



**SIMULASI PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU PADA PEMBEBANAN DINAMIS
TERHUBUNG *GRID***

Skripsi

**Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana
Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Elektro**

Oleh

Muslim Nuryogi

NIM. 5301414007

**PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

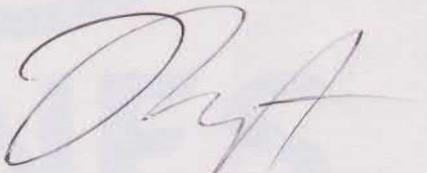
2019

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Muslim Nuryogi
NIM : 5301414007
Program Studi : S-1 Pendidikan Teknik Elektro
Judul : **SIMULASI PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU PADA PEMBEBANAN DINAMIS
TERHUBUNG GRID**

Skripsi ini telah disetujui oleh dosen pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian skripsi program studi S-1 Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 14 Januari 2019
Pembimbing



Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T.
NIP. 197411232005011001

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “SIMULASI PERFORMA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU PADA PEMBEBANAN DINAMIS TERHUBUNG *GRID*” telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 28 Bulan Januari tahun 2019

Oleh

Nama : Muslim Nuryogi
NIM : 5301414007
Program studi : Pendidikan Teknik Elektro

Panitia:

Ketua

Dr.-Ing. Dhidik Prastiyanto, M.T
NIP. 197805312005011002

Sekretaris

Drs. Agus Suryanto, M.T
NIP. 196708181992031004

Penguji 1

Dr. H. Noor Hudallah, M.T
NIP. 196410161989011001

Penguji 2

Dr. Ir. I Made Sudana, M.Pd., IPM
NIP. 195605081984031004

Penguji 3/Pembimbing

Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T
NIP. 197411232005011001

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang



Dr. Nur Oudus M.T
NIP. 1969113011994031001

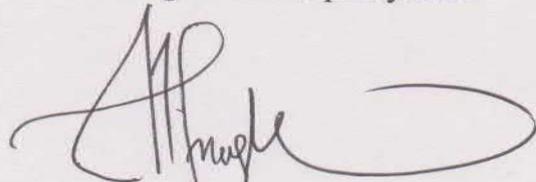
PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Skripsi ini adalah asli dan belum tulis ini belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (Sarjana, Magister, dan/atau Doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Persyaratan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini

Semarang, 14 Januari 2019

Yang membuat pernyataan



Muslim Nuryogi
NIM. 5301414007

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

- Bekerjalah dengan Iman
- Membetulkan Sholat, Membenahi Hidup

PERSEMBAHAN

- Kedua orangtua saya, Rohati dan Tarwadi
- Kedua kakak saya, Yesi dan Fajar
- Adik Saya Sifna
- Teman-teman PTE UNNES angkatan 2014,
UEESRG

RINGKASAN

Muslim Nuryogi. 5301414007. 2019. SIMULASI PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU PADA PEMBEBANAN DINAMIS TERHUBUNG *GRID*. Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T. Program Studi S-1 Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Dalam beberapa tahun terakhir ini, penggunaan energi listrik terus mengalami peningkatan, namun sumber energi pernghasil listrik seperti minyak, gas, batu bara dan energi fosil terus mengalami penurunan. Pemanfaatan sumber energi terbarukan dengan sistem *smart energy* mulai dikembangkan karena efektif dan efisien dalam mengonversikan sumber energi listrik secara berkelanjutan. Energi angin memiliki potensi besar untuk menghasilkan energi listrik dibandingkan dengan jenis sumber energi terbarukan lainnya. Pada penelitian sebelumnya, telah dikembangkan simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang terdiri dari model turbin angin, *generator*, *rectifier*, *boost converter*, *inverter* dan *grid* lalu kemudian dilakukan analisis pembangkit tersebut sehingga menghasilkan daya listrik. Simulasi performa PLTB terhubung *grid* umumnya belum diinvestigasi lebih jauh pada pembebanan dinamis. Penelitian ini mengetahui performa PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid*.

