



TUGAS AKHIR - TE 141599

***BACK TO BACK VOLTAGE SOURCE INVERTER UNTUK
KONTROL SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR***

Ainur Rachmad Hidayat
NRP 2212100095

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

**BACK TO BACK VOLTAGE SOURCE INVERTER FOR
CONTROL OF SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR**

Ainur Rachmad Hidayat
NRP 2212100095

Advisor
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

**BACK TO BACK VOLTAGE SOURCE INVERTER UNTUK
KONTROL SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR**



TUGAS AKHIR
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

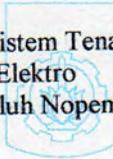
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



Menyetujui :



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Dosen Pembimbing I

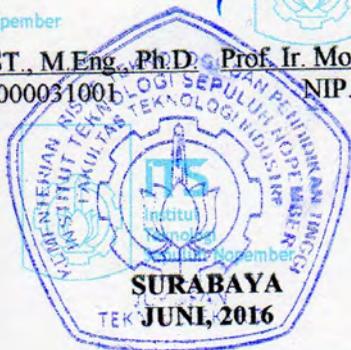
30/6

[Signature]
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Dosen Pembimbing II

[Signature]
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001 NIP. 196510121990031003



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

BACK TO BACK VOLTAGE SOURCE INVERTER UNTUK KONTROL SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR

ABSTRAK

Angin merupakan salah satu energi terbarukan yang sangat pesat perkembangannya dalam membantu memenuhi kebutuhan energi listrik seiring ketersediaannya yang melimpah. Alat yang bisa digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik adalah generator induksi. Pada tugas akhir ini akan membahas operasi turbin angin dengan generator induksi dikontrol menggunakan *back to back voltage source inverter* serta sistem terhubung jaringan listrik tiga fasa tegangan rendah (380 V). Pensaklaran *back to back voltage source inverter* dimodelkan dalam bentuk *average model*.

Pada *back to back voltage source inverter* terdapat dua konverter yaitu konverter sisi mesin (*machine side converter*) dan konverter sisi grid (*grid side converter*). Konverter sisi mesin berfungsi untuk mengatur tegangan dan frekuensi serta pengaturan kecepatan turbin agar turbin angin dapat menghasilkan daya maksimum (*maximum power point tracking*) dengan metode kontrol *volt/hertz constant*. Konverter sisi grid berfungsi untuk mengatur tegangan DC agar tetap konstan dengan mensinkronkan sudut fasa antara keluaran konverter dan grid dengan menggunakan metode *current controlled voltage source inverter*.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan turbin angin selalu maksimum pada setiap kecepatan angin. Tegangan dan frekuensi generator menjadi stabil dan berbanding lurus dengan kecepatan angin serta tegangan dc link selalu konstan sehingga dapat mengalirkan daya secara dua arah. Oleh karena itu *back to back voltage source inverter* sangat cocok digunakan untuk pengontrolan turbin angin dengan menggunakan generator induksi.

Kata Kunci: Turbin Angin, Konverter Sisi Mesin, Konverter Sisi Grid, Volt/Hertz konstan, DC-Link, *Current Controlled Voltage Source Inverter*, *Average Model*.

BACK TO BACK VOLTAGE SOURCE INVERTER FOR CONTROL OF SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR

ABSTRACT

Wind is one of the most develop renewable energy to help human meet the electricity needs as availability is abundant. Instrument which can be used to convert wind energy into electrical energy is an induction generator. In this final project will discuss about the operation of the wind turbine with induction generator controlled using back to back voltage source inverter with grid connected system low voltage 380 V. Switching of back to back voltage source inverter was designed in average model.

In back to back voltage source inverter, there are two converters that are machine side converter and grid side converter. Machine side converter has function to regulate the voltage and frequency of generator and turbine speed in order to the wind turbine can generate maximum power at any wind speed with method volt / hertz constant control. Grid side converter has function to adjust the DC voltage keep be contant by synchronizing the phase angle between the converter output and grid using current controlled voltage source inverter method.

The simulation results showed that wind turbine always generated the maximum power at any wind speed. Voltage and frequency of Generator is stable and directly proportional to the wind speed and the dc link voltage is always constant so the power flow can bidirectional. Therefore, back-to-back voltage source inverter is suitable for controlling wind turbine using an induction generator.

Keywords: Wind Turbine, Machine Side Converter, Grid Side Converter, Volt/Hertz constant, DC-Link, Current Controlled Voltage Source Inverter, Average Model.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
BAB 2 <i>VARIABLE SPEED WIND ENERGY CONVERSION</i> <i>SYSTEM BERBASIS SEIG</i>	
2.1 Turbin Angin/ <i>Wind Turbine</i>	7
2.1.1 Jenis – Jenis Turbin Angin	10
2.1.1.1 VAWT dan HAWT.....	10
2.1.1.2 <i>Fixed Speed</i> dan <i>Variable Speed</i>	11
2.2 <i>Self Excited Induction Generator</i>	13
2.3 <i>Current Controlled Voltage Source Inverter</i> dengan <i>Average Model</i>	16
2.4 <i>Volt/Hertz Constant Control</i>	18
BAB 3 <i>BACK TO BACK VSI</i> UNTUK <i>WIND ENERGY</i> <i>CONVERSION SYSTEM BERBASIS SEIG</i>	
3.1 Konfigurasi Sistem <i>Back to Back Voltage Source</i> <i>Inverter</i> Untuk Kontrol <i>Self Excited Induction</i> <i>Generator</i>	21
3.2 Model <i>Wind Turbine</i>	22
3.3 Model Generator Induksi	24

3.4	Back to Back VSI	25
3.4.1	Kontrol <i>Grid Side Converter</i>	25
3.4.2	Kontrol <i>Machine Side Converter</i>	28
BAB 4	SIMULASI DAN ANALISIS	
4.1	Operasi <i>Steady State</i>	33
4.1.1	Operasi kecepatan angin 3,5 m/s	34
4.1.1.1	Tegangan dan Arus Generator	34
4.1.1.2	Tegangan DC link	35
4.1.1.3	Tegangan dan Arus VSI Grid.....	36
4.1.1.4	Frekuensi Generator dan VSI Grid ..	37
4.1.2	Operasi pada Kecepatan Angin 11 m/s	38
4.1.2.1	Tegangan dan Arus Generator	38
4.1.2.2	Tegangan DC link	39
4.1.2.3	Tegangan dan Arus VSI Grid	40
4.1.2.4	Frekuensi Generator dan VSI Grid ..	41
4.2	Operasi Dinamik Turbin Angin	41
4.2.1	Daya Turbin dan Kecepatan Generator pada Operasi Dinamik	42
4.2.2	Tegangan dan Arus Generator	43
4.2.3	Tegangan DC Link	44
4.2.4	Tegangan dan Arus VSI Grid	45
4.3	Kontrol Daya Reaktif (VAR) pada Grid	45
BAB 5	PENUTUP	
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	47
DAFTAR PUSTAKA	49
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	53
LAMPIRAN	55

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter turbin angin <i>Kingspan</i>	22
Tabel 3.2	Kecepatan dan daya referensi turbin angin pada setiap kecepatan angin	23
Tabel 3.3	Parameter Generator Induksi	25
Tabel 3.4	Kecepatan putar generator referensi	31
Tabel 4.1	Perbandingan daya aktual dengan daya maksimum turbin angin	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Blok diagram <i>back to back voltage source inverter</i> ..	2
Gambar 2.1	Perubahan daya pada turbin angin	7
Gambar 2.2	Koefisien daya sebagai fungsi dari TSR	8
Gambar 2.3	Karakteristik daya terhadap putaran rotor turbin	9
Gambar 2.4	Tiga daerah operasi turbin angin	10
Gambar 2.5	Jenis turbin angin, (a) HAWT dan (b) VAWT	11
Gambar 2.6	Kurva operasi <i>fixed speed</i> dan <i>variable speed</i> turbin.	12
Gambar 2.7	Rangkaian <i>steady state</i> generator induksi penguatan sendiri	13
Gambar 2.8	Rangkaian ekivalen generator induksi penguatan sendiri dalam <i>dq</i> model	14
Gambar 2.9	Kurva magnetisasi <i>self excited induction generator</i> ...	16
Gambar 2.10	Diagram blok kontrol <i>current controlled voltage source inverter</i> menggunakan <i>average model</i>	17
Gambar 2.11	Skema kontrol <i>Volt/Hertz</i> konstan	18
Gambar 2.12	Kurva perbandingan tegangan terhadap frekuensi mesin induksi	19
Gambar 3.1	Skema sistem <i>back to back voltage source inverter</i> untuk kontrol <i>self excited induction generator</i>	21
Gambar 3.2	Kurva karakteristik daya elektrik WT terhadap putaran turbin	23
Gambar 3.3	Kurva karakteristik mesin induksi	24
Gambar 3.4	Rangkaian kontrol <i>voltage source inverter (VSI)</i> tiga fasa <i>grid side converter</i>	26
Gambar 3.5	Regulator tegangan <i>DC-link</i>	27
Gambar 3.6	Skema <i>inner loop current control grid side converter</i>	28
Gambar 3.7	Skema kontrol <i>voltage source inverter (VSI)</i> tiga fasa <i>machine side converter</i>	29
Gambar 3.8	Skema <i>outer loop control machine side converter</i>	30
Gambar 3.9	Skema <i>inner loop current control machine side converter</i>	32
Gambar 4.1	Grafik kecepatan angin 3,5 m/s	34
Gambar 4.2	Tegangan generator pada kecepatan angin 3,5 m/s.....	34
Gambar 4.3	Arus generator pada kecepatan angin 3,5 m/s	35
Gambar 4.4	Tegangan dc link pada kecepatan angin 3,5 m/s	35
Gambar 4.5	Tegangan VSI grid pada kecepatan angin 3,5 m/s	36

Gambar 4.6	Arus VSI grid pada kecepatan angin 3,5 m/s	36
Gambar 4.7	Periode sinyal tegangan generator dan VSI grid	37
Gambar 4.8	Grafik kecepatan angin 11 m/s.....	38
Gambar 4.9	Tegangan generator pada kecepatan angin 11 m/s	38
Gambar 4.10	Arus generator pada kecepatan angin 11 m/s	39
Gambar 4.11	Tegangan dc link pada kecepatan angin 11 m/s	39
Gambar 4.12	Tegangan VSI grid pada kecepatan angin 11 m/s	40
Gambar 4.13	Arus keluaran VSI grid pada kecepatan angin 11 m/s	40
Gambar 4.14	Waktu yang ditempuh satu gelombang penuh tegangan generator dan VSI grid	41
Gambar 4.15	Grafik keadaan dinamik kecepatan angin	42
Gambar 4.16	Kecepatan rotor aktual vs referensi	42
Gambar 4.17	Daya aktual vs daya maksimum turbin angin	42
Gambar 4.18	Tegangan Generator pada operasi dinamik	43
Gambar 4.19	Arus Generator pada keadaan dinamik kecepatan angin	44
Gambar 4.20	Tegangan dc link pada keadaan dinamik kecepatan angin	44
Gambar 4.21	Tegangan VSI grid pada kondisi dinamik	45
Gambar 4.22	Arus VSI grid pada kondisi dinamik	45
Gambar 4.23	Grafik kecepatan angin	46
Gambar 4.24	Daya reaktif (VAR) pada jaringan listrik	46

BAB 1

PENDAHULUAN

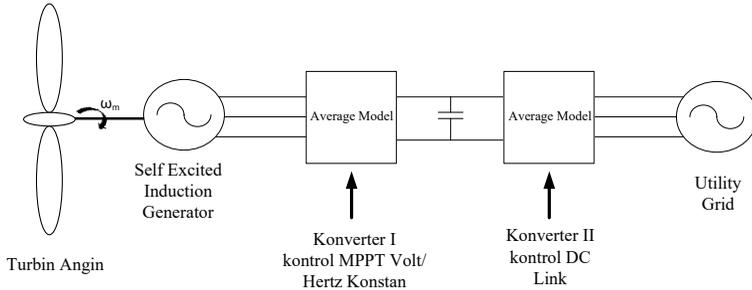
1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, banyak terdapat perusakan lingkungan yang disebabkan oleh bahan bakar fosil. Oleh karena itu, perlu dikembangkannya teknologi – teknologi pembangkitan listrik dari energi terbarukan yang ramah lingkungan dan dapat langsung dimanfaatkan seiring ketersediannya yang melimpah. Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik adalah energi angin. Alat yang digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik adalah generator induksi.

Pada umumnya, Generator induksi dapat dioperasikan menggunakan dua sistem yaitu sistem *stand alone* biasanya diterapkan pada daerah yang tidak terjangkau jaringan listrik dan sistem *grid connected* (terhubung dengan jaringan) yang biasanya diterapkan pada daerah yang terdapat jaringan listrik. Pada operasi *stand alone* tegangan dan frekuensi keluaran generator induksi sangat sensitif terhadap perubahan beban. Hal ini akan menyebabkan tegangan dan frekuensi keluaran yang fluktuatif [1]. Oleh karena itu perlu diadakannya pengaturan tegangan dan frekuensi keluaran generator induksi. Sedangkan pada operasi sistem *grid connected* diperlukan adanya kontrol untuk mengatur kecepatan turbin agar turbin angin dapat selalu menghasilkan daya maksimum pada setiap kecepatan angin serta kontrol tegangan dc link agar sistem stabil dan dapat mengalirkan daya secara dua arah.

Pada tugas akhir ini akan membahas operasi turbin angin dengan sistem *grid connected* dan dikontrol menggunakan *back to back voltage source inverter* yang dimodelkan dalam *average model*. Pada *back to back voltage source inverter* terdapat dua konverter yaitu konverter sisi mesin (*machine side converter*) dan konverter sisi grid (*grid side converter*). Konverter sisi mesin berfungsi untuk mengatur tegangan dan frekuensi serta pengaturan kecepatan turbin agar turbin angin dapat menghasilkan daya maksimum (*maximum power point tracking*) dengan metode kontrol konstan volt/hertz. Konverter sisi grid berfungsi untuk mengatur tegangan DC agar tetap konstan dengan mensinkronkan sudut fasa antara keluaran konverter dan grid dengan menggunakan metode *current controlled voltage source inverter* [2].

