



UNIVERSITAS INDONESIA

**MATRIKS KONVERTER UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA ANGIN**

SKRIPSI

WURI LISTYARINI

0806331323

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**MATRIKS KONVERTER UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA ANGIN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

WURI LISTYARINI

0806331323

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa seminar dengan judul:

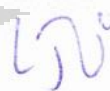
MATRIKS KONVERTER UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

Yang dibuat sebagai salah satu syarat mendapatkan gelar sarjana teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia, adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Wuri Listyarini

NPM : 0806331323

Tanda Tangan :



Tanggal : 12 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Wuri Listyarini
NPM : 0808331323
Program Studi : Teknik elektro

Dengan judul skripsi : MATRIKS KONVERTER UNTUK APLIKASI
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng

Penguji : Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT

Penguji : Dr. Abdul Halim, M.Eng

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 12 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Tuhan atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Feri Yusivar M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang sangat bermanfaat kepada saya.
2. Orang tua serta segenap keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan saya.
3. Teman-teman yang secara langsung atau tidak langsung telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Seluruh sivitas akademik Departemen Teknik Elektro.

Akhir kata, semoga Tuhan berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

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

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

Nama : Wuri Listyarini

NPM : 0806331323

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:

Matriks Konverter untuk Aplikasi Pembangkit Listrik
Tenaga Angin

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: 12 Juni 2012

Yang menyatakan



(Wuri Listyarini)

ABSTRAK

Nama : Wuri Listyarini

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : MATRIKS KONVERTER UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA ANGIN

Matriks konverter adalah salah satu jenis power elektronik yang menjadi penghubung antara generator dengan jala-jala, menggantikan pasangan *rectifier-inverter* yang membutuhkan *DC Link* yang besar. Skripsi ini akan menunjukkan bahwa penggunaan matriks konverter dalam PLTA dapat memberikan daya ke dalam jala-jala, sekaligus dapat mengubah *magnitude* tegangan keluaran, frekuensi keluaran, dan faktor daya masukan. Pengaruh dari perubahan kecepatan angin, frekuensi keluaran, rasio tegangan, sudut bilah, sudut tegangan keluaran, dan pengaturan faktor daya terhadap daya keluaran juga akan di jabarkan di dalam skripsi. Simulasi yang dihasilkan stabil dengan daya aktif yang disuplai ke jala-jala sebesar 88,413 KW, dengan kecepatan angin minimal yang diperlukan antara 6,077 m/s sampai 6,078 m/s.

Kata kunci: turbin angin, generator induksi sangkar tupai, Matlab/Simulink, matriks konverter

ABSTRACT

Name : Wuri Listyarini
Study Program : Electrical Engineering
Title : MATRIX CONVERTER FOR WIND TURBINE APPLICATION

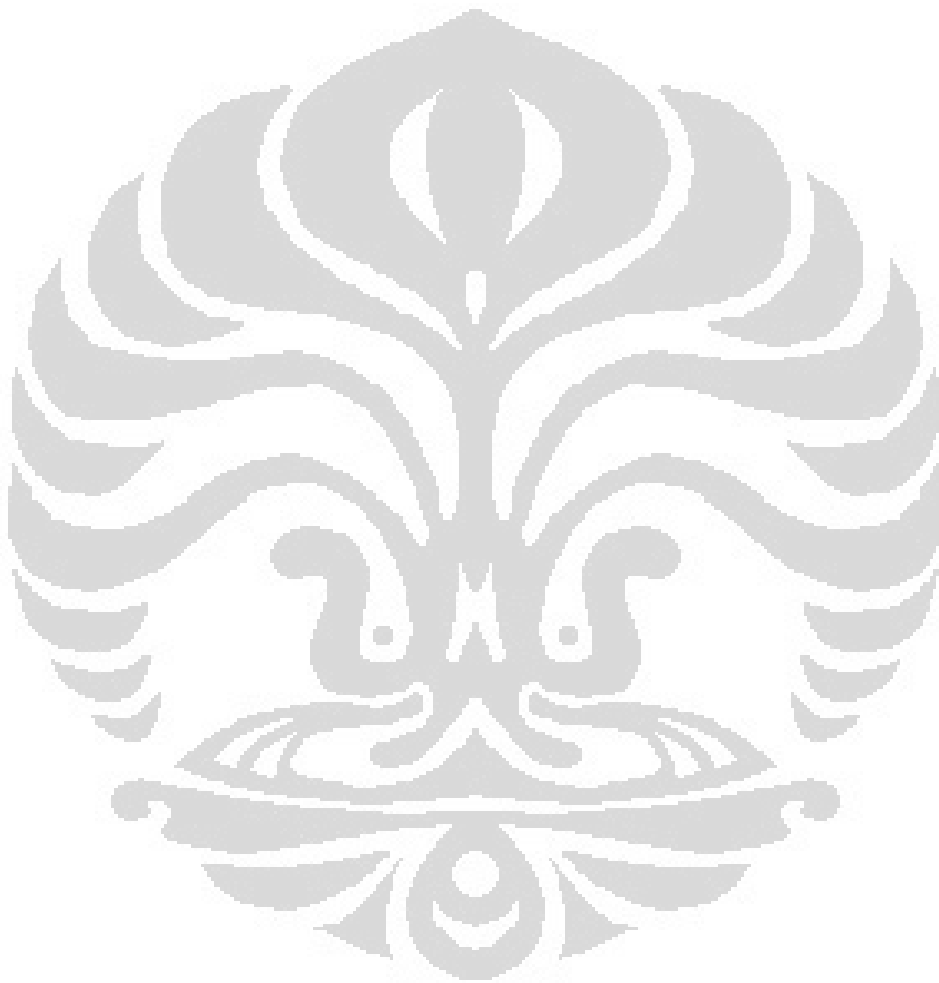
Matrix converter is a kind of power electronic that connects the generator to the grid, and replacing rectifier-inverter pair which need a bulky DC Link. This thesis will show that configuration using matrix converter in wind turbine system could supply power to the grid, change magnitude of output voltage, output frequency, and input power factor. Variation effect of wind speed, output frequency, voltage ratio, pitch angle, voltage output angle, and displacement power factor control also will be evaluated in the thesis. The simulation is stable with active power 88,413 KW supplied to the grid, with minimal wind speed to run the induction machine into a generator is between 6,077 m/s until 6,078 m/s.

Key Words: wind turbine, squirrel cage induction generator, Matlab/Simulink, matrix converter

DAFTAR ISI

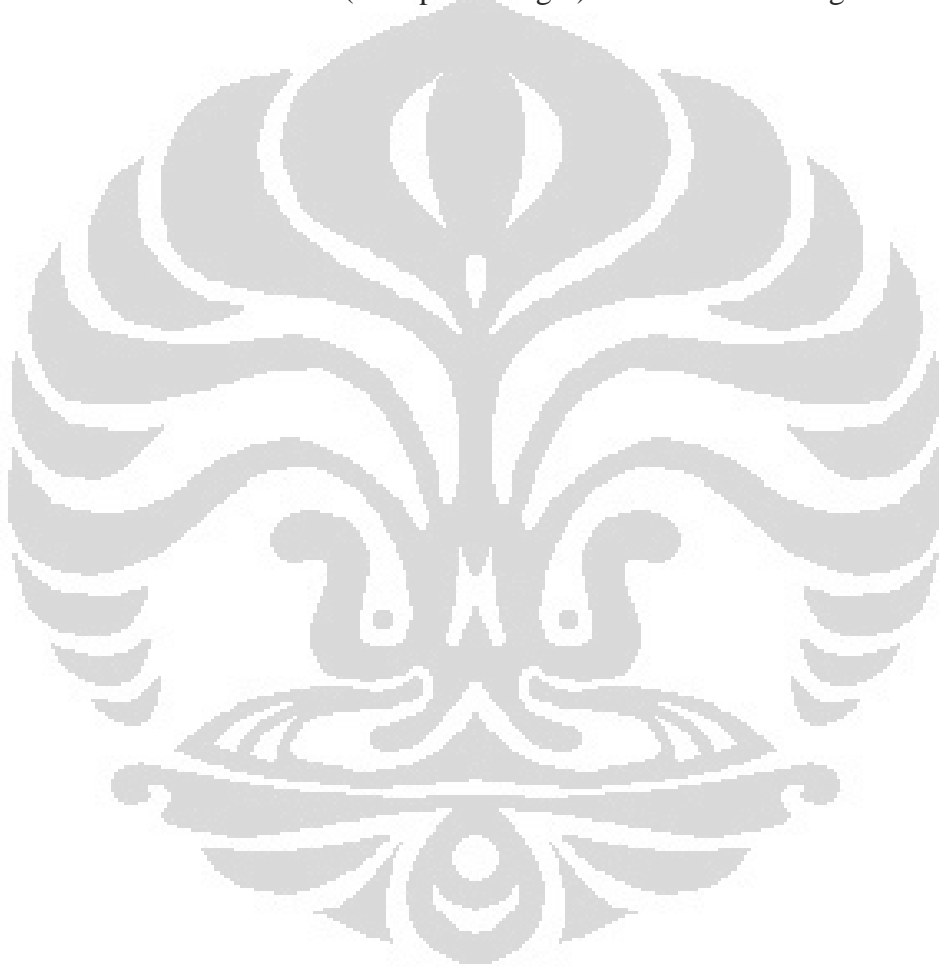
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	II
HALAMAN PENGESAHAN.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
KATA PENGANTAR.....	IV
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	V
ABSTRAK	VI
ABSTRACT	VII
DAFTAR ISI.....	VIII
DAFTAR TABEL	X
DAFTAR GAMBAR.....	XI
DAFTAR RUMUS	XII
DAFTAR LAMP IRAN	XVII
BAB 1 PENDAHULUAN	2
1.1 LATAR BELAKANG	2
1.2 TUJUAN PENULISAN	2
1.3 BATASAN MASALAH	3
1.4 METODOLOGI PENULISAN	3
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	3
BAB 2 SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN	5
2.1 DESAIN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN	5
2.1.1 Klasifikasi Turbin Angin	5
2.1.2 Tipe Generator	6
2.1.2.1 Motor Induksi Sangkar Tupai	6
2.1.2.2 Motor Induksi Belitan	6
2.1.2.3 <i>Doubly Fed Induction Generator</i> (DFIG).....	6
2.1.2.4 Generator Sinkron Dengan Eksitasi Medan.....	6
2.1.2.5 Generator Sinkron Dengan Permanen Magnet	7
2.1.3 <i>Gearbox</i> Mekanik.....	7
2.1.4 Teknik Kontrol	7
2.1.4.1 <i>Fixed-speed Fixed-pitch</i>.....	7
2.1.4.2 <i>Fixed-speed Variabel-pitch</i>.....	7
2.1.4.3 <i>Variabel-speed Fixed-pitch</i>.....	7
2.1.4.4 <i>Variabel-speed Variabel-pitch</i>.....	8
2.1.5 Power Elektronik (PE) Konverter	8
2.1.6 Pembangkit Listrik Tenaga Angin Yang Ingin Dikembangkan.....	10
2.2 MODEL AERODINAMIK.....	11
2.3 MODEL MEKANIK	12
2.4 MODEL DINAMIK MESIN INDUKSI.....	13
2.5 MODEL MATRIKS KONVERTER	17
2.6 MODEL DINAMIK TURBIN ANGIN SECARA KESELURUHAN.....	29
2.7 MODEL DINAMIK TURBIN ANGIN SECARA KESELURUHAN DENGAN STRATEGI V/F KONSTAN.....	38
2.8 MODEL LINEAR TURBIN ANGIN	41

BAB 3 MODEL SIMULASI SISTEM PLTA	55
BAB 4 HASIL DAN ANALISA	59
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 KESIMPULAN	73
5.2 SARAN	74
DAFTAR REFERENSI	75



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nilai Parameter Turbin Angin	55
Tabel 3.2 Nilai Parameter Masukan.....	51
Tabel 3.3 Parameter Keluaran.....	51
Tabel 4.1 Nilai <i>Steady State</i> Masukan, Keluaran dan State Variabel	59
Tabel 4.2 Variasi Nilai α (<i>Displacement Power factor Control</i>)	62
Tabel 4.3 Variasi Nilai $\Delta\omega_e$ (Frekuensi Keluaran Output)	64
Tabel 4.4 Variasi Nilai $\Delta\alpha_o$ (Sudut Tegangan Keluaran).....	66
Tabel 4.5 Variasi Nilai V_w (Kecepatan Angin).....	67
Tabel 4.6 Variasi Nilai V_w (Kecepatan Angin) Untuk Titik Potong.....	69



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) <i>Vertical Axis</i> (b) <i>Horizontal Axis</i>	5
Gambar 2.2 (a) <i>Upwind</i> (b) <i>Downwind</i>	5
Gambar 2.3 <i>Back-to-back Converter</i>	9
Gambar 2.4 Model Mekanik Dari Turbin Angin	12
Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Dari Mesin Induksi	13
Gambar 2.6 Torsi Elektrik Terhadap Kecepatan.....	16
Gambar 2.7 Struktur MC Yang Dipergunakan	17
Gambar 2.8 Struktur <i>Common Emitter Bidirectional Switch</i>	18
Gambar 2.9 (a) Hubung Singkat Sumber (b) Rangkaian Terbuka.....	19
Gambar 2.10 Sistem PLTA Secara Keseluruhan	29
Gambar 3.1 Blok Simulink Turbin Dinamik Dengan Strategi V/f	50
Gambar 3.2 Blok Simulink Turbin Linear	52
Gambar 4.1 Nilai Eigen Matriks A	56
Gambar 4.2 P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s.....	57
Gambar 4.3 Perbesaran P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s.....	57
Gambar 4.4 Q (Daya Reaktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s.....	58
Gambar 4.5 Perbesaran Q (Daya Reaktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s.....	58
Gambar 4.6 P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan $\Delta \omega_e$ (frekuensi keluaran output) Dari $2 \cdot \pi \cdot 60$ rad/s ke $2 \cdot \pi \cdot 63$ rad/s Saat 0,6 s.....	59
Gambar 4.7 Q (Daya Reaktif) dengan kenaikan $\Delta \omega_e$ (frekuensi keluaran output) dari $2 \cdot \pi \cdot 60$ rad/s ke $2 \cdot \pi \cdot 63$ rad/s saat 0,6 s	59
Gambar 4.8 Zero Sistem	60
Gambar 4.9 P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan Δa (<i>Displacement Power factor Control</i>) Berbentuk Ramp Dengan Nilai Awal 0 slope 1 Saat 0,6 s.....	61
Gambar 4.10 Segitiga Daya	61
Gambar 4.11 Nilai <i>Steady State</i> Q (Daya Reaktif) Dengan Variasi Nilai a.....	62
Gambar 4.12 Nilai <i>Steady State</i> PF Dengan Variasi Nilai a (<i>Displacement Power factor Control</i>)	63
Gambar 4.13 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi $\Delta \omega_e$ (Frekuensi Keluaran Output)	64
Gambar 4.14 Nilai Q (Daya Reaktif) Terhadap Variasi $\Delta \omega_e$ (Frekuensi Keluaran Output)	65
Gambar 4.15 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi $\Delta \alpha_o$ (Sudut Tegangan Keluaran).....	66
Gambar 4.16 Nilai Q (Daya Reaktif) Terhadap Variasi $\Delta \alpha_o$ (Sudut Tegangan Keluaran).....	67
Gambar 4.17 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi VW (Kecepatan Angin)	68
Gambar 4.18 Nilai Q (Daya Reaktif) Terhadap Variasi VW (Kecepatan Angin)	68
Gambar 4.19 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi VW (Kecepatan Angin)	68
Untuk Mencari Titik Potong	70

DAFTAR RUMUS

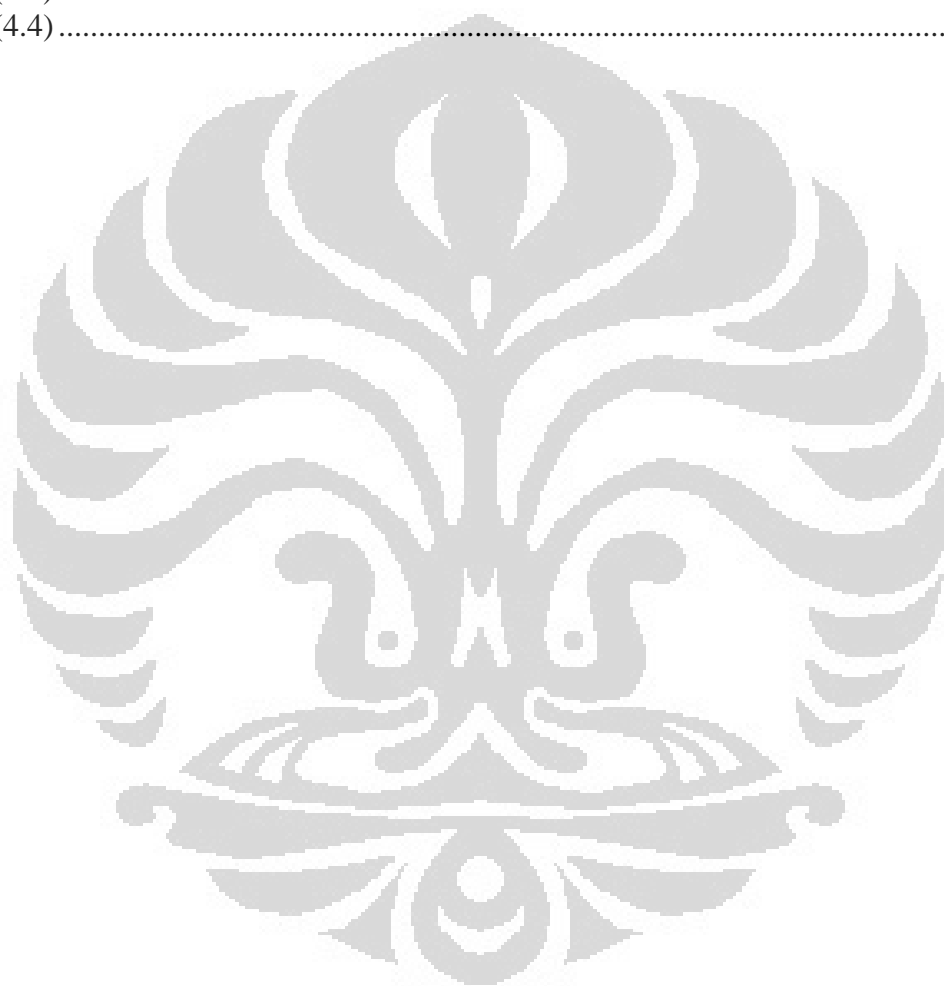
(2.1)	11
(2.2)	11
(2.3)	12
(2.4)	12
(2.5)	13
(2.6)	13
(2.7)	13
(2.8)	13
(2.9)	13
(2.10)	14
(2.11)	14
(2.12)	14
(2.13)	14
(2.14)	14
(2.15)	14
(2.16)	14
(2.17)	14
(2.18)	14
(2.19)	15
(2.20)	15
(2.21)	15
(2.22)	15
(2.23)	15
(2.24)	15
(2.25)	15
(2.26)	15
(2.27)	16
(2.28)	16
(2.29)	18
(2.30)	18
(2.31)	19
(2.32)	19
(2.33)	19
(2.34)	19
(2.35)	19
(2.36)	20
(2.37)	20
(2.38)	20
(2.39)	20
(2.40)	20
(2.41)	20
(2.42)	20
(2.43)	20
(2.44)	20
(2.45)	21

(2.46)	21
(2.47)	21
(2.48)	21
(2.49)	21
(2.50)	21
(2.51)	21
(2.52)	21
(2.53)	21
(2.54)	21
(2.55)	22
(2.56)	22
(2.57)	22
(2.58)	22
(2.59)	22
(2.60)	22
(2.61)	22
(2.62)	22
(2.63)	22
(2.64)	22
(2.65)	23
(2.66)	23
(2.67)	23
(2.68)	23
(2.69)	23
(2.70)	23
(2.71)	24
(2.72)	24
(2.73)	24
(2.74)	24
(2.75)	24
(2.76)	24
(2.77)	25
(2.78)	25
(2.79)	25
(2.80)	25
(2.81)	25
(2.82)	25
(2.83)	25
(2.84)	25
(2.85)	25
(2.86)	26
(2.87)	26
(2.88)	26
(2.89)	26
(2.90)	26
(2.91)	26
(2.92)	26

(2.93).....	26
(2.94).....	26
(2.95).....	27
(2.96).....	27
(2.97).....	27
(2.98).....	27
(2.99).....	27
(2.100).....	27
(2.101).....	27
(2.102).....	28
(2.103).....	28
(2.104).....	28
(2.105).....	28
(2.106).....	28
(2.107).....	28
(2.108).....	28
(2.109).....	29
(2.110).....	29
(2.111).....	29
(2.112).....	29
(2.113).....	31
(2.114).....	32
(2.115).....	32
(2.116).....	32
(2.117).....	32
(2.118).....	32
(2.119).....	32
(2.120).....	32
(2.121).....	32
(2.122).....	33
(2.123).....	33
(2.124).....	34
(2.125).....	34
(2.126).....	34
(2.127).....	35
(2.128).....	35
(2.129).....	35
(2.130).....	35
(2.131).....	36
(2.132).....	36
(2.133).....	37
(2.134).....	37
(2.135).....	37
(2.136).....	37
(2.137).....	37
(2.138).....	37
(2.139).....	37

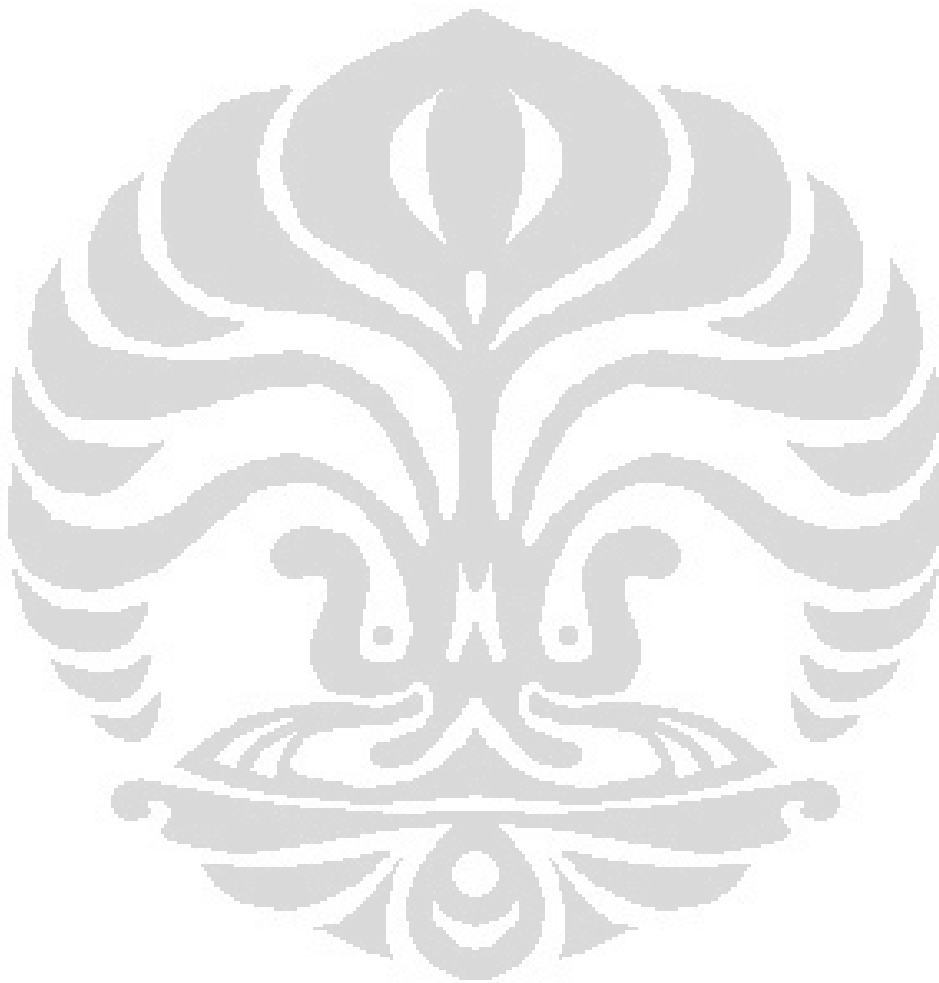
(2.140)	37
(2.141)	37
(2.142)	37
(2.143)	37
(2.144)	38
(2.145)	38
(2.146)	38
(2.147)	38
(2.148)	38
(2.149)	39
(2.150)	39
(2.151)	39
(2.152)	39
(2.153)	39
(2.154)	40
(2.155)	40
(2.156)	40
(2.157)	40
(2.158)	40
(2.159)	40
(2.160)	40
(2.161)	40
(2.162)	40
(2.163)	40
(2.164)	41
(2.165)	41
(2.166)	41
(2.167)	41
(2.168)	41
(2.169)	42
(2.170)	42
(2.171)	43
(2.172)	43
(2.173)	43
(2.174)	43
(2.175)	43
(2.176)	43
(2.177)	43
(2.178)	44
(2.179)	44
(2.180)	44
(2.181)	45
(2.182)	45
(2.183)	45
(2.184)	45
(2.185)	45
(2.186)	45

(2.187).....	46
(2.188).....	46
(2.189).....	46
(2.190).....	46
(2.191).....	46
(2.192).....	47
(2.193).....	47
(2.194).....	48
(4.1).....	59
(4.2).....	59
(4.3).....	61
(4.4).....	62



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Program Turbin Dinamik V/f	75
Lampiran 2 Program Turbin Linear	84



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan akan energi akan selalu meningkat. Hal ini dapat terlihat dari gambaran populasi dunia yang sekarang masih 6,9 milyar penduduk akan meningkat menjadi 9,1 milyar penduduk pada tahun 2050, menunjukkan peningkatan sampai 32%. Hal lain yang perlu diperhatikan adalah perkembangan teknologi dan infrastruktur pada berbagai negara yang juga semakin berkembang. Semua hal tersebut membuat permintaan akan energi dunia meningkat hingga dua kali lipat dalam waktu dua puluh tahun, melebihi 25.000 TWh/Tahun pada tahun 2020 atau 2025.

