan $\text{Rand}()$ adalah bilangan acak antara 0 sampai 1.

Selanjutnya posisi partikel adalah posisi partikel sebelumnya ditambah dengan kecepatan pergerakannya.

$$x_i(t^+) = x_i(t) + v_i(t^+) \quad (2.12)$$

Faktor kecepatan yang dihitung pada persamaan (2.11) menentukan pergerakan partikel selanjutnya. Kecepatan ini diperoleh dengan

menggunakan informasi dari partikel itu sendiri dan partikel-partikel lainnya. Informasi dari partikel itu sendiri disebut dengan komponen kognitif, di mana nilainya merupakan jarak dari posisi partikel tersebut dengan posisi terbaik yang telah diperoleh partikel tersebut selama pencarian. Posisi terbaik partikel tersebut dinamakan *local best* (p_i). Setiap partikel memiliki informasi *local best*-nya masing-masing. Dari *local best* yang telah diperoleh dari setiap partikel, tentu ada lokasi yang memiliki posisi terbaik di antara semua *local best* lainnya. Posisi terbaik ini disebut dengan nama *global best* (p_g). *Global best* inilah yang disebut dengan komponen sosial dari PSO.

Untuk mengetahui seberapa baik posisi yang telah ditemukan, maka diperlukan suatu fungsi yang dapat mengukurnya. Fungsi ini disebut dengan fungsi *fitness* $f(x)$. fungsi ini memiliki domain vektor posisi x dengan keluaran berupa nilai tertentu yang menunjukkan seberapa baik vektor posisi x . Makin baik nilainya, makin dekat posisi tersebut dengan solusi. Dengan fungsi ini, posisi-posisi yang telah ditemukan bisa dibandingkan kedekatannya dengan solusi yang dicari. Fungsi *fitness* berbeda pada tiap-tiap permasalahan bergantung pada masalah yang akan dihadapi.

Pada parameter c_1 dan c_2 , jika c_1 lebih besar maka pengaruh komponen kognitif akan lebih besar daripada komponen sosial dan begitu pula sebaliknya. Komponen kognitif yang lebih besar akan membuat partikel bergerak lebih menuju kepada *local best*-nya sendiri, sementara pengaruh komponen sosial yang besar akan membuat partikel bergerak lebih menuju kepada *global best*. Untuk permasalahan dengan solusi tunggal, pengaruh komponen sosial yang lebih besar akan memberikan hasil yang lebih efisien. Sementara pengaruh komponen kognitif yang lebih besar mungkin akan memberikan keuntungan pada permasalahan dengan banyak solusi .

Setelah kecepatan setiap partikel dihitung dengan rumus (2.11), perubahan posisi dari tiap partikel juga akan dihitung dengan menggunakan rumus (2.12). Hal ini akan dilakukan pada setiap iterasi.

Algoritma PSO bersifat konvergen dimana pada iterasi tertentu seluruh partikel akan menuju ke satu titik *global best*. Jika hal ini terjadi, maka kemungkinan pergerakan partikel-partikel tersebut tidak akan menjadi terlalu

signifikan yang membuat perhitungan PSO menjadi tidak efisien. Pada saat inilah akan ditentukan apakah pencarian akan dilanjutkan atau tidak. Sifat konvergen ini menentukan apakah solusi yang ditemukan sudah dapat dianggap berhasil atau tidak.

Bagian terakhir dari algoritma PSO adalah kondisi tertentu yang dapat menyebabkan pencarian berhenti. Terdapat beberapa kondisi yang dapat dijadikan parameter untuk membuat PSO berhenti.

1. **Iterasi yang terjadi sudah melebihi batas waktu yang ditentukan.**

Batas waktu ini menjadi hal yang penting dalam kondisi ini. Jika batas waktu terlalu singkat, pencarian akan berhenti sebelum solusi ditemukan. Jika batas waktu terlalu panjang, pada pencarian yang gagal PSO akan terus berjalan walaupun PSO sudah mencapai titik konvergen dimana pergerakan menjadi tidak signifikan.

2. **Solusi yang bisa diterima sudah ditemukan.** Jika dalam pencarian ternyata ditemukan solusi yang dapat diterima, maka pencarian akan dihentikan. Batas diterima di sini adalah ambang batas dimana solusi yang ditemukan sudah sesuai dengan apa yang diinginkan. Jika ambang batas terlalu jauh, solusi yang ditemukan mungkin tidak cukup sesuai dengan apa yang diinginkan. Sementara ambang batas yang terlalu kecil akan membuat PSO cukup kesulitan untuk menemukan solusi yang dapat memenuhinya.

3. **Tidak ada peningkatan dalam beberapa iterasi.** Terdapat beberapa cara untuk mengetahui apakah peningkatan masih cukup signifikan untuk dapat dilanjutkan atau tidak. Jika perubahan posisi partikel cukup kecil, maka dapat dipastikan PSO sudah menuju ke titik konvergen. Cara lain, jika perhitungan kecepatan pada PSO memberikan hasil yang mendekati nol maka partikel hampir tidak bergerak, dan perhitungan PSO dapat dihentikan.

4. **Radius normal dari kumpulan partikel mendekati nol.** Radius normal dihitung sebagai berikut.

$$R_{norm} = \frac{R_{max}}{diameter(S)} \quad (2.13)$$

diameter (S) merupakan diameter dari kumpulan partikel awal dan R_{max} merupakan jarak maksimum partikel dari *global best*.

$$R_{max} = \|x_m - y_g\| \quad m = \dots, n(\text{partikel}) \quad (2.14)$$

dan

$$R_{max} \geq \|x_i - y_g\| \quad \forall = \dots, n(\text{partikel}) \quad (2.15)$$

jika R_{max} mendekati nol, maka kumpulan partikel memiliki kemungkinan kecil untuk melakukan peningkatan. Perlu didefinisikan batasan cukup dekat dengan nol. Jika batasan terlalu besar, maka PSO akan berhenti sebelum solusi optimum ditemukan. Sebaliknya, jika batasan terlalu kecil, akan dibutuhkan iterasi yang lebih panjang untuk dapat mencapai batasan tersebut.

5. **Ketika perubahan solusi yang ditemukan mendekati nol.** Kondisi ini terjadi dengan melihat perubahan solusi yang telah ditemukan. Perubahan solusi dihitung dengan rumus berikut.

$$f' = \frac{f(p_g(t)) - f(p_g(t^-))}{f(p_g(t))} \quad (2.16)$$

$f(x)$ adalah fungsi *fitness* yang menghitung seberapa besar solusi telah ditemukan pada posisi x .

Jika f' terlalu kecil, maka kumpulan partikel dapat diasumsikan sudah konvergen menuju satu titik. Di sini juga dibutuhkan batasan seberapa dekat perubahan yang terjadi dengan nol. Seperti pada kondisi-kondisi sebelumnya, jika ambang batas terlalu besar, maka PSO akan berhenti sebelum solusi yang optimal ditemukan. Begitu pula sebaliknya.

Konvergen dalam PSO seperti yang telah dibahas di atas belum tentu berarti partikel sudah menemukan titik optimum (lokal atau global). Konvergen di sini berarti PSO telah mencapai titik keseimbangan (*equilibrium*). Partikel-partikel bergerak hanya menuju ke satu titik, bisa itu berupa titik optimum atau bukan [8].

BAB 3
PERANCANGAN KENDALI DAYA PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU DFIG (*DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR*)
BERBASIS KENDALI VEKTOR DAN PSO

3.1 Angin

Model kecepatan angin yang berubah-ubah terdiri dari komponen deterministik dan stokhastik kecepatan angin dimana Komponen deterministik dari kecepatan angin dinyatakan dengan kecepatan angin rata-rata dari angin untuk ketinggian tertentu sedangkan untuk komponen stokhastik dari kecepatan angin dinyatakan dengan kecepatan angin yang fluktuatif (*turbulence wind*). Persamaan matematis dari model kecepatan angin yang berubah-ubah yaitu [4]:

$$v_{wind}(t, \Psi) = v_{w-det}(\Psi) + v_{w-sto}(t, \Psi) \quad (3.1)$$

Keterangan:

- v_{w-det} : Komponen deterministik dari kecepatan angin (m/s)
- v_{w-sto} : Komponen stokhastik dari kecepatan angin (m/s)
- ψ : Posisi sudut dari rotor turbin (rad)
- t : waktu (sekon)

3.1.1 Komponen Deterministik

Komponen deterministik dari kecepatan angin hanya dipengaruhi oleh posisi sudut dari rotor turbin. Komponen ini terdiri dari kecepatan angin rata-rata, efek menara dan gesekan angin. Gesekan angin sangat penting dalam menganalisa beban dari kincir turbin angin namun model tersebut tidak ditransmisikan ke model daya elektrik sehingga dapat diabaikan. Dalam implementasi turbin angin, menara turbin merupakan salah satu hambatan yang menyebabkan arah distribusi angin berubah. Model efek menara ini hanya dibatasi pada efek angin untuk model turbin horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine/HAWT*) dan model turbin angin untuk tiga buah *blade* (*Three Bladed Wind Turbine*). Model efek menara yang digunakan merupakan fungsi *white noise generator* dengan keluaranya melalui filter kaimal dan filter harmonik yang akan dijelaskan lebih lanjut pada komponen

stokhastik. Persamaan matematis dari komponen deterministik kecepatan angin yaitu [4]:

$$v_{w-det} = v_{mean} + f_{kaimal}(\sigma)f_{harmonic}(\sigma) \quad (3.2)$$

3.1.2 Komponen Stokhastik

Komponen stokhastik dari kecepatan angin dipengaruhi oleh dua variabel yaitu waktu (s) dan posisi sudut dari rotor turbin (ψ). Untuk memodelkan komponen deterministik ini diperlukan sinyal masukan berupa sinyal derau putih (*white noise generator*).

Karakteristik komponen stokhastik dapat dimodelkan dengan menggunakan filter *kaimal spectral*. Dimana filter ini menyatakan karakteristik distribusi sebaran sinyal dalam fungsi frekuensi. Persamaan filter kaimal yang digunakan yaitu [5]:

$$\Phi(\omega) = \frac{K_V}{(1+\omega T_V)^{5/3}} \quad (3.3)$$

Keterangan:

K_V : Konstanta daya turbulen (*turbulence power*)

T_V : Konstanta frekuensi turbulensi

Seperti halnya pada komponen deterministik, filter harmonik juga digunakan untuk memperhalus keluaran dari filter kaimal. Persamaan matematis dari komponen stokhastik kecepatan angin yaitu [4]:

$$v_{w-sto} = f_{kaimal}(t, \sigma)f_{harmonic}(t, \sigma) \quad (3.4)$$

Dimana σ merupakan sinyal derau putih dan t menyatakan waktu.

Fungsi transfer yang digunakan dalam memodelkan filter harmonik dalam domain s dapat dinyatakan sebagai berikut [9]:

$$G(s) = \frac{0.2766ds+0.0307}{0.3691d^2s^2+1.7722ds+1} \quad (3.5)$$

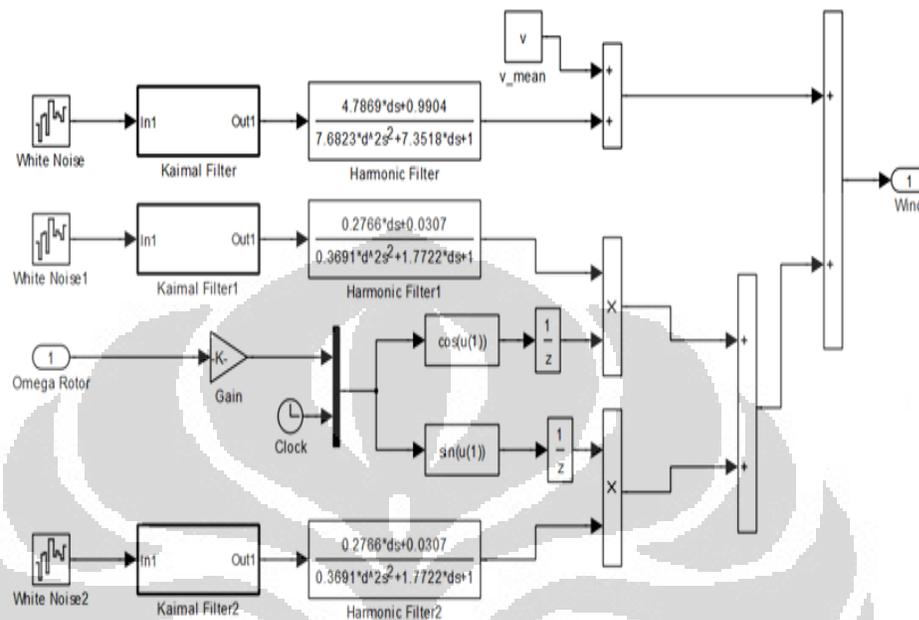
Dimana d menyatakan diameter dari kincir turbin angin.

Untuk fungsi transfer yang digunakan dalam memodelkan filter kaimal berdasarkan persamaan (3.3) dapat dinyatakan sebagai berikut [5]:

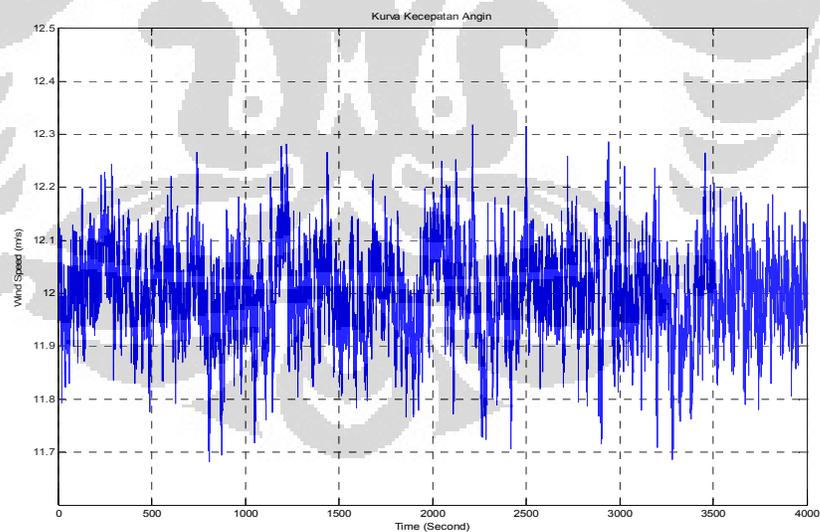
$$G(s) = \frac{0.0182c^2s^2+1.3653cs+0.9846}{1.3463c^2s^2+3.7593cs+1} \quad (3.6)$$

Dimana c menyatakan konstanta intensitas turbulensi.

Pada Gambar 3.1. ditampilkan diagram blok simulasi kecepatan angin berdasarkan persamaan (3.1) hingga (3.6) yaitu [9]:



Gambar 3.1. Diagram blok simulasi kecepatan angin



Gambar 3.2. Grafik respon keluaran blok kecepatan angin

Pada Gambar 3.2. menunjukkan respon angin pada kecepatan rata-rata 12 m/s, waktu 4000 detik, *blade diameter* 5 m dan intensitas turbulen 24 persen.