Berikut adalah skema sistem turbin angin dengan *back to back voltage source inverter* yang diaplikasikan pada *wind turbine* dengan *self excited induction generator* seperti gambar 1.



Gambar 1.1 Blok diagram *back to back voltage source inverter*

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah skema kontrol *back to back voltage source inverter* untuk mengatur sistem *wind turbine* menggunakan *self excited induction generator* dengan sistem *grid connected*.

1.3 Tujuan

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Mendapatkan skema kontrol *back to back voltage source inverter* dengan sistem *grid connected*.
2. Menyajikan simulasi dan analisis pengaturan sistem *wind turbine* dengan *self excited induction generator* saat *connected to grid* menggunakan *back to back voltage source inverter*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Kontrol dari *back to back voltage source* menggunakan *average model*.
2. Pengaturan kecepatan, tegangan dan frekuensi generator induksi menggunakan kontrol volt/hertz konstan.
3. Pengaturan tegangan dc link menggunakan konsep *current controlled voltage source inverter*.

4. Perubahan kecepatan angin dibatasi mulai dari 3,5 m/s (*Cut in speed*) sampai dengan 11 m/s (*rating* turbin angin).

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Studi Literatur

Penulis mempelajari mengenai berbagai skema kontrol *back to back voltage source inverter* dari jurnal IEEE, beberapa buku literatur dan tugas akhir tentang elektronika daya dan mesin listrik.

2. Pengumpulan Data

Setelah dilakukan studi literatur, maka penulis melakukan pengumpulan data tentang parameter-parameter dan spesifikasi pada generator induksi seperti resistansi stator (R_s), Induktansi stator (L_s), resistansi rotor (R_r), Induktansi rotor (L_r) dan Induktansi magnetasi (L_m) serta parameter spesifikasi turbin angin yang akan digunakan.

3. Penentuan dan Simulasi Skema Kontrol Konverter I

Pada bagian ini akan dilakukan penentuan skema kontrol konverter I untuk mengatur kecepatan turbin angin dan kemudian dilakukan simulasi skema kontrol konverter I.

4. Penentuan dan Simulasi Skema Kontrol Konverter II

Setelah menentukan skema kontrol konverter maka dilakukan perancangan skema kontrol konverter II untuk mengatur tegangan dc link.

5. Simulasi total skema kontrol

Setelah melakukan penentuan skema kontrol konverter I dan II penulis melakukan simulasi total sistem *back to back voltage source inverter*.

6. Analisis Data

Setelah menyelesaikan simulasi maka nantinya akan didapat hasil yang akan dianalisis. Data yang akan dianalisis adalah daya yang dihasilkan turbin angin, tegangan dan frekuensi generator induksi serta tegangan DC link dan arus pada konverter sisi grid dengan operasi *steady state* dan dinamik pada turbin angin.

7. Penulisan Buku Tugas Akhir

Setelah menyelesaikan simulasi kontrol *back to back voltage source inverter* maka akan dilakukan penulisan buku tugas

akhir sebagai kesimpulan dari metodologi penelitian yang dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian yang dijelaskan sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi tugas akhir ini.

BAB 2 *Variable Speed Wind Energy Conversion System Berbasis SEIG*

Bab ini membahas mengenai dasar teori dari penelitian seperti turbin angin, *self excited induction generator*, kontrol volt/hertz konstan, serta metode *current controlled voltage source inverter*.

BAB 3 *Back To Back VSI Untuk Wind Energy Conversion System Berbasis SEIG*

Bab ini membahas mengenai pemodelan sistem *back to back VSI* untuk aplikasi turbin angin dengan sistem *grid connected* seperti model turbin angin, model generator induksi dan kontrol *back to back VSI* yang terdiri dari *grid side converter* dan *machine side converter*.

BAB 4 Simulasi dan Analisis

Bab ini berisikan hasil simulasi dan analisis sistem turbin angin pada operasi *steady state* atau kecepatan angin konstan dan dinamik atau kecepatan angin berubah.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi untuk mendesain *back to back voltage source inverter* sebagai kontrol sistem turbin angin menggunakan *self excited induction generator*.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil tugas akhir yang berhubungan dengan *back to back voltage source inverter*.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa yang ingin melakukan penelitian pada bidang pengaturan kecepatan mesin listrik (*variabel speed drive*).

BAB 2

VARIABLE SPEED WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM BERBASIS SEIG

2.1 Turbin Angin/Wind Turbine

Energi angin adalah energi terbarukan yang saat ini sangat berkembang. Prinsip kerja dari turbin angin adalah mengubah gerak linier menjadi gerakan rotasi dan kemudian gerakan rotasi tersebut diubah menjadi energi listrik dengan generator. Energi kinetik yang dihasilkan oleh turbin sesuai dengan persamaan:

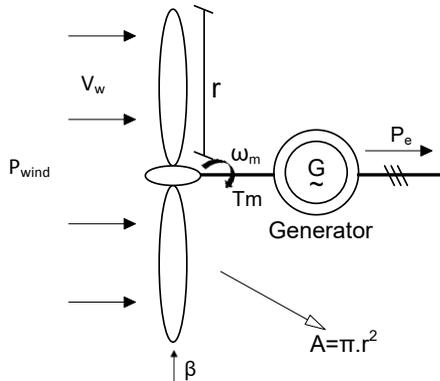
$$E_k = \frac{1}{2}mv_w^2 = \frac{1}{2}\rho Arv_w^2 \quad (2.1)$$

Daya turbin angin dirumuskan:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av_w^3 \quad (2.2)$$

Dimana: ρ adalah masa jenis udara (1.225 kg/m^3)
 A adalah luas turbin (m^2),
 r adalah jari-jari turbin
 v_w adalah kecepatan angin (m/s).

Prinsip dasar turbin angin diilustrasikan pada gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1 Perubahan daya pada turbin angin

Besar daya mekanik (P_m) yang dihasilkan turbin angin tergantung pada koefisien daya/power coefficient (C_p). C_p adalah

perbandingan antara daya aktual yang dihasilkan dari turbin angin dengan daya energi angin. C_p menggambarkan efisiensi dari turbin angin yang nilainya berbeda pada setiap turbin angin [3]. Berikut adalah persamaan dari C_p :

$$P_m = P_w C_p(\lambda, \beta) = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.3)$$

Dimana $C_p(\lambda, \beta)$ adalah fungsi koefisien daya, λ adalah *tip speed ratio* (TSR), dan β adalah *pitch angle*.

Fungsi koefisien daya, $C_p(\lambda, \beta)$ tergantung pada dua faktor yaitu *Tip Speed Ratio* (TSR) λ dan *pitch angle* β . Koefisien daya dirumuskan [3]:

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.4)$$

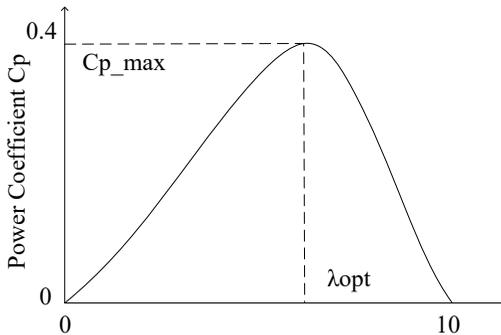
Dimana c_1 - c_6 adalah konstanta mesin pada turbin angin.

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_m}{P_w} = \frac{P_m}{2A v_w^3} \quad (2.5)$$

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara putaran linier dari rotor turbin dengan kecepatan angin. Berikut adalah persamaan matematis dari TSR:

$$\lambda = \frac{r\omega}{v_w} \quad (2.6)$$

Pitch angle β merupakan sudut *blade* pada turbin angin terhadap sumbu longitudinalnya. Gambar 2.2 berikut menunjukkan kurva koefisien daya pada *fixed pitch angle* $\beta = 0^\circ$. Dari gambar berikut dapat diketahui bahwa terdapat titik optimal koefisien daya (C_{p_max}) yaitu saat TSR-nya bernilai optimal (λ_{opt}). C_{p_max} ini merepresentasikan efisiensi dari turbin angin terhadap daya mekanik yang dibangkitkannya [4].



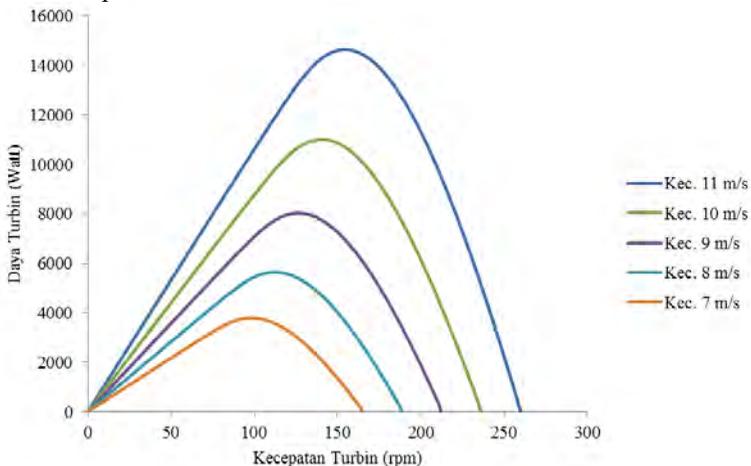
Gambar 2.2 Koefisien daya sebagai fungsi dari TSR

Turbin angin juga memiliki kurva karakteristik daya yang bergantung pada kecepatan angin dan *pitch angle*. Pada nilai *pitch angle* yang tetap (*fixed pitch*), pada gambar 2.3 berikut adalah kurva karakteristik daya turbin angin terhadap putaran rotornya. Besar torsi yang dihasilkan dari turbin angin adalah sebesar [3]:

$$T_m = P_m \frac{r}{G\lambda v_w} \quad (2.7)$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (2.8)$$

Dimana r adalah jari-jari rotor turbin dan G adalah rasio *gear*. Pada turbin angin yang menggunakan sistem *gearless* atau *direct driven* maka tidak terdapat variabel G .

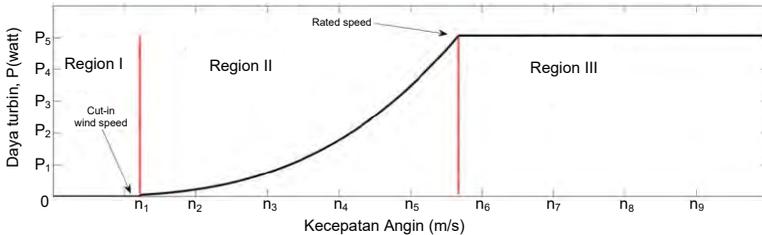


Gambar 2.3 Karakteristik daya terhadap putaran rotor turbin

Hubungan antar daya dan kecepatan angin sangat penting untuk kontrol *maximum power point tracking* pada turbin angin. Kurva diatas menunjukkan karakteristik daya yang dapat dihasilkan oleh turbin angin pada kecepatan angin yang berbeda - beda.

Pada gambar 2.4 berikut ditunjukkan bahwa terdapat tiga daerah kerja turbin angin berdasarkan kinerja dari *pitch angle*-nya. Daerah pertama yaitu disebut *standstill region*. Pada daerah ini, rotor dari turbin angin ter-blok sehingga tak dapat berputar. Hal ini disebabkan kecepatan angin yang mengenai turbin angin masih sangat rendah dan di bawah *cut-in wind speed*. Daerah kedua yaitu *normal*

operation region. Pada daerah ini turbin mulai berputar saat kecepatan angin lebih dari *cut-in wind speed* dan akan terus berputar sampai daya ratingnya. Idealnya, turbin harus berputar pada C_{p_max} untuk mendapatkan daya maksimumnya. Oleh karena itu, pada daerah inilah MPPT bekerja untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan turbin. Daerah ketiga yaitu *pitched operation region*, pada daerah ini kecepatan angin terlalu besar sehingga kecepatan putar turbin perlu dibatasi dengan menggunakan pengaturan *pitch angle* [3].



Gambar 2.4 Tiga daerah operasi turbin angin

2.1.1 Jenis-Jenis Turbin Angin

2.1.1.1 VAWT dan HAWT

Secara umum turbin angin terdiri dari dua jenis yaitu seperti dibawah ini [4]:

1) *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)

VAWT berputar pada sumbu yang tegak lurus dengan permukaan bumi terlihat seperti gambar 2.5 (b). Turbin angin terpasang secara vertikal dengan posisi generator berada di bawah.

Kelebihan:

- Ketinggian instalasi yang rendah dibandingkan dengan HAWT.
- Perbaikan lebih mudah karena posisi generator dan *gear box* di dasar.
- Operasinya tidak bergantung pada arah angin.

Kekurangan:

- Efisiensi konversi energi angin rendah, sekitar 50% dari efisiensi HAWT.
- Terdapat batas kecepatan putaran saat kondisi angin kencang.
- Fluktuasi torsi sangat tinggi.
- Tidak dapat *self-starting*.

2) Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

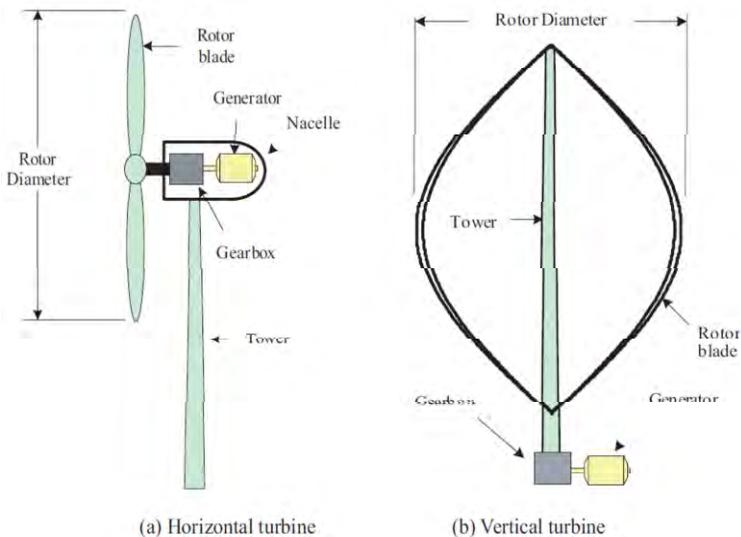
HAWT berputar pada sumbu yang sejajar dengan permukaan bumi terlihat seperti gambar 2.5 (a). Turbin angin terpasang horizontal dengan posisi generator berada satu poros dengan turbin.