Energi memang tidak dapat diciptakan ataupun dihancurkan, energi hanya berubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Pada penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak dan batu bara, energi berubah dari energi kimia ke berbagai jenis energi lainnya seperti energi panas ataupun listrik. Tetapi kuantitas dari bahan bakar itu sendiri menjadi semakin berkurang. Tidak sama halnya dengan energi terbarukan seperti energi cahaya matahari ataupun energi angin yang sumbernya tidak akan pernah habis di alam. Kelebihan lain dari energi terbarukan adalah polusi yang dikeluarkan sama sekali tidak ada, sedangkan pada pembakaran bahan bakar selalu ada zat-zat berbahaya yang dikeluarkan ke alam.

Dengan penggunaan power elektronik yang bisa memaksimalkan energi yang dihasilkan oleh turbin angin, turbin angin menjadi salah satu energi terbarukan yang makin berkembang. Bahkan sudah menjadi energi terbarukan dengan harga pengadaan yang paling murah dan sudah mendekati harga batu bara. Hal ini disebabkan berkembangnya teknologi elektronika daya. Bila dibandingkan dengan energi terbarukan seperti sel surya yang pemanfaatan sinar matahari secara efektif hanya dilakukan dari jam sepuluh pagi hingga jam dua siang saja, maka rasio investasinya cukup tinggi yaitu Rp70.000 untuk setiap watt yang dihasilkan. Bandingkan dengan rasio investasi bila menggunakan turbin angin yang hanya Rp30.000.

Potensi turbin angin dapat dilihat pada perkembangan turbin angin di dunia. Pada pertengahan tahun 2011, kapasitas tambahan sebesar 25,500 MW diharapkan untuk bangkit pada berbagai belahan dunia, yang akan membawa instalasi baru sebesar 43,900 MW, dibandingkan dengan 37,642 MW pada tahun 2010. Total kapasitas energi angin yang terinstal akan mencapai 240,500 MW pada akhir tahun ini. Kapasitas ini dapat mencukupi tiga persen dari permintaan listrik dunia. Dari pengadaan energi angin, sampai saat ini negara dengan penggunaan turbin angin terbanyak masih dipegang oleh cina, amerika, jerman, spanyol dan india sampai dengan 74% dari kapasitas angin global.

Bila ingin mengikuti perkembangan turbin angin seperti yang ada di luar negeri, mereka pada umumnya mempergunakan turbin angin dalam jumlah banyak di suatu tempat yang mempunyai potensi angin yang besar. Jenis yang dipergunakan untuk menjadi turbin angin biasanya adalah *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*, yaitu generator induksi yang dicatu pada bagian stator dan rotor nya. Untuk penghubung antara generator dan jala-jala biasanya dipasang pula pasangan *rectifier-inverter* untuk mengontrol daya yang masuk ke jala-jala. Hal ini masih mempunyai kelemahan, karena pada pasangan *rectifier-inverter* terdapat *DC Link* yang di dalamnya terdapat kapasitor yang besar, sehingga dirasa tidak efisien bila dipergunakan. Sehingga saat ini dikembangkanlah jenis power elektronik baru yaitu matriks konverter. Penggunaan matriks konverter tidak hanya menghilangkan adanya *DC Link* pada pasangan *rectifier-inverter* yang memakan banyak tempat, tapi juga dapat mengubah *magnitude* tegangan keluaran, frekuensi keluaran, dan faktor daya masukan dari matriks konverter.

1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan dari skripsi ini adalah untuk memodelkan dan mensimulasikan sistem PLTB menggunakan Matlab/Simulink dengan menggunakan matriks konverter.

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang akan dibahas menjadi jelas, maka penulis membatasi pembahasan pada beberapa hal, antara lain:

- Menggunakan generator induksi yang bertipe *squirrel cage*
- Menggunakan *bidirectional matrix converter*.

1.4 Metodologi Penulisan

Metodologi yang dilakukan dalam penulisan seminar ini adalah:

- Melakukan studi literatur dengan membaca buku hasil konferensi, ataupun jurnal yang sesuai dengan topik yang sedang dibahas.
- Mensimulasikan model matematika dan rancangan sistem dengan menggunakan MATLAB/Simulink
- Menganalisis hasil simulasi

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan seminar ini terdiri dari lima bab. Bab pertama membahas tentang latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab kedua membahas tentang sistem PLTB dan model matematikanya. Pada bab tiga akan dibahas mengenai simulasi dan parameter yang dipergunakan. Pada bab empat akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dari MATLAB/Simulink secara keseluruhan dan analisa dari hasil yang didapat. Pada bab terakhir akan dijelaskan mengenai kesimpulan dari skripsi ini.

BAB 2 SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

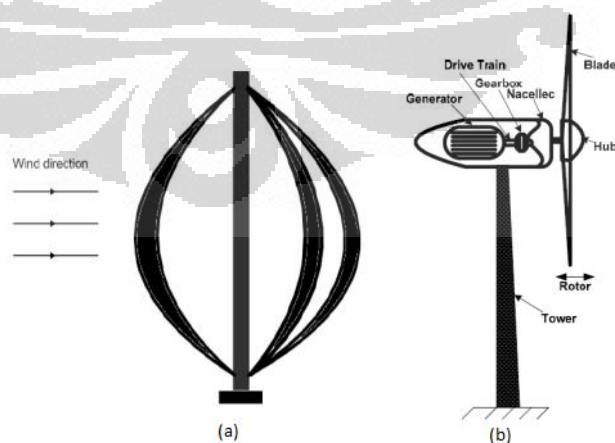
Turbin angin adalah alat yang dipergunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Bagian-bagian turbin angin secara garis besar dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian yaitu turbin, *drive train*, dan generator. Turbin berguna untuk menangkap energi angin dengan sayapnya dan memutar poros. *Drive train* berfungsi untuk menyalurkan kecepatan mekanik dari turbin ke generator, biasanya terdapat suatu faktor pengali yang melipat gandakan kecepatan dari turbin. Generator adalah bagian yang berfungsi mengubah kecepatan mekanik menjadi energi listrik.

2.1 Desain Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Energi angin dapat ditangkap dengan mempergunakan Pembangkit Listrik Tenaga Angin, terdiri dari bilah bilah sayap turbin angin, generator listrik, dan konverter power elektronik yang terhubung dengan suatu sistem kontrol. Pada PLTA banyak sekali hal yang harus dipertimbangkan untuk dipilih, mulai dari jenis generator yang dipergunakan, jenis kontrol, dan lain sebagainya. Berikut akan dijabarkan jenis-jenisnya dan hasil akhir yang akan dikembangkan pada seminar ini.

2.1.1 Klasifikasi Turbin Angin

Berdasarkan orientasi axisnya berotasi terhadap arah angin, maka turbin angin dapat dibagi menjadi dua jenis.

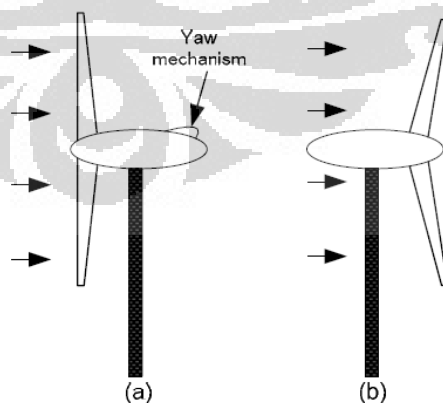


Gambar 2.1 (a) *Vertical Axis* (b) *Horizontal Axis*

Frieris, L. L. (1990). *Wind Energy Conversion System*. Prentice Hall.

Vertical axis hanya diterapkan dalam skala kecil. Keuntungannya adalah mudah untuk dirawat karena generator dan *gearbox* berada di darat, menerima angin dari arah manapun, desain bilah sayap yang mudah dan murah. Kerugiannya yaitu membutuhkan generator untuk bekerja sebagai motor pada awalnya, karena tidak dapat berputar sendiri pada mulanya, efisiensi rendah, sulit untuk mengontrol bilahnya, komponen osilasi pada torsi aerodinamis tinggi.

Horizontal axis dipergunakan oleh sebagian besar turbin angin modern. Pada jenis ini dipergunakan tiang untuk menaikkan turbin angin lebih tinggi dari tanah sehingga mendapatkan angin yang lebih banyak dan menghasilkan energi lebih besar. Keuntungannya adalah efisiensi yang tinggi, bilah dapat diputar, energi yang dihasilkan lebih murah. Kerugiannya adalah generator dan *gearbox* harus dinaikkan sehingga sulit untuk di rawat, desain lebih rumit karena membutuhkan penggerak sumbu. Klasifikasi lebih lanjut lagi dari *horizontal axis* yaitu *upwind* atau *downwind* turbin berdasarkan arah menerima angin. *Upwind* saat turbin mengarah ke angin secara langsung. *Downwind* bila turbin terpapar angin dari arah belakang. *Upwind* menguntungkan karena langsung mendapatkan angin dan tidak tertutup oleh tiangnya sendiri, tapi membutuhkan pengontrolan sumbu agar selalu menghadap ke arah angin.



Gambar 2.2 (a) *Upwind* (b) *Downwind*

Mathew, S. (2006). *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis, and Economics*. Springer.

2.1.2 Tipe Generator

Generator listrik berfungsi untuk menyediakan konversi energi antara torsi mekanik dari rotor turbin, sebagai penggerak utama dan jala-jala listrik. Sistem turbin angin modern, kebanyakan diberi masukan listrik AC tiga fasa. Jenis AC generator yang mungkin dipergunakan yaitu:

2.1.2.1 Motor Induksi Sangkar Tupai

Motor induksi adalah tipe generator yang umum dipergunakan pada turbin angin modern. Motor induksi dianggap sebagai keuntungan karena memberikan suatu derajat fleksibilitas saat kecepatan angin berfluktuasi. Motor induksi sangkar tupai populer karena harganya yang murah, simpel secara mekanik, struktur yang tahan banting, dan ketahanan terhadap gangguan dan getaran.

2.1.2.2 Motor Induksi Belitan

Motor induksi belitan cocok untuk pengontrolan kecepatan dengan mengubah resistansi dari rotor. Tapi lebih mahal daripada generator sangkar tupai

2.1.2.3 *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG)

DFIG dapat mempergunakan baik generator sangkar tupai maupun generator belitan. Pada DFIG, belitan stator dan rotor terhubung ke sumber. Belitan rotor dikoneksikan ke rangkaian catu yang diam dengan konverter elektronika daya. Keuntungan menghubungkan konverter ke rotor ialah operasi *variable speed* memungkinkan dengan konverter yang lebih kecil, dan karenanya lebih murah. Rating daya dari konverter biasanya sepertiga dari rating generator

2.1.2.4 Generator Sinkron Dengan Eksitasi Medan

Generator sinkron mempunyai kemampuan koneksi langsung (*drive-drive*) ke turbin angin tanpa adanya *gearbox*. Keuntungan ini disukai karena melihat umur dan perawatan alat. Pada generator eksitasi medan, magnetisasi disebabkan oleh catu DC pada rotor. Hal ini memungkinkan operasi dengan *power factor* yang tinggi dan efisiensi yang tinggi.

2.1.2.5 Generator Sinkron Dengan Permanen Magnet

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) yang mempergunakan magnet permanen lama-lama kekuatannya akan menurun karena kekuatan magnetnya menurun dan mahal.

2.1.3 Gearbox Mekanik

Koneksi mekanik antara generator dan turbin dapat dilakukan secara langsung maupun melalui *gearbox*. *Gearbox* memungkinkan kecepatan generator sama dengan kecepatan turbin. Penggunaan *gearbox* tidak bergantung dengan jenis generator yang dipergunakan. Kerugian penggunaan *gearbox* adalah pengurangan efisiensi dan kehandalan sistem.

2.1.4 Teknik Kontrol

2.1.4.1 *Fixed-speed Fixed-pitch*

Konfigurasi ini merupakan konfigurasi yang paling sederhana, tidak ada kendali kecepatan poros turbin maupun sudut dari bilah. Keuntungannya mudah dan biaya rendah

2.1.4.2 *Fixed-speed Variabel-pitch*

Pada konfigurasi ini, memungkinkan untuk melakukan kendali terhadap sudut (*pitch*) *blade*, tetapi kecepatan putar generator tidak dikendalikan. Tujuan dari pengendalian *pitch* adalah untuk mendapatkan daya *aerodynamic* yang optimal berdasarkan kurva karakteristik turbin angin. Pengontrolan *pitch* dirasa sulit untuk diimplementasikan karena setiap sayap harus ada pengontrolnya sendiri dan sulit dilakukan saat kecepatan angin sangat tinggi

2.1.4.3 *Variabel-speed Fixed-pitch*

Konfigurasi ini memungkinkan untuk melakukan kendali terhadap kecepatan generator, tetapi sudut *blade* tidak dikendalikan. Tujuan dari mengendalikan kecepatan putar adalah agar bisa mendapatkan nilai λ optimum pada kondisi angin tertentu. Keuntungan dari metode ini yaitu dapat diterapkannya pengecekan daya maksimum sehingga didapatkan energi tertinggi dari angin, tekanan mekanik yang lebih rendah, variasi pada daya listrik menjadi minimum, pengurangan suara bising saat kecepatan angin rendah. Penjelasan kenapa variasi daya

menjadi minimum dapat dijelaskan sebagai berikut. Saat turbin beroperasi akan ada fluktuasi yang disebabkan komponen elektrik maupun mekanik. Contoh fluktuasi karena komponen mekanik yaitu fluktuasi arus karena bilah melewati tiang atau karena kecepatan angin yang berubah. Fluktuasi karena komponen elektrik diantaranya tegangan harmonik karena konverter elektrik. Harmonik dapat diminimalisir dengan memilih filter elektrik yang sesuai, tapi karena *time constant* yang besar dan fluktuasi komponen mekanik maka tidak dapat dihilangkan dengan komponen elektrik biasa. Hal ini dapat diatasi dengan mempergunakan metode kecepatan berubah. Kerugian dari metode ini ialah biaya ekstra untuk komponen dan cara pengontrolan yang rumit.

2.1.4.4 Variabel-speed Variabel-pitch

Konfigurasi ini merupakan konfigurasi yang paling baik dan akan menghasilkan daya yang lebih tinggi. Karena dapat melakukan pengendalian terhadap kecepatan generator dan sudut *blade*. Penggunaan metode ini akan mengakibatkan biaya produksi akan menjadi sangat tinggi.

2.1.5 Power Elektronik (PE) Konverter

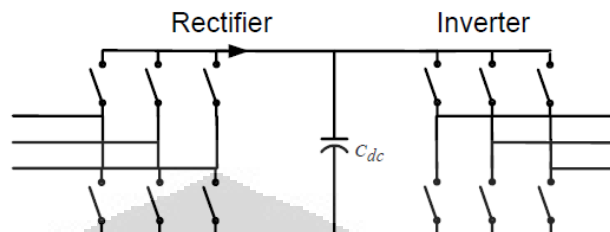
Power elektronik konverter penting dalam metode kecepatan berubah, untuk

- Mendapatkan transfer daya maksimum dari angin, saat kecepatan angin berubah-ubah dengan mengontrol kecepatan dari rotor turbin
- Mengubah frekuensi dan AC *magnitude* yang berubah-ubah menjadi frekuensi dan *magnitude* yang tetap dan dapat di *supply* ke jala-jala.

Karena perkembangan zaman, semikonduktor bisa mengatasi arus yang lebih tinggi dan kehandalan yang lebih tinggi, dan harga yang lebih murah. Daya yang melewati PE konverter tergantung dari konfigurasi PLTA yang dibangun, bisa sebagian atau semuanya. Jenis PE yang sering dipergunakan yaitu pasangan *rectifier-inverter*. Matriks konverter yang bisa mengubah dari AC ke AC menjadi metode baru dari PE konverter pada PLTA.

a. *Back-to-back rectifier-inverter pair*

Terdiri dari 2 PWM (*pulse width modulation*) *voltage source converters* (VSC) seperti terlihat pada gambar di bawah



Gambar 2.3 *Back-to-back Converter*

Ferries, L. L. (1990). *Wind Energy Conversion System*. Prentice Hall.

Salah satu konverter bekerja pada mode penyearah sedangkan yang lainnya bekerja pada mode *inverting*. Kedua konverter ini dikoneksikan bersama dengan satu *DC Link* terdiri dari satu kapasitor. Tegangan *DC Link* akan dijaga supaya lebih tinggi daripada *amplitude* dari tegangan *line-to-line* dari jala-jala, agar tercapai pengendalian terhadap arus yang dicatu ke jala-jala. Aliran daya dikontrol oleh konverter yang berada pada sisi jala-jala, sedangkan konverter pada sisi generator mengatur eksitasi generator (bila mempergunakan generator induksi sangkar tupai) dan mengontrol generator agar mendapatkan daya maksimum ke *DC Link*. Karena banyak yang sudah membuat modul untuk metode ini, maka harganya sudah turun. Keberadaan *DC Link* memungkinkan dekoupling antara *rectifier* dan *inverter*. Tapi keberadaan *DC Link* cukup berat, memakan banyak tempat, menambah harga, dan mengurangi *life time* dari sistem.

b. Matriks konverter (MC)

MC adalah *converter AC/AC* langsung yang terdiri dari sembilan bidireksional *switch* menghubungkan setiap fasa masukan ke fasa keluaran. Ide dasarnya adalah frekuensi keluaran yang diinginkan, tegangan keluaran, dan sudut displacement dari masukan bisa didapatkan dengan mengoperasikan *switch* secara benar. Pada tahun

2001, topologi MC yang baru dengan cara *switching* yang mudah tanpa permasalahan komutasi dikembangkan oleh Wei dan Lipo. Matriks konverter yang baru berdasarkan konsep "*fictitious DC Link*" yang dipakai pada MC biasa, tapi tanpa mempergunakan elemen penyimpan energi antara bagian generator dan jala-jala. MC memberikan sinusoidal masukan dan keluaran yang minimum distorsi, aliran daya dua arah, *power factor* masukan yang dapat dikontrol. Keuntungan dari MC adalah desainnya yang ringkas sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan berat dan ukuran yang kecil. Kekurang dari MC *magnitude* dari tegangan keluaran hanya bisa mencapai 0,866 dari tegangan masukannya, desain masukan filter dari MC kompleks, dan karena tidak adanya kapasitor *DC Link*, dekopling antar masukan-keluaran tidak terjadi sehingga penggunaan MC terbatas. Efisiensi MC dan pasangan *rectifier inverter* dengan rating yang sama dites. Hasilnya adalah saat frekuensi *switching* yang rendah MC mempunyai efisiensi yang lebih tinggi daripada pasangan *rectifier inverter*. Tapi dengan teknik modulasi yang berbeda performa pasangan *rectifier inverter* dapat diperbaiki. MC juga dapat ditingkatkan lagi dengan mengurangi banyak *switching* dan mempergunakan pendekatan SVM (*Space Vector Modulation*).

2.1.6 Pembangkit Listrik Tenaga Angin Yang Ingin Dikembangkan

Berikut adalah bentuk PLTA yang akan dikembangkan. Dengan jenis generator induksi yang dipergunakan adalah generator induksi sangkar tupai dan matriks konverter yang dipergunakan adalah matriks konverter dari tiga fasa di bagian jala-jala ke tiga fasa di bagian generator.

SCIG dipilih karena mesin yang kuat, sudah sering dipergunakan pada industri, dan mempunyai properti mekanik yang sesuai dengan turbin angin, seperti slip dan kemampuan *overload*.

Penggunaan *gearbox* akan meningkatkan kecepatan poros. Perhatikan bahwa saat bekerja saat kecepatan poros rendah berarti frekuensi generator induksi yang rendah yang dapat mengakibatkan saturasi inti kecuali kalau diberikan tegangan rendah pada terminalnya.

Saat tegangan terminal rendah, arus akan tinggi, membuat hal ini tidak mungkin untuk dilakukan. Sebagai PE konverter dipergunakan MC. MC menghubungkan jala-jala dengan SCIG dan mengimplementasikan kendali kecepatan poros. MC masukan dihubungkan ke jala-jala dan bagian generator dihubungkan ke MC keluaran. MC dapat dikontrol, dan memungkinkan kontrol *magnitude* tegangan keluaran, frekuensi, dan fasa dari faktor daya masukan. Bila dibandingkan dengan *DC Link AC/AC converter* sistem, keuntungannya adalah mengeliminasi *DC Link* yang termasuk di dalamnya kapasitor yang berat dan menghabiskan banyak tempat.

2.2 Model Aerodinamik

Daya mekanik dan torsi dari poros rotor turbin angin dapat dilihat pada persamaan di bawah ini

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(\beta, \lambda) V_W^3 \quad (2.1)$$

$$T_T = \frac{1}{2 \omega_T} \rho A_r C_p(\beta, \lambda) V_W^3 \quad (2.2)$$

Keterangan:

P_T = daya mekanik dari rotor turbin [Watt]

ρ = masa jenis udara [kg/m^3]

A_r = area yang terjangkau oleh rotor [m^2]
 $= \pi R^2$

R = jari-jari rotor turbin [m]

C_p = koefisien daya

β = sudut sayap rotor

λ = *tip speed ratio* (TSR)

V_W = kecepatan angin [m/s]

T_T = torsi mekanik dari rotor turbin [Nm]

ω_T = kecepatan sudut dari poros turbin [rad/s]

Rumus C_p bisa dilihat pada persamaan [1]

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left[\frac{\pi(-3 + \lambda)}{15 - 0.3\beta} \right] - 0.00184(-3 + \lambda)\beta \quad (2.3)$$

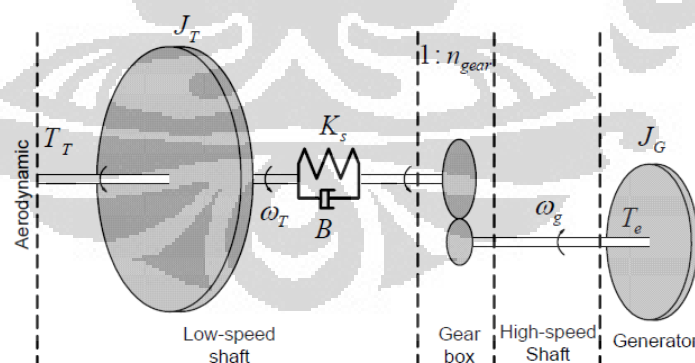
λ dapat dihitung dengan persamaan

$$\lambda = \frac{\text{Kecepatan ujung sayap}}{\text{Kecepatan angin}} = \frac{\omega_T R}{V_W} \quad (2.4)$$

Dari rumus-rumus diatas dapat dilihat bahwa hal cukup berperan adalah kecepatan angin dan ukuran dari rotor, tapi angin berubah-ubah dan karena faktor ekonomi dan teknis, maka ukuran dari rotor juga terbatas. Nilai C_p (koefisien daya) memang berubah tergantung dengan β dan λ , tapi nilai terbaik didapatkan dengan nilai $\beta = 0$ [7]. Karena itu pada skripsi ini, sudut sayap tetap dengan nilai nol.

2.3 Model Mekanik

Model turbin angin pada dasarnya merupakan model dengan tiga masa, yaitu masa rotor turbin angin, masa *gearbox*, dan masa generator. Momen inersia dari *gearbox* dianggap kecil bila dibandingkan dengan masa dari rotor turbin dan masa generator. Karena itu, model mekanik pada skripsi ini menggunakan model yang menggunakan dua masa.



Gambar 2.4 Model Mekanik Dari Turbin Angin

Barakati, S. M., Kazerani, M., & Aplevich, J. D. (2009). Maximum Power Tracking Control for a Wind Turbine System Including a Matrix Converter. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 705-713.

$$\frac{d}{dt} \omega_T = \frac{1}{J_T} [T_T - (K_S \delta \theta + B \delta \omega)] \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt} \delta \theta = \delta \omega \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_g = \frac{1}{J_G} \left[\frac{1}{N_{gear}} (K_S \delta \theta + B \delta \omega) - T_e \right] \quad (2.7)$$

$$\delta \theta = \theta_T - \frac{\theta_g}{N_{gear}} \quad (2.8)$$

$$\delta \omega = \omega_T - \frac{\omega_g}{N_{gear}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

ω_T = kecepatan poros turbin angin [rad/s]

J_T = inersia turbin angin [Kgm^2]

T_T = torsi turbin angin [Nm]

K_S = koefisien kelembaman [Nm/rad]

B = koefisien damping [Nm/rad/s]

J_G = inersia generator [Kgm^2]

N_{gear} = rasio gear

T_e = torsi elektromekanika generator [Nm]

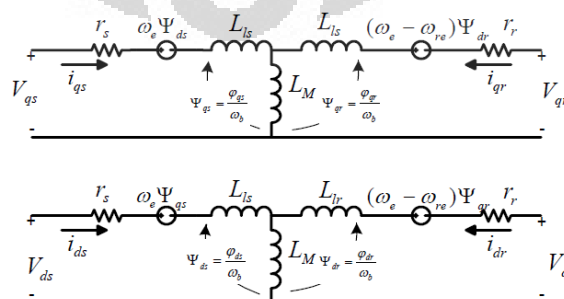
θ_T = sudut poros turbin angin [rad]

θ_g = sudut poros generator [rad]

ω_g = kecepatan poros generator [rad/s]

2.4 Model Dinamik Mesin Induksi

Model induksi yang dipakai berdasarkan keterkaitan fluks. Berikut rangkaian ekuivalen dari mesin induksi dalam qdo frame



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Dari Mesin Induksi

Krause, P. C. (1987). *Analysis of Electrical Machinery*. McGraw-Hill Book Co.