Skripsi ini menyajikan model simulasi PLTB terhubung *grid* dengan uji performa PLTB terhubung *grid* pada *rated wind speed* kemudian pada variasi kecepatan angin, tegangan *output boost converter* pada variasi kecepatan angin, tegangan DC *link*, kerangka referensi natural, tegangan dan arus PLTB, rekapitulasi performa PLTB pada pembebanan dinamis data dari RETScreen NASA, serta aliran daya pada pembebanan dinamis. Komponen utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi model turbin angin, *Permananent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), *Rectifier*, *Boost converter*, *Inverter*, Beban dinamis dan *Grid*. PLTB terhubung *grid* pada pembebanan dinamis disimulasikan dengan *software Power Simulator* (PSIM). Hasil akhir menunjukkan PLTB terhubung *grid* pada pembebanan dinamis memiliki performa baik.

Kata Kunci: *Terhubung grid, PSIM, Pembebanan dinamis*

PRAKATA

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah S.W.T atas segala limpah, rahmat, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **SIMULASI PERFORMA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU PADA PEMBEBANAN DINAMIS TERHUBUNG GRID**. Penulis menyadari sepenuhnya, tanpa bimbingan dari berbagai pihak, Skripsi ini tidak dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang
2. Bapak Dr. Nur Qudus, M.T., Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Bapak Dr. Ir. Subiyanto, S.T., M.T., Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam penyusunan skripsi ini.
4. Tim Dosen Penguji yang telah memberikan masukan yang sangat berharga untuk menambah bobot dan kualitas skripsi ini
5. Seluruh dosen dan karyawan di Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang.
6. Bapak, Ibu serta keluargaku yang selalu memberikan doa, semangat, serta dukungan baik moriil maupun materiil.
7. Serta berbagai pihak yang telah memberikan bantuan untuk karya tulis ini yang tidak dapat disebutka satu persatu.

Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat untuk orang lain.

Semarang, 14 Januari 2019

Penulis,

Muslim Nuryogi

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
RINGKASAN.....	vi
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah	4
1.3 Rumusan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Manfaat Penelitian	5
1.7 Penegasan Istilah	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Kajian Pustaka	7
2.2 Landasan Teori	8

2.2.1	Turbin Angin	8
2.2.1.1	HAWT dan VAWT	8
2.2.2	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)</i>	10
2.2.2.1	Rugi Daya Pada PMSG.....	11
2.2.3	<i>Rectifier</i>	14
2.2.4	<i>Boost Converter</i>	15
2.2.5	<i>Inverter</i>	17
2.2.6	<i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	21
2.2.7	<i>Natural Reference Frame</i>	23
2.2.8	Jaringan Listrik (<i>Grid</i>).....	27
2.2.9	<i>Switching Grid</i>	28
2.2.10	Pembebanan Dinamis	29
BAB III METODE PENELITIAN		32
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	32
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	32
3.3	Desain Penelitian	32
3.4	Metode Penelitian	34
3.5	Parameter Penelitian	36
3.6	Pemodelan PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i>	36
3.6.1	Pemodelan Turbin Angin	37
3.6.2	Pemodelan <i>Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)</i>	38
3.6.3	Pemodelan <i>Rectifier</i>	39
3.6.4	Pemodelan <i>Boost Converter</i>	39
3.6.5	Pemodelan <i>Three-Phase Inverter</i>	41
3.6.5.1	Pemodelan Kerangka Referensi Natural.....	43
3.6.6	Pemodelan Pembebanan Dinamis	45