Kelebihan:

- Ketinggian instalasi yang rendah dibandingkan dengan HAWT.
- Perbaikan lebih mudah karena posisi generator dan *gear box* di dasar.
- Operasinya tidak bergantung pada arah angin.

Kekurangan:

- Efisiensi konversi energi angin rendah, sekitar 50% dari efisiensi HAWT
- Terdapat batas kecepatan putaran saat kondisi angin kencang
- Fluktuasi torsi sangat tinggi
- Tidak dapat *self-starting*

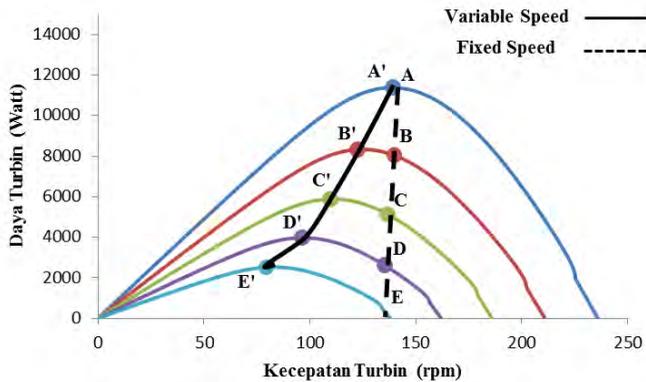


Gambar 2.5 (a) HAWT dan (b) VAWT

2.1.1.2 *Fixed Speed* dan *Variable Speed*

Berdasarkan putaran rotor, turbin angin diklasifikasikan menjadi *fixed speed* dan *variable speed*.

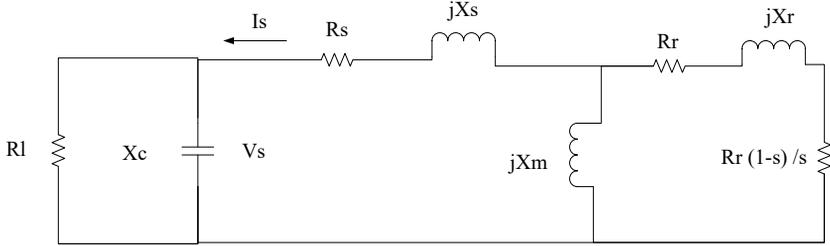
- 1) Sistem turbin angin dengan fixed speed
 Kecepatan rotor turbin angin fixed speed berputar pada putaran yang tetap dan bergantung pada kecepatan angin. Efisiensi konversi daya maksimum hanya bisa didapat pada satu nilai tertentu di setiap kecepatan angin. Sedangkan pada titik nilai operasi yang lain daya akan turun tidak berada pada titik maksimumnya.
- 2) Sistem turbin angin dengan *variable speed*
 Pada sistem ini, turbin angin tidak langsung terhubung ke jaringan listrik, namun dibutuhkan konverter daya yang ditempatkan antara generator dan jaringan untuk sebagai alat pengontrolnya. Turbin angin dapat berputar pada kecepatan yang bervariasi dan memiliki rentang nilai kecepatan angin yang besar. Pada *variable speed* turbin angin selalu berputar dengan kecepatan rotor pada saat turbin menghasilkan daya maksimum pada setiap kecepatan angin. Oleh karena itu, dibutuhkan teknik pengaturan untuk menghasilkan efisiensi aerodinamis tinggi yang menandakan sistem akan bekerja pada titik daya maksimumnya. Keuntungan dari sistem *variable speed* adalah rentang nilai kecepatan angin yang besar, kualitas daya yang tinggi, dan mengurangi stress mekanik. Sedangkan kekurangannya adalah dibutuhkannya peralatan tambahan berupa konverter daya yang akan menambah biaya, serta butuh algoritma untuk mengatur efisiensi maksimum [5].



Gambar 2.6 Kurva operasi *fixed speed* dan *variable speed*

2.2 Self Excited Induction Generator

Generator induksi penguatan sendiri adalah generator induksi yang menggunakan kapasitor yang di paralelkan di sisi stator generator tersebut. Berikut adalah rangkaian *steady state* generator induksi penguatan sendiri [6]:



Gambar 2.7 Rangkaian *steady state* generator induksi penguatan sendiri

Pada bagian stator, rotor dan magnetisasi direpresentasikan:

$$Y_s = Re(Y_s) + Im(Y_s) \quad (2.9)$$

$$Y_r = \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (wX_r)^2} - j \frac{wX_r}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (wX_r)^2} \quad (2.10)$$

$$Y_m = -j \frac{1}{X_m} \quad (2.11)$$

$$Re(Y_s) + \frac{\frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (wX_r)^2} = 0 \quad (2.12)$$

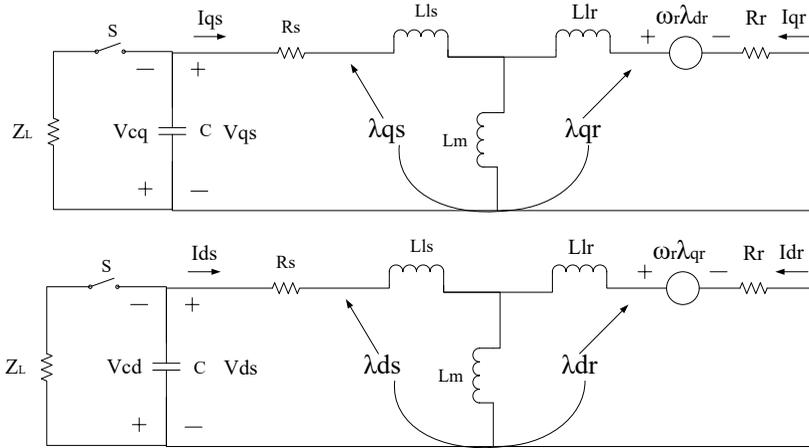
$$Im(Y_s) + \frac{wX_r}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + (wX_r)^2} + \frac{1}{wX_m} = 0 \quad (2.13)$$

$$Y_s = (Z_l + Z_s)^{-1} \quad (2.14)$$

$$Z_l = \frac{1}{\frac{1}{R_l} + jwC} \quad (2.15)$$

$$Z_s = R_s + jwX_s \quad (2.16)$$

Sedangkan rangkaian generator induksi dalam dq model adalah sebagai berikut:



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen generator induksi penguatan sendiri dalam dq model

Persamaan tegangan pada generator induksi penguatan sendiri pada kondisi tanpa beban adalah sebagai berikut [7]:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s + \frac{1}{pC} & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s + \frac{1}{pC} & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & R_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.18)$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (2.19)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{qr} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$B = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} L_m K_q - L_r V_{cq} \\ L_m K_q - L_r V_{cd} \\ L_m V_{cq} - L_s K_q \\ L_m V_{cd} - L_s K_d \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$A = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -L_r R_s & L_m^2 \omega_r & L_m R_r & -L_m \omega_r L_r \\ L_m^2 \omega_r & -L_s R_s & L_m L \omega_r L_r & L_m R_r \\ L_m R_s & L_s \omega_r L_m & -L_s R_r & L_s \omega_r L_r \\ -L_s \omega_r L_m & L_m R_s & -L_s \omega_r L_r & -L_s R_r \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$pI = AI + B \quad (2.23)$$

$$L = L_s L_r + L_m^2 \quad (2.24)$$

$$V_{cq} = \frac{1}{c} \int I_{qs} dt + V_{cqo} \quad (2.25)$$

$$V_{cd} = \frac{1}{c} \int I_{ds} dt + V_{cdo} \quad (2.26)$$

Dimana:

K_d = Tegangan awal terinduksi pada sumbu d

K_q = Tegangan awal terinduksi pada sumbu q

V_{cdo} = Tegangan awal pada kapasitor pada sumbu d

V_{cqo} = Tegangan awal pada kapasitor pada sumbu q

ω_r = Kecepatan putar rotor

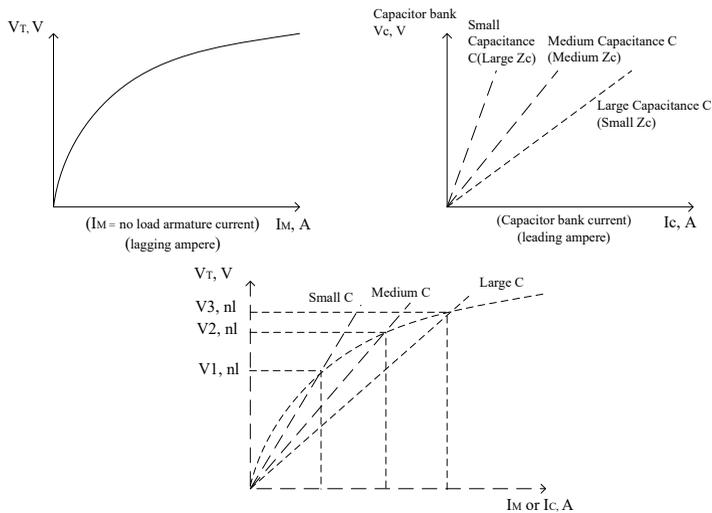
L_{ls} = Induktansi *leakage* pada stator

L_{lr} = Induktansi *leakage* pada rotor

L_m = Induktansi Mangetisasi

λ = *flux linkage*

Arus eksitasi generator induksi penguatan sendiri berasal dari kapasitor yang dirangkai paralel dengan stator mesin. Kapasitor berfungsi memberikan daya reaktif pada generator. Ketika generator diputar oleh *prime mover* sampai kecepatan putar rotor berada diatas kecepatan putar rating mesin induksi pada stator, maka akan timbul tegangan, namun tegangan yang timbul nilainya relatif kecil [8]. Oleh karena itu, pada saat itu fungsi dari kapasitor dibutuhkan sebagai sumber daya reaktif. Hubungan antara tegangan generator dan kapasitor ditunjukkan pada gambar Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Kurva magnetisasi *self excited induction generator*

Pada gambar 2.9 diatas dijelaskan mula-mula generator induksi tanpa beban diputar oleh prime mover dengan kondisi memiliki magnet sisa pada rotornya, sehingga akan muncul tegangan pada sisi stator. Tegangan tersebut akan *charge* kapasitor yang terpasang paralel pada sisi statornya. Pada saat kapasitor sudah terisi maka kapasitor akan mengalirkan arus yang selanjutnya arus kapasitor tersebut menginduksi rotor sehingga menghasilkan tegangan yang lebih besar pada generator. Proses tersebut berlangsung sampai nilai eksitasi generator telah mencapai nilai *steady state* atau sudah berada pada kondisi saturasi mesin induksi tersebut.

2.3 *Current Controlled Voltage Source Inverter (CC-VSI) dengan average model*

Pada penelitian tugas akhir ini pensaklaran *current controlled voltage source inverter* menggunakan *average model*. Pada *average model* Agar arus keluaran *voltage source inverter* dapat diatur sesuai dengan tegangan dan frekuensi sistem maka digunakan metode *current controlled voltage source inverter*. Agar *voltage source inverter* menghasilkan sinyal sinusoidal dengan beda fasa 120° , maka sinyal arus

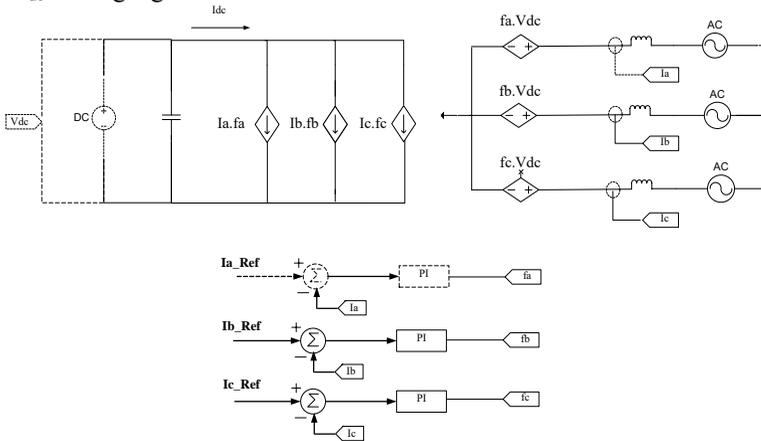
sinusoidal referensi harus mempunyai beda fasa 120° . Arus referensi akan dijumlahkan dengan arus aktual keluaran *voltage source inverter* dan berupa sinyal *error* yang kemudian menjadi masukan dari PI *controller*. Sinyal keluaran dari PI akan berupa sinyal sinusoidal yang akan dikonversi menjadi sinyal arus dc dan tegangan keluaran dari *voltage source inverter* seperti ditunjukkan pada gambar 2.10. Nilai tegangan keluaran dari *voltage source inverter* harus kurang dari nilai tegangan dc link seperti ditunjukkan persamaan berikut ini:

$$V_{ab} = m_a \times \sqrt{3} \times \frac{V_{dc}}{2} \quad 0 < m_a \leq 1 \quad (2.27)$$

V_{ab} : Tegangan keluaran *line to line* inverter

m_a : indeks modulasi

V_{dc} : Tegangan masukan inverter



Gambar 2.10 Diagram blok kontrol *current controlled voltage source inverter* menggunakan *average model*.