Pada rangkaian ekuivalen tersebut, semua parameter dari rotor sudah di transfer ke sisi stator. Berikut persamaan state dari mesin induksi tersebut

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = C_1\psi_{qs} - \omega_e\psi_{ds} + C_2\psi_{qr} + \omega_b V_{qs} \quad (2.10)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \omega_e\psi_{qs} + C_1\psi_{ds} + C_2\psi_{dr} + \omega_b V_{ds} \quad (2.11)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = C_3\psi_{qs} + C_4\psi_{qr} - (\omega_e - \omega_{re})\psi_{dr} \quad (2.12)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = C_3\psi_{ds} + (\omega_e - \omega_{re})\psi_{qr} + C_4\psi_{dr} \quad (2.13)$$

Nilai koefisien diatas dapat dilihat pada rumus di bawah ini

$$C_1 = \omega_b \frac{r_s}{x_{ls}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1 \right) \quad (2.14)$$

$$C_2 = \omega_b \frac{r_s}{x_{ls}} \frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} \quad (2.15)$$

$$C_3 = \omega_b \frac{r_r}{x_{ls}} \frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} \quad (2.16)$$

$$C_4 = \omega_b \frac{r_r}{x_{lr}} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{lr}} - 1 \right) \quad (2.17)$$

$$x_{ml}^* = (x_m^{-1} + x_{ls}^{-1} + x_{lr}^{-1})^{-1} \quad (2.18)$$

Keterangan:

ψ_{qs} = Q (Daya Reaktif) axis stator fluks

ψ_{ds} = d axis stator fluks

ψ_{qr} = Q (Daya Reaktif) axis rotor fluks

ψ_{dr} = d axis rotor fluks

x_{ls} = reaktansi stator

x_{lr} = reaktansi rotor

x_m = reaktansi magnetisasi

r_s = resistansi stator

r_r = resistansi rotor

ω_e = kecepatan sudut elektrik stator

ω_b = kecepatan sudut elektrik base

ω_{re} = kecepatan elektrik rotor

V_{qs} = tegangan Q (Daya Reaktif) axis stator

V_{ds} = tegangan d axis stator

V_{qr} = tegangan Q (Daya Reaktif) axis rotor

V_{dr} = tegangan d axis rotor

Arus stator dan rotor pada rangkaian ekuivalen dapat dicari dengan rumus berikut

$$i_{qs} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi_{qs} - \psi_{mq}) \quad (2.19)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}) \quad (2.20)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{x_{lr}} (\psi_{qr} - \psi_{mq}) \quad (2.21)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{x_{lr}} (\psi_{dr} - \psi_{md}) \quad (2.22)$$

Dimana ψ_{mq} dan ψ_{md} adalah

$$\psi_{mq} = x_{ml}^* \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}}{x_{lr}} \right) \quad (2.23)$$

$$\psi_{md} = x_{ml}^* \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}}{x_{lr}} \right) \quad (2.24)$$

Dengan mensubstitusikan (2.23) dan (2.24) ke (2.19) dan (2.20), maka didapat

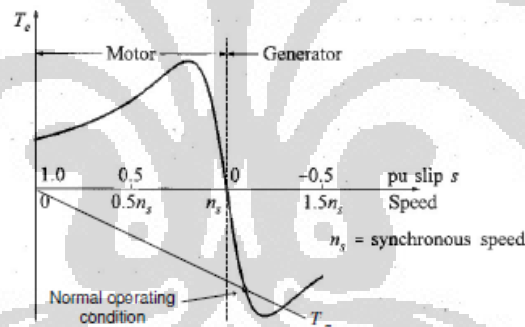
$$i_{qs} = \frac{1}{x_{ls}} \left(\psi_{qs} - x_{ml}^* \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}}{x_{lr}} \right) \right) = \frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \quad (2.25)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{x_{ls}} \left(\psi_{ds} - x_{ml}^* \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}}{x_{lr}} \right) \right) = \frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \quad (2.26)$$

Berikut rumusan untuk mencari torsi elektromekanik, dengan memasukkan persamaan (2.25) dan (2.26) ke rumus T_e

$$\begin{aligned}
T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \\
&= \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} \left(\psi_{ds} \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) \right. \\
&\quad \left. - \psi_{qs} \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) \right) \\
&= \frac{3 P}{2} \frac{1}{2 \omega_b} \left(\frac{\psi_{ds} \psi_{qs}}{x_{ls}} - \frac{\psi_{ds} \psi_{qs} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{ls}} - \frac{\psi_{ds} \psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right. \\
&\quad \left. - \frac{\psi_{qs} \psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qs} \psi_{ds} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{ls}} + \frac{\psi_{qs} \psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) \\
&= \frac{3 P}{2} \frac{x_{ml}^*}{2 \omega_b x_{ls} x_{lr}} (\psi_{qs} \psi_{dr} - \psi_{ds} \psi_{qr}) \\
&= C_5 (\psi_{qs} \psi_{dr} - \psi_{ds} \psi_{qr}) \\
C_5 &= \frac{3 P}{2} \frac{x_{ml}^*}{2 \omega_b x_{ls} x_{lr}}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

$$C_5 = \frac{3 P}{2} \frac{x_{ml}^*}{2 \omega_b x_{ls} x_{lr}} \tag{2.28}$$



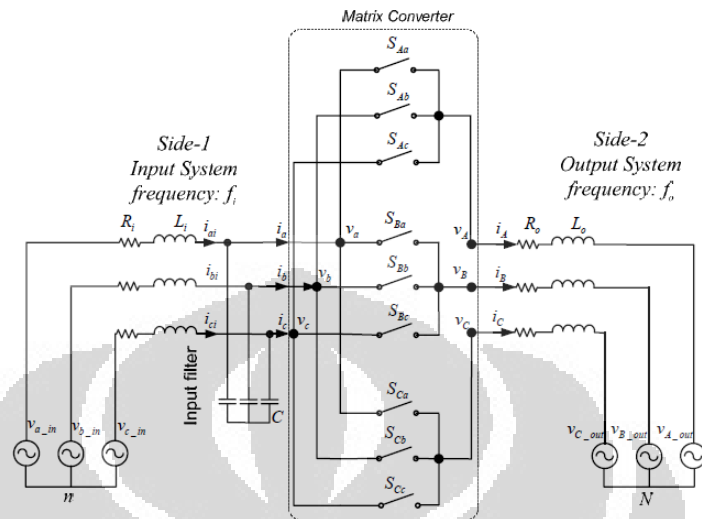
Gambar 2.6 Torsi Elektrik Terhadap Kecepatan

Error! Reference source not found.

Mesin induksi akan bekerja dalam mode generating bila diputar dengan kecepatan lebih tinggi daripada kecepatan sinkron oleh *prime mover*. Pada saat bekerja sebagai motoring, nilai T_e menjadi negatif.

2.5 Model Matriks Konverter

Berikut struktur matriks konverter (MC) yang dipergunakan



Gambar 2.7 Struktur MC Yang Dipergunakan

Barakati, S. M., Kazerani, M., & Aplevich, J. (2008). An Overall Dynamic Model for a Matrix Converter. *IEEE*, 13-18.

Parameter:

$V_i, i_i (i = a, b, c)$ = tegangan dan arus tiga fasa MC masukan

$V_j, i_j (j = A, B, C)$ = tegangan dan arus tiga fasa MC keluaran

$V_{i_in} (i = a, b, c)$ = sumber tegangan masukan tiga fasa

$V_{j_out} (j = A, B, C)$ = sumber tegangan keluaran tiga fasa

R_i = resistansi masukan

L_i = induktansi masukan

C = kapasitor filter masukan

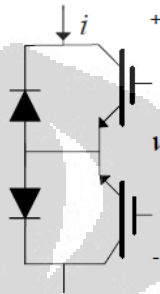
R_o = resistansi keluaran

L_o = induktansi keluaran

$S_{ij} (i = A, B, C, j = a, b, c)$ = switch antara fasa i dan j

MC terdiri dari sembilan *bidirectional switch*, setiap *switch* menghubungkan antara fasa masukan ke fasa keluaran. LC filter dipergunakan pada bagian masukan untuk memfilter harmonik frekuensi tinggi dari arus masukan. Penggunaan MC memungkinkan asupan tegangan sinusoidal ke keluaran, arus sinusoidal ke sisi masukan, mengontrol *power factor* dari

masuk dan mengontrol tegangan keluaran dan sudut fasanya. MC menggunakan *bidirectional switch*, hal ini dapat di buat dengan menggunakan IGBT, dan dioda. Ada beberapa konfigurasi yang bisa dipergunakan, tetapi konfigurasi *common emitter* lebih sering dipergunakan karena dapat meminimalisasikan induktansi. Berikut stuktur *bidirectional switch common emitter* dengan mempergunakan dua dioda dan dua IGBT.



Gambar 2.8 Struktur *Common Emitter Bidirectional Switch*

Barakati, S. M., Kazerani, M., & Aplevich, J. (2008). An Overall Dynamic Model for a Matrix Converter. *iee*, 13-18.

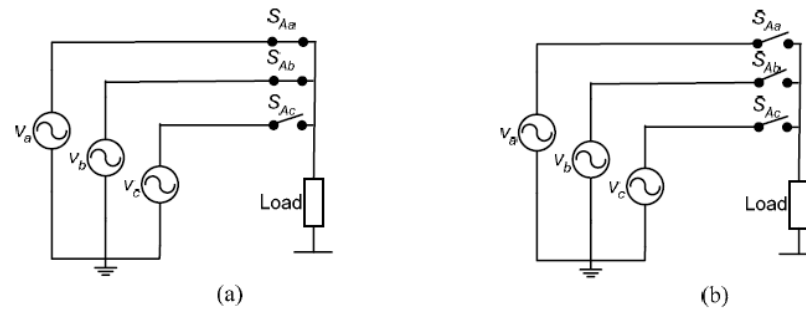
MC bekerja dengan membentuk pola *switching*, dengan memilih pola modulasi.

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & S_{ij} \text{ closed} \\ 0, & S_{ij} \text{ open} \end{cases}, i = A, B, C, j = a, b, c \quad (2.29)$$

Untuk dapat bekerja, ada beberapa ketentuan yang harus dipenuhi dalam menjalankan MC.

$$S_{ia} + S_{ib} + S_{ic} = 1, i = A, B, C \quad (2.30)$$

Ketentuan tersebut ada karena MC dicatu oleh sumber tegangan dan pada umumnya beban bersifat induktor. Menghubungkan lebih dari dua fasa masukan ke fasa keluaran yang sama akan menyebabkan hubungan singkat. Sedangkan pemutusan semua fasa masukan ke fasa keluaran akan menyebabkan sirkuit terbuka.



Gambar 2.9 (a) Hubung Singkat Sumber (b) Rangkaian Terbuka

Barakati, S. M., Kazerani, M., & Aplevich, J. (2008). An Overall Dynamic Model for a Matrix Converter. *iee*, 13-18.

Dengan memperhatikan dua kondisi pada masing-masing sirkuit. Maka ada 512 kemungkinan yang dapat ditimbulkan dari sembilan *switch* yang ada. Tapi karena adanya batasan yang sudah dijelaskan diatas, maka hanya ada 27 kemungkinan yang diperbolehkan.

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}, V_{ABC} = \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix}, i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, i_{ABC} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{Aa} & S_{Ab} & S_{Ac} \\ S_{Ba} & S_{Bb} & S_{Bc} \\ S_{Ca} & S_{Cb} & S_{Cc} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Hubungan masukan-keluaran dapat dihubungkan dengan persamaan berikut

$$V_{ABC} = S V_{abc} \quad (2.33)$$

$$i_{abc} = S^T i_{ABC} \quad (2.34)$$

S^T adalah transpose dari matriks S. Karena frekuensi *switching* jauh lebih tinggi daripada frekuensi masukan maupun keluaran, maka matriks S dapat digantikan dengan komponen frekuensi rendahnya. Komponen frekuensi rendah yang dimaksud adalah *duty cycle* dari *switch* tersebut. *Duty cycle* dapat didefinisikan sebagai

$$d_{ij} = \frac{t_{ij}}{T_{seq}}, i = A, B, C, j = a, b, c \quad (2.35)$$

t_{ij} adalah periode on dari *switch* ij pada satu periode. Batasan yang berlaku pada *duty cycle* adalah sebagai berikut

$$0 < d_{ij} < 1 \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} d_{ia} + d_{ib} + d_{ic} &= 1, i = A, B, C, j \\ &= a, b, c \end{aligned} \quad (2.37)$$

Matriks S bisa digantikan dengan matriks D yang disebut juga matriks modulasi atau komponen frekuensi rendah dari matriks S

$$D = \begin{bmatrix} d_{Aa} & d_{Ab} & d_{Ac} \\ d_{Ba} & d_{Bb} & d_{Bc} \\ d_{Ca} & d_{Cb} & d_{Cc} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$V_{ABC} = DV_{abc} \quad (2.39)$$

$$i_{abc} = D^T i_{ABC} \quad (2.40)$$

Berikut adalah matriks D yang memenuhi semua batasan diatas [14]

$$D_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + 2q\cos(\theta_{s1}) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} - 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} + 2\pi/3) \\ 1 + 2q\cos(\theta_{s1} + 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1}) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} - 2\pi/3) \\ 1 + 2q\cos(\theta_{s1} - 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} + 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1}) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$D_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 + 2q\cos(\theta_{s2}) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} - 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} + 2\pi/3) \\ 1 + 2q\cos(\theta_{s1} - 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} + 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s2}) \\ 1 + 2q\cos(\theta_{s1} + 2\pi/3) & 1 + 2q\cos(\theta_{s2}) & 1 + 2q\cos(\theta_{s1} - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$\theta_{s1} = \omega_i t - (\omega_o t + \alpha_o) \quad (2.43)$$

$$\theta_{s2} = \omega_i t + (\omega_o t + \alpha_o) \quad (2.44)$$

$$\omega_i = 2\pi f_i$$

f_i = MC masukan frekuensi

$$\omega_o = 2\pi f_o$$

f_o = MC keluaran frekuensi

α_o = sudut tegangan keluaran (sudut tegangan masukan sebagai referensi)

$$q = \frac{V_{om}}{V_{im}} = \text{rasio tegangan keluaran terhadap masukan pada MC, } 0 < q < 0.87$$

V_{om} = tegangan maksimum keluaran

V_{im} = tegangan maksimum masukan

Bila mempergunakan matriks D_1 , maka PF dari masukan akan sama dengan PF keluaran. Sedangkan bila mempergunakan D_2 , maka akan memberikan PF masukan dengan nilai yang sama dengan PF keluaran dengan

tanda yang berbeda. Tapi jika keduanya dipergunakan, maka akan membuat PF masukan yang bisa dikontrol. Berikut matriks D gabungan.

$$D = aD_1 + (1 - a)D_2 \quad (2.45)$$

a (*Displacement Power Factor Control*) merupakan nilai konstanta dengan rentang $0 \leq a \leq 1$. Untuk mendapatkan PF dengan nilai satu pada MC terminal masukan, maka a diset 0,5. Tapi hal ini tidak membuat PF pada terminal sumber masukan sama dengan satu.

Untuk membuat model secara keseluruhan, maka variabel tegangan dan arus harus di alihkan menjadi satu frame yang sama. MC akan dialihkan menjadi frame keluaran. Untuk memindahkan frame masukan ke frame keluaran, maka dapat dibuat persamaan

$$V_{ABC} = DV_{abc} = V_{abc}^D \quad (2.46)$$

$$Di_{abc} = i_{abc}^D \quad (2.47)$$

Persamaan tegangan pada bagian masukan

$$V_{abc} = V_{abc_in} - R_i i_{abc} - L_i \frac{d}{dt} i_{abc} \quad (2.48)$$

$$R_i = \begin{bmatrix} R_i & 0 & 0 \\ 0 & R_i & 0 \\ 0 & 0 & R_i \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$L_i = \begin{bmatrix} L_i & 0 & 0 \\ 0 & L_i & 0 \\ 0 & 0 & L_i \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Persamaan tegangan kemudian dipindahkan ke frame keluaran

$$DV_{abc} = DV_{abc_in} - DR_i i_{abc} - DL_i \frac{d}{dt} i_{abc} \quad (2.51)$$

$$V_{ABC} = V_{abc_in}^D - R_i^D i_{abc} - DL_i \frac{d}{dt} i_{abc} \quad (2.52)$$

Persamaan tegangan bagian keluaran

$$V_{ABC} = V_{ABC_out} + R_o i_{ABC} + L_o \frac{d}{dt} i_{ABC} \quad (2.53)$$

$$R_o = \begin{bmatrix} R_o & 0 & 0 \\ 0 & R_o & 0 \\ 0 & 0 & R_o \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

$$L_o = \begin{bmatrix} L_o & 0 & 0 \\ 0 & L_o & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Samakan kedua persamaan tegangan diatas (2.53) dan (2.52)

$$V_{ABC_out} + R_o i_{ABC} + L_o \frac{d}{dt} i_{ABC} = V_{abc_in}^D - R_i i_{abci}^D - DL_i \frac{d}{dt} i_{abci}^D \quad (2.56)$$

Persamaan arus pada kapasitor

$$i_{abcc} = C \frac{d}{dt} V_{abc} \quad (2.57)$$

$$C = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Tranfer persamaan arus (2.57) ke frame keluaran

$$D^{-1} i_{abcc}^D = C \frac{d}{dt} D^{-1} V_{ABC} \quad (2.59)$$

$$i_{abcc}^D = DC \frac{d}{dt} D^{-1} V_{ABC} \quad (2.60)$$

Untuk mengubah nilai *time varying* dari frame abc ke nilai *steady state* yang *time invariant*, maka sistem akan dialihkan ke qdo reference frame. Cara pengalihannya dengan mengikuti persamaan berikut

$$f_{qdo} = K_o f_{abc}, f_{abc} = K_o^{-1} f_{qdo} \quad (2.61)$$

$$K_o = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_o & \cos(\theta_o - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_o + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta_o & \sin(\theta_o - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_o + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$\theta_o = \omega_o t \quad (2.63)$$

Ubah persamaan tegangan ke qdo reference frame dengan rumusan (2.61)

$$\begin{aligned} K_o^{-1} V_{qdo_out} + R_o K_o^{-1} i_{qdo} + L_o \frac{d}{dt} K_o^{-1} i_{qdo} \\ = K_o^{-1} V_{qdo_in}^D - R_i K_o^{-1} i_{qdoi}^D - DL_i \frac{d}{dt} K_o^{-1} D^{-1} i_{qdoi}^D \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$V_{qdo_out} + R_o i_{qdo} + L_o K_o \frac{d}{dt} K_o^{-1} i_{qdo} \quad (2.65)$$

$$= V_{qdo_in}^D - R_i i_{qdoi}^D - K_o D L_i \frac{d}{dt} K_o^{-1} D^{-1} i_{qdoi}^D$$

$$V_{qdo_out} + R_o i_{qdoo} + L_o \frac{d}{dt} i_{qdoo} + L_o K_o \frac{d}{dt} K_o^{-1} i_{qdoo} \quad (2.66)$$

$$= V_{qdo_in}^D - R_i i_{qdoi}^D - L_i \frac{d}{dt} i_{qdoi}^D$$

$$- K_o D L_i \frac{d}{dt} K_o^{-1} D^{-1} i_{qdoi}^D$$

Ada beberapa bagian dari rumus (2.66) yang bisa disederhanakan. Berikut penyederhanaannya.

$$\frac{d}{dt} K_o^{-1} = \omega_o \begin{bmatrix} -\sin\theta_o & \cos\theta_o & 0 \\ -\sin(\theta_o - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_o - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_o + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_o + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$L_o K_o \frac{d}{dt} K_o^{-1} = L_o \begin{bmatrix} 0 & \omega_o & 0 \\ -\omega_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

$$K_o D L_i \frac{d}{dt} K_o^{-1} D^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_i}{2a-1} L_i & 0 \\ -\omega_i(2a-1)L_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$V_{qdo_out} + R_o i_{qdoo} + L_o \frac{d}{dt} i_{qdoo} + L_o \begin{bmatrix} 0 & \omega_o & 0 \\ -\omega_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_{qdoo} \quad (2.70)$$

$$= V_{qdo_in}^D - R_i i_{qdoi}^D - L_i \frac{d}{dt} i_{qdoi}^D$$

$$- \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_i}{2a-1} L_i & 0 \\ -\omega_i(2a-1)L_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_{qdoi}^D$$

Rumus arus juga dipindah ke dqo reference frame

$$K_o^{-1}i_{dqoc}^D = DC \frac{d}{dt} D^{-1}K_o^{-1}V_{dqoo} \quad (2.71)$$

$$i_{dqoc}^D = K_o DC \frac{d}{dt} D^{-1}K_o^{-1}V_{dqoo} + C \frac{d}{dt} V_{dqoo} \quad (2.72)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_i}{2a-1}C & 0 \\ -\omega_i(2a-1)C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} V_{dqoo} + C \frac{d}{dt} V_{dqoo}$$

Setelah itu bentuk menjadi persamaan *state space*. Persamaan tegangan dipisah antara q axis dan d axis

$$V_{q_out} + R_o i_{qo} + L_o \frac{d}{dt} i_{qo} + L_o \omega_o i_{do} \quad (2.73)$$

$$= V_{q_in}^D - R_i i_{qi}^D - L_i \frac{d}{dt} i_{qi}^D - \frac{\omega_i}{2a-1} L_i i_{di}^D$$

$$V_{d_out} + R_o i_{do} + L_o \frac{d}{dt} i_{do} - L_o \omega_o i_{qo} \quad (2.74)$$

$$= V_{d_in}^D - R_i i_{di}^D - L_i \frac{d}{dt} i_{di}^D + \omega_i(2a-1)L_i i_{qi}^D$$

Disusun persamaannya menjadi terhadap turunan

$$\frac{d}{dt} i_{qo} \quad (2.75)$$

$$= \frac{V_{q_in}^D - R_i i_{qi}^D - L_i \frac{d}{dt} i_{qi}^D - \frac{\omega_i}{2a-1} L_i i_{di}^D - (V_{q_out} + R_o i_{qo} + L_o \omega_o i_{do})}{L_o}$$

$$\frac{d}{dt} i_{do} \quad (2.76)$$

$$= \frac{V_{d_in}^D - R_i i_{di}^D - L_i \frac{d}{dt} i_{di}^D + \omega_i(2a-1)L_i i_{qi}^D - (V_{d_out} + R_o i_{do} - L_o \omega_o i_{qo})}{L_o}$$

Kalau diperhatikan, bagian sebelah kanan persamaan tegangan (2.70) adalah persamaan keluaran terminal MC

$$V_{qdo} = V_{qdo_in}^D - R_i i_{qdoi}^D - L_i \frac{d}{dt} i_{qdoi}^D \quad (2.77)$$

$$- \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_i}{2a-1} L_i & 0 \\ -\omega_i(2a-1)L_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_{qdoi}^D$$

Persamaan (2.77) dipisah menjadi q axis dan d axis

$$V_{q_in}^D = V_{qo} + R_i i_{qi}^D + L_i \frac{d}{dt} i_{qi}^D + \frac{\omega_i}{2a-1} L_i i_{di}^D \quad (2.78)$$

$$V_{d_in}^D = V_{do} + R_i i_{di}^D + L_i \frac{d}{dt} i_{di}^D - \omega_i(2a-1)L_i i_{qi}^D \quad (2.79)$$

Substitusikan ke persamaan tegangan total (2.75) dan (2.76)

$$\frac{d}{dt} i_{qo} = \frac{V_{qo} - V_{qout} - R_o i_{qo} - L_o \omega_o i_{do}}{L_o} \quad (2.80)$$

$$\frac{d}{dt} i_{do} = \frac{V_{do} - V_{dout} - R_o i_{do} + L_o \omega_o i_{qo}}{L_o} \quad (2.81)$$

Persamaan state yang lain di dapat dengan mengatur ulang persamaan tegangan menjadi terhadap persamaan turunan yang lain

$$\frac{d}{dt} i_{qi}^D \quad (2.82)$$

$$= \frac{V_{q_in}^D - R_i i_{qi}^D - \frac{\omega_i}{2a-1} L_i i_{di}^D - (V_{q_out} + R_o i_{qo} + L_o \frac{d}{dt} i_{qo} + L_o \omega_o i_{do})}{L_i}$$

$$\frac{d}{dt} i_{di}^D \quad (2.83)$$

$$= \frac{V_{d_in}^D - R_i i_{di}^D + \omega_i(2a-1)L_i i_{qi}^D - (V_{d_out} + R_o i_{do} + L_o \frac{d}{dt} i_{do} - L_o \omega_o i_{qo})}{L_i}$$