3.2 Turbin Angin

Model aerodinamik dari turbin angin dirancang untuk merepresentasikan perubahan energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik yang dihasilkan turbin angin. Konversi energi ini sangat bergantung pada besarnya koefisien daya C_p yang menyatakan persentase dari daya potensial energi angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik. Koefisien daya C_p merupakan koefisien performa yang dinyatakan dalam fungsi *tip speed ratio* (λ) dan *pitch angle* (β). Daya dan torsi mekanik dari turbin angin dapat ditentukan melalui persamaan berikut [6]:

$$P_{wtr} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (3.7)$$

$$\tau_{wtr} = \frac{1}{2\omega_m} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (3.8)$$

Keterangan:

P_{wtr} : Daya mekanik dari turbin angin (Watt)

τ_{wtr} : Torsi mekanik dari turbin angin (Nm)

ρ : Kerapatan udara (Kg/m^3)

R : *Blade radius* (m)

v : Kecepatan angin (m/s)

C_p : Koefisien daya

ω_m : Kecepatan sudut dari turbin angin (rad/s)

Untuk mengetahui karakteristik dari koefisien daya C_p , kita dapat menganalisisnya melalui kurva karakteristik C_p . Persamaan yang digunakan untuk menggambarkan kurva ini yaitu [6]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{c_5 \frac{1}{\lambda}} + c_6 \lambda \quad (3.9)$$

dengan

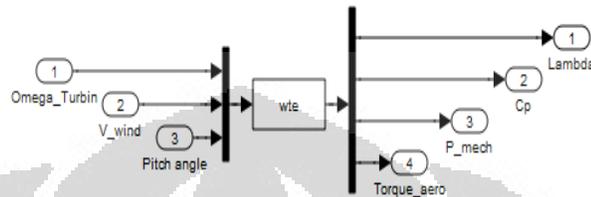
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (3.10)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v} \quad (3.11)$$

Nilai dari koefisien c_1 sampai c_6 yaitu:

$c_1 = 0.5176$; $c_2 = 116$; $c_3 = 0.4$; $c_4 = 5$; $c_5 = 21$ dan $c_6 = 0.0068$

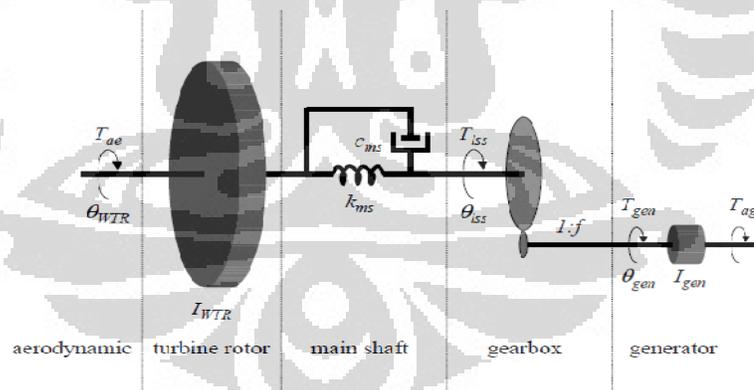
Berdasarkan persamaan (3.7) hingga (3.11) telah diaplikasikan diagram blok simulasi turbin angin dalam C-Mex yang berbasis pada blok S-Function Simulink. Nilai C_p maksimum diperoleh untuk nilai $\lambda = 12,375$ dan *pitch angle* $\beta = 0^\circ$ berdasarkan persamaan karakteristik turbin angin [6]. Gambar 3.3. menampilkan model simulasi dari turbin angin.



Gambar 3.3. Model simulasi turbin angin

3.3 Drive Train

Energi mekanik yang dihasilkan dari kecepatan angin akan menimbulkan momen inersia pada turbin angin. Pada roda gigi turbin angin akan menyebabkan munculnya gaya pada rotor generator. Model matematik yang menyatakan hubungan antara roda gigi bagian turbin angin dan bagian generator dapat diturunkan dalam model *drive train two mass*.



Gambar 3.4. Model mekanik untuk *drive train two mass*

Pada Gambar 3.4. diilustrasikan model mekanik untuk *drive train two mass* [10]. T_{ae} merupakan torsi aerodinamik yang didapat berdasarkan model turbin angin. Untuk sudut rotor turbin angin θ_{wtr} diturunkan berdasarkan kecepatan sudut rotor turbin angin ω_{wtr} . T_{ag} merupakan torsi mekanik bagian

generator dan kecepatan sudut dari generator ω_{gen} diturunkan berdasarkan posisi sudut generator θ_{gen} .

Variabel *state* pada bagian generator didapat dengan menentukan perubahan sudut antara poros rotor turbin angin dan poros utama yaitu [10]:

$$\theta_k = \theta_{wtr} - \theta_{lss} = \theta_{wtr} - \frac{\theta_{gen}}{f} \quad (3.12)$$

Nilai $1/f$ merupakan konstanta rasio perubahan yang menyatakan rasio *gear* untuk kecepatan putar poros yang rendah dan tinggi.

Persamaan variabel *state* dari model *drive train two mass* yaitu [10]:

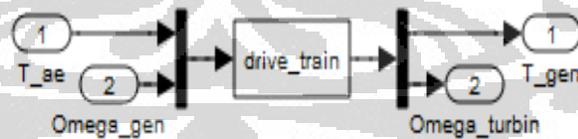
$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_k \\ \dot{\theta}_{wtr} \\ \dot{\omega}_{wtr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_{ms}}{I_{wtr}} & 0 & -\frac{c_{ms}}{I_{wtr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_{wtr} \\ \omega_{wtr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{f} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{c_{ms}}{fI_{wtr}} & \frac{1}{I_{wtr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{gen} \\ \tau_{ae} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Persamaan dari model keluarannya yaitu [10]:

$$\begin{bmatrix} \tau_{gen} \\ \theta_{wtr} \\ \omega_{wtr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{ms}}{f} & 0 & \frac{c_{ms}}{f} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \theta_{wtr} \\ \omega_{wtr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{c_{ms}}{f^2} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{gen} \\ \tau_{ae} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Dimana k_{ms} dan c_{ms} menyatakan konstanta pegas dan konstanta redaman yang diakibatkan antara poros turbin angin dan poros utama.

Dengan menggunakan persamaan (3.13) hingga persamaan (3.14) dapat diaplikasikan model simulasi *drive train two mass* dalam C-Mex S-function seperti terlihat pada Gambar 3.5.

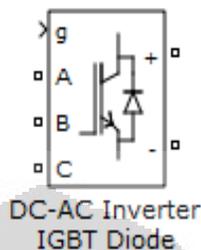


Gambar 3.5. Model simulasi *drive train two mass*

3.4 Inverter DC-AC

Inverter *DC-AC* pada sistem PLTB digunakan sebagai penyedia tegangan *AC* pada bagian kutub rotor dari *doubly fed induction generator* yaitu dengan menghubungkan bagian kutub rotor dari generator induksi dengan tegangan masukan *DC* melalui inverter *DC-AC*.

Blok dari model simulasi rangkaian inverter *DC-AC* ini dibuat dengan menggunakan IGBT *Diode* yang terdapat pada *software* MATLAB/Simulink. Gambar 3.6. menampilkan model simulasi Inverter *DC-AC*.



Gambar 3.6. Model simulasi inverter *DC-AC*

3.5 *Doubly Fed Induction Generator*

3.5.1 Kerangka Acuan

Untuk mempermudah dalam menganalisis model *Doubly Fed Induction Generator*, maka besaran-besaran yang terdapat dalam *Doubly Fed Induction Generator* ditransformasikan ke dalam bentuk kerangka acuan. Kerangka acuan ini digunakan untuk mentransformasikan besaran dalam sistem abc (sistem fasa) menjadi besaran dalam sistem berputar dq. Teori kerangka acuan menyatakan besaran-besaran pada sumbu-sumbu *quadrature* dan *direct* dengan mengasumsikan suatu nilai kecepatan putar dari kerangka acuan pada transformasinya

Persamaan yang digunakan dalam transformasi variabel 3 fasa dari suatu rangkaian yang diam ditentukan menjadi kerangka acuan yaitu [12]:

$$f_{dqs} = K_s f_{abcs} \quad (3.15)$$

Dimana:

$$f_{dqs} = \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix}; f_{abcs} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}; K_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0)$$

Dengan ξ adalah variable pengintegralan.

Jika ditulis dalam bentuk persamaan maka bentuk matriks diatas menjadi:

$$f_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[f_a \cos \theta + f_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.16)$$

$$f_q = -\sqrt{\frac{2}{3}} \left[f_a \sin \theta + f_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.17)$$

Untuk merepresentasikan variabel kerangka acuan sebagai variabel 3 fasa dapat digunakan invers dari persamaan di atas yaitu:

$$f_{abcs} = K_s^{-1} f_{dq0s} \quad (3.18)$$

dimana:

$$K_s^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

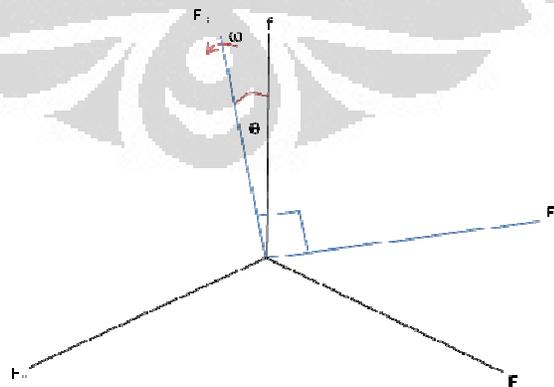
atau dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan yaitu:

$$f_a = \sqrt{\frac{2}{3}} [f_d \cos \theta - f_q \sin \theta] \quad (3.19)$$

$$f_b = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[f_d \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) - f_q \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.20)$$

$$f_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[f_d \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) - f_q \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.21)$$

Variabel f dalam persamaan tersebut dapat merepresentasikan tegangan, arus, fluks gandeng, ataupun muatan listrik. Notasi subskripsi s menunjukkan bahwa variabel, parameter dan transformasi berhubungan dengan rangkaian stasioner. Transformasi tersebut dapat digunakan untuk mentransformasikan kumparan mesin induksi yang berubah terhadap waktu.

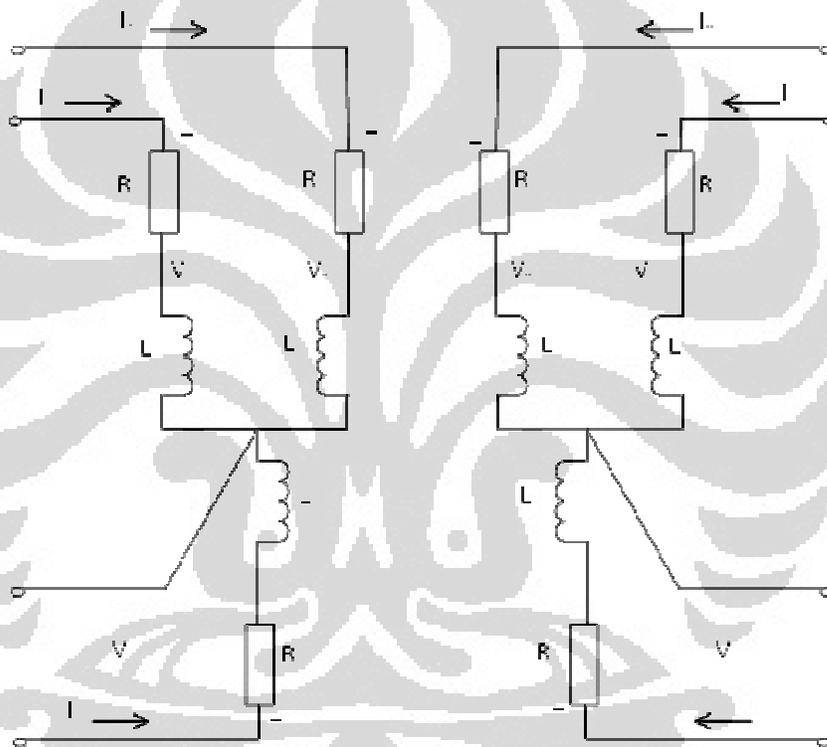


Gambar 3.7. Hubungan abc-dq

Dari Gambar 3.7., dapat diketahui bahwa persamaan transformasi kerangka acuan merupakan transformasi yang meletakkan variabel f_{qs} dan f_{ds} secara tegak lurus yang berputar dengan kecepatan sudut ω diatas f_{as} , f_{bs} , dan f_{cs} (besaran dalam fungsi waktu) yang diasumsikan sebagai variabel dalam suatu sumbu yang diam dengan beda fasa 120° .

3.5.2 Model *Doubly Fed Induction Generator*

Model *Doubly Fed Induction Generator* yang digunakan dalam permodelan ini dapat digambarkan seperti Gambar 3.8. berikut ini yaitu [13]:



Gambar 3.8. *Doubly Fed Induction Generator* 2 kutub 3 fasa dengan konfigurasi Bintang

Gambar 3.8., menggambarkan penampang stator dan rotor dari sebuah *Doubly Fed Induction Generator* 2 kutub 3 fasa dengan konfigurasi Bintang. Kumparan stator merupakan kumparan yang terdistribusi sinusoidal identik dengan induktansi L_s dan memiliki tahanan r_s . Sedangkan kumparan rotor terdiri dari tiga kumparan yang terdistribusi sinusoidal identik dengan

induktansi L_r dan hambatan r_r . Ketiga fasa yang tergambar pada gambar diatas merupakan fasa a,b,c dengan urutan positif.

Persamaan tegangan dari *Doubly Fed Induction Generator* dinyatakan dalam persamaan [1]:

$$u_{abcs} = r_s i_{abcs} + \frac{d\Psi_{abcs}}{dt} \quad (3.22)$$

$$u_{abcr} = r_r i_{abcr} + \frac{d\Psi_{abcr}}{dt} \quad (3.23)$$

Dengan notasi subskripsi s dan r mengindikasikan variabel stator dan rotor. Ψ melambangkan fluks gabungan.