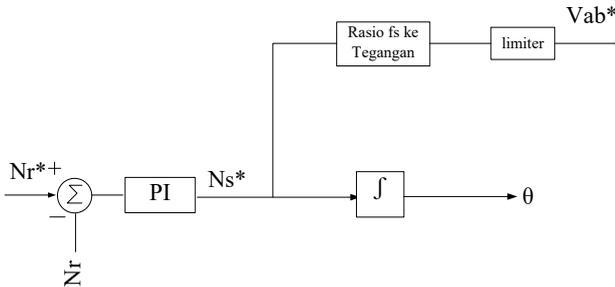
$$\begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_m \cos(\omega t) \\ f_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ f_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} \times V_{dc} \quad (2.29)$$

$$I_{dc} = [f_{ab} \quad f_{bc} \quad f_{ca}]x \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.4 Volt/Hertz Constant Control

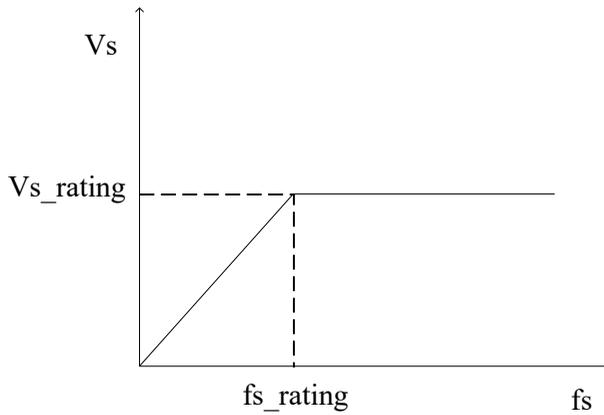
Pengaturan kecepatan motor induksi sangat dibutuhkan dalam dunia industri. Salah satu jenis kontrol yang digunakan untuk mengontrol kecepatan mesin induksi atau yang biasanya disebut dengan *variable speed drive (VSD)*. Pada *variable speed drive* metode yang digunakan untuk mengontrol kecepatan mesin induksi adalah kontrol volt/hertz. Prinsip kerja dari kontrol volt/hertz konstan adalah dengan membandingkan kecepatan putar referensi dengan aktual yang kemudian nilai *error*-nya akan diproses dengan kontroler PI. Hasil keluaran dari kontroler PI adalah frekuensi referensi yang kemudian akan digunakan untuk tegangan mesin referensi. Skema kontrol volt/hertz konstan seperti ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Skema kontrol *Volt/Hertz* konstan

Dari skema kontrol pada gambar 2.11 terlihat bahwa tegangan mesin induksi berbanding lurus dengan frekuensi. Pada saat kecepatan putar rotor referensi naik maka frekuensi stator naik maka tegangan mesin induksi juga akan naik dan sebaliknya. Akan tetapi pada gambar 2.11 terdapat sebuah limiter yang berfungsi untuk membatasi tegangan referensi dari mesin induksi. Tegangan maksimum dari mesin induksi adalah tegangan *rating* dari mesin induksi tersebut. Kurva frekuensi terhadap tegangan generator adalah seperti gambar 2.12. Metode pengaturan tegangan pada mesin induksi adalah dengan mengatur arus

keluaran dari mesin induksi itu sendiri, sehingga keluaran dari kontrol volt/hertz konstan adalah arus referensi.



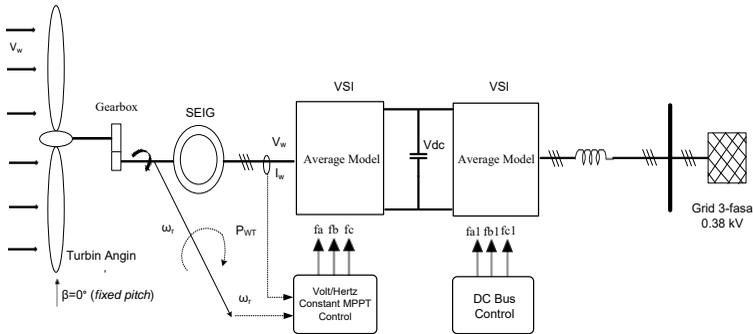
Gambar 2.12 Kurva perbandingan tegangan terhadap frekuensi mesin induksi.

BAB 3

BACK TO BACK VSI UNTUK WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM BERBASIS SEIG

3.1 Konfigurasi Sistem *Back To Back Voltage Source Inverter Untuk Kontrol Self Excited Induction Generator*

Sistem *back to back voltage source inverter* terdiri dari beberapa bagian yaitu turbin angin untuk menghasilkan daya mekanis, gearbox untuk menaikkan kecepatan agar sesuai dengan *rating* generator, SEIG untuk mengubah daya mekanis ke elektrik, konverter sisi mesin dengan kontrol volt/hertz konstan pengontrol kecepatan turbin agar menghasilkan daya maksimum pada setiap kecepatan angin, konverter sisi grid pengontrol tegangan DC link dan Impedansi L yang menghubungkan ke jala – jala. Pada sistem *back to back voltage source inverter* energi listrik yang dihasilkan turbin angin akan langsung disalurkan ke jala – jala tegangan rendah (*grid connected*). Berikut adalah skema diagram *back to back voltage source inverter*:



Gambar 3.1 Skema sistem *back to back voltage source inverter* untuk kontrol *self excited induction generator*.

3.2 Parameter *Wind Turbine (WT)*

Turbin angin yang digunakan pada penelitian ini menggunakan jenis turbin *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)* dengan mode operasi *variable speed* dan *fixed pitch angle*.

- Kecepatan *rating generator* : 1800 rpm

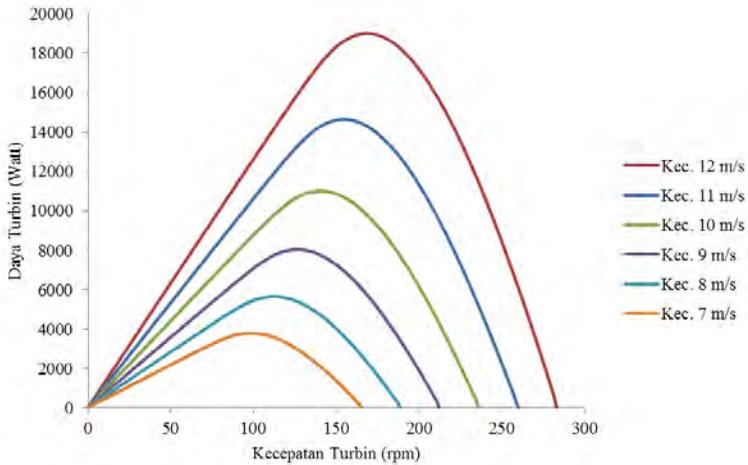
- Kecepatan *rating* turbin angin (11 m/s) : 155 rpm
- *Gearbox* : $\frac{N_1}{N_2} = \frac{1800}{155} = 11,6129$ (3.1)

Turbin angin yang digunakan adalah *Kingspan* berdaya *rating* 15 kW pada kecepatan angin 11 m/s. *Datasheet* dari turbin angin *Kingspan* ditunjukkan pada tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Parameter Turbin Angin *Kingspan*

Parameter	Nilai
Daya	15 kw
Daya maksimum	15,7 kw
<i>Power Coefficient</i> (Cp)	0,244
<i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	4,8
Kecepatan angin <i>Cut-In</i>	3,5 m/ s
Kecepatan angin <i>Rated</i>	11 m/ s
Kecepatan angin <i>Cut-Out</i>	Continuous Operation
<i>Survival Wind Speed</i>	70 m/ s
<i>Blade Pitch Control</i>	<i>None, Fixed Pitch</i>
Jari-jari turbin	4,9 m
Kecepatan rotor	155 rpm
Jumlah <i>blade</i>	3
Tes Uji Standar	
Massa jenis udara (ρ)	1,225 kg/m ³
Suhu	25°C

Pengujian turbin angin dilakukan dengan mengubah besar torsi atau beban pada turbin angin. Pada nilai kecepatan angin tertentu, besar nilai torsi yang diberikan kepada turbin angin diubah-ubah mulai dari nilai minimum (T_{\min}) sampai nilai maksimum (T_{\max}) untuk membentuk kurva karakteristik daya turbin angin terhadap putaran turbin angin.



Gambar 3.2 Kurva karakteristik daya elektrik WT terhadap putaran turbin angin

Gambar 3.2 di atas menunjukkan hubungan kecepatan dengan daya pada perubahan nilai kecepatan angin pada turbin angin. Pada tiap-tiap kecepatan angin, turbin angin memiliki titik kerja optimal atau daya maksimum yang disebut dengan *maximum power point* (MPP). Berikut adalah tabel referensi daya berdasar pada gambar 3.2 di atas.

Tabel 3.2 Daya referensi turbin angin pada setiap kecepatan angin

Wind Speed (m/s)	Kecepatan Turbin (rpm)	Daya Maksimum Turbin (Watt)
3,5	49	475
4	56	708
5	70,1	1381
6	84,17	2383
7	98,24	3781
8	112,3	5640
9	126,37	8026

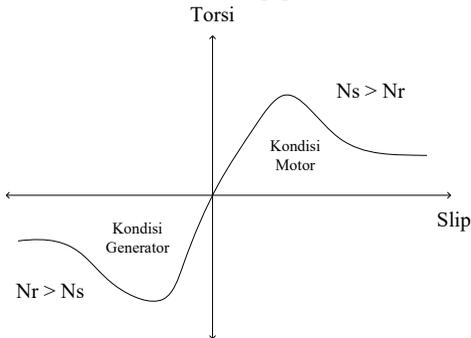
Tabel 3.2 Daya Referensi turbin pada setiap kecepatan angin

Wind Speed (m/s)	Kecepatan Turbin (rpm)	Daya Maksimum Turbin (Watt)
10	140,44	11005
11	154,5	14639
12	168,6	19005

Nilai diatas kecepatan putar generator diatas akan menjadi masukan pada kontrol volt/hertz konstan agar turbin selalu menghasilkan daya maksimum pada setiap kecepatan angin.

3.3 Parameter Generator Induksi

Mesin induksi dapat berfungsi sebagai motor induksi dan juga generator induksi. Operasi sebagai generator induksi dapat dicapai apabila nilai slip dari generator tersebut bernilai negatif. Mesin induksi memiliki kurva karakteristik torsi terhadap slip yang diplot berdasarkan persamaan torsi maksimal[3].



Gambar 3.3 Kurva karakteristik mesin induksi

Dari kurva diatas didapatkan bahwa dapat beroperasi dalam beberapa kondisi, yaitu:

- Sebagai motor, jika $0 \leq s \leq 1$
- Sebagai generator, jika $s < 0$
- Mode pengereman, jika $s > 1$

Untuk mengoperasikan mesin induksi sebagai generator induksi, maka harus diatur agar nilai dari kecepatan putar rotor (N_r) selalu lebih besar dari kecepatan putar stator (N_s), sehingga daya aktif

dialirkan dari generator menuju ke jaringan listrik. Berikut adalah parameter dari mesin induksi yang digunakan.

Tabel 3.3 Parameter Generator Induksi

Parameter	Nilai
Jumlah pasang kutub	4
Daya	18,65 kW
Resistansi stator (R_s)	0,641 ohm
Reaktansi stator (L_s)	2,935 mH
Resistansi rotor (R_r)	0,332 ohm
Reaktansi rotor (L_r)	1,231 mH
Reaktansi Magnetisasi (L_m)	69,798 mH
Inersia	0,2 kg.m ²
Tegangan operasi	460 Volt
Frekuensi	60 Hz

Generator yang digunakan pada tugas akhir ini adalah generator induksi penguatan sendiri. Sistem pada tugas akhir ini adalah *grid connected*, sehingga generator induksi tidak membutuhkan kapasitor untuk eksitasi dan sumber eksitasi generator induksi berasal langsung dari jaringan listrik.

3.4 Back to Back VSI

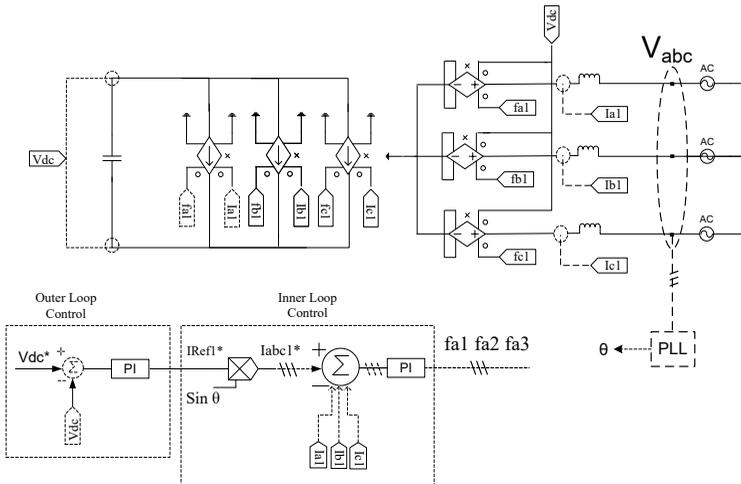
3.4.1 Kontrol Grid Side Converter

Grid side converter digunakan untuk mengontrol tegangan dc link agar tetap konstan sesuai dengan referensi. Alat yang digunakan untuk mengontrol dc link pada penelitian ini menggunakan *voltage source inverter* (VSI). VSI tiga fasa mempunyai enam buah saklar, dimana saklar tersebut akan diaktifkan dengan metode tertentu agar sinyal keluaran sesuai dengan yang diinginkan. Pengaturan pensaklaran inverter yang terhubung jaringan listrik pada penelitian ini menggunakan metode *current control decoupled strategy* [10] yang dimodelkan dalam *average model*. Pada *grid side converter* terdapat dua buah kontrol loop yaitu *outer loop* dan *inner loop*. *Outer loop*

digunakan untuk mengatur tegangan dc pada dc-link agar selalu bernilai konstan pada tegangan referensi tertentu. Sedangkan *inner loop* digunakan untuk mengontrol besar arus yang akan disalurkan ke jaringan. Pada *inner loop*, sinyal input berupa arus inverter yang kemudian dibandingkan dengan arus referensi dengan metode *current control*[1]. Skema kontrol dari *grid side converter* dijelaskan pada gambar 3.4. Untuk mendapatkan sistem yang stabil nilai indeks modulasi pada *voltage source inverter* harus berada pada interval $0 \leq m_a \leq 1$. Oleh karena itu pada penelitian ini dipilih indeks modulasi dengan nilai 0,5485. Dengan nilai indeks modulasi tersebut maka didapatkan nilai tegangan dc sebagai berikut:

- Modulasi amplitudo, $m_a = \frac{2xV_{LL}}{\sqrt{3xV_{dc}}}$ (3.2)