Substitusikan lagi seperti sebelumnya

$$\frac{d}{dt} i_{qi}^D = \frac{V_{q_in}^D - R_i i_{qi}^D - \frac{\omega_i}{2a-1} L_i i_{di}^D - V_{qo}}{L_i} \quad (2.84)$$

$$\frac{d}{dt} i_{di}^D = \frac{V_{d_in}^D - R_i i_{di}^D + \omega_i(2a-1)L_i i_{qi}^D - V_{do}}{L_i} \quad (2.85)$$

Atur persamaan terminal kapasitor, dan ubah ke dalam bentuk qdo reverence frame

$$i_{abcC} = i_{abci} - i_{abc} \quad (2.86)$$

$$K_o^{-1}D^{-1}i_{qdoc}^D = K_o^{-1}D^{-1}i_{qdoi}^D - D^TK_o^{-1}i_{qdo} \quad (2.87)$$

$$i_{qdoc}^D = i_{qdoi}^D - K_oDD^TK_o^{-1}i_{qdo} \quad (2.88)$$

$$K_oDD^TK_o^{-1} \quad (2.89)$$

$$= q^2 \cos(\alpha_o) \begin{bmatrix} \cos(\alpha_o) & \sin(\alpha_o) & 0 \\ (2a-1)^2 \sin(\alpha_o) & (2a-1)^2 \cos(\alpha_o) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ & & \hline & & q^2 \cos(\alpha_o) \end{bmatrix} \quad (2.90)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_i}{2a-1}C & 0 \\ -\omega_i(2a-1)C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} V_{dqoo} + C \frac{d}{dt} V_{dqoo} = i_{qdoi}^D$$

$$- q^2 \cos(\alpha_o) \begin{bmatrix} \cos(\alpha_o) & \sin(\alpha_o) & 0 \\ (2a-1)^2 \sin(\alpha_o) & (2a-1)^2 \cos(\alpha_o) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ & & \hline & & q^2 \cos(\alpha_o) \end{bmatrix} i_q$$

$$\frac{d}{dt} V_{qo} = \frac{i_{qi}^D}{C} - \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \{ \cos(\alpha_o) i_{qo} + \sin(\alpha_o) i_{do} \}}{C} - \frac{\omega_i}{2a-1} V_{do} \quad (2.91)$$

$$\frac{d}{dt} V_{do} \quad (2.92)$$

$$= \frac{i_{di}^D}{C} - \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \{ (2a-1)^2 \sin(\alpha_o) i_{qo} + (2a-1)^2 \cos(\alpha_o) i_{do} \}}{C}$$

$$+ \omega_i(2a-1) V_{qo}$$

Total ada 6 persamaan state untuk memodelkan MC, berikut ke enam persamaan tersebut

$$\frac{d}{dt} i_{qo} = -\frac{R_o}{L_o} i_{qo} - \omega_o i_{do} + \frac{1}{L_o} (V_{qo} - V_{q_out}) \quad (2.93)$$

$$\frac{d}{dt} i_{do} = \omega_o i_{qo} - \frac{R_o}{L_o} i_{do} + \frac{1}{L_o} (V_{do} - V_{d_out}) \quad (2.94)$$

$$\frac{d}{dt} i_{qi}^D = -\frac{R_i}{L_i} i_{qi}^D - \frac{\omega_i}{2a-1} i_{di}^D - \frac{1}{L_i} V_{qo} + \frac{1}{L_i} V_{q_in}^D \quad (2.95)$$

$$\frac{d}{dt} i_{di}^D = \omega_i(2a-1) i_{qi}^D - \frac{R_i}{L_i} i_{di}^D - \frac{1}{L_i} V_{do} + \frac{1}{L_i} V_{d_in}^D \quad (2.96)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_{qo} = & -\frac{q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} i_{qo} - \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} i_{do} + \frac{1}{C} i_{qi}^D \\ & - \frac{\omega_i}{2a-1} V_{do} \end{aligned} \quad (2.97)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_{do} = & -\frac{q^2(2a-1)^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} i_{qo} \\ & - \frac{q^2(2a-1)^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} i_{do} + \frac{1}{C} i_{di}^D \\ & + \omega_i(2a-1) V_{qo} \end{aligned} \quad (2.98)$$

Pada persamaan state di atas, membutuhkan data tegangan masukan keluaran dalam qdo frame. Hal ini bisa didapatkan dengan cara berikut

$$V_{abc_out} = V_{m_out} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t + \alpha_o) \\ \cos(\omega_o t + \alpha_o - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_o t + \alpha_o + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.99)$$

Ubah ke qdo reference frame

$$\begin{aligned} V_{qdo_out} & \\ &= K_o V_{abc_out} \\ &= K_o V_{m_out} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t + \alpha_o) \\ \cos(\omega_o t + \alpha_o - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_o t + \alpha_o + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} = V_{m_out} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_o) \\ -\sin(\alpha_o) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.100)$$

Sedangkan untuk tegangan masukan yang dilihat dari sisi keluaran dapat dilihat penurunannya berikut ini

$$V_{abc_in} = V_{m_in} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t + \alpha_i) \\ \cos(\omega_i t + \alpha_i - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_i t + \alpha_i + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.101)$$

Dibawa ke qdo reference frame

$$V_{qdo_in}^D = K_o D V_{abc_in} = q V_{m_in} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_o) \\ -\sin(\alpha_o) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.102)$$

Daya pada masukan dapat dicari dengan penurunan bahwa daya aktif pada qdo reference frame adalah

$$P_{in} = \frac{3}{2} V_{qdo_in}^T i_{qdoi} \quad (2.103)$$

Persamaan tersebut harus dinyatakan dalam variabel state yang sudah dinyatakan sebelumnya

$$i_{qdoi}^D = K_o(\omega_o) D i_{abci} \quad (2.104)$$

$$i_{abci} = (K_o(\omega_o) D)^{-1} i_{qdoi}^D \quad (2.105)$$

$$i_{qdoi} = K_o(\omega_i) (K_o(\omega_o) D)^{-1} i_{qdoi}^D \quad (2.106)$$

$$K_o(\omega_i) (K_o(\omega_o) D)^{-1} = \frac{1}{q} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_o) & -\sin(\alpha_o) & 0 \\ \sin(\alpha_o) & \cos(\alpha_o) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{q} \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

Persamaan tegangan masukan dalam qdo reference frame dinyatakan sebagai berikut

$$V_{qdo_in} = K_o V_{abc_in} = V_{m_in} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) \\ -\sin(\alpha_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

Substitusi persamaan tegangan dan arus ke dalam rumus daya. Karena menganggap sumber tegangan masukan sebagai referensi, maka nilai α_i adalah nol. Sehingga mendapatkan persamaan

$$P_{in} = \frac{3}{2} V_{m_in} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) \\ -\sin(\alpha_i) \\ 0 \end{bmatrix}^T \frac{1}{q} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_o) & -\sin(\alpha_o) & 0 \\ \frac{\sin(\alpha_o)}{2a-1} & \frac{\cos(\alpha_o)}{2a-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{q} \end{bmatrix} i_{qdoi}^D \quad (2.109)$$

$$= \frac{3}{2q} V_{m_in} \left\{ \cos(\alpha_i) (\cos(\alpha_o) i_{qi}^D - \sin(\alpha_o) i_{di}^D) + \frac{\sin(\alpha_i)}{2a-1} (\sin(\alpha_o) i_{qi}^D + \cos(\alpha_o) i_{di}^D) \right\}$$

$$P_{in} = \frac{3}{2q} V_{im} [\cos(\alpha_o) i_{qi}^D - \sin(\alpha_o) i_{di}^D] \quad (2.110)$$

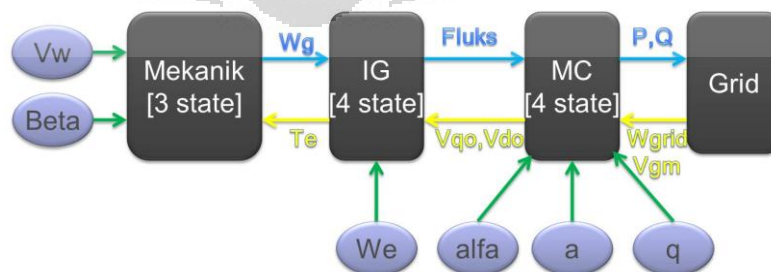
Rumusan daya reaktif pada qdo reference frame adalah $Q = \frac{3}{2}(V_d i_q - V_q i_d)$, dengan membandingkan dengan $P = \frac{3}{2}(V_q i_q + V_d i_d)$, maka Q (Daya Reaktif) bisa didapat dari P, dengan mengganti V_q menjadi V_d dan V_d menjadi $-V_q$. Rumus Q (Daya Reaktif) menjadi seperti rumus di bawah ini. Jangan lupa sumber tegangan masukan sebagai referensi, maka nilai α_i adalah nol. Sehingga mendapatkan persamaan

$$Q_{in} = \frac{3}{2q} V_{m_in} \left\{ \sin(\alpha_i) (\cos(\alpha_o) i_{qi}^D - \sin(\alpha_o) i_{di}^D) - \frac{\cos(\alpha_i)}{2a-1} (\sin(\alpha_o) i_{qi}^D + \cos(\alpha_o) i_{di}^D) \right\} \quad (2.111)$$

$$Q_{in} = -\frac{3}{2q} \frac{V_{im}}{2a-1} [\sin(\alpha_o) i_{qi}^D + \cos(\alpha_o) i_{di}^D] \quad (2.112)$$

2.6 Model Dinamik Turbin Angin Secara keseluruhan

Secara garis besar, berikut adalah alur yang terjadi di dalam sistem, dan input output maupun persamaan state dari sistem



Gambar 2.10 Sistem PLTA Secara Keseluruhan

$$X = [i_{qG}^D \quad i_{dG}^D \quad V_{qo} \quad V_{do} \quad \psi_{qs} \quad \psi_{ds} \quad \psi_{qr} \quad \psi_{dr} \quad \omega_g \quad \delta\theta \quad \omega_e]^T$$

$$U = [\omega_e \quad q \quad a \quad \alpha_o \quad V_W \quad \beta]^T$$

$$Y = [P_{grid} \quad Q_{grid}]^T$$

Hal yang perlu diperhatikan saat menggabungkan semua state yang ada adalah nama variabel. Berikut persamaan nama variabel

$$\text{Tegangan terminal generator } V_{qs} = V_{q_{out}}, V_{ds} = V_{d_{out}}$$

$$\text{Arus terminal generator } i_{qs} = V_{qo}, i_{ds} = i_{do}$$

$$\text{Frekuensi sinkron generator dan frekuensi masukan MC } \omega_o = \omega_e, \omega_i = \omega_{grid}$$

$$\text{Sumber tegangan terminal } V_{qG} = V_{q_{in}}, V_{dG} = V_{d_{in}}$$

Perhatikan bahwa pada tegangan terminal generator, V_{qs} dan V_{ds} harus dinyatakan dalam masukan variabel dan state variabel. Masukan variabel pada sistem keseluruhan adalah V_{qG} dan V_{dG} . Demikian juga harus dilakukan sedikit perubahan pada persamaan fluks pada stator menjadi berdasarkan variabel state. Penurunannya ada pada rumus di bawah ini. Rumus (2.25) dan (2.26) yaitu rumus i_{qs} dan i_{ds} dimasukkan ke persamaan tegangan. Setelah itu pisahkan antara yang variabel state dengan yang bukan. Nilai V_{qs} dan V_{ds} yang didapatkan dari hasil substitusi tersebut, yaitu persamaan (2.113) dan persamaan (2.123). Dimasukkan ke persamaan fluks ψ_{ds} dan fluks ψ_{qs} dari generator induksi pada persamaan (2.10) dan (2.11). Setelah itu untuk mempermudah penulisan dipergunakan koefisien bantu yang ada di persamaan (2.117)-(2.122).

$$\begin{aligned}
V_{qs} = V_{q_{out}} &= -L_o \frac{d}{dt} i_{qs} - R_o i_{qs} - \omega_e i_{ds} L_o + V_{qo} \\
&= -L_o \frac{d}{dt} \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) \\
&\quad - R_o \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) \\
&\quad - \omega_e \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) L_o + V_{qo} \\
&= -L_o \frac{d}{dt} \frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) + L_o \frac{d}{dt} \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \\
&\quad - R_o \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) \\
&\quad - \omega_e \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) L_o + V_{qo} \\
&= -L_o \frac{d}{dt} \frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \\
&\quad + L_o \left[C_3 \psi_{qs} + C_4 \psi_{qr} - (\omega_e - \omega_g) \psi_{dr} \right] \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \quad (2.113) \\
&\quad - R_o \left(\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) \\
&\quad - \omega_e \left(\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right) L_o + V_{qo} \\
&= \frac{d}{dt} \psi_{qs} \frac{-L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \\
&\quad + \psi_{qs} \left[L_o C_3 \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} - \frac{R_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\
&\quad - \psi_{ds} \frac{\omega_e L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) + \psi_{qr} \left[\frac{L_o C_4 x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} + \frac{R_o x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \psi_{dr} \left[-(\omega_e - \omega_g) L_o \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} + \frac{\omega_e x_{ml}^* L_o}{x_{ls} x_{lr}} \right] + V_{qo}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{qs}}{dt} &= C_1\psi_{qs} - \omega_e\psi_{ds} + C_2\psi_{qr} + \omega_b V_{qs} \\ &= C_1\psi_{qs} - \omega_e\psi_{ds} + C_2\psi_{qr}\end{aligned}\quad (2.114)$$

$$\begin{aligned}&+ \omega_b \left[\frac{d}{dt} \psi_{qs} \frac{-L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right. \\ &+ \psi_{qs} \left[L_o C_3 \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} - \frac{R_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\ &- \psi_{ds} \frac{\omega_e L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) + \psi_{qr} \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} [L_o C_4 + R_o] \\ &\left. + \psi_{dr} \frac{x_{ml}^* L_o \omega_g}{x_{ls} x_{lr}} + V_{qo} \right]\end{aligned}$$

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} \left[1 + \frac{\omega_b L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \quad (2.115)$$

$$\begin{aligned}&= \psi_{qs} \left[C_1 + \omega_b L_o C_3 \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} - \frac{\omega_b R_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\ &+ \psi_{ds} \left[-\omega_e + \frac{\omega_b \omega_e L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\ &+ \psi_{qr} \left[C_2 + \frac{\omega_b x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} [L_o C_4 + R_o] \right] + \psi_{dr} \frac{\omega_b x_{ml}^* L_o \omega_g}{x_{ls} x_{lr}} \\ &+ \omega_b V_{qo}\end{aligned}$$

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = C_1^* \psi_{qs} + C_2^* \omega_e \psi_{ds} + C_3^* \psi_{qr} + C_4^* \omega_g \psi_{dr} + C_5^* \omega_b V_{qo} \quad (2.116)$$

$$C_0 = 1 + \frac{\omega_b L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \quad (2.117)$$

$$C_1^* = \frac{1}{C_0} \left[C_1 + \omega_b L_o C_3 \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} - \frac{\omega_b R_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \quad (2.118)$$

$$C_2^* = \frac{1}{C_0} \left[-1 + \frac{\omega_b L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \quad (2.119)$$

$$C_3^* = \frac{1}{C_0} \left[C_2 + \frac{\omega_b x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} [L_o C_4 + R_o] \right] \quad (2.120)$$

$$C_4^* = \frac{1}{C_0} \left[\frac{\omega_b x_{ml}^* L_o}{x_{ls} x_{lr}} \right] \quad (2.121)$$

$$C_5^* = \frac{1}{C_0} \quad (2.122)$$

$$\begin{aligned}
V_{ds} = V_{d_out} &= -L_o \frac{d}{dt} i_{ds} - R_o i_{ds} + \omega_e i_{qs} L_o + V_{do} \\
&= -L_o \frac{d}{dt} \left[\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad - R_o \left[\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \omega_e \left[\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] L_o + V_{do} = \\
&= -L_o \frac{d}{dt} \frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) + L_o \frac{d}{dt} \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \\
&\quad - R_o \left[\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \omega_e \left[\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] L_o + V_{do} \\
&= -L_o \frac{d}{dt} \frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \\
&\quad + L_o \left[C_3 \psi_{ds} + (\omega_e - \omega_g) \psi_{qr} + C_4 \psi_{dr} \right] \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \\
&\quad - R_o \left[\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \omega_e \left[\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] L_o + V_{do} \\
&= \frac{d}{dt} \psi_{ds} \left[\frac{-L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] + \psi_{qs} \left[\frac{\omega_e L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\
&\quad + \psi_{ds} \left[\frac{L_o C_3 x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} - \frac{R_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\
&\quad - \psi_{qr} \left[\frac{-L_o (\omega_e - \omega_g) x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} + \frac{\omega_e x_{ml}^* L_o}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \psi_{dr} \left[\frac{L_o C_4 x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} + \frac{R_o x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] + V_{do}
\end{aligned} \quad (2.123)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = \omega_e \psi_{qs} + C_1 \psi_{ds} + C_2 \psi_{dr} + \omega_b V_{ds} \quad (2.124)$$

$$\begin{aligned} &= \omega_e \psi_{qs} + C_1 \psi_{ds} + C_2 \psi_{dr} \\ &+ \omega_b \left[\frac{d}{dt} \psi_{ds} \left[\frac{-L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \right. \\ &+ \psi_{qs} \left[\frac{\omega_e L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\ &+ \psi_{ds} \left[\frac{L_o C_3 x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} - \frac{R_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] - \psi_{qr} \frac{x_{ml}^* L_o \omega_g}{x_{ls} x_{lr}} \\ &\left. + \psi_{dr} \frac{x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} [L_o C_4 + R_o] + V_{do} \right] = \end{aligned} \quad (2.125)$$

$$\begin{aligned} &\frac{d\psi_{ds}}{dt} \left[1 + \frac{\omega_b L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\ &= -\psi_{qs} \left[-\omega_e - \frac{\omega_b \omega_e L_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\ &+ \psi_{ds} \left[C_1 + \frac{\omega_b L_o C_3 x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} - \frac{\omega_b R_o}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\ &- \psi_{qr} \frac{\omega_b x_{ml}^* L_o \omega_g}{x_{ls} x_{lr}} + \psi_{dr} \left[C_2 + \frac{\omega_b x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} [L_o C_4 + R_o] \right] \\ &+ \omega_b V_{do} \end{aligned} \quad (2.126)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = -C_2^* \omega_e \psi_{qs} + C_1^* \psi_{ds} - C_4^* \psi_{qr} \omega_g + C_3^* \psi_{dr} + C_5^* \omega_b V_{do} \quad (2.126)$$

Selain persamaan yang ada di generator induksi yang dimodifikasi, persamaan state yang ada di MC juga perlu di modifikasi. Rumus turunan V_{qo} dan turunan V_{do} pada MC (2.97) dan (2.98) diganti nilai i_{qs} dan i_{ds} nya sesuai dengan rumus (2.25) dan (2.26). Kemudian seperti sebelumnya pula, pisahkan state variabel dengan parameter yang lain. Variabel pembantu yang lain (2.128)-(2.131) dipergunakan agar penulisan rumus menjadi lebih mudah.

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}V_{qo} &= -\frac{q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} i_{qo} - \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} i_{do} + \frac{1}{C} i_{qi}^D \\
&\quad - \frac{\omega_i}{2a-1} V_{do} \\
&= -\frac{q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} i_{qs} - \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} i_{ds} + \frac{1}{C} i_{qG}^D \\
&\quad - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} V_{do} \\
&= -\frac{q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} \left[\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \tag{2.127}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\quad - \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} \left[\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \frac{1}{C} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} V_{do} \\
&= \psi_{qs} \left[\frac{-q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\
&\quad + \psi_{ds} \left[\frac{-q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \right] \\
&\quad + \psi_{qr} \frac{q^2 \cos^2(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} + \psi_{dr} \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} \\
&\quad + \frac{1}{C} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} V_{do} \\
&= \psi_{qs} A_7 + \psi_{ds} A_7^* + \psi_{qr} A_8 + \psi_{dr} A_8^* + \frac{1}{C} i_{qG}^D \\
&\quad - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} V_{do}
\end{aligned}$$

$$A_7 = \frac{-q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \tag{2.128}$$

$$A_7^* = \frac{-q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} \right) \tag{2.129}$$

$$A_8 = \frac{q^2 \cos^2(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} \tag{2.130}$$

$$A_8^* = \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} \quad (2.131)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} V_{d0} &= -\frac{q^2(2a-1)^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} i_{q0} \\
&\quad - \frac{q^2(2a-1)^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} i_{d0} + \frac{1}{C} i_{di}^D \\
&\quad + \omega_i(2a-1)V_{q0} \\
&= -\frac{q^2(2a-1)^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} i_{qs} \\
&\quad - \frac{q^2(2a-1)^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} i_{ds} + \frac{1}{C} i_{dG}^D \\
&\quad + \omega_{grid}(2a-1)V_{q0} \\
&= -\frac{q^2(2a-1)^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C} \left[\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}}\right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{\psi_{qr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \quad (2.132) \\
&\quad - \frac{q^2(2a-1)^2 \cos^2(\alpha_o)}{C} \left[\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}}\right) - \frac{\psi_{dr} x_{ml}^*}{x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \frac{1}{C} i_{dG}^D + \omega_{grid}(2a-1)V_{q0} \\
&= \psi_{qs}(2a-1)^2 \left[-\frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}}\right) \right] \\
&\quad + \psi_{ds}(2a-1)^2 \left[-\frac{q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}}\right) \right] \\
&\quad + \psi_{qr}(2a-1)^2 \left[\frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} \right] \\
&\quad + \psi_{dr}(2a-1)^2 \frac{q^2 \cos^2(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} + \frac{1}{C} i_{dG}^D \\
&\quad + \omega_{grid}(2a-1)V_{q0} \\
&= \psi_{qs}(2a-1)^2 A_7^* + \psi_{ds}(2a-1)^2 A_7 \\
&\quad + \psi_{qr}(2a-1)^2 A_8^* + \psi_{dr}(2a-1)^2 A_8 + \frac{1}{C} i_{dG}^D \\
&\quad + \omega_{grid}(2a-1)V_{q0}
\end{aligned}$$

Secara keseluruhan berikut adalah sebelas persamaan state secara lengkap

$$\frac{d}{dt} i_{qG}^D = -\frac{R_i}{L_i} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{q0} + \frac{1}{L_i} V_{qG}^D \quad (2.133)$$

$$\frac{d}{dt} i_{dG}^D = \omega_{grid}(2a-1) i_{qG}^D - \frac{R_i}{L_i} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{d0} + \frac{1}{L_i} V_{dG}^D \quad (2.134)$$

$$\frac{d}{dt} V_{q0} = \psi_{qs} A_7 + \psi_{ds} A_7^* + \psi_{qr} A_8 + \psi_{dr} A_8^* + \frac{1}{C} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} V_{d0} \quad (2.135)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_{d0} = & \psi_{qs}(2a-1)^2 A_7^* + \psi_{ds}(2a-1)^2 A_7 + \psi_{qr}(2a-1)^2 A_8^* \\ & + \psi_{dr}(2a-1)^2 A_8 + \frac{1}{C} i_{dG}^D + \omega_{grid}(2a-1) V_{q0} \end{aligned} \quad (2.136)$$

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = C_1^* \psi_{qs} + C_2^* \omega_e \psi_{ds} + C_3^* \psi_{qr} + C_4^* \omega_g \psi_{dr} + C_5^* \omega_b V_{q0} \quad (2.137)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = -C_2^* \omega_e \psi_{qs} + C_1^* \psi_{ds} - C_4^* \psi_{qr} \omega_g + C_3^* \psi_{dr} + C_5^* \omega_b V_{d0} \quad (2.138)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = C_3 \psi_{qs} + C_4 \psi_{qr} - (\omega_e - \omega_{re}) \psi_{dr} \quad (2.139)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = C_3 \psi_{ds} + (\omega_e - \omega_{re}) \psi_{qr} + C_4 \psi_{dr} \quad (2.140)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_g = & \frac{1}{J_G} \left[\frac{1}{n_{gear}} \left(K_s \delta\theta + B \left(\omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \right) \right) - C_5 (\psi_{qs} \psi_{dr} \right. \\ & \left. - \psi_{ds} \psi_{qr}) \right] \end{aligned} \quad (2.141)$$

$$\frac{d}{dt} \delta\theta = \omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \quad (2.142)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_T = & \frac{1}{J_T} \left[\frac{1}{2\omega_T} \rho A_r C_p(\beta, \lambda) V_W^3 \right. \\ & \left. - \left(K_s \delta\theta + B \left(\omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (2.143)$$

Rumusan daya jala-jala dapat ditulis berdasarkan daya masukan MC, dengan perubahan nama variabel yang bersesuaian

$$P_{Grid} = \frac{3}{2q} V_{Gm} [\cos(\alpha_o) i_{qG}^D - \sin(\alpha_o) i_{dG}^D] \quad (2.144)$$

$$Q_{Grid} = -\frac{3}{2q} \frac{V_{Gm}}{2a-1} [\sin(\alpha_o) i_{qG}^D + \cos(\alpha_o) i_{dG}^D] \quad (2.145)$$

Dengan V_{Gm} adalah tegangan fasa maksimum dari jala-jala.