3.6.7	Pemodelan PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i>	45
3.7	Kondisi Dalam Simulasi PLTB Terhubung <i>Grid</i>	46
3.8	Teknik Pengumpulan Data	47
3.9	Teknik Analisis Data	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Performa PLTB Terhubung <i>Grid</i> Pada <i>Rated Wind Speed</i>	49
4.2	Performa PLTB Terhubung <i>Grid</i> Pada Variasi Kecepatan Angin	50
4.3	Hasil Tegangan <i>Output Boost Converter</i> Pada Variasi Kecepatan Angin	52
4.4	Hasil Tegangan <i>DC Link</i>	53
4.5	Hasil Simulasi Kerangka Referensi Natural	53
4.6	Hasil Arus dan Tegangan PLTB.....	54
4.7	Rekapitulasi Performa PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i> dengan Data RETScreen.....	56
4.8	Aliran Daya PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i>	58
BAB V SIMPULAN DAN SARAN		60
5.1	Simpulan.....	60
5.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		61
LAMPIRAN		65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Mode Saklar <i>Inverter</i> Tiga Fasa	19
Tabel 3.1 Alat dan Bahan Penelitian.....	32
Tabel 3.2 Parameter Model Turbin Angin	38
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>Peemanent Magnet Synchronous Generator</i>	38
Tabel 3.4 Persamaan <i>Boost Converter</i>	40
Tabel 3.5 Parameter <i>Boost Converter</i>	40
Tabel 3.6 Parameter Pembebanan Dinamis	45
Tabel 3.7 Data RETScreen Terintegrasi NASA Kota Tual.....	46
Tabel 3.8 Parameter Simulasi PLTB Terhubung <i>Grid</i>	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 HAWT dan VAWT	10
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen PMSG.....	11
Gambar 2.3 Rangkaian <i>Rectifier</i>	14
Gambar 2.4 Grafik tegangan <i>input</i> (AC 3-fasa) dan <i>output</i> (DC).....	15
Gambar 2.5 Rangkaian <i>Boost Converter</i>	15
Gambar 2.6 <i>Voltage Source Inverter</i>	18
Gambar 2.7 Sinyal <i>Gating</i> dan Tegangan Keluaran <i>Inverter SPWM</i> 3 Fasa	21
Gambar 2.8 Sinyal <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	22
Gambar 2.9 Pembentukan Sinyal <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	23
Gambar 2.10 <i>Natural Reference Frame</i>	24
Gambar 2.11 Jaringan Listrik (<i>Grid</i>).....	28
Gambar 2.12 Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Dengan Beban Linier	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 3.2 Diagram Blok PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i>	37
Gambar 3.3 <i>Output</i> Tegangan <i>Rectifier</i>	39
Gambar 3.4 Pemodelan <i>boost converter</i>	41
Gambar 3.5 <i>Input</i> dan <i>Output</i> Tegangan <i>Boost Converter</i>	41
Gambar 3.6 Pemodelan <i>Voltage Source Inverter (VSI)</i>	42
Gambar 3.7 Pemodelan <i>Control Three-Phase Inverter</i>	43
Gambar 3.8 Pemodelan Pengontrolan.....	43
Gambar 3.9 Pemodelan <i>Phase Locked Loop (PLL)</i>	44
Gambar 3.10 Pemodelan PWM.....	44
Gambar 3.11 Pemodelan <i>DC Link Voltage</i>	44
Gambar 3.12 Pemodelan PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i>	45
Gambar 4.1 Kecepatan Angin <i>Rated Wind Speed</i>	50
Gambar 4.2 Aliran Daya PLTB	50
Gambar 4.3 Variasi Kecepatan Angin 8 m/s, 12 m/s dan 10 m/s	51
Gambar 4.4 Aliran Daya PLTB Diberbagai Kondisi Kecepatan Angin	52
Gambar 4.5 Tegangan Kerja <i>Boost Converter</i> Pada Variasi Kecepatan Angin..	53
Gambar 4.6 Tegangan <i>DC Link</i> PLTB.....	53

Gambar 4.7 Gelombang Perbandingan Sudut Fasa PLL dengan Arus dan Tegangan pada <i>grid</i>	54
Gambar 4.8 Gelombang Tegangan PLTB Hasil Keluaran <i>Inverter</i>	55
Gambar 4.9 Gelombang Arus PLTB Keluaran Filter	55
Gambar 4.10 Aliran Daya PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i> .	59

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Usulan Dosen Pembimbing Penulisan Skripsi	65
Lampiran 2 Surat Tugas Dosen Pembimbing Penulisan Skripsi	66
Lampiran 3 Perhitungan <i>Boost Converter</i>	67
Lampiran 4 Perhitungan Beban Induktif dan Resistif.....	68
Lampiran 5 Pemodelan PLTB pada Pembebanan Dinamis Terhubung <i>Grid</i>	71
Lampiran 6 Data RETScreen Terintegrasi NASA	72
Lampiran 7 Hasil Simulasi PLTB Pada Pembebanan Dinamis RETScreen	73
Lampiran 8 <i>Datasheet</i> Turbin Angin Fuhrlander.....	91
Lampiran 9 <i>Datasheet</i> Generator PMSG	92
Lampiran 10 MOSFET/IGBT type APT60N60BCSG	93
Lampiran 11 Dioda type DUR6060W	95
Lampiran 12 Induktor type HCS-850M-280A.....	97
Lampiran 13 Capacitor type C4DEIPQ5680A8TK	98