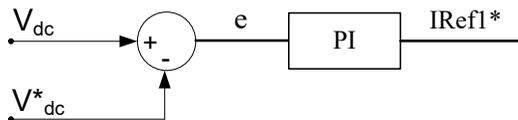
$$V_{dc} = \frac{2x380}{\sqrt{3x0,5485}} = 800 \text{ Volt}$$
- Kapasitor DC-link, $C_{DC} = 2,2 \text{ mF}$



Gambar 3.4 Rangkaian kontrol *voltage source inverter* (VSI) tiga fasa *grid side converter*

a) *Outer Loop Control* (Kontrol Tegangan DC)

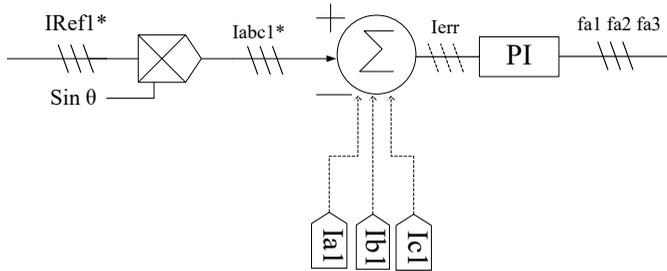
Outer Loop Control adalah regulator tegangan atau *voltage regulator* yang digunakan untuk menjaga sistem tegangan pada DC-link tetap konstan. Pada penelitian ini dipilih sistem tegangan dc-link tetap pada 800 V. Prinsip kerja dari *outer loop control* adalah dengan mengatur komponen arus aktif yang akan disalurkan ke grid. Misal ketika tegangan dc-link terlalu rendah, maka arus aktif yang disalurkan menuju grid akan dikurangi untuk menambah arus *charging* pada kapasitor dc-link agar tegangan kapasitor dc-link menjadi tetap konstan. Regulator tegangan dc-link ini menggunakan kontroler *Proportional Integral* (PI) seperti ditunjukkan pada blok diagram berikut:



Gambar 3.5 Regulator tegangan DC-link

b) *Inner Loop Control* (Kontrol Arus Jaringan)

Inner Loop Control adalah regulator arus atau *current regulator* yang digunakan untuk memperbaiki sinyal *error* berupa arus yang akan disuplai ke jaringan. Arus referensi didapatkan dari keluaran *outer loop control* yang kemudian akan dikalikan dengan sinusoidal 3 fasa yang berbeda 120°, dimana θ atau sudut sinyal sinusoidal adalah sudut fasa dari jaringan listrik. Arus referensi tersebut akan dijumlahkan dengan arus aktual dari jaringan yang kemudian *errornya* akan diproses menggunakan kontroler *Proportional Integral* (PI). Skema dari *inner loop control* adalah sebagai berikut:



Gambar 3.6 Skema *current inner loop control grid side converter*

3.4.2 Kontrol *Machine Side Converter*

Machine side converter digunakan untuk mengontrol kecepatan putar generator yang disambungkan dengan turbin angin agar turbin angin selalu menghasilkan daya maksimum pada setiap kecepatan angin. Alat yang digunakan untuk mengontrol kecepatan putar generator pada tugas akhir ini menggunakan *voltage source inverter* tiga fasa yang juga dimodelkan dalam *average model*. Metode yang digunakan untuk mengontrol kecepatan putar generator adalah menggunakan metode kontrol *volt/hertz* konstan yang dijelaskan pada bab sebelumnya atau pada gambar 2.11. Pada metode ini pengontrolan kecepatan generator dilakukan dengan cara mengontrol tegangan dan arus pada generator induksi. Pada kontrol pada konverter sisi mesin juga terdiri dari dua kontrol yaitu *outer loop control* untuk mengontrol kecepatan dan tegangan generator induksi serta *inner loop control* yang digunakan untuk mengontrol arus pada generator. Untuk mendapatkan sistem yang stabil, maka indeks modulasi dari sistem harus berada pada interval $0 \leq m_a \leq 1$. Oleh karena itu dengan tegangan dc link 800 Volt yang didapat dari konverter sisi grid maka nilai indeks modulasi dapat dihitung sebagai berikut:

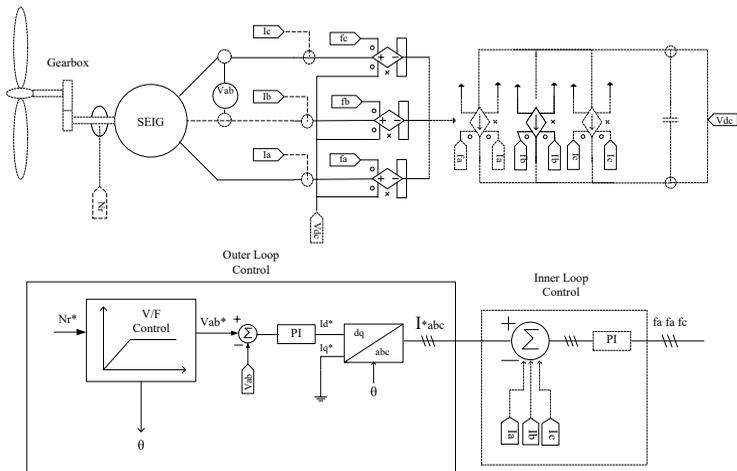
- Tegangan dc-link referensi, $V_{dc} = 800 \text{ V}$
 - Tegangan maksimum mesin $= 460 \text{ V}$
 - Modulasi maksimum amplitudo, $m_a = \frac{2xV_{LL}}{\sqrt{3}xV_{dc}}$
- $$m_a = \frac{2x460}{\sqrt{3}x800} = 0.664$$

Dalam kontrol volt/hertz konstan dibutuhkan nilai konversi dari frekuensi ke tegangan generator induksi. Nilai konversi tersebut dapat dihitung dengan menggunakan tegangan dan frekuensi *rating* generator sebagai berikut:

- Tegangan rating generator : 460 Volt
- Frekuensi generator : 60 Hz (1800 rpm)
- Konstanta volt/hertz konstan adalah:

$$c = \frac{460}{60} = 7,67$$

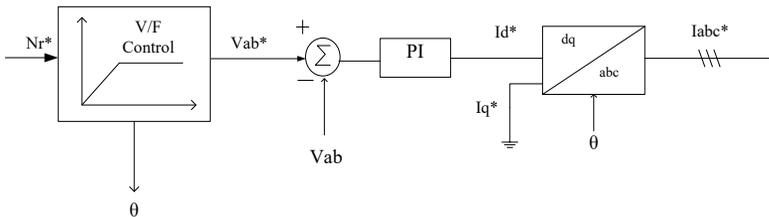
Dari persamaan diatas terlihat bahwa apabila frekuensi generator adalah 60 Hz maka tegangan keluaran pada generator adalah 460 Volt dan apabila frekuensi generator lebih dari 60 Hz maka tegangan generator maksimum akan tetap 460 Volt, karena tegangan keluaran generator dibatasi oleh *limiter*.



Gambar 3.7 Skema kontrol *voltage source inverter (VSI) tiga machine side converter*

a) *Outer Loop Control* (Kontrol Kecepatan Rotor)

Outer Loop Control adalah kontrol kecepatan putar generator agar sesuai dengan yang kita inginkan dengan menggunakan kontrol volt/hertz konstan. Nilai dari kecepatan putar generator referensi didapatkan dari pengujian turbin angin pada saat turbin angin mencapai daya maksimum (*maximum power point*). Pada kontrol volt/hertz konstan kecepatan generator referensi akan dibandingkan dengan kecepatan generator aktual yang kemudian akan diproses dengan kontroler PI agar nilai aktual sama dengan referensi. Keluaran dari kontroler PI akan menjadi frekuensi generator referensi yang kemudian dikonversi menjadi tegangan generator referensi. Tegangan generator referensi akan dibandingkan dengan tegangan generator aktual dan diproses oleh kontroler PI. Keluaran dari kontrol tegangan akan menjadi arus aktif referensi yang kemudian akan ditransformasikan dari sumbu dq menuju sumbu abc. Nilai keluaran dari *outer loop control* akan menjadi masukan dari *inner loop control*. Berikut adalah skema kontrol dari *outer loop control*:



Gambar 3.8 Skema *outer loop control machine side converter*

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Dimana:

I_d = Arus referensi sumbu d

I_q = Arus referensi sumbu q

I_a = Arus referensi fasa a

I_b = Arus referensi fasa b

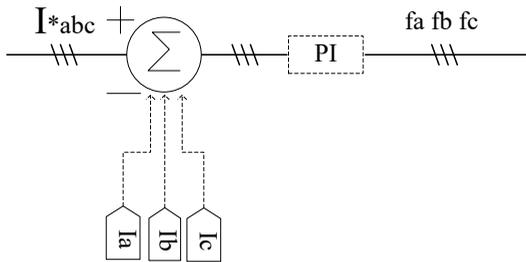
I_c = Arus referensi fasa c
 θ = sudut fasa

Nilai masukan dari kontrol volt/hertz konstan adalah kecepatan turbin generator. Oleh karena itu yang menjadi nilai kecepatan referensi adalah hasil perkalian dari nilai kecepatan turbin angin pada saat mencapai daya maksimum yang didapatkan berdasarkan pengujian karakteristik turbin angin dengan rasio *gearbox*. Berikut adalah nilai kecepatan putar rotor referensi:

Tabel 3.4 Kecepatan putar generator referensi

Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan putar generator referensi (rpm)
3,5	569,03
4	650,32
5	814,06
6	977,46
7	1140,85
8	1304,13
9	1467,52
10	1630,91
11	1794,2
12	1957,93

- b) *Inner Loop Control* (Kontrol Arus generator)
Inner loop control adalah regulator arus atau *current regulator* diperlukan untuk memperbaiki sinyal *error* berupa arus pada generator induksi. Arus referensi didapatkan dari keluaran *outer loop control*. Arus referensi tersebut akan dijumlahkan dengan arus aktual dari generator yang kemudian *errornya* akan diproses menggunakan kontroler *Proportional Integral* (PI). Keluaran dari kontroler PI berupa *switching function* yang akan menjadi masukan pada *average model*. Skema dari *inner loop control* pada konverter sisi mesin adalah sebagai berikut:



Gambar 3.9 Skema *inner loop current control machine side converter*

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini membahas hasil simulasi dan analisis data dari turbin angin yang dihubungkan dengan generator induksi dan dikontrol dengan *back to back voltage source inverter* serta terhubung pada jaringan listrik tiga fasa tegangan rendah (380 V). Turbin angin juga dikontrol agar menghasilkan daya maksimum (*maximum power point tracking*) dengan kontrol volt/hertz konstan. Berikut adalah simulasi pengujian yang dilakukan pada turbin angin:

1. Pengujian sistem turbin angin pada keadaan *steady state* atau dengan kecepatan angin yang konstan, yaitu pada kecepatan angin 3,5 m/s dan 11 m/s.
2. Pengujian sistem turbin angin pada keadaan dinamik atau dengan kecepatan angin yang berubah yaitu dari kecepatan 3,5 m/s naik menjadi 11 m/s.
3. Pengujian *back to back voltage source inverter* untuk mengatur daya reaktif (VAR) pada jaringan listrik.

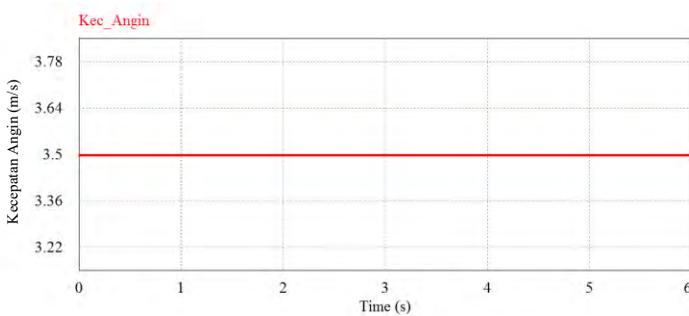
Pada simulasi ini turbin angin yang digunakan mempunyai kapasitas daya 15 kW dan generator induksi dengan kapasitas daya 18,65 kW. Nilai tegangan *rating* dari generator induksi adalah 460 Volt dengan frekuensi 60 Hz serta tegangan dc link referensi yang diatur pada simulasi adalah 800 Volt.

4.1 Operasi Steady State Turbin Angin

Kecepatan angin yang digunakan pada simulasi *steady state* adalah 3,5 m/s dan 11 m/s. Oleh karena itu nilai berdasarkan pengujian turbin angin pada bab sebelumnya kecepatan rotor referensi adalah 569,03 rpm untuk kecepatan angin 3,5 m/s dan 1794,2 rpm untuk kecepatan angin 11 m/s.

4.1.1 Operasi pada Kecepatan Angin 3,5 m/s

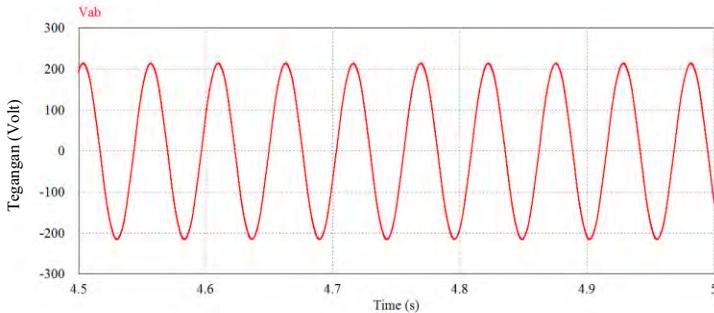
Pada simulasi ini keadaan *steady state* turbin angin, kecepatan angin yang digunakan adalah 3,5 m/s. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui kestabilan sistem turbin angin pada kondisi *steady state*.