2.7 Model Dinamik Turbin Angin Secara Keseluruhan Dengan Strategi V/f Konstan

Tegangan terminal dan frekuensi dari generator induksi biasanya dikontrol berdasarkan strategi V/f konstan untuk menghindari saturasi fluks dan arus yang tinggi. Hal ini harus dilakukan, karena sistem dipersiapkan untuk *variable speed* dimana kecepatan frekuensi akan diubah-ubah. Dengan strategi V/f, maka tegangan akan dibuat sebanding dengan frekuensi. Nilai yang di pergunakan untuk mengontrol variasi dari tegangan dan frekuensi adalah

$$K_{Vf} = \frac{q_{rated}}{\omega_e} \quad (2.146)$$

$$q = K_{Vf} \omega_e \quad (2.147)$$

Dengan begitu, sebelas persamaan state harus dimodifikasi agar sesuai dengan strategi V/f konstan. Bagian yang diubah adalah bagian-bagian yang mencantumkan variabel q (rasio tegangan), seperti I_{qgd} dan I_{dgd} . Selain itu variabel pembantu (2.128)-(2.131) juga terdapat variabel q. Terakhir pada bagian keluaran juga harus dimodifikasi karena terdapat konstanta q.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{qG}^D &= -\frac{R_i}{L_i} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{qO} + \frac{1}{L_i} V_{qG}^D \quad (2.148) \\ &= -\frac{R_i}{L_i} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{qO} + \frac{1}{L_i} V_{Gm} q \cos(\alpha_o) \\ &= -\frac{R_i}{L_i} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{qO} \\ &\quad + \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \omega_e \cos(\alpha_o) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} i_{dG}^D = \omega_{grid}(2a-1)i_{qG}^D - \frac{R_i}{L_i} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{dO} + \frac{1}{L_i} V_{dG}^D \quad (2.149)$$

$$= \omega_{grid}(2a-1)i_{qG}^D - \frac{R_i}{L_i} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{dO}$$

$$- \frac{1}{L_i} V_{Gm} q \sin(\alpha_o)$$

$$= \omega_{grid}(2a-1)i_{qG}^D - \frac{R_i}{L_i} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{dO}$$

$$- \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \omega_e \sin(\alpha_o)$$

$$A_7 = \frac{-q^2 \cos^2(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}}\right) = \frac{(K_{Vf} \omega_e)^2 \cos^2(\alpha_o)}{C L_s \omega_e} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1\right) \quad (2.150)$$

$$= \omega_e \cos^2(\alpha_o) \frac{K_{Vf}}{C L_s} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1\right) = \omega_e \cos^2(\alpha_o) A_{71}$$

$$A_{71} = \frac{K_{Vf}}{C L_s} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1\right) \quad (2.151)$$

$$A_7^* = \frac{-q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C x_{ls}} \left(1 - \frac{x_{ml}^*}{x_{ls}}\right) \quad (2.152)$$

$$= \frac{(K_{Vf} \omega_e)^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o)}{C L_s \omega_e} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1\right)$$

$$= \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e \frac{K_{Vf}}{C L_s} \left(\frac{x_{ml}^*}{x_{ls}} - 1\right)$$

$$= \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e A_{71}$$

$$A_8 = \frac{q^2 \cos^2(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} = \frac{(K_{Vf} \omega_e)^2 \cos^2(\alpha_o) x_{ml}^*}{C L_s \omega_e x_{lr}} \quad (2.153)$$

$$= \omega_e \cos^2(\alpha_o) \frac{K_{Vf}^2 x_{ml}^*}{C L_s x_{lr}} = \omega_e \cos^2(\alpha_o) A_{81}$$

$$A_{81} = \frac{K_{Vf}^2 x_{ml}^*}{C L_s x_{lr}} \quad (2.154)$$

$$\begin{aligned} A_8^* &= \frac{q^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o) x_{ml}^*}{C x_{ls} x_{lr}} = \frac{(K_{Vf} \omega_e)^2 \cos(\alpha_o) \sin(\alpha_o) x_{ml}^*}{C L_s \omega_e x_{lr}} = \\ &= \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e \frac{K_{Vf}^2 x_{ml}^*}{C L_s x_{lr}} = \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e A_{81} \end{aligned} \quad (2.155)$$

Berikut sebelas persamaan state yang sudah dimodifikasi

$$\frac{d}{dt} i_{qG}^D = -\frac{R_i}{L_i} i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{qo} + \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \omega_e \cos(\alpha_o) \quad (2.156)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{dG}^D &= \omega_{grid}(2a-1) i_{qG}^D - \frac{R_i}{L_i} i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} V_{do} \\ &\quad - \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \omega_e \sin(\alpha_o) \end{aligned} \quad (2.157)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_{qo} &= \omega_e \left\{ A_{71} \left[\cos^2(\alpha_o) \psi_{qs} + \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \psi_{ds} \right] \right. \\ &\quad \left. + A_{81} \left[\cos^2(\alpha_o) \psi_{qr} + \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \psi_{dr} \right] \right\} + \frac{1}{C} i_{qG}^D \\ &\quad - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} V_{do} \end{aligned} \quad (2.158)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_{do} &= (2a-1)^2 \omega_e \left\{ A_{71} \left[\frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \psi_{qs} + \cos^2(\alpha_o) \psi_{ds} \right] \right. \\ &\quad \left. + A_{81} \left[\frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \psi_{qr} + \cos^2(\alpha_o) \psi_{dr} \right] \right\} + \frac{1}{C} i_{dG}^D \\ &\quad + \omega_{grid}(2a-1) V_{qo} \end{aligned} \quad (2.159)$$

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = C_1^* \psi_{qs} + C_2^* \omega_e \psi_{ds} + C_3^* \psi_{qr} + C_4^* \omega_g \psi_{dr} + C_5^* \omega_b V_{qo} \quad (2.160)$$

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = -C_2^* \omega_e \psi_{qs} + C_1^* \psi_{ds} - C_4^* \psi_{qr} \omega_g + C_3^* \psi_{dr} + C_5^* \omega_b V_{do} \quad (2.161)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = C_3 \psi_{qs} + C_4 \psi_{qr} - (\omega_e - \omega_g) \psi_{dr} \quad (2.162)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = C_3 \psi_{ds} + (\omega_e - \omega_g) \psi_{qr} + C_4 \psi_{dr} \quad (2.163)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_g = \frac{1}{J_G} \left[\frac{1}{n_{gear}} \left(K_s \delta \theta + B \left(\omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \right) \right) - C_5 (\psi_{qs} \psi_{dr} - \psi_{ds} \psi_{qr}) \right] \quad (2.164)$$

$$\frac{d}{dt} \delta \theta = \omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \quad (2.165)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_T = \frac{1}{J_T} \left[\frac{1}{2\omega_T} \rho A_r C_p (\beta, \lambda) V_W^3 - \left(K_s \delta \theta + B \left(\omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \right) \right) \right] \quad (2.166)$$

Rumus daya keluaran juga dimodifikasi sedikit menjadi

$$P = \frac{3}{2K_{Vf} \omega_e} V_{Gm} [\cos(\alpha_o) i_{qG}^D - \sin(\alpha_o) i_{dG}^D] \quad (2.167)$$

$$Q = -\frac{3}{2K_{Vf} \omega_e} \frac{V_{Gm}}{2a-1} [\sin(\alpha_o) i_{qG}^D + \cos(\alpha_o) i_{dG}^D] \quad (2.168)$$

2.8 Model Linear Turbin Angin

Model linear dibentuk dengan cara menurunkan dengan turunan parsial setiap persamaan stater terhadap setiap state variabel dan terhadap masukan variabel. Model yang sudah dilinearakan ditandai dengan adanya tanda Δ . Persamaan awal yang menjadi dasar untuk dilinearisasi dapat dilihat pada persamaan (2.156)-(2.166) sebagai persamaan keadaan. Selain sebelas persamaan tersebut, tentunya persamaan keluaran P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) juga dilinearisasi. Karena terlalu panjang, beberapa hasil linearisasi dimasukkan dalam variabel-variabel pembantu lainnya. Variabel pembantu di cari agar memudahkan yaitu hasil penurunan terhadap masukan atau state. Bila terhadap state, maka dipergunakan notasi a sebagai bagian dari matriks A. Bila terhadap masukan maka diberi notasi b sebagai bagian dari matriks B. Angka yang menyertai notasi a dan b tersebut menunjukkan persamaan state keberapa terhadap state apa. Contoh pada persamaan (2.172) dengan notasi variabel pembantu a3,5 artinya hasil penurunan persamaan state ke 3, yaitu

turunan V_{q0} terhadap variabel state ke 5 yaitu fluks q_s . Linearisasi pada bagian mekanik harus dilakukan dengan hati-hati karena terdiri dari beberapa fungsi yang mengandung banyak perkalian variabel masukan maupun state, sehingga rumus penurunan terhadap perkalian dua fungsi harus dilakukan. Untuk mempermudah penulisan rumus, maka dipergunakan lagi beberapa variabel bantuan yang ada di persamaan (2.188)-(2.191).

$$\frac{d}{dt} \Delta i_{qG}^D = -\frac{R_i}{L_i} \Delta i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} \Delta i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} \Delta V_{q0} \quad (2.169)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \cos(\alpha_o) \Delta \omega_e + \frac{2\omega_{grid} i_{dG}^D}{(2a-1)^2} \Delta a \\ & - \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \omega_e \sin(\alpha_o) \Delta \alpha_o \end{aligned} \quad (2.170)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta i_{dG}^D & = \omega_{grid} (2a-1) \Delta i_{qG}^D - \frac{R_i}{L_i} \Delta i_{dG}^D - \frac{1}{L_i} \Delta V_{d0} \\ & - \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \sin(\alpha_o) \Delta \omega_e + 2\omega_{grid} i_{qG}^D \Delta a \\ & - \frac{1}{L_i} V_{Gm} K_{Vf} \cos(\alpha_o) \omega_e \Delta \alpha_o \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \Delta V_{qo} = \Delta \psi_{qs} \{ \omega_e \cos^2(\alpha_o) A_{71} \} + \Delta \psi_{ds} \left\{ \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e A_{71} \right\} \quad (2.171)$$

$$+ \Delta \psi_{qr} \{ \omega_e \cos^2(\alpha_o) A_{81} \}$$

$$+ \Delta \psi_{dr} \left\{ \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e A_{81} \right\} + \frac{1}{C} \Delta i_{qG}^D$$

$$- \frac{\omega_{grid}}{2a-1} \Delta V_{do}$$

$$+ \Delta \omega_e \left\{ A_{71} \left(\psi_{qs} \cos^2(\alpha_o) + \frac{1}{2} \psi_{ds} \sin(2\alpha_o) \right) \right.$$

$$\left. + A_{81} \left(\psi_{qr} \cos^2(\alpha_o) + \frac{1}{2} \psi_{dr} \sin(2\alpha_o) \right) \right\}$$

$$+ \Delta \alpha \left\{ \frac{2\omega_{grid} V_{do}}{(2a-1)^2} \right\}$$

$$+ \Delta \alpha_o \omega_e \left\{ A_{71} \left(-2\psi_{qs} \sin(\alpha_o) + \psi_{ds} \cos(2\alpha_o) \right) \right.$$

$$\left. + A_{81} \left(-2\psi_{qr} \sin(\alpha_o) + \psi_{dr} \cos(2\alpha_o) \right) \right\}$$

$$= \Delta \psi_{qs} a_{3,5} + \Delta \psi_{ds} a_{3,6} + \Delta \psi_{qr} a_{3,7} + \Delta \psi_{dr} a_{3,8}$$

$$+ \frac{1}{C} \Delta i_{qG}^D - \frac{\omega_{grid}}{2a-1} \Delta V_{do} + \Delta \omega_e b_{3,1}$$

$$+ \Delta \alpha \left\{ \frac{2\omega_{grid} V_{do}}{(2a-1)^2} \right\} + \Delta \alpha_o b_{3,3}$$

$$a_{3,5} = \omega_e \cos^2(\alpha_o) A_{71} \quad (2.172)$$

$$a_{3,6} = \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e A_{71} \quad (2.173)$$

$$a_{3,7} = \omega_e \cos^2(\alpha_o) A_{81} \quad (2.174)$$

$$a_{3,8} = \frac{1}{2} \sin(2\alpha_o) \omega_e A_{81} \quad (2.175)$$

$$b_{3,1} = A_{71} \left(\psi_{qs} \cos^2(\alpha_o) + \frac{1}{2} \psi_{ds} \sin(2\alpha_o) \right) \quad (2.176)$$

$$+ A_{81} \left(\psi_{qr} \cos^2(\alpha_o) + \frac{1}{2} \psi_{dr} \sin(2\alpha_o) \right)$$

$$b_{3,3} = \omega_e \left\{ A_{71} \left(-\psi_{qs} \sin(2\alpha_o) + \psi_{ds} \cos(2\alpha_o) \right) \right. \quad (2.177)$$

$$\left. + A_{81} \left(-\psi_{qr} \sin(2\alpha_o) + \psi_{dr} \cos(2\alpha_o) \right) \right\}$$

$$\frac{d}{dt}\Delta V_{do} = \Delta\psi_{qs}(2a-1)^2\frac{1}{2}\sin(2\alpha_o)\omega_e A_{71} \quad (2.178)$$

$$\begin{aligned} & + \Delta\psi_{ds}(2a-1)^2\omega_e\cos^2(\alpha_o)A_{71} \\ & + \Delta\psi_{qr}(2a-1)^2\frac{1}{2}\sin(2\alpha_o)\omega_e A_{81} \\ & + \Delta\psi_{dr}(2a-1)^2\omega_e\cos^2(\alpha_o)A_{81} + \frac{1}{C}\Delta i_{dG}^D \\ & + \omega_{grid}(2a-1)\Delta V_{q0} \\ & + \Delta\omega_e(2a-1)^2\left\{A_{71}\left(\psi_{qs}\frac{1}{2}\sin(2\alpha_o)\right.\right. \\ & \left.\left.+ \psi_{ds}\cos^2(\alpha_o)\right)\right. \\ & \left.+ A_{81}\left(\psi_{qr}\frac{1}{2}\sin(2\alpha_o) + \psi_{dr}\cos^2(\alpha_o)\right)\right\} \\ & + \Delta a\left\{4(2a\right. \\ & \left.- 1)\omega_e\left\{A_{71}\left(\psi_{qs}\frac{1}{2}\sin(2\alpha_o) + \psi_{ds}\cos^2(\alpha_o)\right)\right.\right. \\ & \left.\left.+ A_{81}\left(\psi_{qr}\frac{1}{2}\sin(2\alpha_o) + \psi_{dr}\cos^2(\alpha_o)\right)\right\}\right. \\ & \left.+ 2\omega_{grid}V_{q0}\right\} \\ & + \Delta\alpha_o\omega_e(2a-1)^2\left\{A_{71}\left(\psi_{qs}\cos(2\alpha_o)\right.\right. \\ & \left.\left.- \psi_{ds}\sin(2\alpha_o)\right)\right. \\ & \left.+ A_{81}\left(\psi_{qr}\cos(2\alpha_o) - \psi_{dr}\sin(2\alpha_o)\right)\right\} \end{aligned}$$

$$\frac{d\Delta\psi_{qs}}{dt} = C_1^*\Delta\psi_{qs} + C_2^*\omega_e\Delta\psi_{ds} + C_3^*\Delta\psi_{qr} + C_4^*\omega_g\Delta\psi_{dr} \quad (2.179)$$

$$+ C_5^*\omega_e\Delta V_{q0} + C_4^*\Delta\omega_g\psi_{dr} + \Delta\omega_e(C_2^*\psi_{ds} + C_5^*V_{q0})$$

$$\frac{d\Delta\psi_{ds}}{dt} = -C_2^*\omega_e\Delta\psi_{qs} + C_1^*\Delta\psi_{ds} - C_4^*\Delta\psi_{qr}\omega_g + C_3^*\Delta\psi_{dr} \quad (2.180)$$

$$+ C_5^*\omega_e\Delta V_{do} - C_4^*\psi_{qr}\Delta\omega_g + \Delta\omega_e(-C_2^*\psi_{qs} + C_5^*V_{do})$$

$$\frac{d\Delta\psi_{qr}}{dt} = C_3\Delta\psi_{qs} + C_4\Delta\psi_{qr} - (\omega_e - \omega_g)\Delta\psi_{dr} - \Delta\omega_e\psi_{dr} + \Delta\omega_g\psi_{dr} \quad (2.181)$$

$$\frac{d\Delta\psi_{dr}}{dt} = C_3\Delta\psi_{ds} + (\omega_e - \omega_g)\Delta\psi_{qr} + C_4\Delta\psi_{dr} + \Delta\omega_e\psi_{qr} - \Delta\omega_g\psi_{qr} \quad (2.182)$$

$$\frac{d}{dt}\omega_g = \frac{1}{J_G} \left[\frac{1}{n_{gear}} \left(K_s\delta\theta + B \left(\omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \right) \right) - C_5(\psi_{qs}\psi_{dr} - \psi_{ds}\psi_{qr}) \right] \quad (2.183)$$

$$C_6 = \frac{1}{J_G} \quad (2.184)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\Delta\omega_g = & \Delta\psi_{qs}(-C_5C_6\psi_{dr}) + \Delta\psi_{ds}(C_5C_6\psi_{qr}) + \Delta\psi_{qr}(C_5C_6\psi_{ds}) \\ & + \Delta\psi_{dr}(-C_5C_6\psi_{qs}) + \Delta\omega_g \left(-\frac{2BC_6}{PN_{gear}^2} \right) \\ & + \Delta\delta\theta \left(\frac{K_sC_6}{n_{gear}} \right) + \Delta\omega_T \left(\frac{BC_6}{n_{gear}} \right) \\ & + \Delta\omega_e \frac{C_5C_6}{\omega_e} (\psi_{qs}\psi_{dr} - \psi_{ds}\psi_{qr}) \end{aligned} \quad (2.185)$$

$$\frac{d}{dt}\Delta\delta\theta = \Delta\omega_T - \frac{2\Delta\omega_g}{PN_{gear}} \quad (2.186)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_T = \frac{1}{J_T} \left[\frac{1}{2\omega_T} \rho \pi R^2 \left\{ (0.44 - 0.0167\beta) \sin \left[\frac{\pi \left(\frac{\omega_T R}{V_W} - 3 \right)}{15 - 0.3\beta} \right] \right. \right. \quad (2.187)$$

$$\left. - 0.00184 \left(\frac{\omega_T R}{V_W} - 3 \right) \beta \right\} V_W^3$$

$$\left. - \left(K_s \delta \theta + B \left(\omega_T - \frac{2\omega_g}{PN_{gear}} \right) \right) \right]$$

$$= \frac{0.44 \rho \pi R^2 V_W^3}{J_T 2\omega_T} \sin \left[\frac{\pi \left(\frac{\omega_T R}{V_W} - 3 \right)}{15 - 0.3\beta} \right]$$

$$- \frac{0.0167 \beta \rho \pi R^2 V_W^3}{J_T 2\omega_T} \sin \left[\frac{\pi \left(\frac{\omega_T R}{V_W} - 3 \right)}{15 - 0.3\beta} \right]$$

$$- \frac{0.00184 \beta \rho \pi R^3 V_W^2}{J_T 2} + \frac{0.00184 \beta \rho \pi R^2 V_W^3}{J_T 2\omega_T} 3$$

$$- \frac{K_s \delta \theta}{J_T} - \frac{\omega_T B}{J_T} + \frac{2\omega_g B}{PN_{gear} J_T}$$

$$W_1 = \frac{0.44 \rho \pi R^2 V_W^3}{J_T 2\omega_T} \quad (2.188)$$

$$W_2 = \sin \left[\frac{\pi \left(\frac{\omega_T R}{V_W} - 3 \right)}{15 - 0.3\beta} \right] \quad (2.189)$$

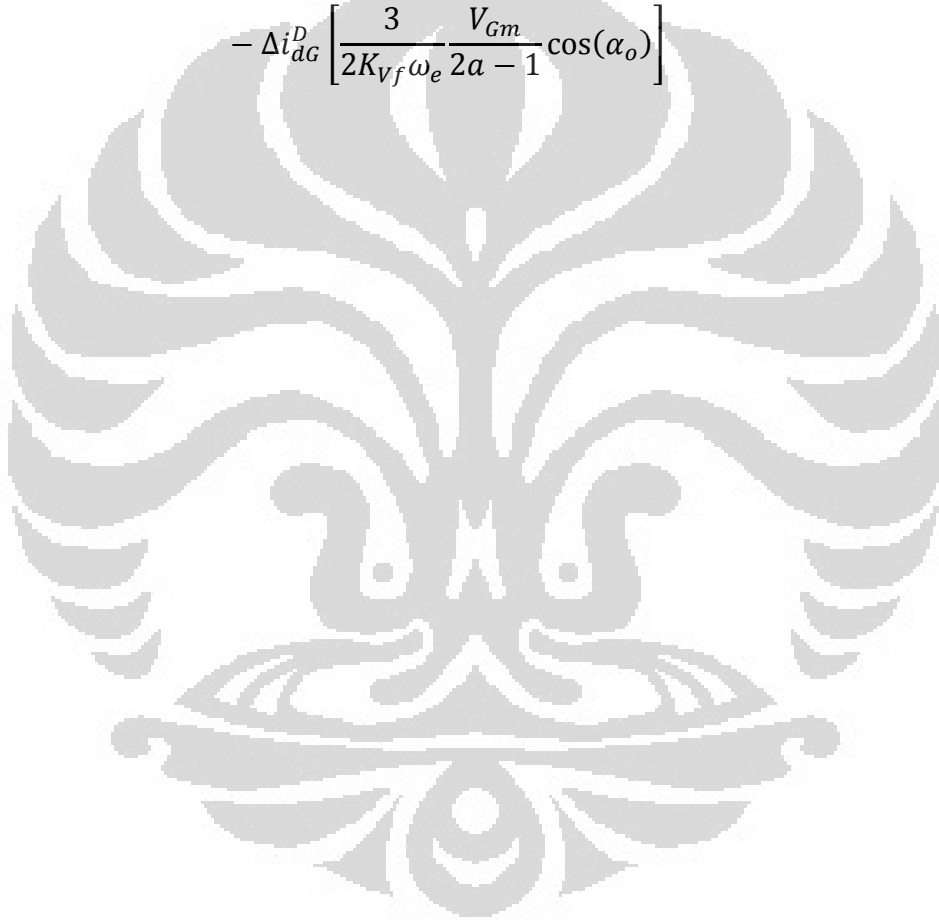
$$W_3 = - \frac{0.0167 \beta \rho \pi R^2 V_W^3}{J_T 2\omega_T} \quad (2.190)$$

$$W_4 = \cos \left[\frac{\pi \left(\frac{\omega_T R}{V_W} - 3 \right)}{15 - 0.3\beta} \right] \quad (2.191)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega_T = -\Delta\delta\theta \frac{K_s}{J_T} + \Delta\omega_g \frac{2B}{PN_{gear}J_T} \quad (2.192)$$

$$\begin{aligned} & + \Delta\omega_T \left(-\frac{B}{J_T} - \frac{3\beta V_W^3 \rho \pi R^2 0.00184}{2J_T \omega_T^2} - \frac{W_1 W_2}{\omega_T} \right. \\ & + W_1 W_4 \frac{\pi R}{V_W (15 - 0.3\beta)} - \frac{W_3 W_2}{\omega_T} \\ & \left. + W_3 W_4 \frac{\pi R}{V_W (15 - 0.3\beta)} \right) \\ & + \Delta V_W \left(\frac{3W_1 W_2}{V_W} - W_1 W_4 \frac{\pi \omega_T R}{V_W^2 (15 - 0.3\beta)} + \frac{3W_3 W_2}{V_W} \right. \\ & + W_3 W_4 \frac{\pi \omega_T R}{V_W^2 (15 - 0.3\beta)} - \frac{2\beta V_W \rho \pi R^2 0.00184}{2J_T} \\ & \left. + \frac{3\beta 3V_W^2 \rho \pi R^2 0.00184}{2J_T \omega_T} \right) \\ & + \Delta\beta \left(W_1 W_4 \frac{0.3\pi \omega_T R}{V_W (15 - 0.3\beta)^2} + \frac{W_3 W_2}{\beta} \right. \\ & + W_3 W_4 \frac{0.3\pi \omega_T R}{V_W (15 - 0.3\beta)^2} - \frac{0.00184 \rho \pi R^3 V_W^2}{J_T 2} \\ & \left. + \frac{0.00184 \rho \pi R^2 V_W^3}{J_T 2 \omega_T} \right) \\ \Delta P = & \Delta\omega_e \left[-\frac{3}{2K_{Vf} \omega_e^2} V_{Gm} [\cos(\alpha_o) i_{qG}^D - \sin(\alpha_o) i_{dG}^D] \right] \\ & + \Delta\alpha_o \left[\frac{3}{2K_{Vf} \omega_e} V_{Gm} [-\sin(\alpha_o) i_{qG}^D - \cos(\alpha_o) i_{dG}^D] \right] \\ & + \Delta i_{qG}^D \left[\frac{3}{2K_{Vf} \omega_e} V_{Gm} \cos(\alpha_o) \right] \\ & - \Delta i_{dG}^D \left[\frac{3}{2K_{Vf} \omega_e} \sin(\alpha_o) \right] \end{aligned} \quad (2.193)$$

$$\begin{aligned}
\Delta Q = \Delta\omega_e & \left[\frac{3}{2K_{Vf}\omega_e^2} \frac{V_{Gm}}{2a-1} [\sin(\alpha_o) i_{qG}^D + \cos(\alpha_o) i_{dG}^D] \right] \\
& + \Delta a \left[\frac{3}{K_{Vf}\omega_e} \frac{V_{Gm}}{(2a-1)^2} [\sin(\alpha_o) i_{qG}^D + \cos(\alpha_o) i_{dG}^D] \right] \\
& - \Delta\alpha_o \left[\frac{3}{2K_{Vf}\omega_e} \frac{V_{Gm}}{2a-1} [\cos(\alpha_o) i_{qG}^D - \sin(\alpha_o) i_{dG}^D] \right] \\
& - \Delta i_{qG}^D \left[\frac{3}{2K_{Vf}\omega_e} \frac{V_{Gm}}{2a-1} \sin(\alpha_o) \right] \\
& - \Delta i_{dG}^D \left[\frac{3}{2K_{Vf}\omega_e} \frac{V_{Gm}}{2a-1} \cos(\alpha_o) \right]
\end{aligned} \tag{2.194}$$