Persamaan (3.22) dan (3.23) dapat dinyatakan dalam referensi sumbu dq dengan transformasi sumbu abc-dq. Persamaan tegangan *Doubly Fed Induction Generator* dalam referensi sumbu dq yaitu [1]:

$$u_{s,dq} = r_s i_{s,dq} + j\omega_e \Psi_{s,dq} + \frac{d\Psi_{s,dq}}{dt} \quad (3.24)$$

$$u_{r,dq} = r_r i_{r,dq} + j(\omega_e - \omega_r) \Psi_{r,dq} + \frac{d\Psi_{r,dq}}{dt} \quad (3.25)$$

Dengan memisahkan komponen d dan q dari persamaan tegangan stator dan rotor maka akan didapat persamaan tegangan stator dan rotor dalam komponen d dan q yaitu [1]:

$$u_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_e \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt}$$

$$u_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_e \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt}$$

$$u_{dr} = r_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt}$$

$$u_{qr} = r_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} \quad (3.26)$$

Keterangan:

ω_e : Kecepatan angular elektrik dari kerangka acuan

ω_r : Kecepatan angular dari rotor

Persamaan fluks *Doubly Fed Induction Generator* dalam referensi sumbu dq yaitu [1]:

$$\Psi_{s,dq} = L_s i_{s,dq} + L_m i_{r,dq}$$

$$L_s = L_m + L_{ls} \quad (3.27)$$

$$\Psi_{r,dq} = L_r i_{r,dq} + L_m i_{s,dq}$$

$$L_r = L_m + L_{lr} \quad (3.28)$$

Keterangan:

L_{ls} : Induktansi *leakage* stator

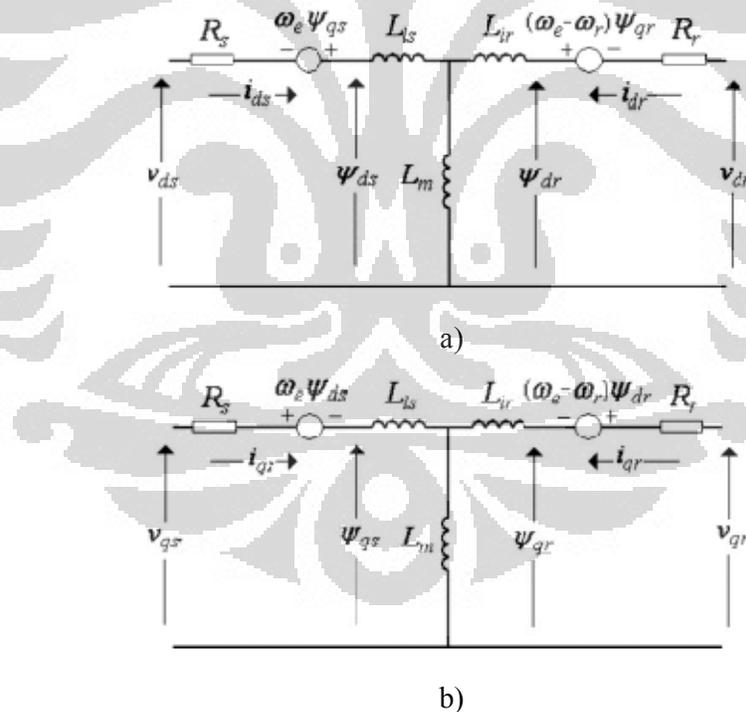
L_{lr} : Induktansi *leakage* rotor

L_m : Induktansi *magnetizing*

Persamaan fluks stator dan rotor diatas dapat dinyatakan dalam komponen d dan q yaitu [1]:

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} &= L_{ls}i_{ds} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qs} &= L_{ls}i_{qs} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Psi_{dr} &= L_{lr}i_{dr} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qr} &= L_{lr}i_{qr} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Dengan menggunakan persamaan diatas, maka dapat digambarkan rangkaian pengganti dari *Doubly Fed Induction Generator* dalam referensi kerangka acuan seperti yang terlihat pada Gambar 3.9. yaitu [14]:



Gambar 3.9. Rangkaian Ekuivalen *Doubly Fed Induction Generator* dalam sumbu dq a) Rangkaian ekuivalen dalam sumbu d. b) Rangkaian ekuivalen dalam sumbu q

Daya yang dibangkitkan dari *Doubly Fed Induction Generator* terdiri dari daya aktif dan daya reaktif dimana daya ini dibangkitkan baik itu pada bagian stator dan rotor. Dengan mengabaikan rugi-rugi daya yang diakibatkan resistansi dan induktansi stator maka dapat ditentukan persamaan daya aktif dan reaktif yang dihasilkan oleh kutub stator dalam sumbu dq yaitu [15]:

$$P_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) \quad (3.30)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) \quad (3.31)$$

Dengan cara yang sama dapat ditentukan daya yang dibangkitkan pada kutub rotor (*slip power*) dalam sumbu dq yaitu [15]:

$$P_r = \frac{3}{2}(u_{rd}i_{rd} + u_{rq}i_{rq}) \quad (3.32)$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(u_{rq}i_{rd} - u_{rd}i_{rq}) \quad (3.33)$$

Daya total yang dibangkitkan oleh *Doubly Fed Induction Generator* merupakan daya yang dibangkitkan oleh kutub stator dan disalurkan ke beban serta daya yang dikonsumsi oleh bagian kutub rotor dari beban melalui Konverter *AC-DC AC*. Dari penjelasan tersebut maka kita dapat menentukan persamaan daya total yang dibangkitkan oleh *Doubly Fed Induction Generator* yaitu [16] :

$$P_{dfig} = P_s - P_r \quad (3.34)$$

$$Q_{dfig} = Q_s - Q_r \quad (3.35)$$

Persamaan mekanis dari *Doubly Fed Induction Generator* dapat diturunkan dari persamaan torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan kutub rotor dari generator. Untuk menggerakkan kutub rotor sebesar ω_m dibutuhkan torsi total yang dihasilkan oleh torsi mekanis dan torsi listrik dimana dapat dinyatakan dalam persamaan berikut [1]:

$$\tau_e - B_m\omega_{rm} - \tau_L = J \frac{d\omega_{rm}}{dt} \quad (3.36)$$

Keterangan:

τ_e : Torsi elektromagnetis (Nm)

τ_L : Torsi mekanis mesin (Nm)

B_m : Koefisien gesek mesin (*constant*)

J : konstanta inersia mesin (Kg.m^2)

ω_{rm} : Kecepatan putar mesin (rpm)

Persamaan yang menyatakan hubungan antara perubahan sudut mesin dan kecepatan putar mesin yaitu [1]:

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_{rm}; \omega_{rm} = \frac{\omega_r}{p} \quad (3.37)$$

Dimana besar torsi elektromagnetis yang dihasilkan oleh *Doubly Fed Induction Generator* yaitu [1]:

$$\tau_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} [\omega_e (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) + (\omega_e - \omega_r) (\Psi_{dr} i_{qr} - \Psi_{qr} i_{dr})] \quad (3.38)$$

Dengan melihat persamaan fluks pada persamaan (3.27) hingga (3.29) dapat diketahui bahwa

$$(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) = -(\Psi_{dr} i_{qr} - \Psi_{qr} i_{dr}) = L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (3.39)$$

Sehingga persamaan torsi elektromagnetis mesin induksi dapat dituliskan sebagai [1],

$$\tau_e = \frac{3P}{4} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3.40)$$

3.5.3 Variabel *State Doubly Fed Induction Generator*

Variabel *state* yang digunakan pada model *Doubly Fed Induction Generator* ini yaitu arus stator dan arus rotor dalam referensi sumbu dq. Dengan mensubstitusikan persamaan fluks stator dan rotor yaitu persamaan (3.29) ke dalam persamaan tegangan stator dan rotor yaitu persamaan (3.26) maka akan didapat persamaan berikut [1]:

$$\begin{aligned} u_{ds} &= r_s i_{ds} - \omega_e (L_{ls} i_{qs} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr}) + \frac{d(L_{ls} i_{ds} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr})}{dt} \\ u_{qs} &= r_s i_{qs} + \omega_e (L_{ls} i_{ds} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr}) + \frac{d(L_{ls} i_{qs} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr})}{dt} \\ u_{dr} &= r_r i_{dr} - (\omega_e - \omega_r) (L_{lr} i_{qr} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr}) + \frac{d(L_{lr} i_{dr} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr})}{dt} \\ u_{qr} &= r_r i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) (L_{lr} i_{dr} + L_m i_{ds} + L_m i_{dr}) + \frac{d(L_{lr} i_{qr} + L_m i_{qs} + L_m i_{qr})}{dt} \end{aligned} \quad (3.41)$$

Persamaan *differential* arus stator dan rotor dalam referensi sumbu d dan q dapat diperoleh dari persamaan (3.41) dengan mengeliminasi variabel *differential* arus dari tegangan stator dan rotor untuk komponen d dan q.

Persamaan *differential* dengan variabel *state* arus stator dan arus rotor dalam referensi sumbu dq yaitu [1]:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{ds}}{dt} &= \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} [(L_s L_r - L_m^2) \omega_e i_{qs} - L_r r_s i_{ds} + L_m r_r i_{dr} \\
 &\quad + L_m (L_m i_{qs} + L_r i_{qr}) \omega_r + L_r u_{ds} - L_m u_{dr}] \\
 \frac{di_{qs}}{dt} &= \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} [-L_r r_s i_{qs} - (L_s L_r - L_m^2) \omega_e i_{ds} + L_m r_r i_{qr} \\
 &\quad - L_m (L_m i_{ds} + L_r i_{dr}) \omega_r + L_r u_{qs} - L_m u_{qr}] \\
 \frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} [L_m r_s i_{ds} + (L_s L_r - L_m^2) \omega_e i_{qr} - L_s r_r i_{dr} \\
 &\quad - L_s (L_m i_{qs} + L_r i_{qr}) \omega_r - L_m u_{ds} + L_s u_{dr}] \\
 \frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} [L_m r_s i_{qs} - L_s r_r i_{qr} - (L_s L_r - L_m^2) \omega_e i_{dr} \\
 &\quad + L_s (L_m i_{ds} + L_r i_{dr}) \omega_r - L_m u_{qs} + L_s u_{qr}]
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

Persamaan *differential* arus pada persamaan (3.42) dapat disederhanakan dengan mendefinisikan variabel σ sebagai

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \tag{3.43}$$

Sehingga akan didapat persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{ds}}{dt} &= -\frac{r_s}{\sigma L_s} i_{ds} + \frac{L_m^2}{L_s L_r \sigma} \omega_r i_{qs} + \frac{r_r L_m}{L_s L_r \sigma} i_{dr} + \frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_r i_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{ds} \\
 &\quad - \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} u_{dr} + \omega_e i_{qs} \\
 \frac{di_{qs}}{dt} &= -\frac{L_m^2}{L_s L_r \sigma} \omega_r i_{ds} - \frac{r_s}{\sigma L_s} i_{qs} - \frac{L_m}{\sigma L_s} \omega_r i_{dr} + \frac{r_r L_m}{L_s L_r \sigma} i_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{qs} \\
 &\quad - \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} u_{qr} - \omega_e i_{ds} \\
 \frac{di_{dr}}{dt} &= \frac{r_s L_m}{L_s L_r \sigma} i_{ds} - \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_r i_{qs} - \frac{r_r}{\sigma L_r} i_{dr} - \frac{1}{\sigma} \omega_r i_{qr} - \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} u_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} u_{dr} \\
 &\quad + \omega_e i_{qr} \\
 \frac{di_{qr}}{dt} &= \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_r i_{ds} + \frac{r_s L_m}{L_s L_r \sigma} i_{qs} + \frac{1}{\sigma} \omega_r i_{dr} - \frac{r_r}{\sigma L_r} i_{qr} - \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} u_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} u_{qr} \\
 &\quad - \omega_e i_{dr}
 \end{aligned}$$

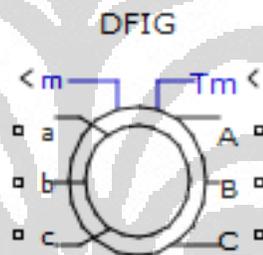
(3.44)

Persamaan *differential* untuk bagian mekanis dari *Doubly Fed Induction Generator* dapat diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan torsi elektromagnetis yaitu persamaan (3.40) ke dalam persamaan hubungan torsi mesin dan kecepatan putar yaitu persamaan (3.36) serta dengan menyatakan hubungan perubahan sudut putar dan kecepatan putar rotor maka akan didapat persamaan *differential* berikut [1] :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3P^2}{8J} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) - \frac{B_m}{J} \omega_r - \frac{P}{2J} \tau_L \quad (3.45)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (3.46)$$

Pada Gambar 3.10., menampilkan model simulasi dari *Doubly Fed Induction Generator* yang digunakan dalam simulasi dengan program MATLAB/Simulink.



Gambar 3.10. Model simulasi *Doubly Fed Induction Generator*

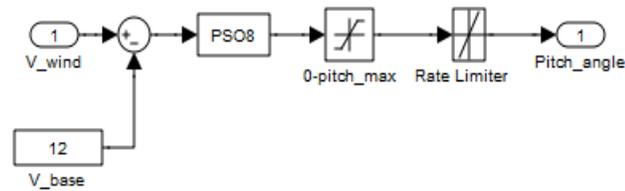
3.6 Perancangan Pengendali

3.6.1 Pitch Control

Pengendali sudut (*pitch control*) dapat dimodelkan sebagai sistem dinamik berorde satu dimana Persamaan diferensialnya adalah [5]:

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau} \beta + \frac{1}{\tau} \beta_d \quad (3.47)$$

Nilai β dan β_d adalah sudut aktual dan sudut yang diinginkan. Batas sudut untuk pitch control ini dipertahankan nilainya antara 0.01° dan -0.01° . Diagram blok pengendali sudut ditunjukkan Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Diagram blok pengendali sudut (*pitch control*)

3.6.2 Kendali Vektor

Model kendali vektor untuk sistem PLTB dengan menggunakan *Doubly Fed Induction Generator* ini diaplikasikan pada sisi rotor. Kendali vektor digunakan untuk mengendalikan daya yang dihasilkan oleh sistem agar sesuai dengan daya referensi. Pada Kendali vektor sisi rotor digunakan daya mekanik masukan ke generator sebagai daya referensi dari daya aktif stator yang dihasilkan generator sedangkan daya reaktif yang dihasilkan diusahakan nilainya seminimal mungkin.

Persamaan kendali vektor yang diaplikasikan pada sisi rotor menggunakan prinsip *Stator Flux Oriented Control* (SFOC) dimana persamaan *differential* untuk SFOC ini menggunakan variabel *state* arus rotor dan fluks stator dalam referensi sumbu dq. Persamaan *differential* untuk SFOC dapat diturunkan dengan mensubstitusikan persamaan fluks yaitu persamaan (3.29) ke persamaan tegangan stator yaitu persamaan (3.24) dan ke persamaan *differential* arus rotor yaitu persamaan (3.44).

Dari persamaan fluks stator dalam sumbu d dan q didapat persamaan arus stator dalam sumbu d dan q yaitu:

$$\begin{aligned}\Psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ i_{ds} &= \frac{\Psi_{ds} - L_m i_{dr}}{L_s}\end{aligned}\quad (3.48)$$

dan

$$\begin{aligned}\Psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ i_{qs} &= \frac{\Psi_{qs} - L_m i_{qr}}{L_s}\end{aligned}\quad (3.49)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.48) dan (3.49) ke persamaan tegangan stator (3.24) serta dengan mengasumsikan tegangan stator pada

sumbu d dan q adalah nol ($u_{sd} = 0$ dan $u_{sq} = 0$) maka akan diperoleh persamaan berikut:

$$0 = r_s \left(\frac{\Psi_{ds} - L_m i_{dr}}{L_s} \right) - \omega_e \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt}$$

$$\frac{d\Psi_{ds}}{dt} = \frac{r_s L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{r_s}{L_s} \Psi_{ds} + \omega_e \Psi_{qs} \quad (3.50)$$

dan

$$0 = r_s \left(\frac{\Psi_{qs} - L_m i_{qr}}{L_s} \right) + \omega_e \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt}$$

$$\frac{d\Psi_{qs}}{dt} = \frac{r_s L_m}{L_s} i_{qr} - \frac{r_s}{L_s} \Psi_{qs} - \omega_e \Psi_{ds} \quad (3.51)$$

Persamaan *differential* arus rotor untuk sumbu d dan q diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (3.48) dan (3.49) ke persamaan *differential* arus rotor pada persamaan (3.44) sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{r_s L_m}{L_s L_r \sigma} \left(\frac{\Psi_{ds} - L_m i_{dr}}{L_s} \right) - \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_r \left(\frac{\Psi_{qs} - L_m i_{qr}}{L_s} \right) - \frac{r_r}{\sigma L_r} i_{dr} - \frac{1}{\sigma} \omega_r i_{qr}$$

$$- \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} u_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} u_{dr} + \omega_e i_{qr}$$

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left[- \left(r_r + r_s \frac{L_m^2}{L_s^2} \right) i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{qr} + \frac{r_s L_m}{L_s^2} \Psi_{ds} \right.$$

$$\left. - \frac{L_m}{L_s} \omega_r \Psi_{qs} - \frac{L_m}{L_s} u_{ds} + u_{dr} \right] \quad (3.52)$$

dan

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_r \left(\frac{\Psi_{ds} - L_m i_{dr}}{L_s} \right) + \frac{r_s L_m}{L_s L_r \sigma} \left(\frac{\Psi_{qs} - L_m i_{qr}}{L_s} \right) + \frac{1}{\sigma} \omega_r i_{dr} - \frac{r_r}{\sigma L_r} i_{qr}$$

$$- \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} u_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} u_{qr} - \omega_e i_{dr}$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} \left[- (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{dr} - \left(r_r + r_s \frac{L_m^2}{L_s^2} \right) i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \omega_r \Psi_{ds} \right.$$

$$\left. + \frac{r_s L_m}{L_s^2} \Psi_{qs} - \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} u_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} u_{qr} \right] \quad (3.53)$$

Pengendali PI hanya dapat digunakan untuk mengendalikan sistem linear, oleh karena itu, ketidaklinearan dari sistem dihilangkan dengan cara

menambahkan *decoupling* pada sistem. Proses penurunan persamaan *decoupling* dalam skripsi ini didapat dengan mensubstitusikan persamaan *differential* dari model mesin induksi dengan orientasi SFOC yang telah didapat dari persamaan (3.50) hingga (3.53).