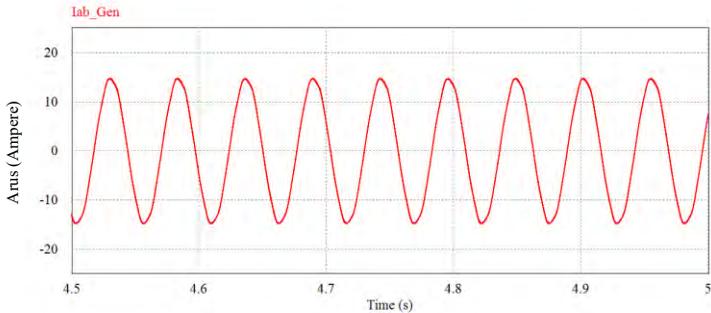
Gambar 4.1 Grafik kecepatan angin 3,5 m/s

4.1.1.1 Tegangan dan Arus Generator

Pada simulasi ini akan dilakukan analisis pengaruh kecepatan angin konstan terhadap tegangan dan arus pada generator induksi. Berikut adalah hasil tegangan dan arus pada generator induksi:



Gambar 4.2 Tegangan generator pada kecepatan angin 3,5 m/s

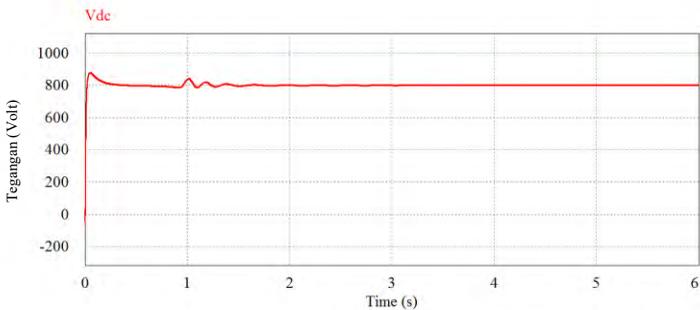


Gambar 4.3 Arus generator pada kecepatan angin 3,5 m/s

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan dan arus generator tetap konstan. Hal ini disebabkan karena nilai dari kecepatan angin juga konstan, sehingga nilai tegangan generator referensi juga konstan dan menyebabkan arus generator konstan. Besar tegangan generator adalah 151,4 Volt dan arus generator adalah 10,38 Ampere.

4.1.1.2 Tegangan DC link

Pada bab 3 dijelaskan bahwa tegangan dc link dikontrol agar tetap konstan pada setiap kecepatan angin. Berikut adalah tegangan dc link pada kecepatan angin konstan 3,5 m/s.



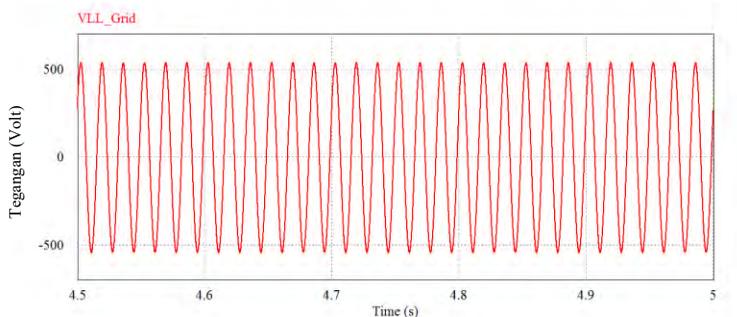
Gambar 4.4 Tegangan dc link pada kecepatan angin 3,5 m/s

Dari hasil simulasi didapatkan nilai tegangan dc mengalami *charging* dalam waktu yang sangat singkat kemudian konstan dengan

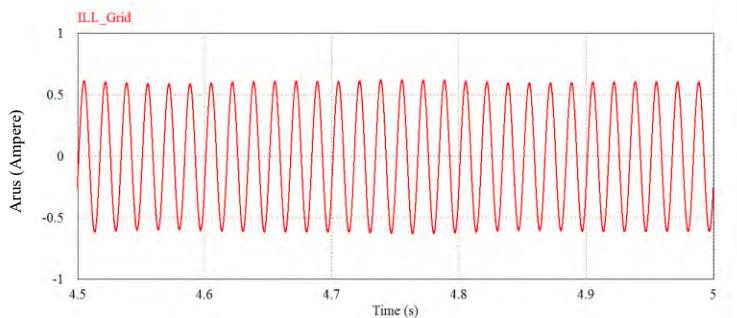
nilai 800 volt. Nilai tegangan dc link sesuai dengan tegangan dc referensi yang dikontrol melalui kontrol tegangan pada konverter sisi grid.

4.1.1.3 Tegangan dan Arus VSI Grid

Pada pengujian ini akan dilakukan analisis pengaruh kecepatan angin konstan yang rendah terhadap tegangan dan arus VSI grid.



Gambar 4.5 Tegangan VSI grid pada kecepatan angin 3,5 m/s

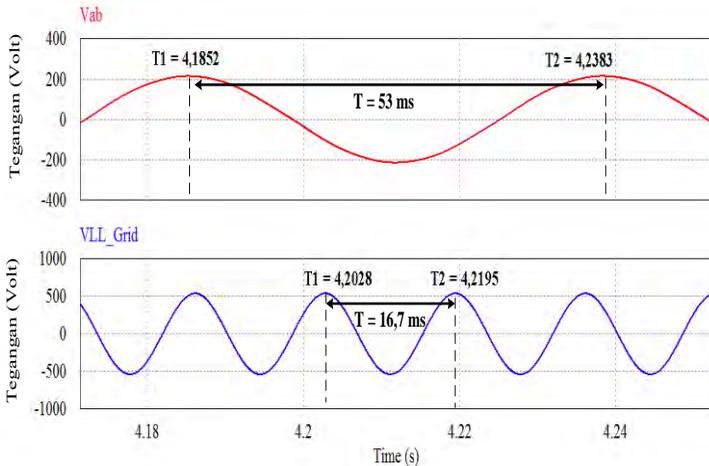


Gambar 4.6 Arus VSI grid pada kecepatan angin 3,5 m/s

Dari grafik tegangan dan arus diatas didapatkan bahwa nilai tegangan dan arus adalah konstan. Nilai tegangan VSI adalah 380, 9 Volt dan arus adalah 0,381 Ampere. Nilai tegangan VSI lebih besar dibandingkan nilai tegangan grid dikarenakan aliran arus dari VSI menuju grid.

4.1.1.4 Frekuensi Generator dan VSI grid

Pengujian dibawah ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin yang konstan terhadap frekuensi sinyal pada generator dan VSI grid.

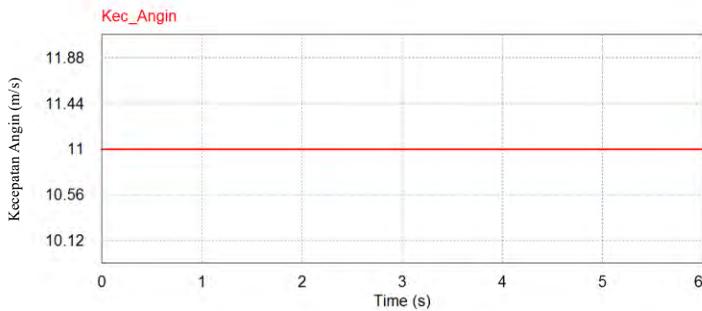


Gambar 4.7 Periode sinyal tegangan generator dan VSI grid

Dari grafik diatas didapatkan nilai periode dari generator adalah 0,053 sekon. Sehingga didapatkan nilai frekuensi dari generator adalah 18,87 Hz. Nilai frekuensi generator sangat rendah dikarenakan turbin angin beroperasi pada kecepatan angin yang rendah. Sedangkan nilai periode dari sinyal tegangan keluaran VSI adalah 0,0167 sekon. Sehingga nilai frekuensi dari VSI adalah 60 Hz. Meskipun nilai frekuensi generator rendah, nilai frekuensi VSI grid tetap dipertahankan pada 60 Hz karena terdapat sinyal referensi pada konverter sisi grid mempunyai frekuensi 60 Hz. Nilai frekuensi tersebut sama dengan nilai frekuensi dari grid.

4.1.2 Operasi pada Kecepatan Angin 11 m/s

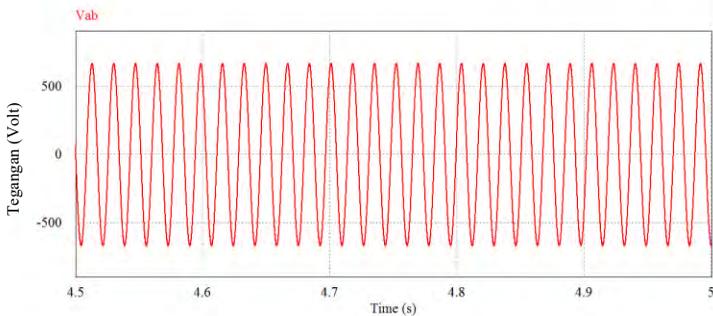
Pada simulasi kondisi *steady state* turbin angin ini digunakan kecepatan angin yaitu pada 11 m/s. tujuan dari simulasi adalah untuk membandingkan kondisi *steady state* turbin angin pada kecepatan angin yang berbeda yang disimulasikan pada pembahasan sebelumnya.



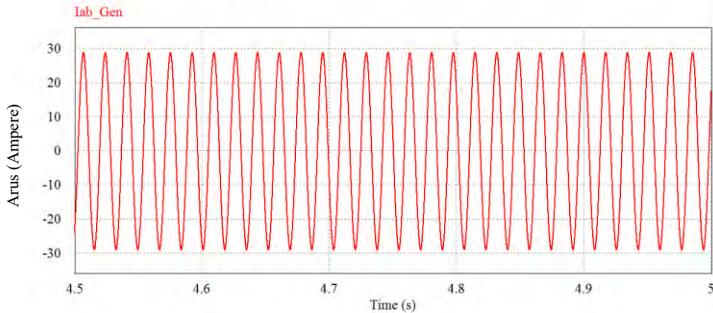
Gambar 4.8 Grafik kecepatan angin 11 m/s

4.1.2.1 Tegangan dan Arus Generator

Pada pengujian ini akan dijelaskan pengaruh kecepatan angin konstan terhadap tegangan dan arus generator induksi pada kondisi rating turbin angin yaitu 11 m/s. Berikut adalah hasil tegangan dan arus generator induksi dengan kontrol volt/hertz konstan pada konverter sisi mesin.



Gambar 4.9 Tegangan generator pada kecepatan angin 11 m/s

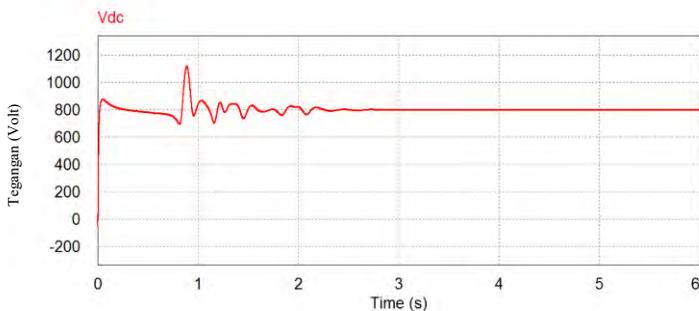


Gambar 4.10 Arus generator pada kecepatan angin 11 m/s

Nilai tegangan generator adalah 450 Volt dan arus generator 20,25 Ampere. Nilai tegangan dan arus generator konstan dikarenakan nilai dari kecepatan angin juga konstan. Nilai kecepatan angin lebih tinggi daripada sebelumnya, sehingga menyebabkan nilai tegangan generator juga lebih besar dan nilai dari arus generator juga naik dibandingkan simulasi pada kecepatan angin 3,5 m/s.

4.1.2.2 Tegangan DC link

Tegangan dc link dikontrol oleh konverter sis grid agar tetap konstan, Berikut adalah hasil tegangan dc link pada kecepatan angin konstan 11 m/s.

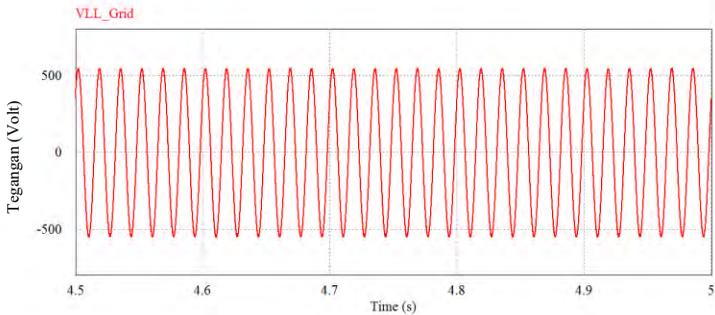


Gambar 4.11 Tegangan dc link pada kecepatan angin 11 m/s

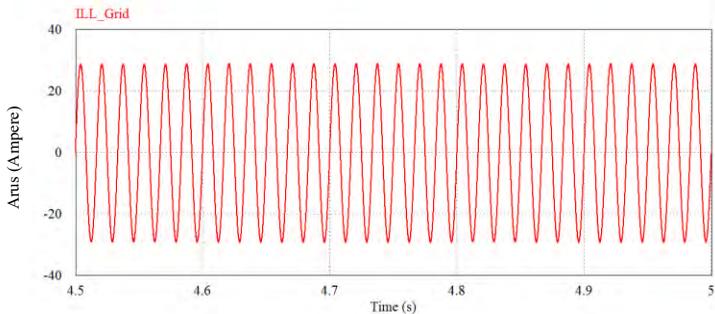
Dari gambar diatas terlihat bahwa nilai tegangan dc link dipertahankan tetap konstan 800 volt pada setiap kecepatan angin rating turbin angin. Hal ini disebabkan karena kontrol arus untuk mempertahankan dc link pada konverter sisi grid.

4.1.2.3 Tegangan dan Arus VSI Grid

Pada simulasi ini akan dijelaskan pengaruh kecepatan angin konstan terhadap tegangan dan arus pada VSI grid.