BAB 3 MODEL SIMULASI SISTEM PLTA

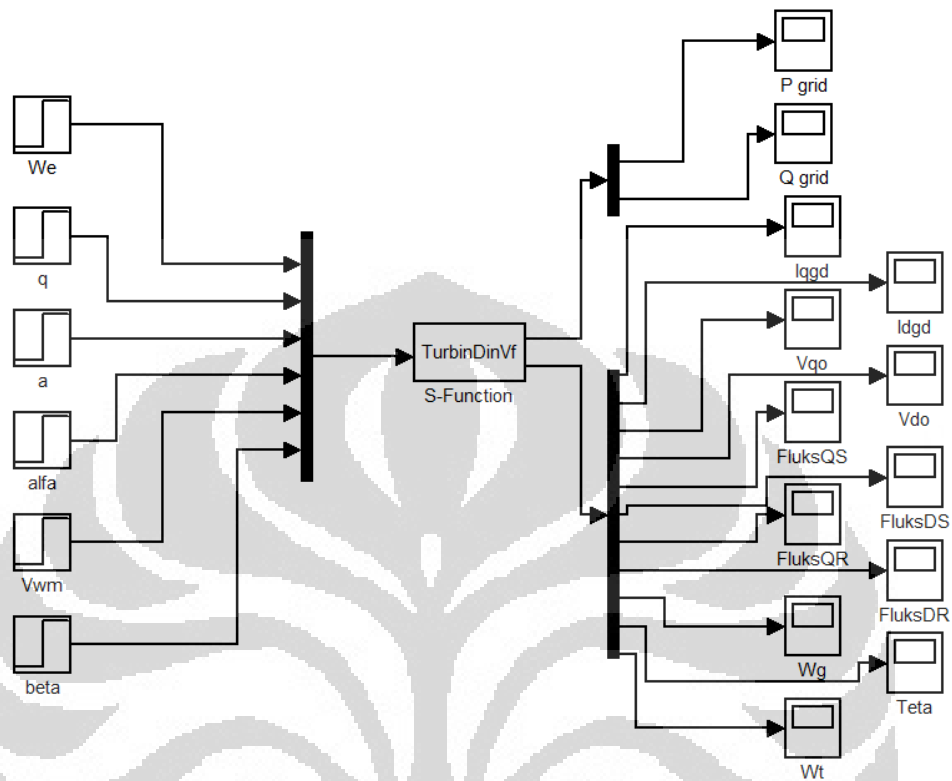
Simulasi dibuat dengan mempergunakan Matlab R2011a, dengan menggunakan Simulink dan cmex. Persamaan state yang sudah dibuat pada bab 2 dimasukkan ke dalam block Simulink matlab dengan menggunakan cmex. Berikut nilai parameter yang dipergunakan saat melakukan simulasi

Tabel 3.1 Nilai Parameter Turbin Angin

Generator Induksi	Sistem Turbin Angin	Matriks Konverter	Grid
500[hp], 2.3[KV],1773[rpm]	$J_T = 100[Kgm^2]$	$R_i = R_o = 0.1[\Omega]$	$V_G = 4[KV]$
$T_B = 1.98 \times 10^3[Nm]$, $I_{B(abc)} = 93.6[A]$	$K_s = 2 \times 10^6[Nm/rad]$	$L_i = L_o = 1[mH]$	$f_G = 60[Hz]$
$r_s = 0.262[\Omega]$, $r_r = 0.187[\Omega]$	$B = 5 \times 10^3 \left[\frac{Nm}{rad} \right] / s$	$C = 0.1[mF]$	
$x_{ls} = 1.206[\Omega]$, $x_{lr} = 1.206[\Omega]$, $x_M = 54.02[\Omega]$	Ngear=20	$0 < q \leq 0.87$	
$J=11.06[Kgm^2]$	$\rho_{udara} = 1.25[Kg/m^3]$	$0 \leq a \leq 1$	
P=4[pole], $P_{mech_loss} = 1\%P_{rated}$	R=10[m]		

Error! Reference source not found.

Berikut blok simulink yang digunakan untuk membuat simulasi turbin angin dinamik dengan V/f strategi



Gambar 3.1 Blok Simulink Turbin Dinamik Dengan Strategi V/f

Masukan ada lima, dengan dua keluaran. Persamaan *state space* dimasukkan dalam S-Function TurbinDinVf. Untuk memasukkan masukan menggunakan blok mux dan untuk mengeluarkan keluaran dipergunakan blok demux. Keluaran sistem ada dua yaitu bagian daya yang *disupply* ke jala-jala dalam bentuk daya aktif P (Daya Aktif) jala-jala dan daya reaktif Q (Daya Reaktif) jala-jala. Bagian lain yang dikeluarkan dari sistem adalah nilai state variabel. Nilai masukan mempergunakan blok step agar mudah melakukan perubahan nilai, apabila diinginkan masukan berupa suatu nilai konstan maka diset pada blok stepnya nilai awal dan nilai akhirnya sama. Nilai state variabel dikeluarkan agar dapat menentukan nilai titik setimbang yang akan dimasukkan dalam pembuatan nilai linear model dari turbin angin. Berikut parameter masukan dan nilainya

Universitas Indonesia

Tabel 3.2 Nilai Parameter Masukan

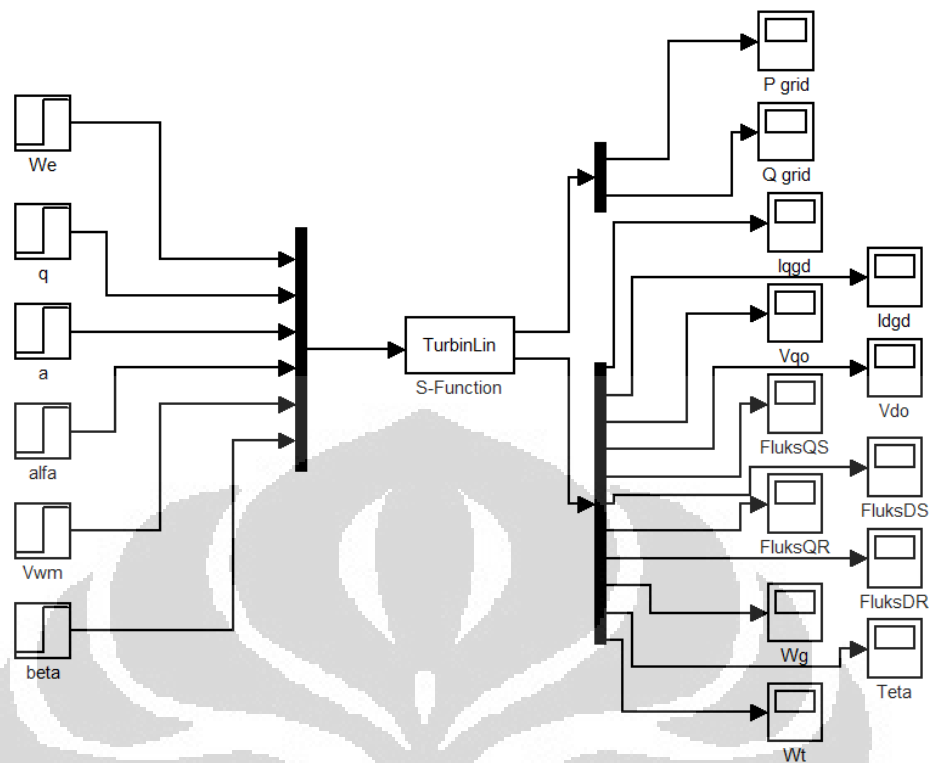
ω_e	q	a	α_o	V_w	β
We	q	a	Alfa	Vw (kecepatan angin)	Beta
$2\pi 60$	0.5	0.8	0	10[m/s]	0

Berikut parameter yang dikeluarkan

Tabel 3.3 Parameter Keluaran

i_{qG}^D	i_{dG}^D	V_{qo}	V_{do}	ψ_{qs}	
Iqgd	Idgd	Vqo	Vdo	FluksQS	
ψ_{ds}	ψ_{qr}	ψ_{dr}	ω_g	$\delta\theta$	ω_t
FluksDS	FluksQR	FluksDR	Wg	Teta	Wt

Hasil simulasi ada pada bab berikutnya. Hasil kemudian di masukkan ke dalam persamaan linear model dari turbin angin. Persamaan *state space* dari turbin angin linear juga ada di bagian hasil dan analisa. Berikut blok yang dipergunakan dalam mensimulasikan linear model turbin angin.



Gambar 3.2 Blok Simulink Turbin Linear

Blok *S-Function* TurbinLin berisi *state space* model dari turbin angin linear. Masukan dan parameter yang dikeluarkan sama dengan saat mensimulasikan turbin angin dinamik dengan strategi V/f

Pada saat menganalisa, mungkin nilai masukan akan diubah-ubah, hal tersebut akan tidak dijelaskan satu persatu bagaimana blok simulinknya, karena hanya melakukan perubahan nilai parameter.

BAB 4 HASIL DAN ANALISA

Dengan mempergunakan blok simulink dan parameter yang ada di bab empat, maka didapatkan nilai *steady state* tiap variabel masukan, variabel state, dan variabel keluaran berikut

Tabel 4.1 Nilai *Steady State* Masukan, Keluaran dan State Variabel

$\omega_e = 2\pi 60$	$q = 0.5$	$\alpha = 0.8$	$\alpha_o = 0$	V_W = 10m/s
$\beta = 0$	i_{qG}^D = -8.45[A]	$i_{dG}^D = 2.5$ [A]	V_{qo} = 1632.3[V]	V_{do} = -2.16[V]
ψ_{qs} = 26.45[Wb]	ψ_{ds} = 1632.5[Wb]	ψ_{qr} = 109.5[Wb]	ψ_{dr} = 1591.1[Wb]	ω_g = 378.5[rad/s]
$\delta\theta$ = 0.004[rad]	ω_t = 9.45[rad]	P_{grid} = 82.79[KW]	Q_{grid} = 40.88[KW]	

Dengan memasukkan nilai *steady state* sistem ke dalam persamaan linear model dari turbin angin, maka didapatkan matriks sistem berikut dalam bentuk *state space*

$$\frac{d}{dt}\Delta X = A\Delta X + B\Delta U \quad (4.1)$$

$$\Delta Y = C\Delta X + D\Delta U \quad (4.2)$$

Dengan matrikaks ΔX , ΔU , ΔY dan A,B,C dan D sebagai berikut

$$\Delta X = [\Delta i_{qG}^D \quad \Delta i_{dG}^D \quad \Delta V_{qo} \quad \Delta V_{do} \quad \Delta \psi_{qs} \quad \Delta \psi_{ds} \quad \Delta \psi_{qr} \quad \Delta \psi_{dr} \quad \Delta \omega_g \quad \Delta \delta\theta \quad \Delta \omega_t]^T$$

$$\Delta U = [\Delta \omega_e \quad \Delta q \quad \Delta \alpha \quad \Delta \alpha_o \quad \Delta V_W \quad \Delta \beta]^T$$

$$\Delta Y = [\Delta P_{grid} \quad \Delta Q_{grid}]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} 4331.6 & 0 & 5243.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6371.2 & -9.798e5 & 0 & 0 \\ 22411 & 0 & -4527.5 & -7.9796e6 & 0 & 0 \\ -7619.9 & 0 & -1.792e7 & 3.0415e6 & 0 & 0 \\ -222.94 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 24.59 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1591.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 109.47 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.39844 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 22.848 & -5.3188 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 9798 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -16330 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 219.62 & 0 & 0 & -24528 & 0 & 0 \\ 108.44 & 0 & 1.35627e5 & 1.3799e5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Karena ukuran matriks A yang besar, maka matriks A akan di tampilkan dalam bentuk landscape pada halaman berikutnya.

Karena matriks A merupakan matriks sistem, tentu semua bagian dari sistem dapat memberikan kontribusi terhadap stabil atau tidaknya matriks A tersebut. Contohnya sistem mekanik sistem, karena berhubungan langsung dengan vektor penting seperti kecepatan angin dan area sapuan bilah. Sedangkan SCIG sendiri mempunyai karakteristik mengurangi kecepatan restorasi tegangan setelah gangguan dan dapat menyebabkan ketidakstabilan tegangan dan kecepatan rotor. Untuk mencegah hal tersebut dipergunakan *voltage regulator* seperti MC.

Berikut matriks nilai matriks A

$$A = \begin{bmatrix} -100 & -628.32 & -1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 226.19 & -100 & 0 & -1000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1e6 & 0 & 0 & -628.32 & -1.0479e5 & 0 & 1.025e5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1e6 & 226.19 & 0 & 0 & -37726 & 0 & 36902 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 325.55 & 0 & -45.54 & -376.99 & 44.375 & 50.528 & 212.38 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 325.55 & 376.99 & -45.54 & -50.528 & 44.375 & -14.612 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 28.905 & 0 & -29.551 & 1.5489 & 1591.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 28.905 & -1.5489 & -29.551 & -109.47 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.87472 & -0.060182 & -0.89748 & 0.014545 & -1.0531 & 16849 & 42.123 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.25 & -20000 & -55.302 & 0 \end{bmatrix}$$

Analisa kestabilan sistem dapat dilakukan dengan mencari nilai eigen dari matriks A. Dengan mempergunakan matlab masukkan matriks A, kemudian pergunakan fungsi adalah

$eig(A)$

Nilai eigen matriks A adalah sebagai berikut

```

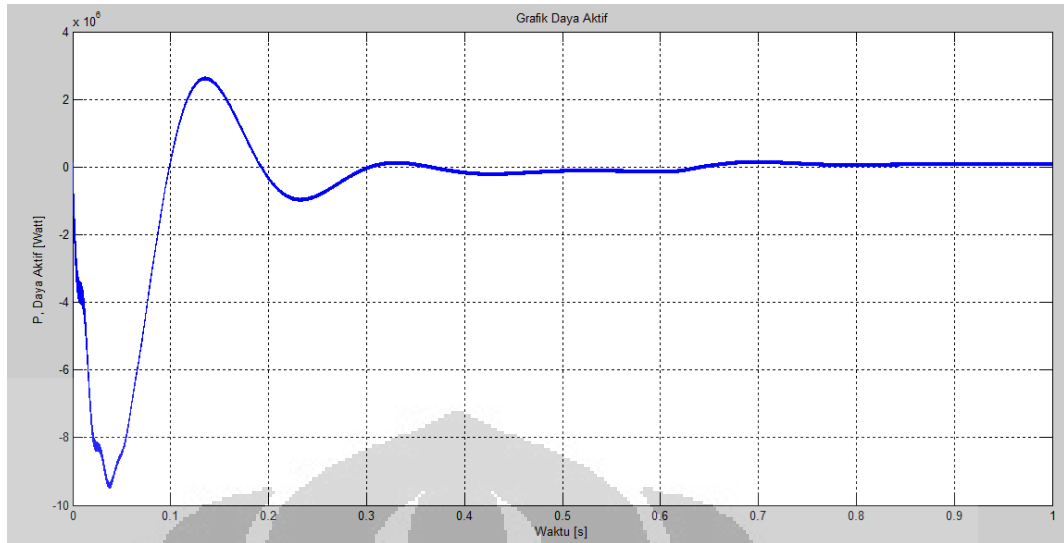
1.0e+004 *
-0.0050 + 3.2400i
-0.0050 - 3.2400i
-0.0050 + 3.1574i
-0.0050 - 3.1574i
-0.0051 + 0.0373i
-0.0051 - 0.0373i
-0.0025
-0.0012 + 0.0032i
-0.0012 - 0.0032i
-0.0028 + 0.0140i
-0.0028 - 0.0140i

```

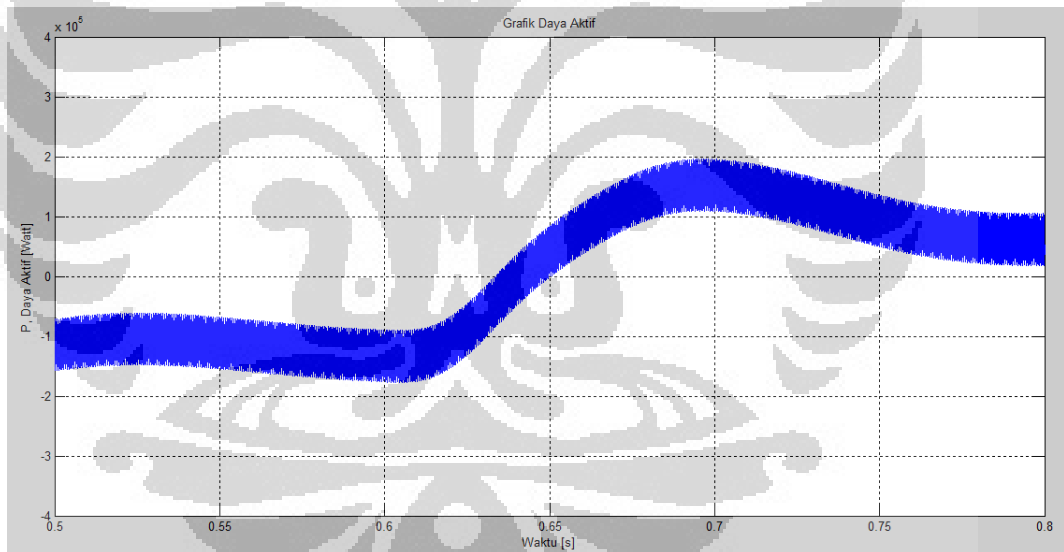
Gambar 4.1 Nilai Eigen Matriks A

Dapat dilihat dari nilai eigen value yang negatif, menandakan bahwa semua pole ada di sebelah kiri sumbu imajiner, dan sistem stabil.

Berikut akan ditampilkan beberapa grafik yang menunjukkan hasil simulasi dan analisisnya. Dengan mempergunakan MC, maka karakteristik mesin induksi yang dapat bekerja sebagai motor maupun sebagai generator masih tetap terlihat. Berikut adalah grafik baik daya aktif maupun daya reaktif saat diberikan step pada kecepatan angin dari 0 m/s menjadi 10 m/s saat waktu simulasi 0,6 s dengan waktu simulasi total 1 s.

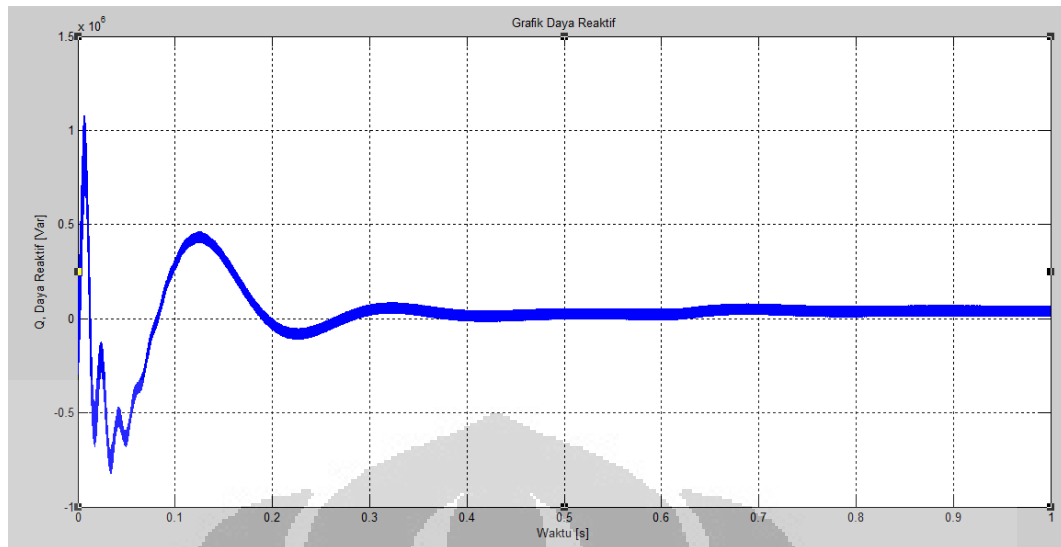


Gambar 4.2 P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s

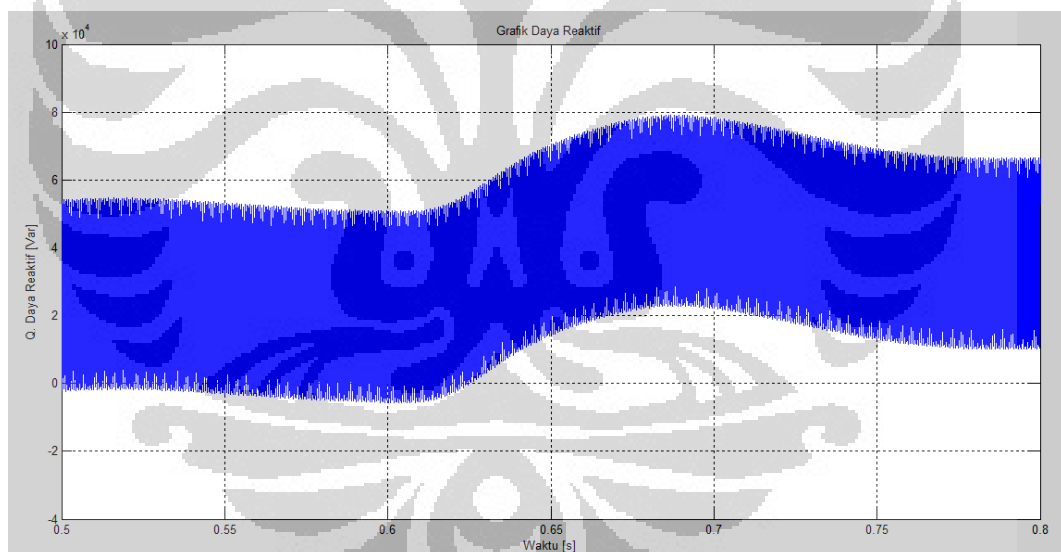


Gambar 4.3 Perbesaran P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s

Daya aktif yang diasup saat masih menjadi motor $-1.1543e+005$. Daya aktif saat sudah menjadi generator 88,413 KW. Rentang perubahan saat sudah steady antara $1,051e5$ W sampai $1,849e4$ W.



Gambar 4.4 Q (Daya Reaktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s

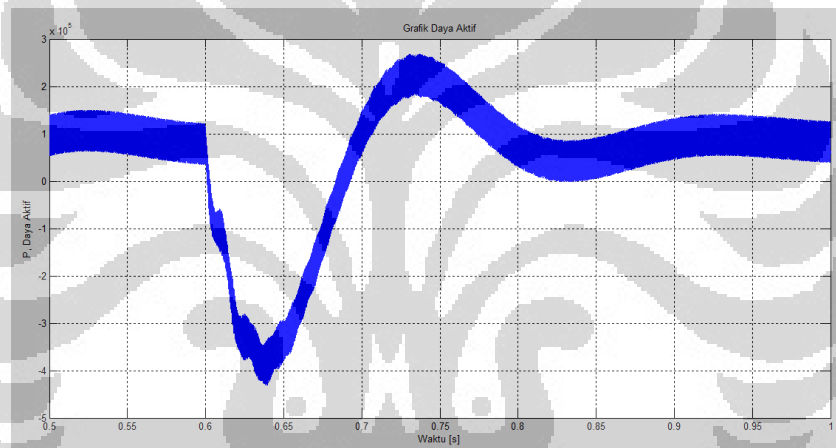


Gambar 4.5 Perbesaran Q (Daya Reaktif) Dengan Kenaikan ΔV_w (kecepatan angin) Dari 0 m/s ke 10 m/s Saat 0,6 s

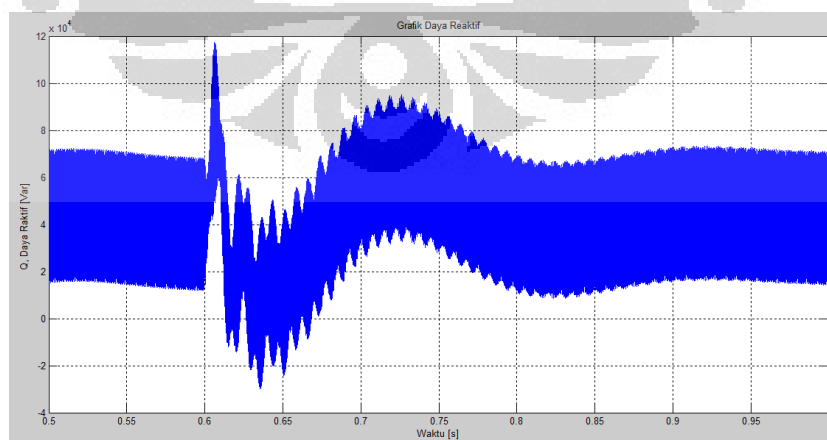
Nilai rata-rata daya reaktif saat menjadi motor $2.4860e+004$ W. Nilai rata-rata daya reaktif saat menjadi generator $4.1757e+004$ W. Rentang antara $6,62e4$ W sampai dengan $1,035e4$ W.