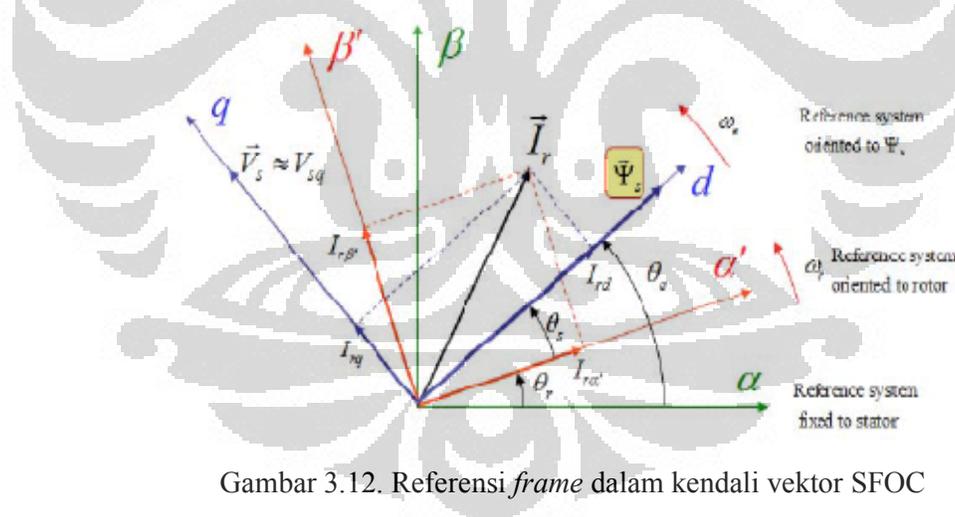
Pada kendali vektor dengan orientasi pengendali SFOC, ketika vektor telah terorientasi dengan baik maka fluks stator akan searah dengan *frame* sumbu d. Hal ini mengakibatkan fluks stator dalam referensi sumbu q akan bernilai nol ($\psi_{qs} = 0$).

Dengan mensubstitusikan ($\psi_{qs} = 0$) ke persamaan fluks stator yaitu persamaan (3.29) maka akan didapat persamaan berikut [2]:

$$\begin{aligned}\Psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ i_{ds} &= \frac{\Psi_{ds}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr}\end{aligned}\quad (3.54)$$

Dan

$$\begin{aligned}0 &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ i_{qs} &= -\frac{L_m}{L_s} i_{qr}\end{aligned}\quad (3.55)$$



Gambar 3.12. Referensi *frame* dalam kendali vektor SFOC

Pada Gambar 3.12. yaitu gambar referensi *frame* dalam kendali vektor SFOC dapat dilihat bahwa pengendalian arus stator dimungkinkan dengan mengendalikan arus rotor dimana hal ini dapat direpresentasikan dalam persamaan (3.54) dan (3.55). Untuk mendapatkan arus rotor dalam sumbu dq yang telah terorientasi terhadap fluks stator maka arus rotor yang terorientasi

terhadap *frame* rotor harus ditransformasikan ke *frame* fluks stator dimana sudut antara *frame* fluks stator dan arus rotor adalah sudut slip (θ_s).
Persamaan untuk menentukan sudut slip yaitu:

$$\theta_s = \int (\omega_e - \omega_r) dt \quad (3.56)$$

Dari persamaan (3.56) dapat diketahui bahwa sudut slip merupakan integral dari perbedaan antara kecepatan putar elektrik (ω_e) dan kecepatan putar rotor (ω_r).

Persamaan untuk menentukan kecepatan putar elektrik diturunkan dari persamaan tegangan stator dalam sumbu q dengan mengasumsikan fluks stator dan tegangan stator dalam referensi sumbu q bernilai nol ($\psi_{qs} = 0$) dan ($u_{qs} = 0$). yaitu sebagai berikut:

$$0 = r_s i_{qs} + \omega_e \Psi_{ds} + 0$$

$$\omega_e = -\frac{r_s i_{qs}}{\Psi_{ds}} \quad (3.57)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.55) ke persamaan (3.57) maka akan didapat persamaan berikut:

$$\omega_e = \frac{r_s L_m}{L_s \Psi_{ds}} i_{qr} \quad (3.58)$$

Persamaan untuk menentukan fluks stator dalam sumbu d diturunkan dari persamaan fluks stator sumbu d dan tegangan stator sumbu q serta dengan mendefinisikan *time* konstan stator ($T_s = L_s/r_s$) maka akan didapat persamaan berikut:

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\Psi_{ds} - L_s i_{ds} = L_m i_{dr}$$

$$\Psi_{ds} - L_s \frac{1}{-r_s} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} = L_m i_{dr} \quad (3.59)$$

Atau dapat dinyatakan dalam fungsi *Laplace* sebagai,

$$\Psi_{ds} (1 + T_s s) = L_m i_{dr}$$

$$\Psi_{ds} = \frac{L_m i_{dr}}{(1 + T_s s)} \quad (3.60)$$

Dengan mensubstitusikan $\psi_{qs} = 0$ ke persamaan (3.50) dan (3.51) maka akan didapat persamaan berikut:

$$\frac{d\Psi_{ds}}{dt} = \frac{r_s}{L_s} (L_m i_{dr} - \Psi_{ds}) \quad (3.61)$$

$$0 = \frac{r_s L_m}{L_s} i_{qr} - \omega_e \Psi_{ds} \quad (3.62)$$

Persamaan *decoupling* tegangan untuk referensi sumbu d didapat dengan mensubstitusikan $\psi_{qs} = 0$ dan persamaan (3.61) ke persamaan (3.52) seperti diturunkan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} &= \left[-r_r i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{qr} - r_s \frac{L_m^2}{L_s^2} i_{dr} + \frac{r_s L_m}{L_s^2} \Psi_{ds} - \frac{L_m}{L_s} u_{ds} \right. \\ &\quad \left. + u_{dr} \right] \\ \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} &= \left[-r_r i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{qr} - \frac{L_m}{L_s} \left(r_s \frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{r_s}{L_s} \Psi_{ds} \right) - \frac{L_m}{L_s} u_{ds} \right. \\ &\quad \left. + u_{dr} \right] \\ \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} &= \left[-r_r i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{qr} - \frac{L_m}{L_s} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \frac{L_m}{L_s} u_{ds} + u_{dr} \right]\end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan tegangan stator pada sumbu d adalah nol ($u_{ds} = 0$) dan mengelompokkannya menjadi bagian linear dan tidak linear maka akan didapat persamaan berikut:

$$u_{dr} = \left[r_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} \right] + \left[-(\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \right] \quad (3.63)$$

Persamaan tegangan dalam referensi sumbu d yang hanya terdiri bagian tidak linear yaitu:

$$u_{dr} = \left[-(\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \right] \quad (3.64)$$

Persamaan *decoupling* tegangan untuk referensi sumbu q diperoleh dengan mensubstitusikan $\psi_{qs} = 0$ dan persamaan (3.62) ke persamaan (3.53) seperti diturunkan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned}\sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} &= \left[-r_r i_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{dr} - \frac{L_m}{L_s} \omega_e \Psi_{ds} + \frac{L_m}{L_s} \omega_r \Psi_{ds} - \frac{L_m}{L_s} u_{qs} \right. \\ &\quad \left. + u_{qr} \right] \\ \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} &= \left[-r_r i_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{dr} - \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds} (\omega_e - \omega_r) - \frac{L_m}{L_s} u_{qs} \right. \\ &\quad \left. + u_{qr} \right]\end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan tegangan stator pada sumbu q adalah 0 ($u_{qs} = 0$) dan me ngelompokkannya menjadi bagian linear dan tidak linear maka akan didapat persamaan berikut:

$$u_{qr} = \left[r_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} \right] + \left[(\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds} (\omega_e - \omega_r) \right] \quad (3.65)$$

Persamaan tegangan dalam referensi sumbu q yang hanya terdiri bagian tidak linear yaitu:

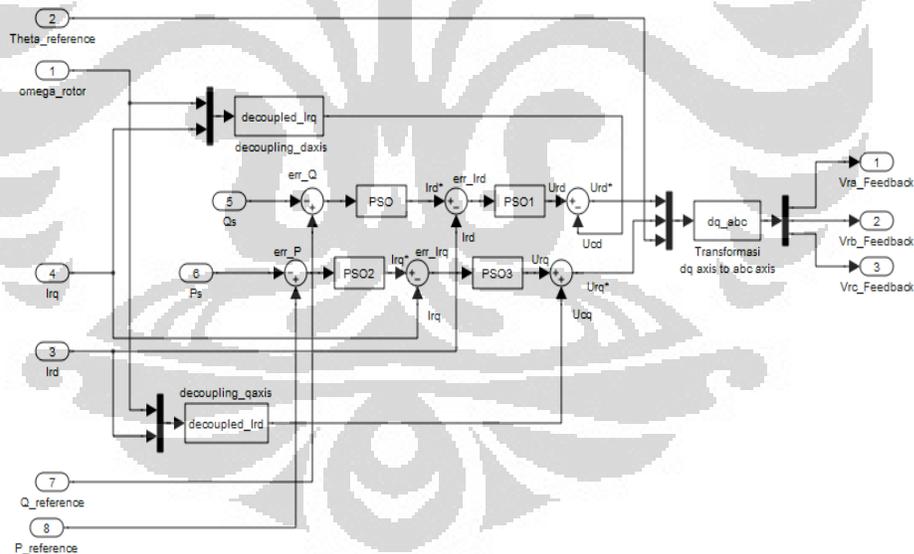
$$u_{qr} = \left[(\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \Psi_{ds} (\omega_e - \omega_r) \right] \quad (3.66)$$

Pada perancangan blok simulasi dari *vector control* untuk bagian rotor ini diasumsikan perubahan fluks stator dalam referensi sumbu d cukup kecil sehingga dapat diabaikan ($d\Psi_{ds}/dt = 0$). Pendekatan ini akan berakibat nilai dari fluks stator dalam referensi sumbu d adalah nol ($\Psi_{ds} = 0$) sehingga didapat persamaan pengendali tegangan untuk komponen tidak linear yaitu [2]:

$$u_{dr} = [-(\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{qr}] \quad (3.67)$$

$$u_{qr} = [(\omega_e - \omega_r) \sigma L_r i_{dr}] \quad (3.68)$$

Dari persamaan (3.67) dan (3.68) telah dirancang blok simulasi dari kendali vektor untuk bagian rotor seperti terlihat pada Gambar 3.13., yaitu:

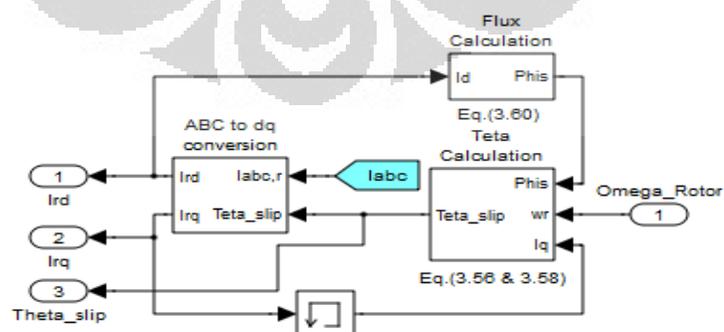


Gambar 3.13. Diagram blok kendali vektor sisi rotor

Proses pengendalian dari blok kendali vektor sisi rotor yaitu pada bagian *decoupling* komponen sumbu d digunakan referensi masukan berupa daya reaktif acuan ($Q_{reference}$) yang nilainya seminimal mungkin dan daya reaktif umpan balik diperoleh dari daya reaktif stator (Q_s). Hasil *error* antara kedua

masukan tersebut akan dikendalikan dengan pengendali PID berbasis algoritma PSO untuk memberikan arus rotor acuan sumbu d (I_{rd}^*). Tegangan rotor sumbu d (U_{rd}) didapat dengan mengendalikan *error* antara I_{rd}^* dan arus rotor sumbu d dari generator (I_{rd}) menggunakan pengendali PID berbasis algoritma PSO. Hasil Tegangan rotor sumbu d (U_{rd}) kemudian akan dipisahkan komponen tidak linearnya dengan penambahan *decoupling* tegangan komponen sumbu d (U_{cd}) sehingga didapatkan referensi U_{rd}^* . Untuk *decoupling* komponen sumbu q, referensi masukan diambil dari daya mekanik masukan generator dengan umpan balik adalah daya aktif stator (P_s). *Error* antara keduanya akan dikendalikan dengan pengendali PID berbasis algoritma PSO untuk memberikan arus rotor acuan sumbu q (I_{rq}^*). Nilai I_{rq}^* akan diumpan balik dengan arus rotor sumbu q dari generator (I_{rq}) untuk menentukan *error* yang akan dikendalikan oleh pengendali PID berbasis algoritma PSO agar didapatkan tegangan rotor sumbu q (U_{rq}). Nilai tegangan rotor acuan sumbu q (U_{rq}^*) didapat dengan menambahkan *decoupling* tegangan komponen sumbu q (U_{cq}) pada tegangan rotor sumbu q (U_{rq}). Tegangan U_{rd}^* dan U_{rq}^* akan ditransformasikan ke dalam sumbu abc untuk kemudian dimodulasi agar mendapatkan pulsa referensi yang akan dijadikan referensi pulsa untuk PWM inverter bagian rotor.

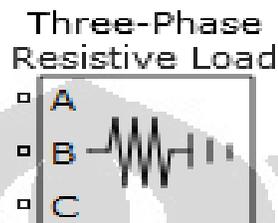
Penentuan sudut slip referensi yang diperlukan sebagai referensi sudut untuk transformasi sumbu dari dq ke abc serta sebaliknya menggunakan persamaan (3.56) hingga (3.60). Pada Gambar 3.14., menampilkan diagram blok simulasi dari penentuan sudut slip referensi yang digunakan dalam simulasi dengan program MATLAB/Simulink yaitu:



Gambar 3.14. Diagram blok simulasi penentuan sudut slip referensi

3.7 Model Beban

Permodelan dari beban ini digunakan untuk merepresentasikan penggunaan daya yang dihasilkan oleh generator yaitu untuk beban daya aktif. Pada Gambar 3.15., menampilkan diagram blok simulasi dari model Beban yang digunakan dalam simulasi dengan program MATLAB/Simulink.



Gambar 3.15. Model simulasi beban

3.8 Tuning Pengendali PID dengan *Particle Swarm Optimization*

3.8.1 Algoritma *Particle Swarm Optimization*

PSO yang diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995 merupakan suatu teknik komputasi yang evolusioner dan dikembangkan berdasarkan simulasi dari kebiasaan kawanan burung (*bird flocking*). Prosedur pencarian untuk teknik komputasi PSO ini dapat dirangkum sebagai berikut [17], [18]:

Tahap 1: Inisialisasi

Tahap ini digunakan untuk mengumpulkan suatu populasi dari partikel dalam suatu dimensi permasalahan yang akan menjadi kandidat vektor solusi dari permasalahan.

Tahap 2: Evaluasi

Pada tahap ini dilakukan estimasi nilai *fitness* dari tiap partikel dimana digunakan untuk mengevaluasi performa dari tiap partikel tersebut.