Gambar 4.12 Tegangan VSI grid pada kecepatan angin 11 m/s



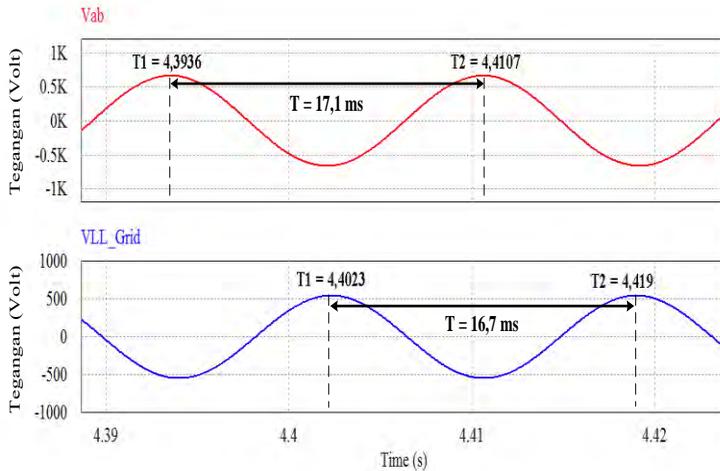
Gambar 4.13 Arus keluaran VSI grid pada kecepatan angin 11 m/s

Hasil simulasi menunjukkan tegangan dan arus keluaran VSI tetap stabil dan konstan. Nilai tegangan keluaran VSI grid adalah 388,5 Volt dan Arus VSI adalah 20,37 Ampere. Nilai tegangan dan arus keluaran VSI lebih besar pada kecepatan angin 11 m/s lebih besar dari

pada 3,5 m/s. Hal ini disebabkan karena nilai tegangan dan arus VSI grid berbanding lurus dengan kecepatan angin.

4.1.2.4 Frekuensi Generator dan VSI Grid

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin yang konstan terhadap frekuensi generator dan VSI grid.



Gambar 4.14 Waktu yang ditempuh satu gelombang penuh tegangan generator dan VSI grid

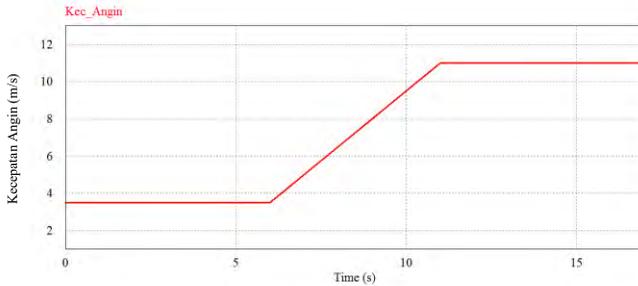
Dari grafik diatas terlihat bahwa periode dari sinyal generator adalah 0,0171 sekon. Sehingga didapatkan frekuensi dari generator adalah 58, 48 Hz. Nilai frekuensi generator pada kecepatan angin 11 m/s lebih besar dibandingkan pada kecepatan angin 3,5 m/s. Dari grafik terlihat bahwa periode dari gelombang keluaran VSI grid adalah 0,0167 sekon. Nilai frekuensi VSI grid adalah 60 Hz. Nilai frekuensi VSI grid akan selalu konstan. Hal dikarenakan kontrol frekuensi pada konverter sisi grid.

4.2 Operasi Dinamik Turbin Angin

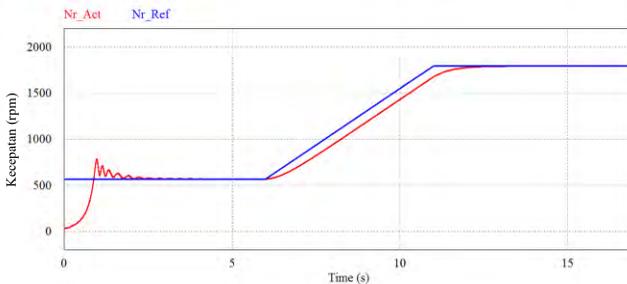
Pada operasi dinamik turbin angin kecepatan angin diatur mulai dari 3,5 m/s dan kemudian akan naik terus sampai nilai 11 m/s.

4.2.1 Daya Turbin dan Kecepatan Generator pada Operasi Dinamik

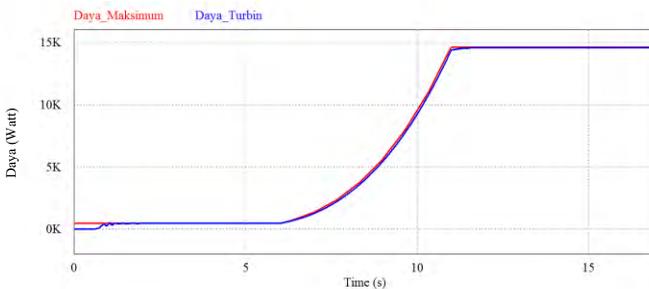
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan konverter sisi mesin dalam mengatur kecepatan generator agar turbin beroperasi pada titik maksimumnya.



Gambar 4.15 Grafik keadaan dinamik kecepatan angin



Gambar 4.16 Kecepatan rotor aktual vs referensi



Gambar 4.17 Daya aktual vs daya maksimum turbin angin

Dari gambar diatas pada kondisi dinamik kecepatan angin hubungan antara kecepatan angin dengan kecepatan rotor dan daya yang dihasilkan turbin angin. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada saat kecepatan angin konstan maka nilai dari kecepatan putar rotor dan daya yang dibangkitkan turbin angin juga konstan. Akan tetapi pada saat nilai kecepatan angin naik, maka nilai kecepatan putar rotor juga naik dan menyebabkan daya yang dihasilkan turbin angin juga meningkat. Dari gambar diatas juga terlihat hubungan antara kontrol kecepatan putar generator dengan daya yang dihasilkan turbin angin. Berikut adalah perbandingan antara daya aktual dan daya maksimum turbin angin:

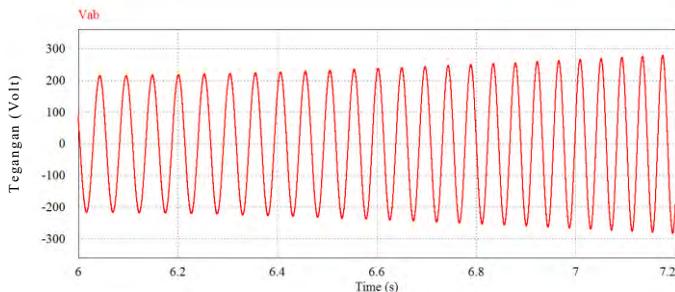
Tabel 4.1 Perbandingan daya aktual dengan daya maksimum turbin angin

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Aktual Turbin Angin (Watt)	Daya Maksimum Turbin (Watt)	Efisiensi <i>Tracking</i> (%)
3,5	470	475	99
11	14594	14639	99,7

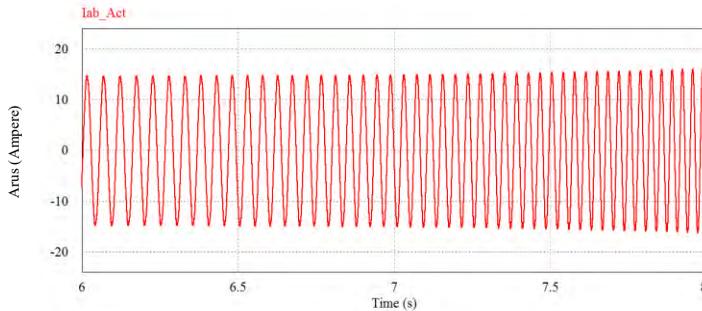
Dari tabel diatas terlihat bahwa maksimum didapatkan nilai efisiensi *tracking* turbin angin yaitu 99 % untuk kecepatan angin 3,5 m/s dan 99,7 % untuk kecepatan angin 11 m/s. Sedangkan kecepatan generator aktual mempunyai nilai yang sama dengan kecepatan generator referensi.

4.2.2 Tegangan dan Arus Generator

Pengujian menunjukkan pengaruh perubahan kecepatan angin terhadap tegangan dan arus generator.



Gambar 4.18 Tegangan Generator pada operasi dinamik

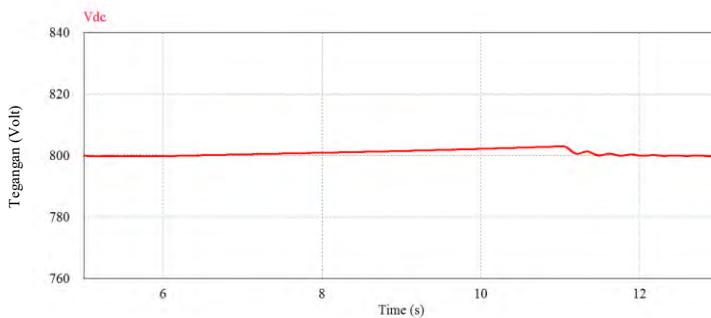


Gambar 4.19 Arus Generator pada keadaan dinamik kecepatan angin

Terlihat dari gambar 4.18 dan 4.19 apabila kecepatan angin naik maka nilai tegangan, arus dan frekuensi generator juga semakin naik. Hal ini disebabkan karena kecepatan angin naik maka kecepatan putar generator juga semakin naik dan menyebabkan tegangan referensi juga naik karena kontrol volt/hertz konstan.

4.2.3 Tegangan DC link

Pengujian ini menunjukkan kondisi tegangan dc link pada kecepatan angin yang berubah mulai dari 3,5 m/s sampai 11 m/s.



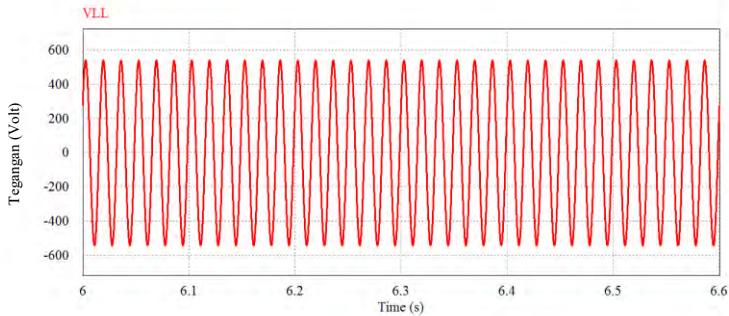
Gambar 4.20 Tegangan dc link pada keadaan dinamik kecepatan angin

Pada saat terjadi perubahan kecepatan angin nilai tegangan dc link menjadi naik sedikit lebih dari 800 volt. Akan tetapi pada saat

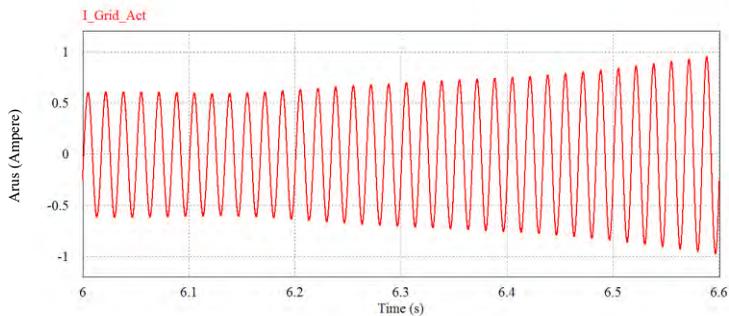
kecepatan angin sudah konstan kembali nilai dc link juga kembali konstan menjadi 800 volt.

4.2.4 Tegangan dan Arus VSI Grid

Pada pengujian ini menunjukkan analisis bagaimana pengaruh perubahan kecepatan angin pada tegangan dan arus VSI grid.



Gambar 4.21 Tegangan VSI grid pada kondisi dinamik



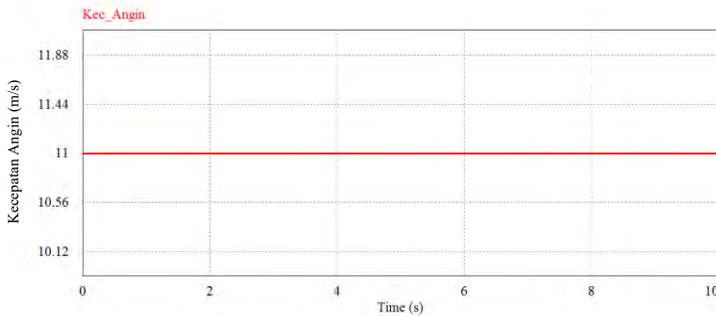
Gambar 4.22 Arus VSI grid pada kondisi dinamik

Dari gambar diatas terlihat bahwa nilai tegangan VSI grid relatif konstan meskipun terjadi kenaikan kecepatan angin. Hal ini dikarenakan indeks modulasi harus dijaga tetap kurang dari 1. Nilai frekuensi VSI grid selalu sama dengan frekuensi grid karena sinyal referensi mempunyai frekuensi yang sama dengan grid. Sedangkan

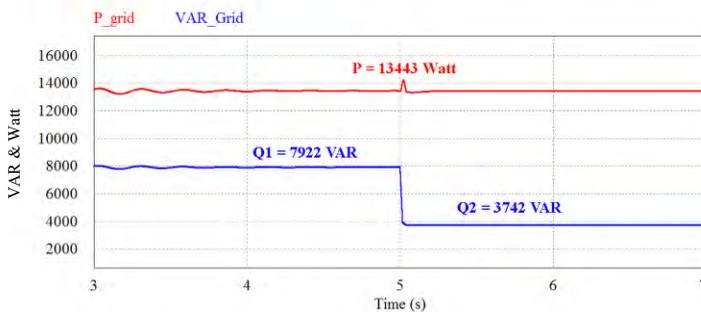
semakin tinggi kecepatan angin maka arus VSI grid semakin besar karena daya yang dihasilkan turbin angin juga semakin besar.

4.3 Kontrol Daya Reaktif(VAR) pada Grid

Pada simulasi ini digunakan kecepatan angin konstan yaitu 11 m/s. Kontrol daya reaktif bertujuan untuk memperbaiki faktor daya pada grid.