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir ini, penggunaan energi listrik terus mengalami peningkatan, namun sumber energi penghasil listrik seperti minyak, gas, batu bara dan energi fosil terus mengalami penurunan (Shivarama Krishna dan Sathish Kumar, 2015:907; Masson, G. dan Brunisholz, M., 2018). Oleh karena itu dibutuhkan sumber energi lainnya yang dapat di konversi menjadi energi listrik dan dapat menyuplai listrik tersebut ke konsumen atau pengguna secara berkelanjutan, salah satunya yaitu pemanfaatan sumber energi terbarukan atau *renewable energy* (Erdinc dan Uzunoglu, 2012).

Dalam perkembangannya pembangkit listrik menggunakan energi terbarukan dapat dibuat dalam mode berdiri sendiri (*Stand alone*) yang dapat digunakan pada wilayah terpencil (Ribeiro dan Boccaletti, 2009). Pemanfaatan sumber energi terbarukan dengan sistem *smart energy* juga mulai dikembangkan karena efektif dan efisien dalam mengonversikan sumber energi listrik secara berkelanjutan (Lund *et al.*, 2017). *Smart energy* merupakan bagian dari transformasi revolusi industri manufaktur ke generasi berikutnya, yaitu industri 4.0 (Rubmann *et al.*, 2015). Dasar dari *smart energy* adalah *smart grid*, yang merupakan jaringan listrik cerdas yang dapat mengintegrasikan semua aktivitas pengguna mulai dari pembangkit sampai ke konsumen dengan tujuan agar efisien,

berkelanjutan, ekonomis dan memastikan pasokan listrik aman (IEC, 2010; M. A. Islam, 2014; Kakran dan Chanana, 2018).

Pada sistem *smart grid*, banyak sumber energi yang digunakan seperti matahari, angin, biomassa, gelombang air laut dan lain sebagainya yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik dengan efisiensi besar (Muyeen dan Al-Durra, 2013). Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang dapat menghasilkan energi listrik dibandingkan dengan jenis sumber energi terbarukan lainnya (El-Sebaei, 2013; Eltamaly dan Farh, 2013; Muyeen dan Al-Durra, 2013) kemudian energi angin juga memiliki biaya instalasi lebih rendah dibandingkan energi surya (Valenciaga *et al.*, 2003; Koutroulis dan Kalaitzakis, 2006).

Teknologi PLTB telah banyak digunakan dan terus mengalami peningkatan kapasitas yang signifikan pada koneksi *grid* di seluruh dunia. Beberapa alasan yang memungkinkan perkembangan yang pesat ini misalnya ketercukupan kecepatan angin untuk pembangkit listrik, proses pembangkitan listrik yang hampir *independent* dari intervensi operator, hemat biaya operasi, bebas polusi sehingga ramah terhadap lingkungan (Jansuya dan Kumsuwan, 2013). Sementara itu untuk pengaturan terhubung *grid*, dengan kontrol yang tepat dan memenuhi kriteria koneksi sehingga PLTB ini bertindak sebagai pembangkit listrik untuk beban dasar yang secara aktif berkontribusi pada pengaturan frekuensi dan kontrol tegangan dalam sistem *grid*. Oleh karena itu, penggunaan PLTB dapat terhubung *grid* dan layak di dalam pengoperasiannya (Baoqing dan De, 2012).