Tahap 3: *Stopping criteria*

Tahap untuk *stopping criteria* akan menentukan kondisi dari iterasi dalam menentukan nilai *fitness* yang sesuai dengan hasil dari tahap evaluasi. Kondisi dari *stopping criteria* harus mampu menentukan nilai *local best* dan

global best dimana dapat dilakukan perbandingan untuk tiap iterasi sebagai berikut:

- Bandingkan antara posisi tiap partikel saat ini (x_i) dengan posisi terbaik partikel yang dihasilkan oleh fungsi *fitness* ($x_{i,pbest}$). Jika posisi partikel saat ini lebih baik dari posisi yang dihasilkan oleh fungsi *fitness* maka $x_{i,pbest} = x_i$
- Jika $x_{i,pbest}$ hasil perbandingan diatas telah tersimpan maka dapat dilakukan perbandingan terhadap posisi partikel terbaik *global* (*swarm best position*) yang dihasilkan oleh fungsi *fitness* (x_{gbest}). Jika $x_{i,pbest}$ lebih baik dari x_{gbest} maka $x_{gbest} = x_{i,pbest}$.

Tahap 4: *Update* posisi partikel dan kecepatan pergerakannya

Bedasarkan nilai yang didapat dari fungsi *fitness*, operator yang berbeda dapat digunakan dalam algoritma untuk melakukan *update* vektor posisi dari partikel sehingga dapat dilakukan pencarian di ruang yang berbeda dalam dimensi permasalahan.

Persamaan yang digunakan dalam proses *update* posisi partikel dan kecepatan pergerakannya untuk algoritma PSO yaitu [17]:

$$v_{i,j}(t+1) = w(t)v_{i,j}(t) + c_1r_1(x'_{i,j} - x_{i,j}(t)) + c_2r_2(\ddot{x}_j - x_{i,j}(t)) \quad (3.69)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (3.70)$$

Dimana $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$; n merupakan indeks yang menyatakan partikel dalam tiap populasi dan m merupakan indeks yang menyatakan individu dari partikel. $v_{i,j}(t)$ dan $v_{i,j}(t+1)$ adalah kecepatan pergerakan dari tiap individu dari partikel saat waktu t dan $t+1$. w adalah faktor bobot dari kecepatan pergerakan dan c_1 serta c_2 adalah konstanta percepatan. r_1 dan r_2 adalah bilangan acak antara 0 dan 1. $x_{i,j}(t)$ dan $x_{i,j}(t+1)$ adalah vektor posisi dari tiap individu dari partikel saat waktu t dan $t+1$. Untuk $x_{i,j}^*$ adalah vektor posisi terbaik yang dicapai oleh individu dalam suatu partikel tertentu atau disebut juga *local best* (*pbest*) sedangkan untuk x_j^{**} adalah vektor posisi terbaik yang dicapai oleh partikel dalam suatu populasi tertentu atau disebut juga sebagai *global best* (*gbest*).

3.8.2 *Tuning* Parameter Pengendali PID dengan PSO

Pada skripsi ini, algoritma PSO diaplikasikan untuk menentukan nilai optimal dari parameter pengendali yang digunakan dalam mengendalikan sistem PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG). Penentuan parameter yang tepat sangat penting dalam proses *tuning* pengendali dimana proses ini diharapkan mampu memberikan tegangan rotor referensi yang sesuai untuk regulator tegangan. Prosedur dari *tuning* parameter pengendali PID dengan PSO ini yaitu:

Tahap 1: Inisialisai

Pada bagian 3.6.2 telah dijelaskan bahwa digunakan kendali vektor untuk bagian rotor dimana kendali vektor ini disusun oleh pengendali PID dengan referensi acuan tertentu sehingga sinyal masukan dapat diatur agar sesuai dengan referensi acuan. *Error* antara referensi acuan dengan sinyal masukan diharapkan mampu dikompensasi oleh pengendali PID sehingga didapat sinyal keluaran yang sesuai. Penentuan parameter dari pengendali PID dari kendali vektor dalam skripsi ini digantikan dengan menggunakan algoritma PSO sehingga pengendali dapat menentukan secara *self tuning* parameter yang sesuai berdasarkan *error* yang ada. Pada sistem pengendali PLTB dengan *doubly fed induction generator* (DFIG) digunakan 5 buah pengendali PID dimana 4 buah pengendali PID diaplikasikan di pengendali bagian rotor dan 1 buah digunakan pada bagian pengendali *pitch*. Dari data tersebut diperlukan inisialisai parameter gain dari masing-masing pengendali yaitu gain proporsional (K_p), gain differential (K_d) dan gain integral (K_i) sehingga total parameter yang harus dilakukan inisialisai untuk bagian rotor dan beban yaitu 15 parameter.

Dalam dimensi pencarian, n partikel $\{X_i(0), i = 1, 2, \dots, n\}$ dapat diinisialisasi secara acak dimana $X_i(0) = \{x_{i,j}(0), j = 1, 2, \dots, m\}$ adalah inisialisasi pencarian vektor posisi partikel dalam suatu populasi dan merupakan titik pencarian pertama. Inisialisasi dari kecepatan pergerakan $V(0) = \{v_{i,j}(0), i = 1, 2, \dots, n ; j = 1, 2, \dots, m\}$ dapat diinisialisasi secara acak.

Untuk c_1 , c_2 dan w diinisialisasi dengan suatu bilangan konstanta sedangkan untuk R_1 dan R_2 diinisialisasi dengan bilangan acak.

Tahap 2: Evaluasi

Proses evaluasi dengan menggunakan fungsi *fitness* dari suatu populasi dari partikel dapat dinyatakan sebagai fungsi berikut [17]:

$$F = \max\{i_r\} \quad (3.71)$$

Dimana F adalah fungsi *fitness* dan i_r adalah arus rotor. Tujuan dari fungsi *fitness* ini yaitu untuk meminimalkan nilai F agar dapat mengurangi nilai maksimum dari arus rotor pada kondisi dipengaruhi *disturbance*. Berdasarkan fungsi *fitness*, *local best* dan *global best* dapat ditentukan sehingga tujuan diatas dapat tercapai.

Tahap 3: *Stopping criteria*

Jika *stopping criteria* telah terpenuhi maka proses iterasi dapat dihentikan dan dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya. *Stopping criteria* dapat berupa nilai maksimal iterasi atau fungsi *fitness* yang dihasilkan dari *global best* telah lebih kecil dari yang diharapkan (bernilai negatif).

Tahap 4: *Update* posisi partikel dan kecepatan pergerakannya

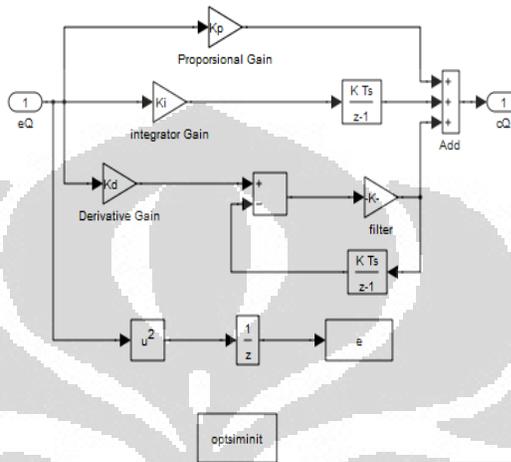
Proses *update* untuk vektor kecepatan pergerakan dari partikel yaitu [17]:

$$\begin{aligned} \text{if } v_{i,j}(t+1) > v_{j,max} \text{ then } v_{i,j}(t+1) &= v_{j,max} \\ \text{if } v_{i,j}(t+1) < v_{j,min} \text{ then } v_{i,j}(t+1) &= v_{j,min} \end{aligned} \quad (3.72)$$

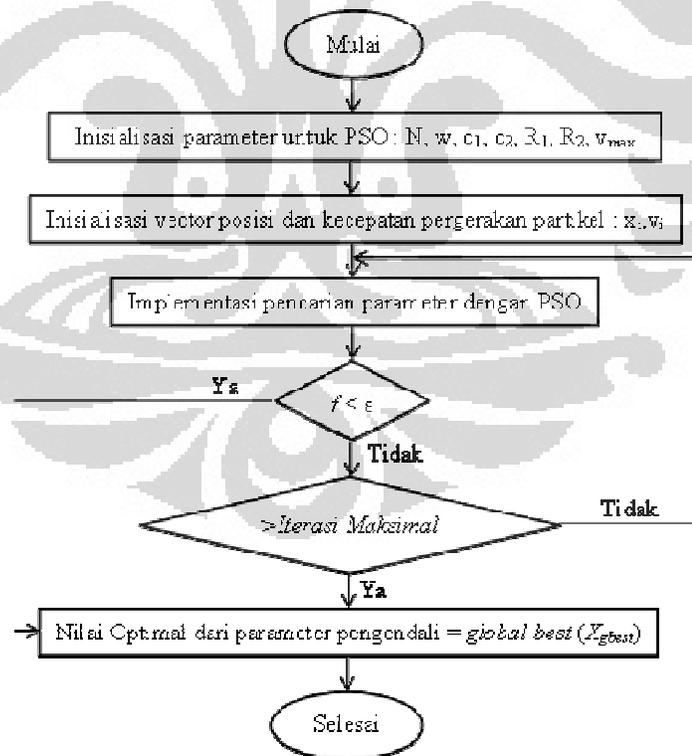
Sedangkan untuk proses *update* untuk vektor posisi partikel yaitu [17]:

$$\begin{aligned} \text{if } x_{i,j}(t+1) > x_{j,max} \text{ then } x_{i,j}(t+1) &= x_{j,max} \\ \text{if } x_{i,j}(t+1) < x_{j,min} \text{ then } x_{i,j}(t+1) &= x_{j,min} \end{aligned} \quad (3.73)$$

pada Gambar 3.16. ditampilkan model simulasi dari model pengendali PID dengan algoritma PSO dan pada Gambar 3.17. dapat dilihat diagram alir dari algoritma yang digunakan dalam proses *tuning* pengendali PID dengan algoritma PSO.



Gambar 3.16. Diagram blok simulasi model pengendali PID dengan PSO



Gambar 3.17. Flowchart algoritma tuning pengendali PID dengan PSO

BAB 4

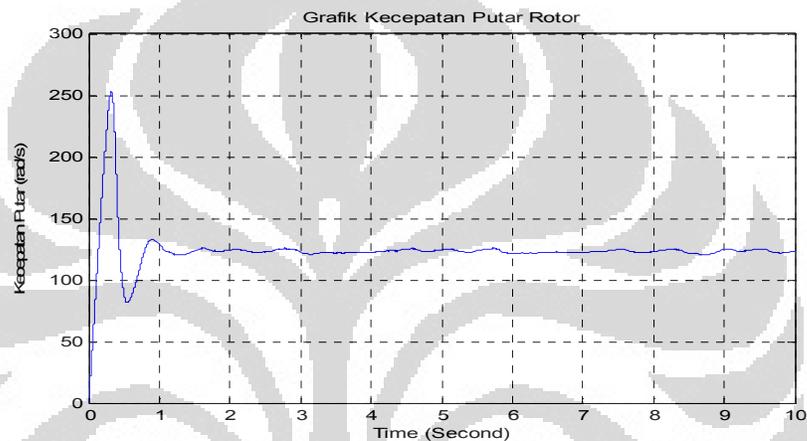
SIMULASI DAN ANALISIS HASIL

Bab ini akan menjelaskan hasil simulasi perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) Berbasis Kendali Vektor dan *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang telah dilakukan. Hasil ini kemudian akan dianalisis sehingga dapat diketahui karakteristik performa pengendali yang telah dirancang.

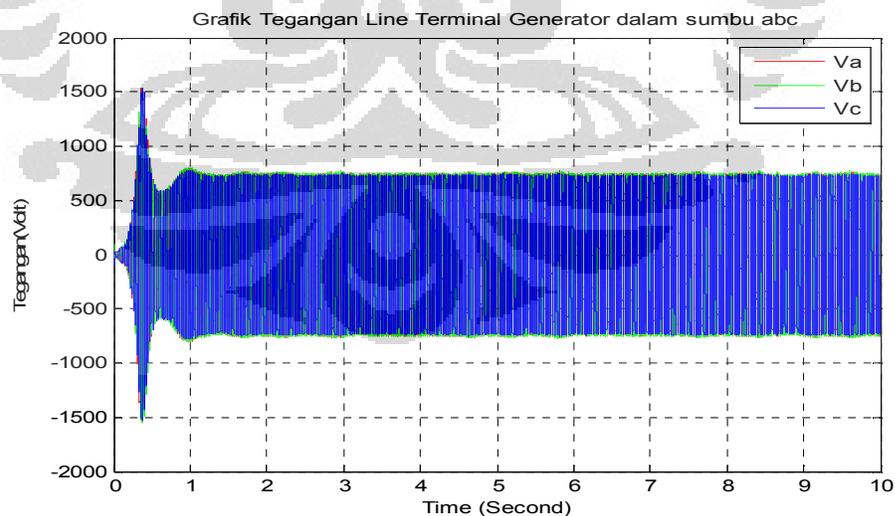
Proses simulasi sistem PLTB dijalankan dalam tiga tahap utama yaitu simulasi sistem PLTB dengan torsi masukan ke generator dalam kondisi konstan, simulasi sistem PLTB dengan torsi masukan ke generator dalam kondisi berubah-ubah dan simulasi sistem PLTB dengan torsi masukan dipengaruhi oleh torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin. Tujuan dari pengendalian untuk simulasi sistem PLTB dengan torsi masukan ke generator dalam kondisi konstan yaitu untuk melihat karakteristik daya yang dihasilkan ketika kondisi torsi masukan sistem dalam keadaan konstan. Skema simulasi yang kedua dilakukan dengan memberikan torsi masukan ke generator berubah-ubah dimana tujuan dari skema simulasi ini yaitu skema kendali vektor yang telah dirancang mampu mempertahankan daya aktif stator agar sesuai dengan daya mekanik masukan dan meminimalkan daya reaktif. Skema simulasi yang ketiga dilakukan dengan menghubungkan torsi masukan generator ke sistem turbin angin. Perubahan kecepatan angin yang berubah-ubah akan menyebabkan torsi pada *drive train* yang ditransmisikan ke generator berubah-ubah. Tujuan dari pengendali yang digunakan pada simulasi ini yaitu perubahan energi mekanik dari sistem turbin angin dapat secara maksimal dikonversi menjadi daya aktif stator dari generator dan meminimalkan konsumsi daya reaktif oleh generator. Analisis terhadap performa penentuan parameter pengendali PID dengan menggunakan algoritma PSO dilakukan dengan membandingkan kinerja yang diperoleh untuk proses *tuning* dengan *PI tuner* yang terdapat pada fitur pengendali PI dari *software* MATLAB/Simulink dan *self tuning* dengan algoritma PSO.