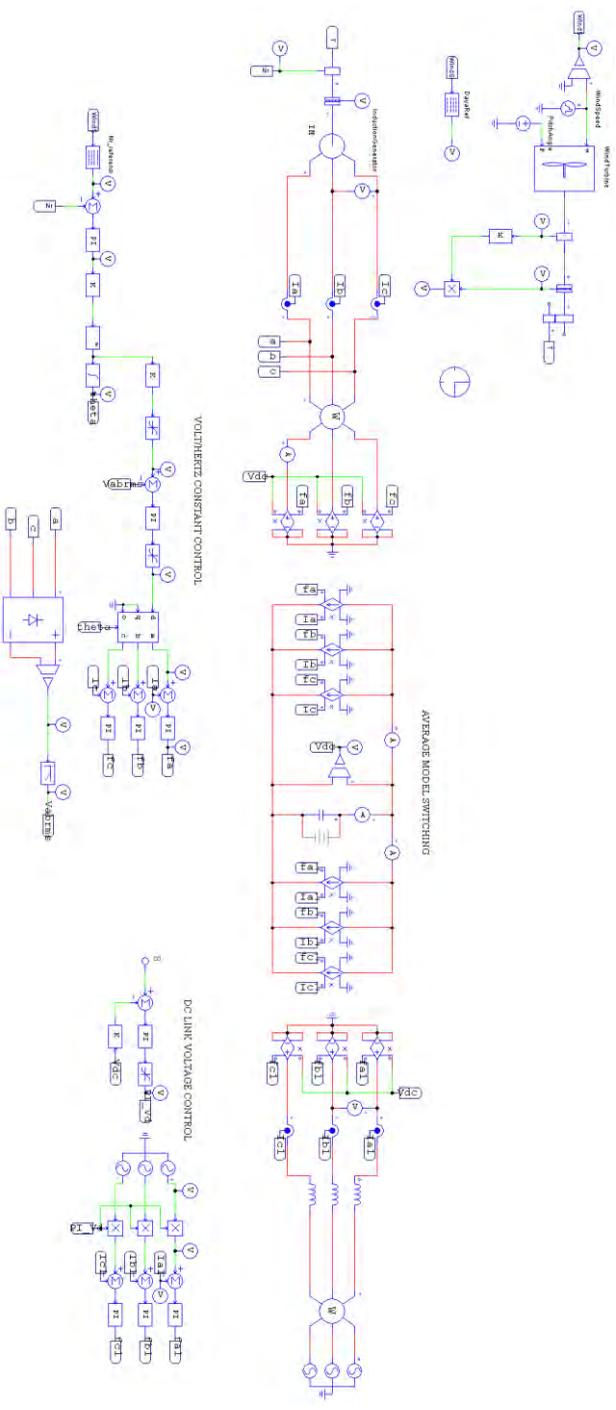
Gambar 4.23 Grafik kecepatan angin



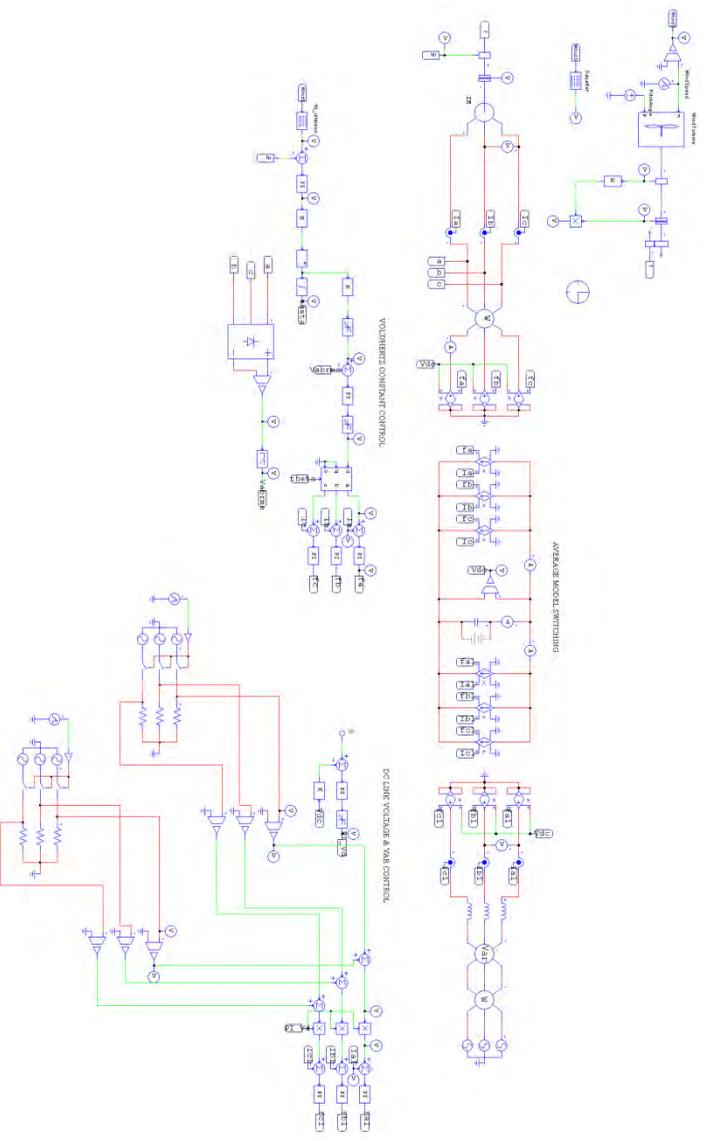
Gambar 4.24 Daya reaktif(VAR) pada jaringan listrik

Pada grafik diatas terlihat bahwa pada nilai kecepatan angin dan daya aktif (watt) yang sama nilai daya reaktif yang disuplai ke jaringan listrik berbeda yaitu 7922 VAR kemudian menjadi 3742 VAR pada waktu tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa *back to back voltage source inverter* dapat mengatur besar daya reaktif pada jaringan listrik.

LAMPIRAN



Gambar Skema total Back to Back Voltage Source Inverter dengan average model



Gambar Skema Kontrol Daya Reaktif (VAR) pada Jaringan Listrik

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. *Back to back voltage source inverter* dapat mengontrol kecepatan, tegangan dan frekuensi generator induksi serta aliran daya aktif maupun reaktif dari generator dan grid secara dua arah atau *bidirectional*.
2. Pada pengujian keadaan *steady state* nilai tegangan, arus, frekuensi pada generator serta tegangan dan arus grid bernilai konstan. Sedangkan pada kondisi dinamik, maka nilai dari parameter diatas berubah sesuai dengan kondisi angin.
3. Nilai tegangan dc link dan frekuensi grid selalu bernilai konstan yaitu 800 Volt dan 60 Hz pada kondisi *steady state* maupun dinamik kecepatan angin.
4. Penggunaan volt/hertz konstan sebagai MPPT mempunyai efektifitas yang tinggi yaitu 99 % pada kecepatan angin 3,5 m/s sampai 99,7 % pada kecepatan angin 11 m/s.

5.2 Saran

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah:

1. Pada penelitian menggunakan pensaklaran *average model* dan disarankan untuk selanjutnya untuk menggunakan pensaklaran detail. Pada pensaklaran detail terdapat harmonisa pada sinyal sehingga simulasi hampir sama dengan kondisi nyata.
2. Diperlukan adanya metode untuk menentukan nilai kecepatan turbin angin referensi untuk menghasilkan daya maksimum secara otomatis, karena pada penelitian ini kecepatan turbin referensi didapatkan dari pengujian turbin angin terlebih dahulu. Pencarian nilai kecepatan turbin dapat menggunakan metode *artificial intelligence* seperti Perturb and Observe, serta firefly.
3. Pada penelitian ini mode operasi sistem adalah *grid connected*, oleh karena itu pada penelitian selanjutnya diusulkan untuk sistem yang dapat bekerja pada operasi *grid connected* dan *stand alone*. Pada penelitian selanjutnya dilakukan simulasi *islanded* atau pada

saat grid *loss* dari sistem dan beberapa saat kemudian grid kembali lagi ke sistem.

4. *Back to back voltage source inverter* digunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem secara otomatis dengan metode kontrol *closed loop* misal kontrol PI.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Heri Ardiansyah, “Studi Regulasi Output Generator Induksi dengan Voltage Source Inverter”, Proceeding Seminar Tugas Akhir elektro FTI-ITS, ITS, 2012.
- [2] Ling Xu, Zhixin Miao, “Control of Back to back VSC System from Grid Connection to Islanded mode in Micro grids”, IEEE Conference, 2013.
- [3] Thohaku Abdul Hadi, “Desain dan Simulasi Sistem Pembangkit HIBRIDA PV-WIND Menggunakan Konverter High Gain Integrated Cascade Boost (HGICB) Terhubung Jaringan”, Proceeding Seminar Tugas Akhir elektro FTI-ITS, ITS, 2015.
- [4] Hadi Malek. “Control of Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Fractional Order Operators”. Dissertation Electrical Engineering UTAH State University, 2014.
- [5] Mirjana Milosevic, Goran A., “Decoupling Current Control and Maximum Power Point Control in Small Power Network with Photovoltaic Source”, EEH power Systems Laboratory Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich), 2006.
- [6] E. Muljadi, C.P. Butterfield, “Investigation of Self-Excited Induction Generators for Wind Turbine Applications”, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2000.
- [7] Rupp Carriveau, “Fundamental and Advanced Topics in Wind Power”, Federal University of Petroleum Resources, Effurun Nigeria, Ch. 11, 2011.
- [8] A Yudhistira Bondan Satriawisesa, “Pengaturan Tegangan dan Frekuensi Generator Induksi Tiga Fasa Penguatan Sendiri Menggunakan Voltage Source Inverter dan Electronic Load Controller”, Proceeding Seminar Tugas Akhir elektro FTI-ITS, ITS, 2013.
- [9] L. Mihet Popa, V.Groza, “Modeling and Design of Grid Connection Control Mode for small Variable-Speed Wind Turbine System”, IEEE Conference, POLITEHNICA University of Timisoara, 2008.

- [10] Siti Aisyah, “Desain dan Simulasi Average Model Voltage Source Inverter pada Generator Induksi”, Proceeding Seminar Tugas Akhir elektro FTI-ITS, ITS, 2013.
- [11] Namdeo S. Guljavar, Debaprasad Kastha, N.K. Kishore, “Comparison of Self Excited Squirrel Cage Induction Machine based Wind Energy Conversion System”, IEEE Conference, 2014.
- [12] Marius Fatu, Ferebe Blaabjerg, Ion Boldea, “Grid to Standalone transition motion-sensorless dual-inverter control of PMSG with asymmetrical grid voltage sags and Harmonics Filtering”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29 No.27, July 2014.
- [13] Marius Fatu, L. Tutelea, R. Teodorescu, “*Motion Sensorless Bidirectional PWM Converter Control with Seamless Switching from power grid to stand alone and back*”, IEEE, 2007.
- [14] Richard C. Dorf, “Power Electronics and Motor Drives”, University of California, USA, Ch. 21, 2011.
- [15] J. Alaca, V. Cardenas, A. R. Lamirez-Lopez, “Study of the Bidirectional Power Flow in Back – to – Back Converters by using Linear and Nonlinear Control Strategies”, IEEE Journal, 2011.
- [16] Mahmoud M. Amin, Osama A. Mohammed, “Development of High-Performance Grid-Connected Wind Energy Conversion System for Optimum Utilization of Variable Speed Wind Turbines”, IEEE Transaction on Sustainable Energy Vol. 2 No. 3, July, 2011.
- [17] S. M. Muyen, Ahmed Al-Durra, J. Tamura, “Variable speed wind turbine generator system with current controlled voltage source inverter”, Energy Conversion and Management”, *ELSLVIER Journal*, 2011.
- [18] Denny Novian Mustoko, “Desain Dan Analisis Konverter DC-DC Multi-Input Bi-Directional Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik”, Proceeding Seminar Tugas Akhir elektro FTI-ITS, ITS, 2014.
- [19] Kajal Shah, Visal Gaur, Siddharth Joshi, Nitin Patel, “Maximum Power Point Tracking Methods for Wind and Solar Conversion Systems for Standalone Generation PSIM based Perturb and

- Observe Method”, International Journal of Engineering Research and Development ISSN: 2278-067X, 2015.
- [20] Stephen J. Chapman, “Electric Machinery Fundamentals”, University of central Florida, Ch. 7, 2005.
- [21] Muhammad H. Rashid, “Power Electronics Devices, Circuits and Applications”, University of West Florida, Ch.15, 2011.
- [22] Dushan Boroyevich, “Modeling and Control of Three Phase PWM Converter”, The 2nd IEEE International Power and Energy Conference, 2008.

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Ainar Rachmad Hidayat adalah seorang pemuda yang lahir di sebuah kota garam yaitu sumenep 5 November 1994. Penulis adalah putra pertama dari dua bersaudara dari pasangan suami istri ibunda maswiyati dan bapak suharto. Penulis memulai sekolah di sebuah desa terpencil di madura yaitu SDN pinggir papas II kabupaten sumenep. Pada waktu masa kecil penulis sangat gemar bermain bola, memancing dan layang – layang dengan sahabat – sahabat dan jarang sekali belajar sehingga masih kalah bersaing dengan teman sekolahnya yang lain. Kemudian penulis melanjutkan sekolahnya di kota yaitu SMPN 2 Sumenep. Pada waktu sekolah di tingkat menengah penulis tinggal di kota dan tidak di desa lagi. Akan tetapi, penulis masih tetap gemar bermain. Memasuki sekolah menengah atas penulis mencoba mendaftar di SMA terbaik di sumenep yaitu SMAN 1 Sumenep dan alhamdulillah diterima. Mulai saat itu penulis meningkatkan minat belajarnya dan lumayan bersaing dengan teman – teman SMA yang lain. Penulis gemar belajar matematika dan fisika. Penulis sudah beberapa kali mengikuti olimpiade dan lomba di bidang matematika. Setelah lulus SMA penulis berencana melanjutkan kuliah di bidang matematika dan statistika, akan tetapi penulis tidak diterima. Setelah itu penulis mengikuti bimbingan belajar yang dibiayai oleh pemerintah kabupaten sumenep. Pada saat mendaftar jurusan penulis sempat bingung dan akhirnya memilih teknik elektro ITS sebagai jurusan pilihan. Setelah melakukan beberapa perjuangan akhirnya penulis diterima di teknik elektro ITS melalui jalur SNMPTN tulis dan beasiswa bidik misi yang sebelumnya gagal di matematika dan statistik. Oleh karena itu, penulis percaya bahwa semuanya sudah digariskan dan pasti setiap orang akan memperoleh yang terbaik sesuai dengan usaha masing – masing. Di perkuliahan penulis mencoba melakukan adaptasi dengan lingkungan elektro. Dalam perkuliahan penulis beberapa kali menang dalam lomba keilmiahan dan juga sebagai asisten laboratorium B101 konversi energi listrik ITS. Disini penulis juga mengembangkan kemampuan hard skill di bidang teknologi energi terbarukan, elektronika daya dan mesin listrik.