Pada simulasi diatas terjadi perubahan fungsi motor induksi dari motor menjadi generator seiring dengan meningkatnya kecepatan angin yang membuat kecepatan poros turbin bertambah. Sehingga arah aliran daya berubah dari yang awalnya jala-jala menyuplai mesin induksi menjadi mesin induksi yang bertindak sebagai generator yang menyuplai jala-jala. Pada bagian awal terjadi transien yang sangat besar karena simulasi tidak mengikutsertakan prosedur *soft starting* sirkuit untuk mengurangi arus yang berlebihan di awal. Tapi hal ini masih dapat diterima, karena perhatian lebih terpusat kepada nilai *steady state* saat mempergunakan MC.

Selanjutnya akan diperlihatkan akibat dari step pada $\Delta\omega_e$ (frekuensi keluaran output) sebesar $2\pi \cdot 3$ rad/s



Gambar 4.6 P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan $\Delta\omega_e$ (frekuensi keluaran output) Dari $2\pi \cdot 60$ rad/s ke $2\pi \cdot 63$ rad/s Saat 0,6 s



Gambar 4.7 Q (Daya Reaktif) dengan kenaikan $\Delta\omega_e$ (frekuensi keluaran output) dari $2\pi \cdot 60$ rad/s ke $2\pi \cdot 63$ rad/s saat 0,6 s

Akibat dari $\Delta\omega_e$ (frekuensi keluaran output) yang dinaikkan adalah P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) juga akan naik, hal ini akan terlihat lebih jelas pada analisa bagian berikutnya yang akan memplot nilai *steady state* untuk P dan Q untuk peningkatan nilai $\Delta\omega_e$. Grafik diatas ingin menunjukkan sifat dari MC dari sisi control, yaitu sistem termasuk dalam sistem minimum fasa, karena meskipun respon sistem positif, akan timbul respon negatif terlebih dahulu. Hal ini menunjukkan bahwa ada pole atau zero dari sistem yang berada di sebelah kanan bidang kompleks. Tapi karena sudah ditunjukkan bahwa nilai eigen matriks A semuanya berada pada sisi kiri bidang kompleks, sehingga sistem stabil. Maka dapat dipastikan bahwa ada zero dari sistem yang berada pada sebelah kanan sumbu kompleks. Zero yang berada di sebelah kanan sumbu kompleks tersebut tidak menyebabkan ketidakstabilan sistem.

Untuk mencari zero dari sistem maka dipergunakan perintah berikut

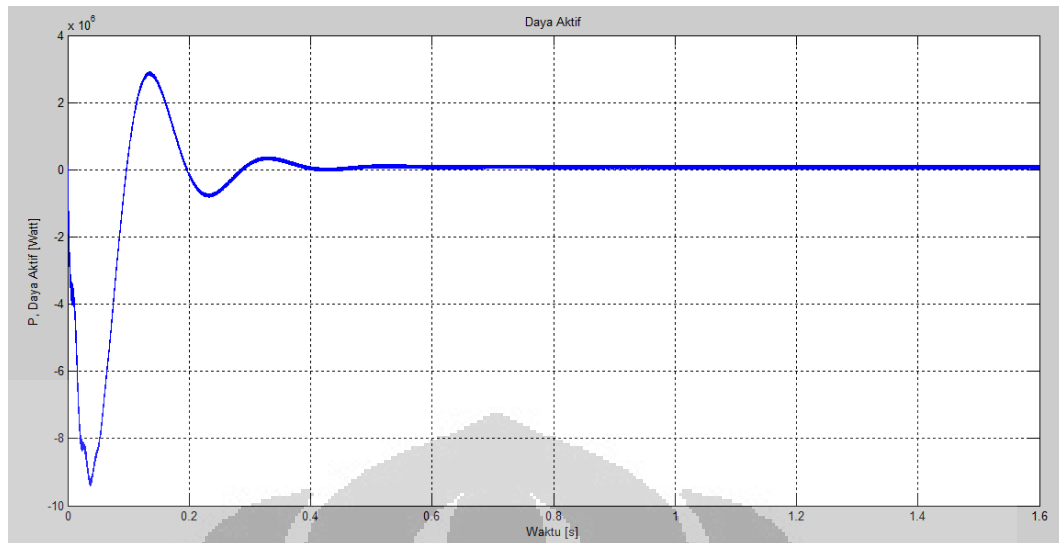
```
>> [z,p,k] = ss2zp(A,B,C,D,1)

z =

1.0e+005 *
-1.9350          0.0086 + 0.2755i
-0.0006 + 0.3178i  0.0086 - 0.2755i
-0.0006 - 0.3178i -0.1084
 0.0005 + 0.0815i  0.0186 + 0.0826i
 0.0005 - 0.0815i  0.0186 - 0.0826i
-0.0002 + 0.0026i  0.0499
-0.0002 - 0.0026i -0.0003 + 0.0014i
-0.0003 + 0.0014i -0.0003 - 0.0014i
-0.0003 - 0.0014i  0.0005
 0.0000          0.0001
-0.0003          -0.0001
```

Gambar 4.8 Zero Sistem

Berikutnya akan dilihat pengaruh nilai masukan. Akan ditinjau akibat dari nilai a (*Displacement Power factor Control*) pada sistem. Perlu diingat nilai a berfungsi untuk mengontrol PF di terminal masukan dari MC. Perubahan nilai a tidak mempengaruhi nilai daya aktif secara signifikan

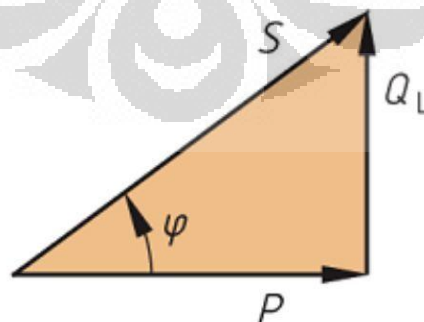


Gambar 4.9 P (Daya Aktif) Dengan Kenaikan Δa (*Displacement Power factor Control*) Berbentuk Ramp Dengan Nilai Awal 0 slope 1 Saat 0,6 s

Masukan yang diberikan adalah ramp yang dimulai dari $t = 0.6$ s dengan slope satu. Sedangkan untuk perubahan nilai pada Q (Daya Reaktif) terhadap a (*Displacement Power factor Control*) dapat dilihat pada table berikut. Selain menunjukkan nilai Q pada *steady state* pada berbagai macam nilai a ditunjukkan juga nilai P (Daya Aktif) yang seperti digambarkan pada grafik sebelumnya tidak terlalu terpengaruh dengan perubahan a. Selain itu dihitung juga nilai daya kompleks S dengan rumus

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.3)$$

Rumusan tersebut dapat dilihat dari gambar segitiga daya berikut



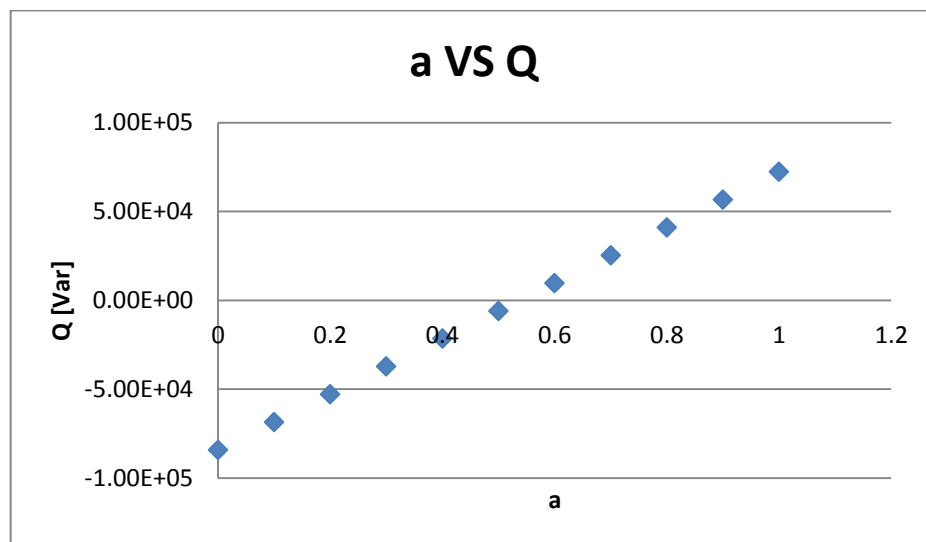
Gambar 4.10 Segitiga Daya

S dicari agar bisa dicari PF nya. Untuk perhitungan PF dipergunakan rumus

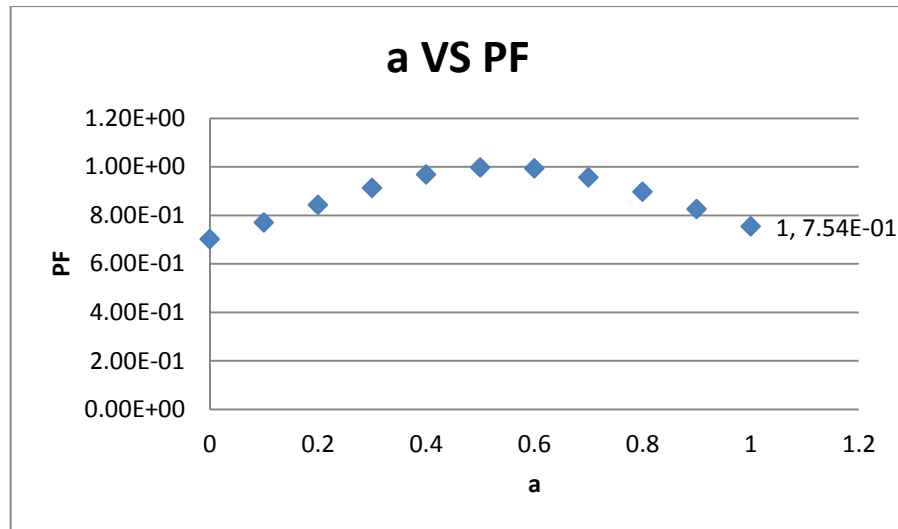
$$PF = \cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (4.4)$$

Tabel 4.2 Variasi Nilai a (*Displacement Power factor Control*)

a	Q[Var]	P[Watt]	S[VA]	PF
0	-8.43E+04	8.29E+04	118221.5	0.70
0.1	-6.86E+04	8.29E+04	107617	0.77
0.2	-5.30E+04	8.29E+04	98365.57	0.84
0.3	-3.73E+04	8.29E+04	90884.29	0.91
0.4	-2.17E+04	8.29E+04	85645.25	0.97
0.5	-6.02E+03	8.28E+04	83061.34	1.00
0.6	9.64E+03	8.28E+04	83375.97	0.99
0.7	2.53E+04	8.28E+04	86561.48	0.96
0.8	4.09E+04	8.28E+04	92334.38	0.90
0.9	5.66E+04	8.28E+04	100262.2	0.83
1	7.22E+04	8.28E+04	109861.8	0.75



Gambar 4.11 Nilai *Steady State Q* (Daya Reaktif) Dengan Variasi Nilai a



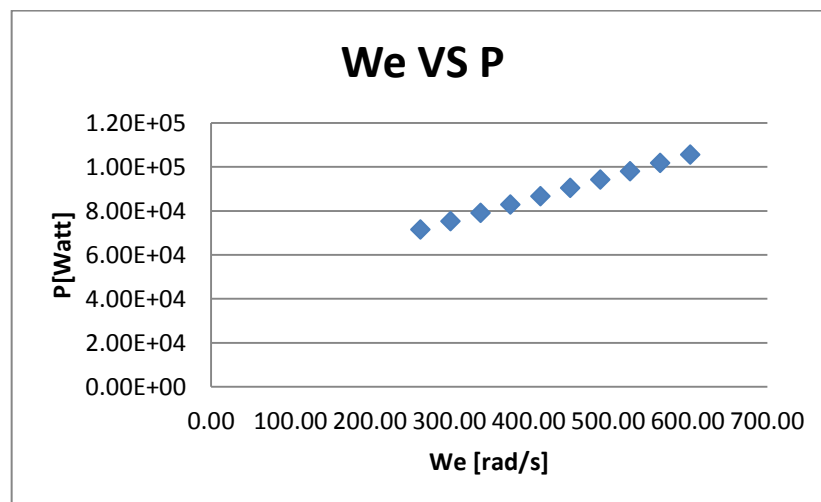
Gambar 4.12 Nilai *Steady State* PF Dengan Variasi Nilai *a* (*Displacement Power factor Control*)

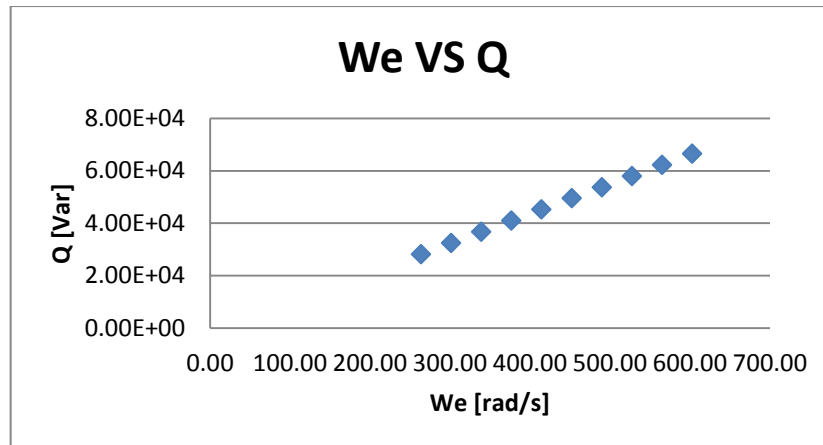
Dapat dilihat dari grafik tersebut bahwa perubahan *a* (*Displacement Power factor Control*) dapat mengubah nilai PF baik menjadi lagging atau leading. Nilai *steady state* yang dipergunakan sekarang 0,8. Menunjukkan nilai *Q* (Daya Reaktif) yang positif, berarti sistem mempunyai PF 0,896 lagging. Sistem bisa saja ditingkatkan lagi PF nya dengan mengurangi nilai *a*. Nilai *a* (*Displacement Power factor Control*) 0,5 akan menyebabkan *unity power factor* pada terminal masukan MC, tapi belum tentu *unity power factor* pada sumber masukan, karena masih ada RLC antara sumber tegangan dengan terminal masukan MC. PF yang sekarang dirasa aman karena kalau ditingkatkan terlalu dekat dengan *unity power factor* (PF=1), maka pada saat *switching* maka sistem akan beresilasi antara leading-lagging PF

Selanjutnya akan dibahas mengenai akibat peningkatan $\Delta\omega_e$ (frekuensi keluaran output) pada *P* (Daya Aktif) dan *Q*. Pada simulasi kali ini $\Delta\omega_e$ akan divariasikan dari rentang $0,7 \cdot 2\pi \cdot 60$ sampai dengan $1,6 \cdot 2\pi \cdot 60$ dengan peningkatan 0,1

Tabel 4.3 Variasi Nilai $\Delta\omega_e$ (Frekuensi Keluaran Output)

We, base[rad/s]	Pengali	We[rad/s]	Q[Var]	P[Watt]
376.9911	0.7	263.89	2.82E+04	7.15E+04
376.9911	0.8	301.59	3.24E+04	7.53E+04
376.9911	0.9	339.29	3.67E+04	7.90E+04
376.9911	1.0	376.99	4.09E+04	8.28E+04
376.9911	1.1	414.69	4.52E+04	8.66E+04
376.9911	1.2	452.39	4.95E+04	9.04E+04
376.9911	1.3	490.09	5.37E+04	9.41E+04
376.9911	1.4	527.79	5.80E+04	9.79E+04
376.9911	1.5	565.49	6.22E+04	1.02E+05
376.9911	1.6	603.19	6.65E+04	1.06E+05

Gambar 4.13 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi $\Delta\omega_e$ (Frekuensi Keluaran Output)



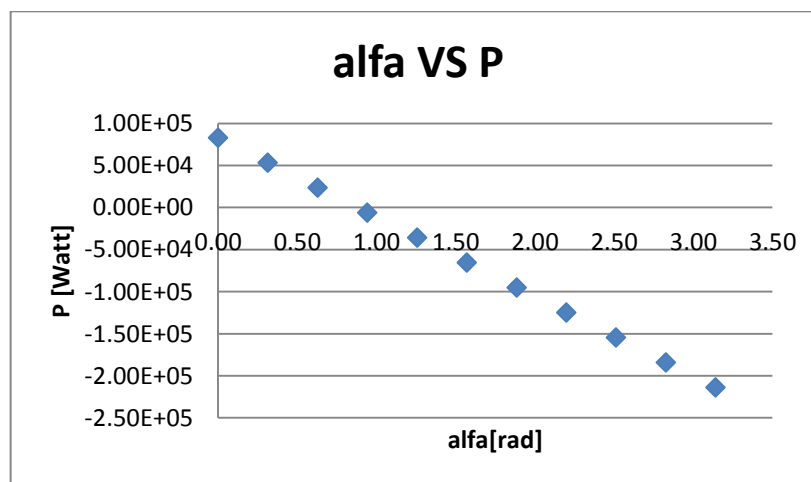
Gambar 4.14 Nilai Q (Daya Reaktif) Terhadap Variasi $\Delta\omega_e$ (Frekuensi Keluaran Output)

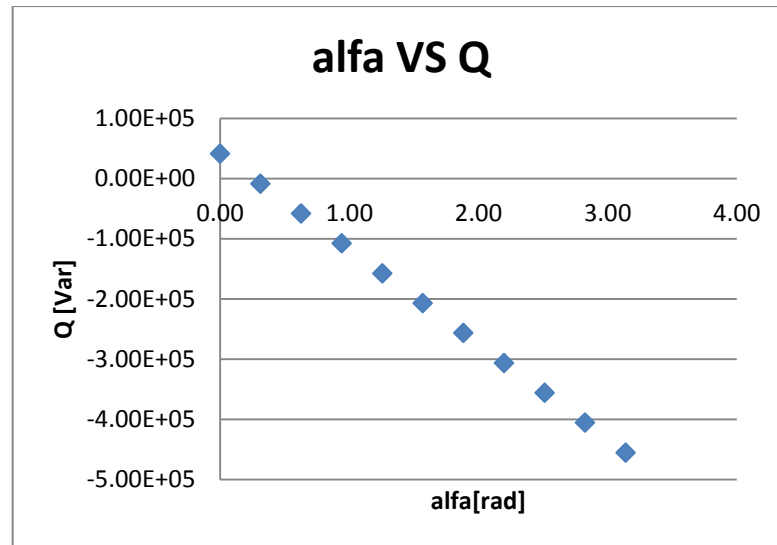
Hasil menunjukkan bahwa saat $\Delta\omega_e$ (frekuensi keluaran output) ditingkatkan, maka P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) akan meningkat. Hal ini dikarenakan dipergunakannya konstan V/f strategi, sehingga perubahan pada frekuensi proporsional terhadap perubahan penguatan tegangan MC. Jika tidak mempergunakan V/f strategi, maka Q (Daya Reaktif) akan menurun seiring peningkatan $\Delta\omega_e$ sedangkan untuk P (Daya Aktif) akan tetap sama seperti sekarang. Untuk menerangkan grafik pada P, maka perlu diperhatikan kembali kurva daya terhadap kecepatan dan grafik daya terhadap frekuensi pada generator. Sedangkan untuk Q, meningkatnya frekuensi keluaran pada MC akan meningkatkan konsumsi daya reaktif sistem, sehingga daya reaktif yang *disupply* pada jala-jala akan berkurang.

Berikut akan dijabarkan pengaruh α_o (sudut tegangan keluaran) pada P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) jala-jala. α_o dalam radian akan divariasikan dari $0 \cdot \pi$ sampai dengan π dengan peningkatan 0.1

Tabel 4.4 Variasi Nilai $\Delta\alpha_o$ (Sudut Tegangan Keluaran)

pi	pengali	Alfa (sudut tegangan keluaran)	Q[Var]	P[Watt]
3.141593	0.0	0.00	4.09E+04	8.28E+04
3.141593	0.1	0.31	-8.69E+03	5.32E+04
3.141593	0.2	0.63	-5.83E+04	2.36E+04
3.141593	0.3	0.94	-1.08E+05	-6.15E+03
3.141593	0.4	1.26	-1.58E+05	-3.58E+04
3.141593	0.5	1.57	-2.07E+05	-6.55E+04
3.141593	0.6	1.88	-2.57E+05	-9.52E+04
3.141593	0.7	2.20	-3.06E+05	-1.25E+05
3.141593	0.8	2.51	-3.56E+05	-1.55E+05
3.141593	0.9	2.83	-4.06E+05	-1.84E+05
3.141593	1.0	3.14	-4.55E+05	-2.14E+05

Gambar 4.15 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi $\Delta\alpha_o$ (Sudut Tegangan Keluaran)



Gambar 4.16 Nilai Q (Daya Reaktif) Terhadap Variasi $\Delta\alpha_o$ (Sudut Tegangan Keluaran)

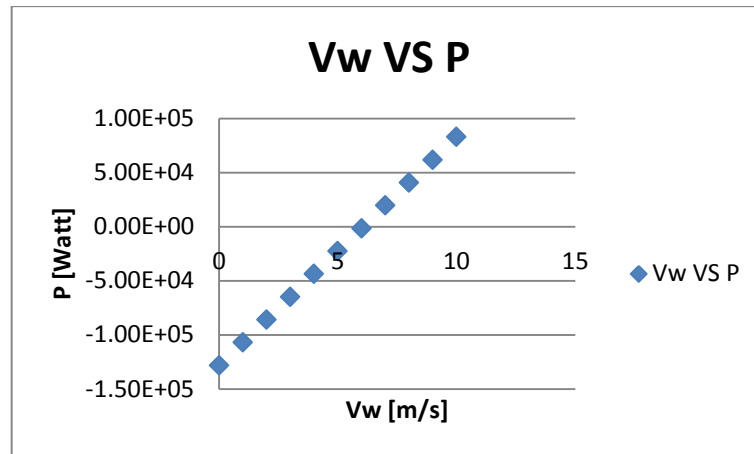
Grafik menunjukkan perubahan yang besar terhadap $\Delta\alpha_o$ baik pada P (Daya Aktif) maupun Q. Ternyata perubahan $\Delta\alpha_o$ membuat mesin induksi bekerja pada mode motoring bila ditingkatkan. Hal ini menunjukkan bahwa $\Delta\alpha_o$ bukan merupakan masukan yang cocok untuk mengendalikan sistem. Jadi untuk selanjutnya $\Delta\alpha_o$ akan tetap bernilai nol.

Inspeksi selanjutnya akan dilakukan terhadap masukan kecepatan angin. Simulasi dijalankan dengan memvariasikan kecepatan angin dari 0 m/s sampai dengan 10 m/s dengan peningkatan 1.

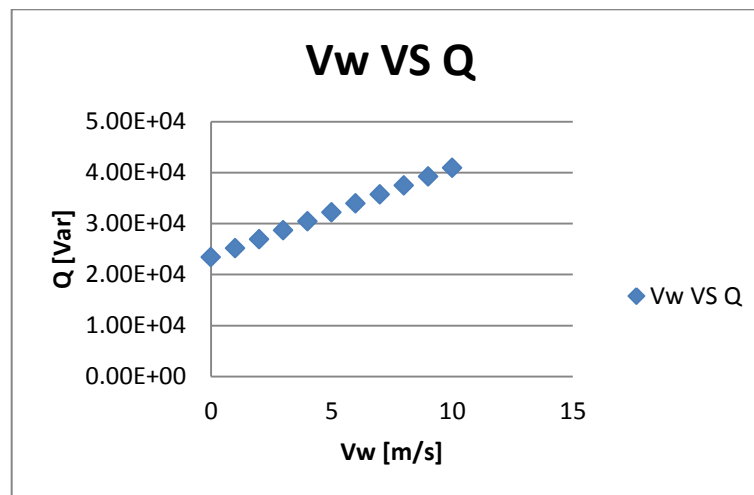
Tabel 4.5 Variasi Nilai Vw (Kecepatan Angin)

Vw (kecepatan angin)[m/s]	Q[V ar]	P[Watt]
0	2.34E+04	-1.28E+05
1	2.52E+04	-1.07E+05
2	2.69E+04	-8.60E+04
3	2.87E+04	-6.49E+04
4	3.04E+04	-4.38E+04
5	3.22E+04	-2.27E+04
6	3.39E+04	-1.63E+03
7	3.57E+04	1.95E+04

8	3.74E+04	4.06E+04
9	3.92E+04	6.17E+04
10	4.09E+04	8.28E+04



Gambar 4.17 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi V_w (Kecepatan Angin)



Gambar 4.18 Nilai Q (Daya Reaktif) Terhadap Variasi V_w (Kecepatan Angin)

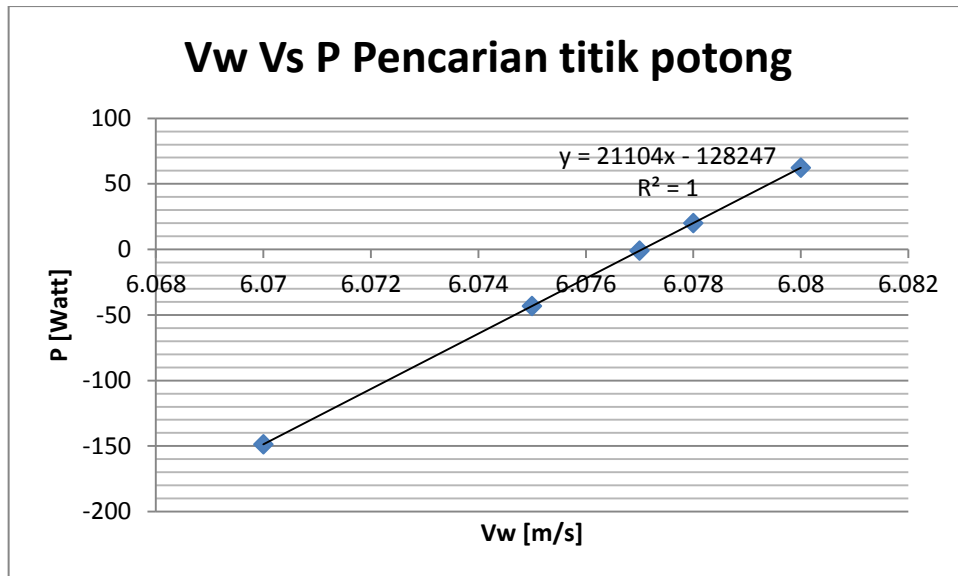
P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) meningkat seiring meningkatnya kecepatan angin. Hal ini sesuai dengan dasar teori yang menyatakan bahwa kecepatan angin sangat berpengaruh pada keluaran kincir angin, seperti yang

tertulis dalam rumus untuk daya mekanik dan torsi mekanik yang diambil dari turbin angin adalah fungsi dari kecepatan angin.