4.1 Analisis Hasil Simulasi Sistem PLTB Untuk Torsi Konstan

Pada simulasi sistem PLTB untuk kondisi konstan digunakan torsi masukan ke generator sebesar 35 Nm dengan waktu simulasi selama 10 sekon. Beban resistif murni 2000 Watt dengan konfigurasi bintang dihubungkan ke bagian kutub stator melalui kapasitor eksitasi sebesar 10 μ F dimana kapasitor eksitasi ini digunakan sebagai penyeimbang ketiga fasanya. Grafik kecepatan putar rotor untuk torsi masukan ke generator dalam kondisi konstan dapat dilihat pada Gambar 4.1. yaitu:



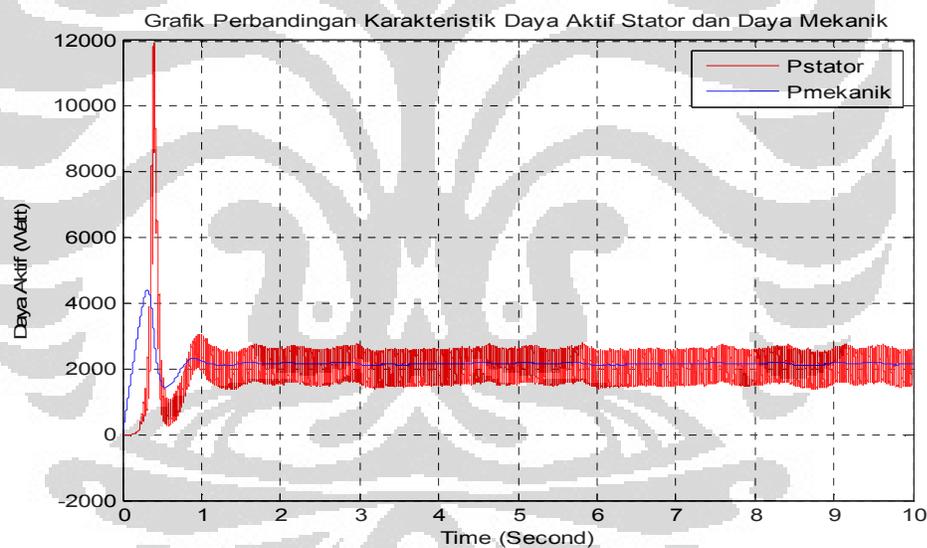
Gambar 4.1. Grafik kecepatan putar rotor dari generator untuk torsi konstan



Gambar 4.2. Grafik tegangan *line* terminal sisi kutub stator generator untuk torsi konstan

Pada Gambar 4.2. dapat dilihat bahwa tegangan *line* terminal fluktuatif untuk kondisi awal dimana respon yang sama juga terjadi pada kecepatan putar rotor. Ketika tegangan telah dibangkitkan seluruhnya oleh generator maka respon tegangan akan mencapai *peak* maksimum yaitu dapat dilihat pada grafik, tegangan *peak* mencapai 1500 Volt. Setelah mencapai titik maksimumnya maka respon tegangan akan beresilasi selama kondisi transiennya dan menuju titik kestabilannya yaitu 740 Volt.

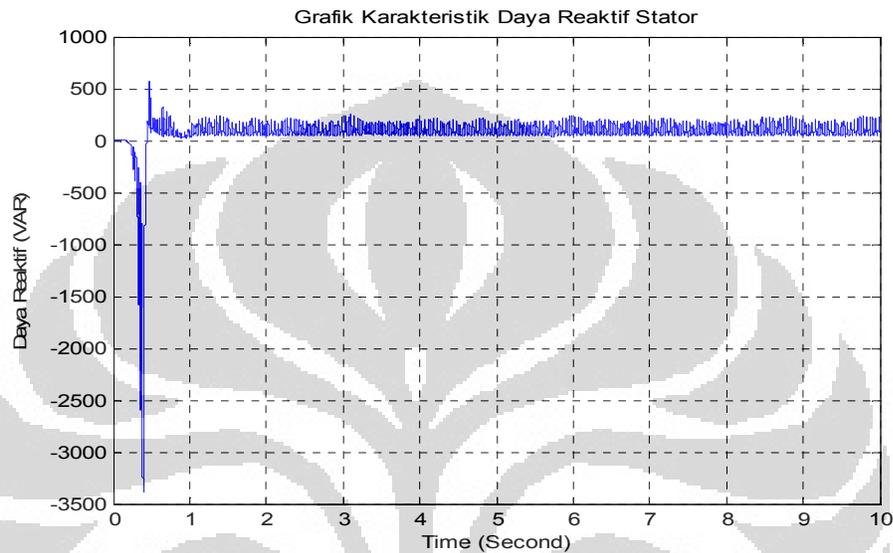
Karakteristik performa dari kendali vektor yang telah diaplikasikan pada skema simulasi sistem PLTB untuk torsi masukan ke generator dalam kondisi konstan dapat dilihat melalui karakteristik daya aktif pada kutub stator dari generator dan daya mekanik masukan. Pada Gambar 4.3. digambarkan karakteristik performa kendali vektor dilihat dari daya aktif dan daya mekanik yang dihasilkan oleh sistem PLTB.



Gambar 4.3. Grafik karakteristik daya aktif kutub stator dan daya mekanik untuk torsi konstan

Dari Gambar 4.3. dapat diketahui bahwa kendali vektor sisi rotor telah mampu mempertahankan daya aktif kutub stator untuk mengikuti daya referensinya yaitu daya mekanik untuk kondisi torsi konstan. Grafik berwarna biru merupakan grafik untuk daya mekanik yang dihasilkan oleh torsi masukan ke generator dan kecepatan putar mekanik. Grafik berwarna merah

merupakan grafik dari daya aktif kutub stator dari generator. Pada respon karakteristik daya aktif kutub stator dari generator terjadi *ripple* yang cukup besar dimana nilainya mencapai 550 Watt. Hal ini dapat disebabkan oleh efek *switching* dari *inverter* yang digunakan pada kutub rotor sehingga mempengaruhi daya elektrik yang dihasilkan oleh kutub stator.

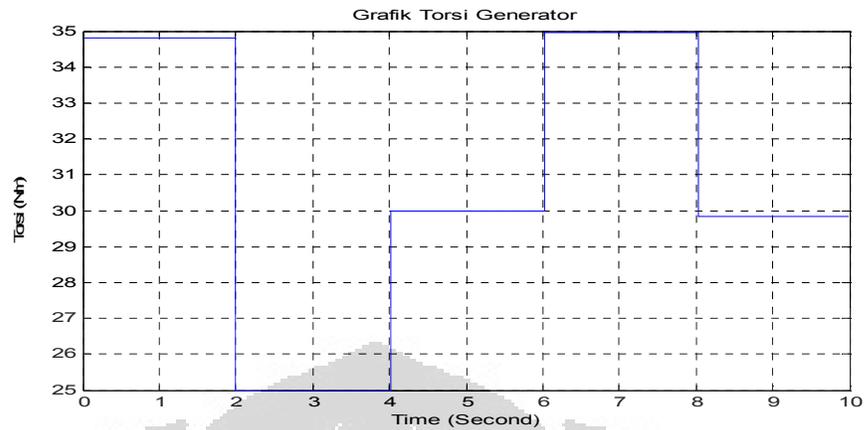


Gambar 4.4. Grafik daya reaktif kutub stator untuk torsi konstan

Pada Gambar 4.4. dapat dilihat grafik karakteristik daya reaktif kutub stator dari generator untuk kondisi torsi konstan dimana dapat dilihat pada kondisi awal pembangkitan dibutuhkan daya reaktif yang cukup besar. Untuk kondisi tunak dari daya reaktif kutub stator yaitu 50 VAR dimana nilai referensi daya reaktif dari pengendali yaitu 0 VAR. Dari hasil yang didapat untuk daya reaktif terjadi perbedaan antara referensi dan daya aktual dimana nilai ini dipengaruhi oleh penggunaan kapasitor eksitasi yang dipasang diantara generator dan beban.

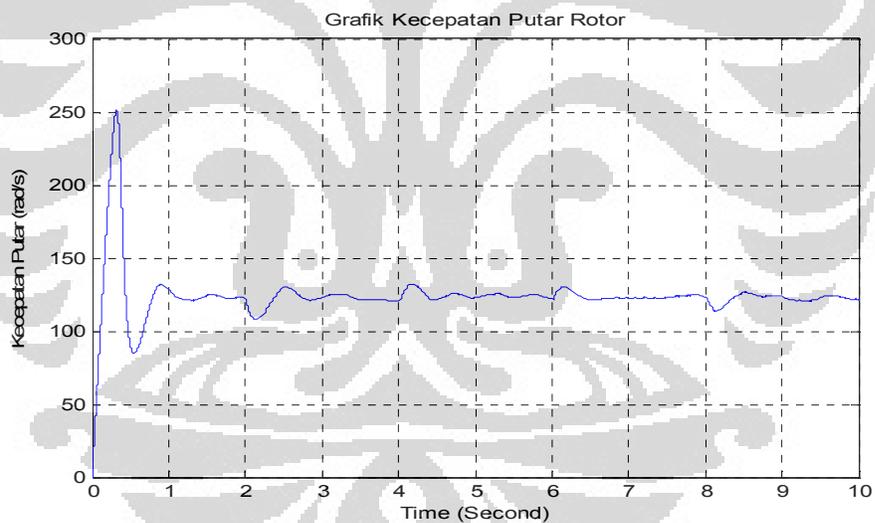
4.2 Analisis Hasil Simulasi Sistem PLTB Untuk Torsi Berubah-ubah

Pada simulasi sistem PLTB untuk kondisi torsi berubah-ubah dilakukan perubahan torsi setiap 2 sekon selama 10 sekon waktu simulasi seperti terlihat pada Gambar 4.5. yaitu grafik torsi masukan ke generator untuk kondisi torsi berubah-ubah.



Gambar 4.5. Grafik torsi masukan ke generator berubah-ubah

Grafik kecepatan putar rotor untuk torsi masukan ke generator dalam kondisi berubah-ubah dapat dilihat pada Gambar 4.6. yaitu:

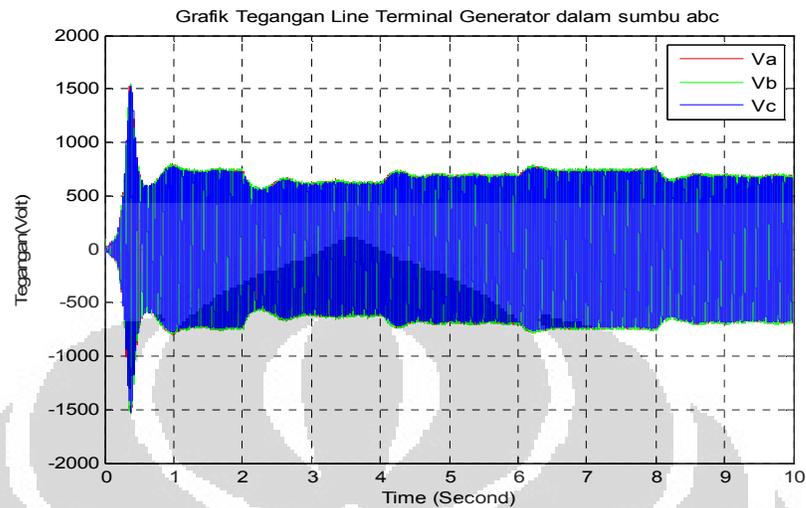


Gambar 4.6. Grafik kecepatan putar rotor dari generator untuk torsi berubah-ubah

Pada Gambar 4.6. dapat dilihat bahwa saat kondisi tunak terjadi fluktuasi dari kecepatan putar rotor ketika dilakukan perubahan torsi dan menuju satu titik kestabilan kembali.

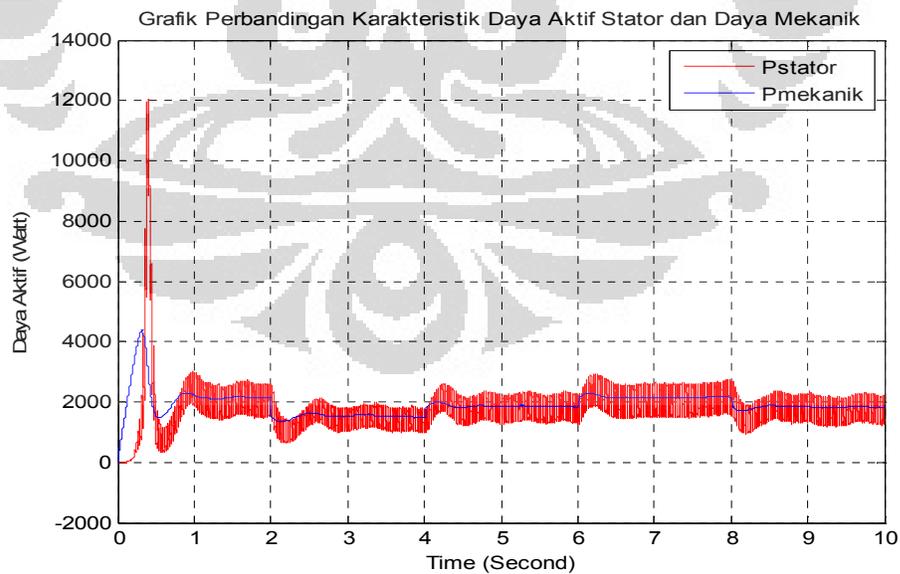
Grafik dari tegangan *line* terminal untuk kondisi torsi berubah-ubah dapat dilihat pada Gambar 4.7. dimana dapat dilihat bahwa perubahan torsi masukan

ke generator membuat tegangan *line* terminal pada kutub stator berubah-ubah sebanding dengan waktu perubahan torsi masukan.



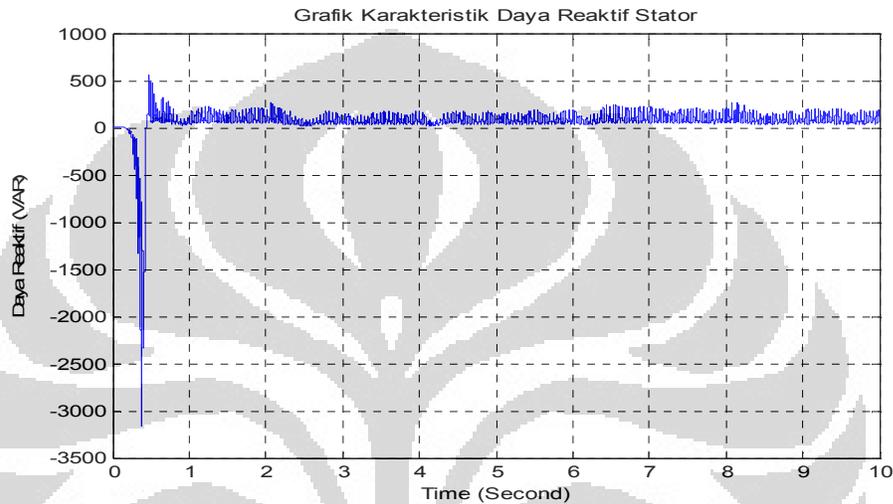
Gambar 4.7. Grafik tegangan *line* terminal sisi kutub stator generator untuk torsi berubah-ubah

Grafik perbandingan antara karakteristik daya aktif pada kutub stator dari generator dan daya mekanik masukan untuk kondisi torsi masukan berubah-ubah dapat dilihat pada Gambar 4.8., yaitu:



Gambar 4.8. Grafik karakteristik daya aktif kutub stator dan daya mekanik untuk torsi berubah-ubah

Dari Gambar 4.8. dapat diketahui bahwa perubahan daya mekanik yang diakibatkan oleh variasi torsi yang diberikan ke generator mampu diikuti oleh daya aktif kutub stator. Kendali vektor sisi rotor yang telah dirancang memiliki kemampuan yang cukup untuk mengatasi perubahan daya mekanik yang diberikan ke generator agar menghasilkan daya aktif kutub stator yang sesuai dengan daya mekanik referensi.