Pada penelitian sebelumnya, telah dikembangkan teknologi PLTB yang terdiri dari model turbin angin, *generator*, *rectifier*, *boost converter*, *inverter* dan *grid* lalu kemudian dilakukan analisis pembangkit tersebut sehingga menghasilkan daya listrik (Kanellos dan Hatziaargyriou, 2008; Fournier, 2017; Rahimi, 2017). Pengembangan PLTB juga didasarkan pada berbagai fokus penelitian seperti pada baling-baling turbin yang memiliki parameter seperti luas area turbin, kepadatan udara, kecepatan angin, parameter aerodinamis operasional yang memiliki efek langsung pada prioritas tertinggi aerodinamis sehingga harus dipertimbangkan dalam pengoperasian PLTB (Almukhtar, 2012; Qi dan Meng, 2012). Akan tetapi performa PLTB terhubung *grid* umumnya belum diinvestigasi lebih jauh pada pembebanan dinamis. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui performa PLTB terhubung *grid* pada pembebanan dinamis.

Penelitian ini menyajikan model simulasi PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid*. Komponen utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi model turbin angin, *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), *Rectifier*, *Boost converter*, *Inverter*, Beban Dinamis dan *Grid*. PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid* disimulasikan dengan *software Power Simulator* (PSIM) dan diuji secara komprehensif dengan kondisi di lapangan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka dapat diidentifikasi masalah dalam penelitian ini adalah PLTB dapat terhubung *grid* tanpa menyebabkan kendala yang berarti namun belum diinvestigasi ketika pada pembebanan dinamis.

1.3 Rumusan Masalah

PLTB telah banyak dikembangkan sebagai pemanfaatan energi terbarukan untuk menghasilkan energi listrik. Akan tetapi performa PLTB terhubung *grid* umumnya belum diinvestigasi lebih jauh khususnya pada pembebanan dinamis.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan tersebut, maka tujuan dalam penelitian ini adalah mengetahui performa hasil simulasi PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid*.

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah diatas maka penelitian ini dibatasi permasalahan dengan asumsi sebagai berikut :

1. Pemodelan, simulasi dan analisis menggunakan *software Power Simulator* (PSIM) 9.0.3.
2. Sistem yang akan di rancang dalam penelitian ini adalah Performa PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung *Grid*.

3. Karakteristik pengujian turbin angin dibatasi berdasarkan variasi kecepatan angin yaitu 8 m/s, 10 m/s, dan 12 m/s serta sesuai data tahunan RETScreen NASA.
4. Tidak membahas masalah yang timbul saat terjadi gangguan seperti hubung singkat.
5. *Pitch angle* pada turbin bernilai konstan 0° .
6. Simulasi PLTB tanpa penggunaan penyimpanan daya atau baterai.
7. Daya yang dibangkitkan PLTB adalah daya aktif.
8. Desain beban dinamis menggunakan beban linier yang didapat dari persamaan-persamaan yakni 0 kW, 5 kW, 20 kW dan 40 kW.

1.6 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan dari penelitian, manfaat yang diharapkan dari adanya penelitian ini adalah

1. Hasil penelitian ini dapat memberikan pengetahuan mengenai Performa PLTB Pada Pembebanan Dinamis Terhubung *Grid*.
2. Menjadi pemodelan implementasi PLTB yang nantinya dapat di implementasikan dalam bentuk *hardware*.
3. Menjadi referensi pemanfaatan PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid* bagi penelitian dimasa mendatang.
4. Menjadi sebuah referensi yang dapat menunjang instansi-instansi yang bergerak di bidang energi baru terbarukan khususnya PLTB.
5. Menjadi sebuah referensi untuk mahasiswa yang akan mengerjakan

penelitian dengan topik energi terbarukan khususnya mengenai PLTB.

1.7 Penegasan Istilah

Agar tidak terjadi penafsiran yang berbeda pada tentang penelitian ini maka diberikan penjelasan istilah sebagai berikut :

1. Simulasi

Sistem atau proses penggambaran dengan peragaan berupa model statistik atau pemeranan.

2. *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Sebuah generator sinkron yang menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya.

3. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik yang mengubah energi angin menjadi energi listrik.