Sudah digambarkan sebelumnya bahwa seiring peningkatan kecepatan angin, maka mesin induksi akan beralih dari mode motoring menjadi mode generator. Pertanyaan berapa angin yang dibutuhkan untuk membuat generator bekerja dalam mode generating tentu patut untuk dijawab. Karena itu, berikut akan dilakukan pencarian nilai angin yang menyebabkan mesin induksi beralih fungsi dari motor menjadi generator. Dari variasi nilai V_w (kecepatan angin) pada bagian sebelumnya, diketahui peralihan nilai terjadi antara 6 m/s sampai dengan 7 m/s. Karena itu pencarian dilakukan dalam rentang tersebut. Beberapa data diambil, hanya disisakan lima data yang paling mendekati nilai yang diinginkan. Hal ini dikarenakan hubungan V_w (kecepatan angin) dan P (Daya Aktif) sebenarnya tidak linear, untuk didekati dengan persamaan linear semakin kecil rentang V_w (kecepatan angin yang diambil maka pendekatan linear akan semakin baik.

Tabel 4.6 Variasi Nilai V_w (Kecepatan Angin) Untuk Titik Potong

V_w	P
(kecepatan angin)	
6.07	-148.807
6.075	-43.2895
6.077	-1.0824
6.078	20.0211
6.08	62.2282



Gambar 4.19 Nilai P (Daya Aktif) Terhadap Variasi V_w (Kecepatan Angin) Untuk Mencari Titik Potong

Dari plot dengan mempergunakan excel, didapat persamaan antara daya dan kecepatan angin adalah sebagai berikut

$$y = 21104x - 128247$$

Karena ingin mencari titik perpotongan, maka cari nilai angin yang menyebabkan P (Daya Aktif) menjadi 0

$$0 = 21104x - 128247$$

$$x = \frac{128247}{21104} = 6.0769 \text{ m/s}$$

Kalau dilihat dari tabel, sebenarnya nilai tersebut masih membuat mesin induksi bekerja pada kondisi motoring. Ketidak sesuaian terjadi karena hubungan V_w (kecepatan angin) dan P (daya aktif) yang tidak linear didekati secara linear. Kecepatan yang dicari berada pada rentang 6,077 m/s sampai dengan 6,078 m/s.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- Desain dari Pembangkit listrik tenaga angin yang diajukan mempergunakan SCIG (*Squirrel Cage Induction Generator*) dipilih karena mesin yang kuat, sudah sering dipergunakan pada industri, dan mempunyai properti mekanik yang sesuai dengan turbin angin, seperti slip dan kemampuan *overload*. Penggunaan *gearbox* akan meningkatkan kecepatan poros, dipakai two mass model agar mempermudah model tanpa mengurangi dinamik dari sistem. Mempergunakan Matriks konverter yang memungkinkan kontrol *magnitude* tegangan keluaran, frekuensi, dan faktor daya masukan.
- Model yang sudah diturunkan sudah disimulasikan dan mendapatkan hasil yang bersesuaian dengan teori. Turbin angin dengan mempergunakan matriks konverter stabil dan dapat dipergunakan untuk menggantikan turbin angin dengan pasangan *rectifier-inverter* dengan keunggulan menghilangkan adanya *DC Link* yang memakan banyak tempat.
- Pengaruh masukan sistem sebagai berikut. $\Delta\omega_e$ (frekuensi tegangan keluaran) yang meningkat akan menyebabkan P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) meningkat karena sudah menggunakan strategi V/f. Δq (rasio tegangan) sudah diatur bersesuaian dengan $\Delta\omega_e$ yang dimasukkan, sehingga hubungan Δq (perbandingan tegangan) dan $\Delta\omega_e$ sebanding. $\Delta\alpha$ (*DPF control*) dapat dipergunakan untuk mengontrol PF (*Power Factor*) sumber tegangan. $\Delta\alpha_o$ (sudut tegangan keluaran) yang meningkat menyebabkan mesin induksi bekerja pada mode motoring, jadi sebaiknya tetap dijaga 0. ΔV_w (kecepatan angin) yang meningkat menyebabkan P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) yang meningkat sesuai rumus torsi dan daya mekanik turbin. $\Delta\beta$ (sudut bilah) dijaga tetap 0, sesuai yang dinyatakan dalam literatur agar mendapatkan nilai C_p (koefisien daya) yang optimum.

5.2 Saran

Untuk kedepannya perlu ditambahkan rangkaian soft starting agar transient yang terjadi saat simulasi pertama kali dijalankan tidak terlalu besar. Pengontrolan dapat dilakukan lebih baik lagi sehingga nilai P (Daya Aktif) dan Q (Daya Reaktif) sesuai dengan set point yang diinginkan.

DAFTAR REFERENSI

- [1] Abdin, E., & Xu, W. (1998). CONTROL DESIGN AND DYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF A WIND TURBINE-INDUCTION GENERATOR UNIT. *IEEE*, 1198-1202.
- [2] Barakati, S. M., Kazerani, M., & Aplevich, J. (2008). An Overall Dynamic Model for a Matrix Converter. *iee*, 13-18.
- [3] Barakati, S. M., Kazerani, M., & Aplevich, J. D. (2009). Maximum Power Tracking Control for a Wind Turbine System Including a Matrix Converter. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 705-713.
- [4] Evans, A. (2010). *Resource Scarcity, Climate Change, and The Risk of Violent Conflict*. New York: World Development Record 2011.
- [5] Freries, L. L. (1990). *Wind Energy Conversion System*. Prentice Hall.
- [6] Fujinami, K., Kondo, K., Sato, Y., & Takahashi, K. (n.d.). A Restarting Method of an Induction Motor Speed Sensorless Vector Control System for a Small Sized Wind Turbine Power Generator System. 5.
- [7] Heier, S. (1998). Chapter 1. In S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. John Wiley and Sons Ltd .
- [8] Krause, P. C. (1987). *Analysis of Electrical Machinery*. McGraw-Hill Book Co.
- [9] Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (1994). *Analysis of Electric Machinery*. IEEE Press.
- [10] Mathew, S. (2006). *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis, and Economics*. Springer.
- [11] Nise, N. (2004). *Control System Engineering*. Singapore: John Wiley & Sons.

- [12] Paulo Fischer de Toledo, H. X. (n.d.). *WIND FARM IN WEAK GRIDS COMPENSATED WITH STATCOM*.
- [13] Pucci, M., & Cirrincione, M. (2011). Neural MPPT Control of Wind Generators With Induction Machines Without Speed Sensors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 11.
- [14] Wheeler, P. W., Rodríguez, J., Clare, J. C., Empringham, L., & Weinstein, A. (2002). Matrix Converters: A Technology Review. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 276-288.

Lampiran 1 Program Turbin Dinamik V/f

```
/* ==SOURCE file list of "IM.c" with Structure C == */
```

```
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME TurbinDinVf
#include "simstruc.h"
#include <math.h>

#define Masukan(element) (*uPtrs0[element])
#define Rs 0.262
#define Rr 0.187
#define Xls 1.206
#define Xlr 1.206
#define Xm 54.02
#define Jg 11.06
#define P (Daya Aktif) 4
#define Jt 100
#define Ks 2e6
#define B 5e3
#define Ngear 20
#define rho 1.25
#define R 10
#define Ri 0.1
#define Ro 0.1
#define Li 1e-3
#define Lo 1e-3
#define C 0.1e-3
#define Fg 60
#define pi 3.1416
#define Wjala-jala 2*pi*Fg
#define Kvf 1.32628e-3
#define Vll 4000
#define Vgm sqrt(2)*Vll/sqrt(3)
#define Xbinml 1/(1/Xm+1/Xls+1/Xlr)
```

```
#define kecil 1e-6
```

```
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
```

```
{
    ssSetNumContStates(S, 11);

    if (!ssSetNumMasukanPorts(S, 1)) return;
    ssSetMasukanPortWidth(S, 0, 6);
    ssSetMasukanPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
    ssSetMasukanPortOverWritable(S, 0, 1);
```

```
    if (!ssSetNumKeluaranPorts(S, 2)) return;
    ssSetKeluaranPortWidth(S, 0, 2);
    ssSetKeluaranPortWidth(S, 1, 11);
```

```
[Lanjutan]
```

```
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);

    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE);
}
```

```
static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
```

```
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);

    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}
```

```
#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS
```

```
static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
```

```
{
    real_T *X0 = ssGetContStates(S);
    int_T nStates = ssGetNumContStates(S);
```

```

int_T i;

/* initialize the states to 0.0 */
for (i=0; i < nStates; i++)
    {
        XO[i] = 0.0;
    }
}

static void mdlKeluarans(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T      *Y0 = ssGetKeluaranPortRealSignal(S,0);
    real_T      *Y1 = ssGetKeluaranPortRealSignal(S,1);
    real_T      *X = ssGetContStates(S);
    MasukanRealPtrsType uPtrs0 = ssGetMasukanPortRealSignalPtrs(S,0);
    real_T We,q,a,alfa,Vw (kecepatan angin),beta;
    real_T Iqgd,Idgd,Vqo,Vdo,FluksQS,FluksDS,FluksQR,FluksDR,Wg,Teta,Wt;
    real_T We1;
    We=Masukan(0);
    q=Masukan(1);
    a=Masukan(2);
    alfa=Masukan(3);
    Vw (kecepatan angin)=Masukan(4);
    beta=Masukan(5);
    Iqgd=X[0];
    Idgd=X[1];
    Vqo=X[2];
    Vdo=X[3];
    FluksQS=X[4];
    [Lanjutan]
    FluksDS=X[5];
    FluksQR=X[6];

```

```

FluksDR=X[7];
Wg=X[8];
Teta=X[9];
Wt=X[10];

if(abs(We)<kecil)
{if(We>0)
We=kecil;
else
We=-1*kecil;}
else
We1=We;

Y0[0]=((3*Vgm)/(2*Kvf*We))*((cos(alfa))*Iqgd-(sin(alfa))*Idgd);
//Pjala-jala
Y0[1]=((3*Vgm)/((2*Kvf*We)*(2*a-1)))*((sin(alfa))*Iqgd+(cos(alfa))*Idgd);
//Qjala-jala

Y1[0]=Iqgd;
Y1[1]=Idgd;
Y1[2]=Vqo;
Y1[3]=Vdo;
Y1[4]=FluksQS;
Y1[5]=FluksDS;
Y1[6]=FluksQR;
Y1[7]=FluksDR;
Y1[8]=Wg;
Y1[9]=Teta;
Y1[10]=Wt;
}

#define MDL_DERIVATIVES

```



```

static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
{
    real_T *dX = ssGetdX(S);
    real_T *X = ssGetContStates(S);
    MasukanRealPtrsType uPtrs0 = ssGetMasukanPortRealSignalPtrs(S,0);
    real_T We,q,a,alfa,Vw (kecepatan angin),beta;
    real_T Iqgd,Idgd,Vqo,Vdo,FluksQS,FluksDS,FluksQR,FluksDR,Wg,Teta,Wt;
    real_T
doIqgd,doIdgd,doVqo,doVdo,doFluksQS,doFluksDS,doFluksQR,doFluksDR,do
Wg,doTeta,doWt;
    real_T Ls,A71,A81,C0,C1,C2,C3,C4,C5,C6;
    real_T C1bin,C2bin,C3bin,C4bin,C5bin;
[Lanjutan]
    real_T Wb;
    real_T Vw (kecepatan angin)1,We1,Wb1,Wt1;

    We=Masukan(0);
    q=Masukan(1);
    a=Masukan(2);
    alfa=Masukan(3);
    Vw (kecepatan angin)=Masukan(4);
    beta=Masukan(5);
    Iqgd=X[0];
    Idgd=X[1];
    Vqo=X[2];
    Vdo=X[3];
    FluksQS=X[4];
    FluksDS=X[5];
    FluksQR=X[6];
    FluksDR=X[7];
    Wg=X[8];
    Teta=X[9];

```

Wt=X[10];

```

if(abs(Vw (kecepatan angin))<kecil)
{ if(Vw (kecepatan angin)>0)
Vw (kecepatan angin)1=kecil;
else
Vw (kecepatan angin)1=-1*kecil;}
else
Vw (kecepatan angin)1=Vw (kecepatan angin);

```

```

if(abs(We)<kecil)
{ if(We>0)
We1=kecil;
else
We1=-1*kecil;}
else
We1=We;

```

```

if(abs(Wb)<kecil)
{ if(Wb>0)
Wb1=kecil;
else
Wb1=-1*kecil;}
else
Wb1=Wb;

```

```

if(abs(Wt)<kecil)
[Lanjutan]
{ if(Wt>0)
Wt1=kecil;
else
Wt1=-1*kecil;}

```

else

Wt1=Wt;

Wb=We1;

Ls=Xls/We1;

A71=(pow(Kvf,2)/(C*Ls))*(Xbinml/Xls-1);

A81=(pow(Kvf,2)/(C*Ls))*(Xbinml/Xls);

C0=(Wb1*Lo/Xls)*(1-Xbinml/Xls)+1;

C1=(Wb*Rs/Xls)*(Xbinml/Xls-1);

C2=Wb*Rs*Xbinml/(Xls*Xlr);

C3=Wb*Rr*Xbinml/(Xlr*Xls);

C4=(Wb*Rr/Xlr)*(Xbinml/Xlr-1);

C5=3*P*Xbinml/(2*2*Wb1*Xls*Xlr);

C6=1/Jg;

C1bin=(1/C0)*(C1+C3*(Wb*Lo*Xbinml/(Xls*Xls))-(Wb*Ro/Xls)*(1-Xbinml/Xls));

C2bin=(1/C0)*(-1-(Lo*Wb/Xls)*(1-Xbinml/Xls));

C3bin=(1/C0)*(C2+(Wb*Xbinml/Xls)*(C4*Lo/Xls+Ro/Xls));

C4bin=Wb*Lo*Xbinml/(C0*Xls*Xls);

C5bin=1/C0;

doIqgd=-(Ri/Li)*Iqgd-(Wjala-jala/(2*a-1))*Idgd-
 (1/Li)*Vqo+(Vgm*Kvf*cos(alfa)/Li)*We;
 doIdgd=Wjala-jala*(2*a-1)*Iqgd-(Ri/Li)*Idgd-(1/Li)*Vdo-
 (Vgm*Kvf*sin(alfa)/Li)*We;
 doVqo=(1/C)*Iqgd-(Wjala-jala/(2*a-
 1))*Vdo+We*A71*pow(cos(alfa),2)*FluksQS+We*A71*0.5*sin(2*alfa)*FluksD
 S+We*A81*pow(cos(alfa),2)*FluksQR+We*A81*0.5*sin(2*alfa)*FluksDR;
 doVdo=(1/C)*Idgd+Wjala-jala*(2*a-1)*Vqo+pow((2*a-
 1),2)*We*A71*0.5*sin(2*alfa)*FluksQS+pow((2*a-
 1),2)*We*A71*pow(cos(alfa),2)*FluksDS+pow((2*a-

```

1),2)*We*A81*0.5*sin(2*alfa)*FluksQR+pow((2*a-
1),2)*We*A81*pow(cos(alfa),2)*FluksDR;

```

```

doFluksQS=C1bin*FluksQS+C2bin*FluksDS*We+C3bin*FluksQR+C4bin*Wg*
FluksDR+C5bin*Vqo*We;

```

```

doFluksDS=-C2bin*FluksQS*We+C1bin*FluksDS-
C4bin*Wg*FluksQR+C3bin*FluksDR+C5bin*Vdo*We;

```

```

doFluksQR=C3*FluksQS+C4*FluksQR-(We-Wg)*FluksDR;

```

```

doFluksDR=C3*FluksDS+(We-Wg)*FluksQR+C4*FluksDR;

```

```

doWg=C6*(-C5*(FluksDR*FluksQS-
FluksQR*FluksDS)+(1/Ngear)*(Ks*Teta+B*(Wt-(2*Wg/(P*Ngear)))));

```

```

[Lanjutan]

```

```

doTeta=Wt-(2*Wg/(P*Ngear));

```

```

doWt=(1/Jt)*((0.5*pi*rho*pow(R,2)*pow(Vw (kecepatan
angin),3)/Wt1)*((0.44-0.0167*beta)*sin(pi*(R*Wt/Vw (kecepatan angin)1-
3)/(15-0.3*beta))-0.00184*(R*Wt/Vw (kecepatan angin)1-3)*beta)-
(Ks*Teta+B*(Wt-(2*Wg)/(P*Ngear))));

```

```

dX[0]=doIqgd;

```

```

dX[1]=doIdgd;

```

```

dX[2]=doVqo;

```

```

dX[3]=doVdo;

```

```

dX[4]=doFluksQS;

```

```

dX[5]=doFluksDS;

```

```

dX[6]=doFluksQR;

```

```

dX[7]=doFluksDR;

```

```

dX[8]=doWg;

```

```

dX[9]=doTeta;

```

```

dX[10]=doWt;

```

```

}

```

```

static void mdlTerminate(SimStruct *S)

```

```
{ } /*Keep this function empty since no memory is allocated*/

#ifdef MATLAB_MEX_FILE
/* Is this file being compiled as a (Displacement Power factor Control) MEX-
file? */
#include "simulink.c" /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfunk.h" /*Code generation registration function*/
#endif
```

Lampiran 2 Program Turbin Linear

```

/* ==SOURCE file list of "IM.c" with Structure C == */
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME TurbinLin
#include "simstruc.h"
#include <math.h>

#define Masukan(element) (*uPtrs0[element])

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    ssSetNumContStates(S, 11);

    if (!ssSetNumMasukanPorts(S, 1)) return;
    ssSetMasukanPortWidth(S, 0, 6);
    ssSetMasukanPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
    ssSetMasukanPortOverWritable(S, 0, 1);

    if (!ssSetNumKeluaranPorts(S, 2)) return;
    ssSetKeluaranPortWidth(S, 0, 2);
    ssSetKeluaranPortWidth(S, 1, 11);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);

    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);

    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}

```

```

#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS
static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
    real_T      *X0 = ssGetContStates(S);
    int_T nStates = ssGetNumContStates(S);
    int_T i;

    /* initialize the states to 0.0 */
    for (i=0; i < nStates; i++)
        {
            X0[i] = 0.0;
        }
}

```

[Lanjutan]

```

static void mdlKeluarans(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T      *Y0 = ssGetKeluaranPortRealSignal(S,0);
    real_T      *Y1 = ssGetKeluaranPortRealSignal(S,1);
    real_T      *X = ssGetContStates(S);
    MasukanRealPtrsType uPtrs0 = ssGetMasukanPortRealSignalPtrs(S,0);
    real_T We,q,a,alfa,Vw (kecepatan angin),beta;
    real_T Iqgd,Idgd,Vqo,Vdo,FluksQS,FluksDS,FluksQR,FluksDR,Wg,Teta,Wt;

    We=Masukan(0);
    q=Masukan(1);
    a=Masukan(2);
    alfa=Masukan(3);
    Vw (kecepatan angin)=Masukan(4);
    beta=Masukan(5);
}

```

```

Iqgd=X[0];
Idgd=X[1];
Vqo=X[2];
Vdo=X[3];
FluksQS=X[4];
FluksDS=X[5];
FluksQR=X[6];
FluksDR=X[7];
Wg=X[8];
Teta=X[9];
Wt=X[10];

Y0[0]=9798*Iqgd+219.62*We-24528*alfa;
Y0[1]=-16330*Idgd+108.44*We+1.3627e5*a+1.3799e5*alfa;
Y1[0]=Iqgd;
Y1[1]=Idgd;
Y1[2]=Vqo;
Y1[3]=Vdo;
Y1[4]=FluksQS;
Y1[5]=FluksDS;
Y1[6]=FluksQR;
Y1[7]=FluksDR;
Y1[8]=Wg;
Y1[9]=Teta;
Y1[10]=Wt;

}

```

[Lanjutan]

```
#define MDL_DERIVATIVES
```



```

static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
{
    real_T *dX = ssGetdX(S);
    real_T *X = ssGetContStates(S);
    MasukanRealPtrsType uPtrs0 = ssGetMasukanPortRealSignalPtrs(S,0);
    real_T We,q,a,alfa,Vw (kecepatan angin),beta;
    real_T Iqgd,Idgd,Vqo,Vdo,FluksQS,FluksDS,FluksQR,FluksDR,Wg,Teta,Wt;
    real_T
doIqgd,doIdgd,doVqo,doVdo,doFluksQS,doFluksDS,doFluksQR,doFluksDR,do
Wg,doTeta,doWt;

    We=Masukan(0);
    q=Masukan(1);
    a=Masukan(2);
    alfa=Masukan(3);
    Vw (kecepatan angin)=Masukan(4);
    beta=Masukan(5);
    Iqgd=X[0];
    Idgd=X[1];
    Vqo=X[2];
    Vdo=X[3];
    FluksQS=X[4];
    FluksDS=X[5];
    FluksQR=X[6];
    FluksDR=X[7];
    Wg=X[8];
    Teta=X[9];
    Wt=X[10];

    doIqgd=-100*Iqgd-628.32*Idgd-1000*Vqo+4331.6*We+5243.1*a;
    doIdgd=226.19*Iqgd-100*Idgd-1000*Vdo-6371.2*a-9.798e5*alfa;

```

$$\begin{aligned}
\text{doVqo} &= 1e6 * \text{Iqgd} - 628.32 * \text{Vdo} - \\
& 1.0479e5 * \text{FluksQS} + 1.025e5 * \text{FluksQR} + 22411 * \text{We} - 4527.5 * a - 7.9796e6 * \text{alfa}; \\
\text{doVdo} &= 1e6 * \text{Idgd} + 226.19 * \text{Vqo} - 37726 * \text{FluksDS} + 36902 * \text{FluksDR} - 7619.9 * \text{We} - \\
& 1.792e7 * a + 3.0415e6 * \text{alfa}; \\
\text{doFluksQS} &= 325.55 * \text{Vqo} - 45.54 * \text{FluksQS} - \\
& 376.99 * \text{FluksDS} + 44.375 * \text{FluksQR} + 50.528 * \text{FluksDR} + 212.38 * \text{Wg} - 222.94 * \text{We}; \\
\text{doFluksDS} &= 325.55 * \text{Vdo} + 376.99 * \text{FluksQS} - 45.54 * \text{FluksDS} - \\
& 50.528 * \text{FluksQR} + 44.375 * \text{FluksDR} - 14.612 * \text{Wg} + 24.59 * \text{We}; \\
\text{doFluksQR} &= 28.905 * \text{FluksQS} - 29.551 * \text{FluksQR} + 1.5489 * \text{FluksDR} + 1591.1 * \text{Wg} - \\
& 1591.1 * \text{We}; \\
\text{doFluksDR} &= 28.905 * \text{FluksDS} - 1.5489 * \text{FluksQR} - 29.551 * \text{FluksDR} - \\
& 109.47 * \text{Wg} + 109.47 * \text{We}; \\
& \text{[Lanjutan]}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{doWg} &= 0.87472 * \text{FluksQS} - 0.060182 * \text{FluksDS} - \\
& 0.89748 * \text{FluksQR} + 0.014545 * \text{FluksDR} - \\
& 1.0531 * \text{Wg} + 16849 * \text{Teta} + 42.123 * \text{Wt} + 0.39844 * \text{We}; \\
\text{doTeta} &= -0.025 * \text{Wg} + 1 * \text{Wt}; \\
\text{doWt} &= 1.25 * \text{Wg} - 20000 * \text{Teta} - 55.302 * \text{Wt} + 22.848 * \text{Vw (kecepatan angin)} - \\
& 5.3188 * \text{beta};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
dX[0] &= \text{doIqgd}; \\
dX[1] &= \text{doIdgd}; \\
dX[2] &= \text{doVqo}; \\
dX[3] &= \text{doVdo}; \\
dX[4] &= \text{doFluksQS}; \\
dX[5] &= \text{doFluksDS}; \\
dX[6] &= \text{doFluksQR}; \\
dX[7] &= \text{doFluksDR}; \\
dX[8] &= \text{doWg}; \\
dX[9] &= \text{doTeta}; \\
dX[10] &= \text{doWt};
\end{aligned}$$

```
}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{ } /*Keep this function empty since no memory is allocated*/

#ifdef MATLAB_MEX_FILE
/* Is this file being compiled as a (Displacement Power factor Control) MEX-
file? */
#include "simulink.c" /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfunk.h" /*Code generation registration function*/
#endif
```