Gambar 4.9. Grafik daya reaktif kutub stator untuk torsi berubah-ubah

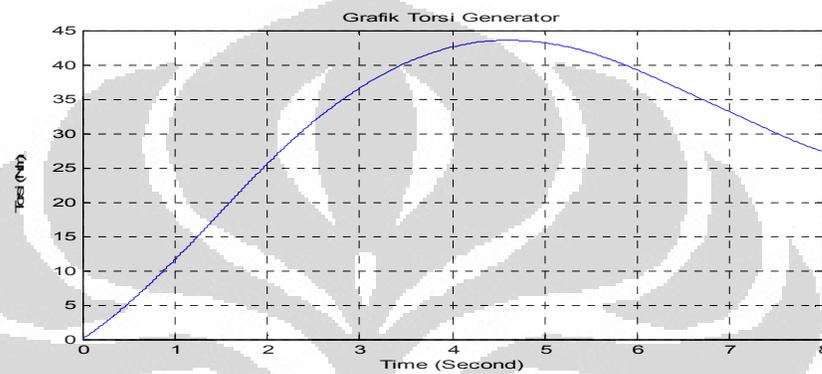
Pada Gambar 4.9. dapat dilihat grafik karakteristik daya reaktif kutub stator dari generator untuk kondisi torsi masukan berubah-ubah. Dari grafik yang ditampilkan didapat hasil yang tidak jauh berbeda dengan daya reaktif untuk torsi konstan. Untuk kondisi tunak terjadi perubahan daya reaktif ketika dilakukan perubahan torsi dimana perubahan titik operasi dari torsi masukan generator mempengaruhi daya reaktif yang dihasilkan oleh kutub stator dari generator namun daya reaktif yang dihasilkan masih mendekati daya reaktif referensi yaitu 0 VAR.

4.3 Analisis Hasil Simulasi Sistem PLTB Terhubung Turbin Angin

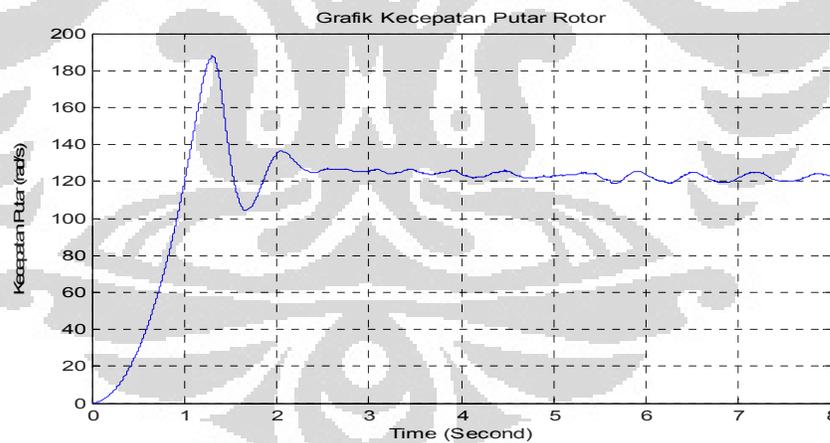
Pada simulasi sistem PLTB terhubung turbin angin, *doubly fed induction generator* dihubungkan dengan turbin angin melalui *drive train*. Kecepatan angin yang berubah-ubah akan membuat daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dan torsi masukan generator berubah-ubah. Sistem kendali vektor

sisi rotor yang digunakan pada skema simulasi sistem PLTB terhubung turbin angin ini harus mampu mengatasi perubahan ini dan mendapatkan daya yang maksimal berdasarkan perubahan daya mekanis tersebut sedangkan untuk daya reaktif dijaga nilainya agar seminimal mungkin.

Pada Gambar 4.10. dan Gambar 4.11. dapat dilihat grafik torsi masukan dan kecepatan putar rotor dari generator untuk sistem PLTB yang telah terhubung dengan turbin angin.

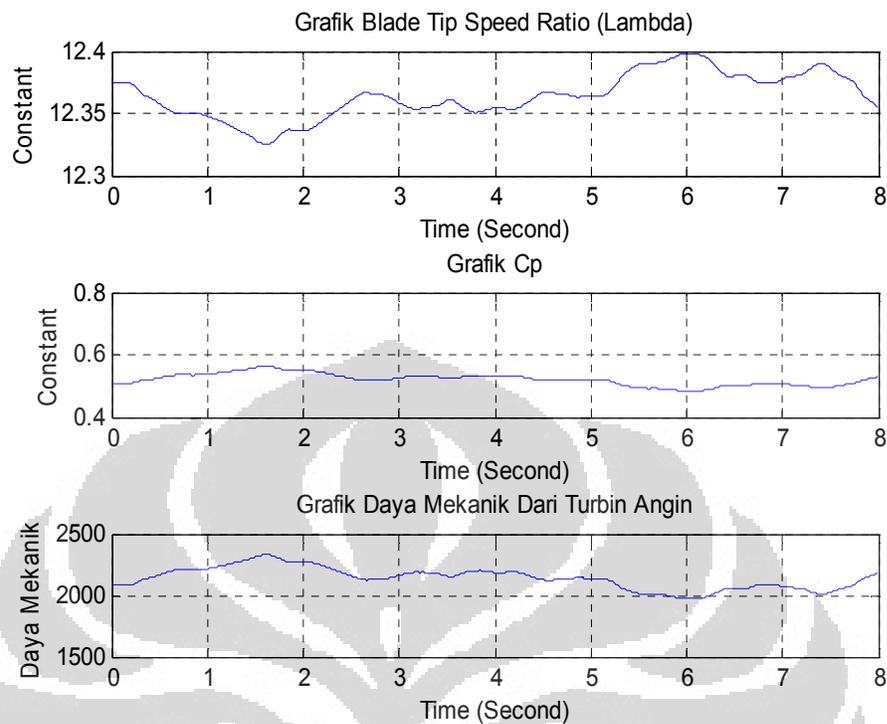


Gambar 4.10. Grafik torsi masukan ke generator terhubung turbin angin

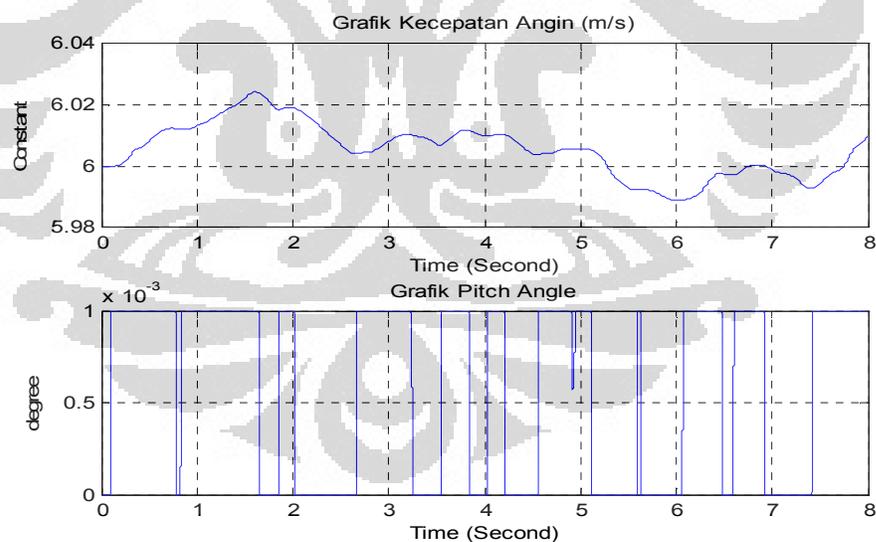


Gambar 4.11. Grafik kecepatan putar rotor dari generator untuk sistem PLTB terhubung turbin angin

Karakteristik dari turbin angin untuk kecepatan angin rata-rata 6 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.12. dimana digambarkan grafik dari *tip speed ratio* (λ), C_p dan daya total turbin angin.



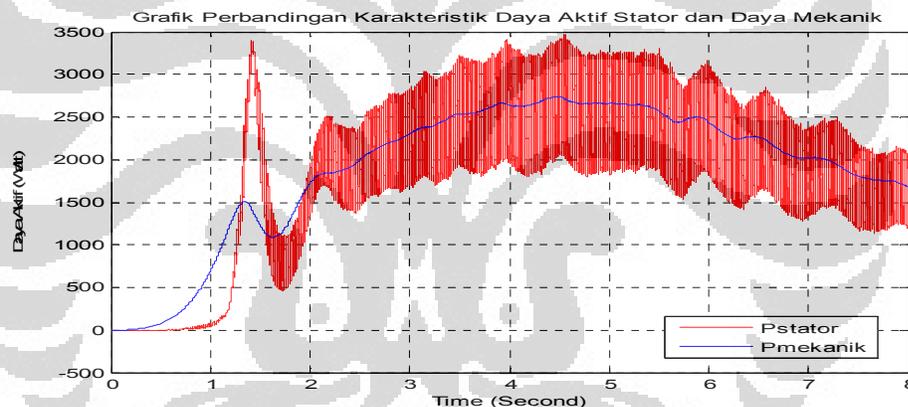
Gambar 4.12. Grafik karakteristik keluaran turbin angin

Gambar 4.13. Grafik kecepatan angin berubah-ubah dan *pitch angle*

Pada Gambar 4.13.(atas) digambarkan grafik keluaran angin berubah-ubah untuk kecepatan angin rata-rata 6 m/s, intensitas turbulensi 24 % dan diameter *blade* 6 m. Gambar 4.13.(bawah) memperlihatkan grafik keluaran sistem

pengendali *pitch* (*pitch control*) dimana dari grafik dapat dilihat bahwa pengendali *pitch* mampu menjaga titik kerja optimum dari *pitch angle* pada nilai $0^\circ - 0.001^\circ$.

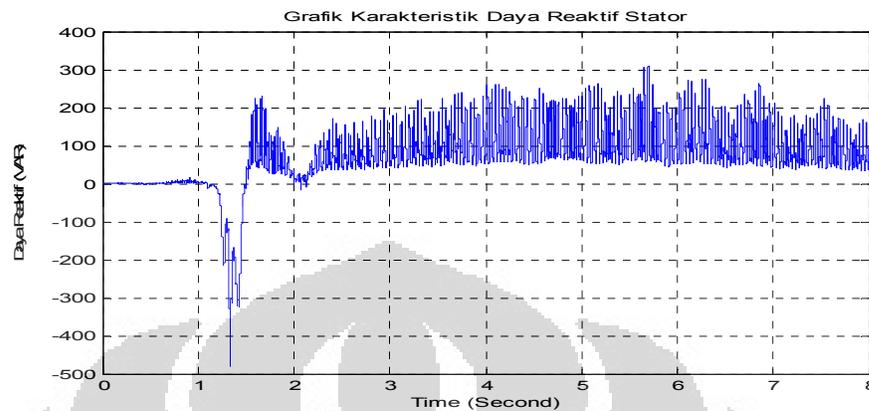
Karakteristik kinerja dari kendali vektor yang digunakan untuk mengendalikan daya pada sistem PLTB terhubung turbin angin ini dapat dilihat dari karakteristik daya aktif dan daya reaktif generator. Pada Gambar 4.14. digambarkan grafik perbandingan karakteristik daya aktif kutub stator dari generator dan daya mekanik referensi. Dari Gambar 4.14. dapat diketahui bahwa kinerja dari kendali vektor telah cukup mampu mempertahankan daya aktif kutub stator dari generator untuk berada pada nilai daya mekanik referensinya. Dari grafik pada Gambar 4.14. dapat diketahui juga bahwa terjadi *ripple* yang cukup besar dari daya aktif kutub stator namun nilainya masih berada di sekitar daya mekaniknya.



Gambar 4.14. Grafik perbandingan karakteristik daya aktif dan daya mekanik sistem PLTB terhubung turbin angin

Pada Gambar 4.15. dapat dilihat grafik karakteristik daya reaktif kutub stator dari generator untuk sistem PLTB telah terhubung dengan turbin angin dimana dapat dilihat pada kondisi awal pembangkitan dibutuhkan daya reaktif sebesar 500 VAR sedangkan untuk kondisi tunak dari daya reaktif kutub stator yaitu 100 VAR dengan nilai referensi daya reaktif dari pengendali yaitu 0 VAR. Dari hasil yang didapat untuk daya reaktif terjadi perbedaan antara referensi dan daya aktual dimana torsi yang berubah-ubah dari turbin angin

mempengaruhi besar beban reaktif yang diberikan oleh kapasitor eksitasi yang dipasang diantara generator dan beban.

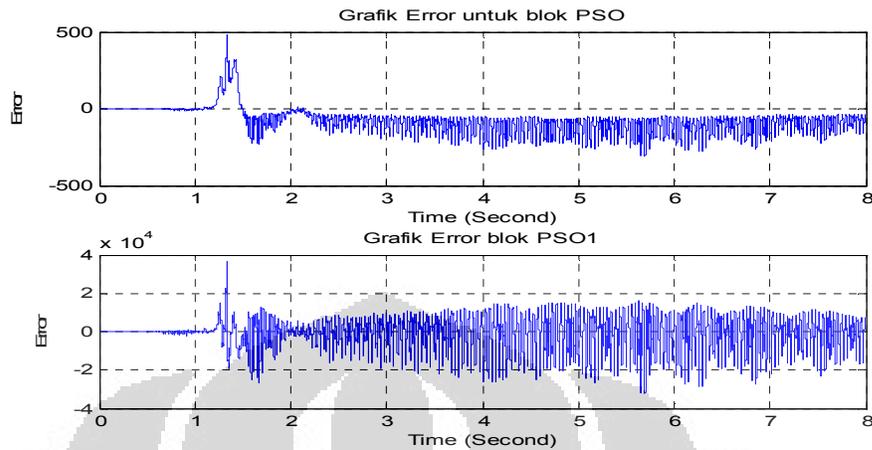


Gambar 4.15. Grafik daya reaktif kutub stator untuk sistem PLTB terhubung turbin angin

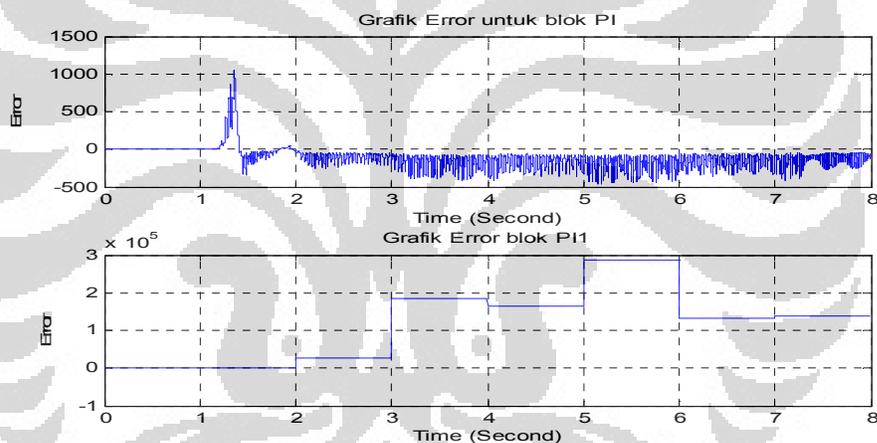
4.4 Analisis Hasil Simulasi Uji Perbandingan *Tuning* Pengendali PID Dengan Algoritma PSO dan *Tuning* Dengan Fitur *PID Tuner*

Pada simulasi uji perbandingan kinerja dari proses *tuning* pengendali PID dengan algoritma PSO dan proses *tuning* dengan fitur *PI tuner* yang terdapat pada blok PI di *software* MATLAB/Simulink dilihat parameter *error* yang dikendalikan sebagai acuan untuk melihat karakteristik performa dari masing-masing pengendali. Selain itu karakteristik daya yang dihasilkan yaitu; daya aktif dan daya mekanik referensi sistem PLTB juga digunakan sebagai referensi untuk melihat kinerja dari masing-masing proses *tuning* pengendali.

Pada gambar berikut digambarkan salah satu grafik *error* yang dikendalikan oleh pengendali. Gambar 4.16., digambarkan grafik *error* yang dikendalikan untuk bagian kendali vektor sisi beban komponen sumbu d melalui proses *tuning* pengendali PID dengan algoritma PSO dan Gambar 4.17., digambarkan grafik *error* yang dikendalikan untuk bagian kendali vektor sisi rotor komponen sumbu d melalui proses *tuning* pengendali PI dengan fitur *PI tuner*. Dari Gambar 4.16. dan Gambar 4.17. dapat dilihat bahwa proses *tuning* pengendali PID dengan algoritma PSO lebih cepat menghasilkan *error* yang konvergen jika dibandingkan dengan proses *tuning* pengendali PI dengan fitur *PI tuner*.

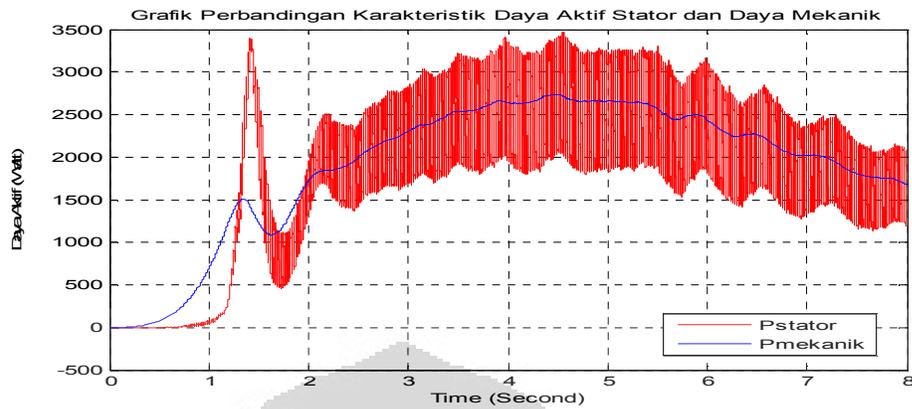


Gambar 4.16. Grafik *error* untuk *tuning* pengendali PID dengan PSO

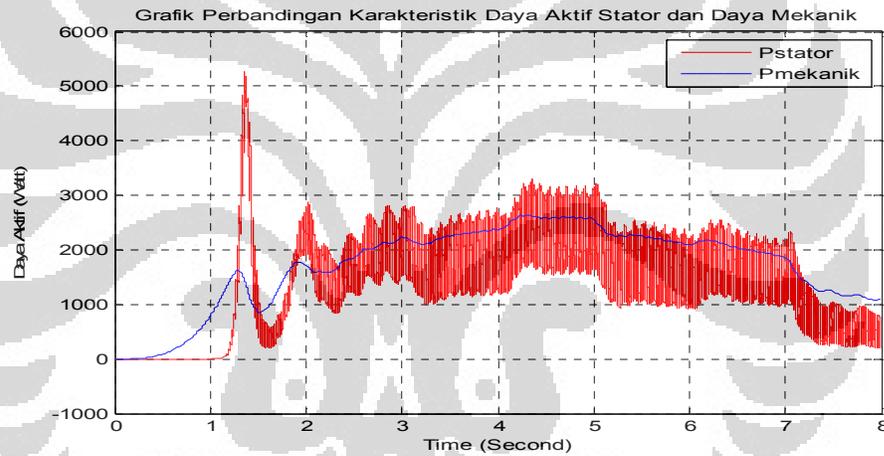


Gambar 4.17. Grafik *error* untuk *tuning* pengendali PI dengan PI *tuner*

Pada Gambar 4.18 dapat dilihat grafik perbandingan karakteristik daya aktif dan daya mekanik untuk *tuning* pengendali PID dengan PSO. Jika dibandingkan antara grafik karakteristik daya aktif yang dihasilkan *tuning* pengendali PID dengan PSO dengan grafik karakteristik daya aktif yang dihasilkan *tuning* pengendali PI dengan PI *tuner* yaitu grafik pada Gambar 4.19, dapat diketahui bahwa karakteristik daya aktif yang dihasilkan oleh *tuning* pengendali PID dengan PSO memiliki respon yang lebih baik dalam mempertahankan daya aktif kutub stator dari generator agar sesuai dengan daya mekanik referensinya.



Gambar 4.18. Grafik perbandingan karakteristik daya aktif dan daya mekanik untuk *tuning* pengendali PID dengan PSO



Gambar 4.19. Grafik perbandingan karakteristik daya aktif dan daya mekanik untuk *tuning* pengendali PI dengan PI tuner

BAB 5

KESIMPULAN

Hal-hal yang dapat disimpulkan dari penelitian dalam penulisan skripsi ini adalah :

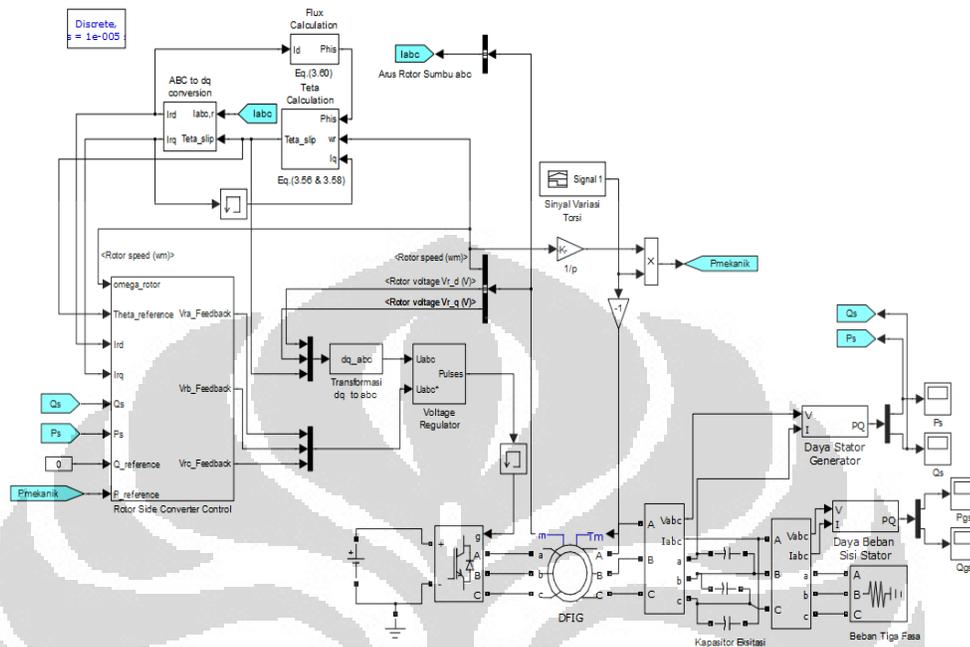
1. Pada simulasi sistem PLTB untuk torsi masukan ke generator dalam kondisi konstan, untuk kondisi torsi berubah-ubah dan untuk torsi masukan ke generator terhubung turbin angin didapat hasil yang cukup baik dimana daya aktif kutub stator dari generator telah mampu mengikuti daya mekanik referensi. Untuk daya reaktif kutub stator dari generator masih terjadi perbedaan terhadap daya reaktif dimana hal ini dipengaruhi oleh penggunaan kapasitor eksitasi.
2. Pada Hasil yang didapat untuk daya aktif dan reaktif kutub stator dari generator terjadi *ripple* yang cukup besar dimana hal ini dapat dipengaruhi oleh proses *switching* dari inverter pada bagian kutub rotor. Penggunaan filter tambahan ke dalam sistem PLTB dapat diaplikasikan untuk mengatasi adanya *ripple* ini.
3. Skema pengendali kecepatan dengan menggunakan *pitch control* mampu menjaga arah dari sudut *pitch* (β) untuk berada pada nilai optimalnya sehingga didapat nilai C_p yang maksimum yaitu berada dikisaran 0.5.
4. Proses *tuning* pengendali PID dengan menggunakan algoritma PSO yang diaplikasikan pada skema kendali vektor memiliki kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan menggunakan *tuning* pengendali PI melalui fitur *PI tuner* yang disediakan oleh *software* MATLAB/Simulink. Hal ini dapat diketahui dengan melihat karakteristik *error* dan karakteristik daya aktif yang dikendalikan untuk masing-masing pengendali dimana *tuning* pengendali PID dengan algoritma PSO memiliki respon karakteristik keluaran *error* dan daya aktif yang lebih baik.

DAFTAR ACUAN

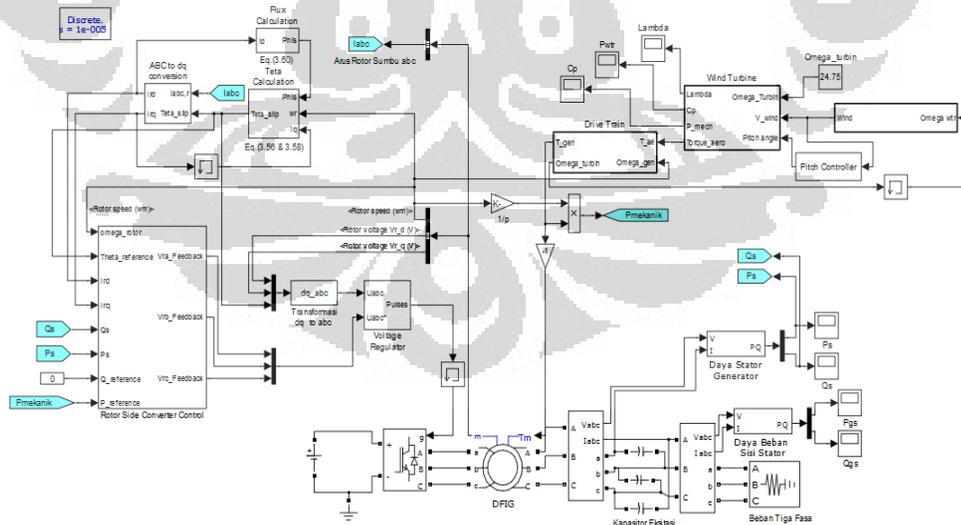
- [1] Edward Lyshevski, Sergey., “*Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics*” CRC Press, USA, 1999.
- [2] J.A. Cortajarena, J. De Marcos, P. Alvarez, F.J.Vicandi dan P.Alkorta., “Start up and control of a DFIG wind turbine test rig” IEEE Jurnal, 2011.
- [3] Handy, “Simulasi Generator Induksi Doubly Fed Sebagai Sistem Pembangkit Pada Turbin Angin Dengan Variasi Beban” Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, 2007.
- [4] Hassan H. El-Tamaly, Mohamed A. A. Wahab dan Ali H., “Kasem Simulation of Directly Grid-Connected Wind Turbines for Voltage Fluctuation” Evaluation.IEEE Journal, 2007.
- [5] Primadusi, Ungu, “Pengembangan Simulasi Dan Uji Kinerja Pengendali PI Sistem Kendali Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu” Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, Gasal 2009/2010.
- [6] Chouhan, Nishant Swaraj., “Doubly Fed Induction Generator With Integrated Energy Storage System For Smoothing Of Output Power” Thesis, Missouri University Of Science And Technology, 2010.
- [7] Shuhui Li, Timothy A. Haskew, Keith A. Williams dan Richard P. Swatloski., “Control of DFIG Wind Turbine With Direct-Current Vector Control Configuration” IEEE Transactionx On Sustainable Eenergy, Vol. 3, No. 1, January 2012.
- [8] Wijoyo, Ranu, “Simulasi Dan Analisis Particle Swarm Optimization Untuk Pencarian Banyak Sumber Gas Dengan Open Dynamics Engine” Skripsi, S1 Fakultas Ilmu Komputer, Depok, 2009..
- [9] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sørensen dan Frede Blaabjerg., “Wind Turbine Blockset In Matlab/Simulink” Aalborg University. 2004.
- [10] Poul Sørensen, Anca Hansen, Lorand Janosi, John Bech dan Birgitte Bak-Jensen. “Simulation of Interaction between Wind Farm and Power System” Risø National Laboratory, 2001.
- [11] David E.Johnson, Johnny R. Johnson, John L.Hirburn dan Peter D.Scott., “*Electric Circuit Analysis*” Third Edition.

- [12] F. Yusivar dan S. Wakao., “Minimum Requirements of Motor Vector Control Modeling and Simulation Utilizing C MEX S-function in MATLAB/SIMULINK” IEEE Journal.
- [13] Dirghantara, Afiat, “ Analisis dan Simulasi Pengaturan Tegangan Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dengan Menggunakan Konverter AC-DC-AC Pada Sifat Beban Yang Berbeda” Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, Gasal 2009/2010.
- [14] Modesto Amundarain*, Mikel Alberdi, Aitor J. Garrido, Izaskun Garrido dan Javier Maseda., “Wave energy plants: Control strategies for avoiding the stalling behaviour in the Wells turbine” Dept. of Automatic Control and Systems Engineering, EUITI Bilbao, University of the Basque Country, Plaza de la Casilla 3, 48012 Bilbao, Spain, 2010.
- [15] Oscar Barambones, Manuel De La Sen dan Patxi Alkorta. “A Robust Control of Double-feed Induction” Dept. of Electricity and Electronics. Faculty of Science and Technology. Vitorio. Spain.
- [16] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake dan N. Jenkins., “Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances” IEEE Journal Vol.150, No.3, May, 2003.
- [17] F. Wu, P. Ju and X.P. Zhang., “Parameter Tuning for Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator Using PSO” IEEE Journal, 2010.
- [18] Abolfazl Jalilvand, Mehdi Jabbari, Gholamreza Zarei Govar dan Hamid Khoshkhoo., “Modeling and Control of a Doubly Fed Induction Generator Using PSO Algorithm” IEEE Journal, 2008.
- [19] Mansour, Wael., “Tunning of PID controller using Particle Swarm Optimization” Electrical Engineering Dept, Faculty of Engineering Cairo University, Egypt.
- [20] Barakati, S.Masoud., “Wind Turbine Systems: History, Structure and Dynamic Model”. Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran, 2008.

LAMPIRAN



Lampiran 1. Model Simulasi Sistem PLTB DFIG Berbasis Kendali Vektor Dan PSO Untuk Torsi Konstan Dan Berubah-ubah



Lampiran 2. Model Simulasi Sistem PLTB DFIG Berbasis Kendali Vektor Dan PSO Untuk Torsi Masukan Ke Generator Terhubung Turbin Angin

Lampiran 3. Tabel Parameter sistem PLTB yang digunakan pada penelitian

Angin	Kecepatan Angin Rata-rata (v_{mean})	6 m/s
	Intensitas Turbulensi (c)	24 %
	Diameter Kincir Turbin (d)	6 m
Turbin Angin	Kerapatan udara (ρ)	1.3416 Kg/m ³
	<i>Blade radius</i> (R)	3 m
<i>Drive Train</i>	Momen Inersia Poros Turbin Angin (I_{wtr})	0.031 Kg.m ²
	Konstanta Pegas (k_{ms})	0.01
	Konstanta Damping (c_{ms})	0.01
	Rasio untuk kecepatan Rendah dan Tinggi (f)	3
<i>DoublyFed Induction Generator</i> (DFIG)	Tegangan Stator ($u_{\text{abc,s}}$)	380 V
	Tegangan Rotor ($u_{\text{abc,r}}$)	190 V
	Resistansi Stator (r_s)	3.25 Ohm
	Resistansi Rotor (r_r)	2.75 Ohm
	Induktansi Leakage Stator (L_{ls})	0.00264 H
	Induktansi Leakage Rotor (L_{lr})	0.00372 H
	Induktansi Magnetizing (L_m)	0.664 H
	Frekuensi	50 Hz
	Jumlah Pole (P)	4
	Momen Inersia Mesin (J)	0.038 Kg.m ²
Koefisien Gesek Mesin (B_m)	0.005752	
<i>Inverter DC-AC</i>	<i>Hysteresis Band</i>	20
	<i>Snubber Resistance</i>	10 ⁵ Ohm

Lampiran 4. Diagram Blok Simulasi *Voltage Regulator*