4. *Grid*

Jaringan listrik tiga fasa.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu terhubung *grid* meliputi :

1. Rahimi *et al* (2017) melakukan penelitian yang berjudul “*Modeling, Control and Stability Analysis of Grid Connected PMSG Based Wind Turbine Assisted with Diode Rectifier and Boost Converter*”. Dalam penelitian tersebut PLTB terhubung *grid* dengan menggunakan generator tipe PMSG dan jenis konverter *Rectifier* dan *Boost converter*. Hasil penelitian menunjukkan peningkatkan kecepatan generator, redaman dari mode *dc-link* osilasi berkurang secara signifikan pada PLTB tersebut.
2. Kanellos dan Hatziargyriou (2008) melakukan penelitian dengan judul “*Control of Variable Speed Wind Turbines in Islanded Mode of Operation*”. Dalam penelitian tersebut PLTB terhubung *grid* dengan putaran rotor turbin angin menggunakan jenis *Variabel Speed Wind Turbine* (VSWT) sehingga bisa mendapatkan daya yang lebih maksimal.
3. Fournier *et al* (2017) melakukan penelitian dengan judul “*Stability for Wind Turbine using Observer Method with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*”. Penelitian PLTB menggunakan generator tipe PMSG sehingga daya *output* lebih stabil dan maksimal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Turbin Angin

Energi listrik dapat dihasilkan dengan berbagai cara dan bahan bakar yang digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator. Angin digunakan sebagai bahan bakar yang memutar turbin dan terhubung dengan generator yang menghasilkan listrik. Turbin angin berfungsi mengonversi energi angin menjadi energi mekanik (Amine, Abdelaziz dan Najib, 2014). Persamaan matematis dari energi mekanik yang dihasilkan oleh angin adalah sebagai berikut:

$$P_w = 0.5\rho\pi R^2 \mathcal{V}_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

Di mana P_w adalah daya yang dihasilkan oleh angin, ρ adalah massa jenis udara (kg/m^3), R adalah jari-jari sudu turbin angin (m), \mathcal{V}_w adalah kecepatan angin (m/s), dan C_p adalah koefisien daya dari kedua fungsi rasio kecepatan, λ dan sudut pengaturan sudu, β (Muyeen, Member dan Al-durra, 2013). Jenis Turbin angin umumnya ada dua yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Horisontal Axis Wind Turbine* (VAWT).

2.2.1.1 HAWT dan VAWT

a) *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)

VAWT berputar tegak lurus dengan permukaan tanah. VAWT biasa digunakan pada kebutuhan yang kecil. Turbin angin terpasang secara vertikal dengan posisi generator berada di dasar. Terdapat kelebihan VAWT diantaranya:

1. Mempunyai biaya instalasi yang lebih rendah dibandingkan dengan HAWT karena tidak harus dipasang pada tower.
2. Generator dapat dipasang dipermukaan tanah, sehingga mempermudah pemeliharaan.
3. Operasinya tidak bergantung pada arah angin, karena dapat menghasilkan daya dari arah angin 360°.

VAWT juga mempunyai kekurangan diantaranya:

1. Memiliki efisiensi yang rendah karena hanya memiliki satu *blade* rotor.
2. Terdapat batas kecepatan putaran saat kondisi angin kencang.
3. Tidak dapat *self-starting*.
4. Mempunyai vibrasi yang relatif tinggi.

b) *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*

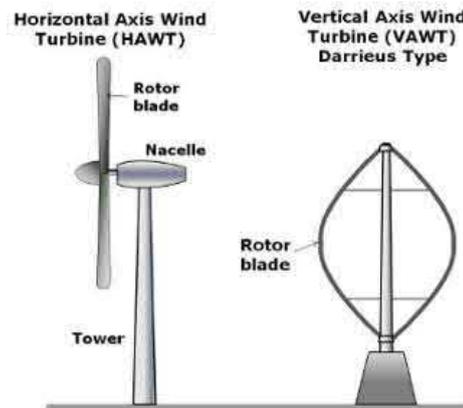
HAWT berputar pada sumbu yang sejajar dengan permukaan bumi Turbin angin terpasang horizontal dengan posisi generator berada satu poros dengan turbin dan berada di atas. Biasa digunakan untuk membangkitkan daya yang besar. Terdapat kelebihan pada HAWT diantaranya:

1. Efisiensi konversi energi angin tinggi.
2. Mampu *self-starting*.
3. Dapat mengakses kecepatan angin yang kencang sesuai dengan ketinggian tower.

HAWT juga mempunyai kekurangan diantaranya:

1. Memiliki biaya instalasi lebih mahal daripada VAWT

2. Membutuhkan tower yang kuat yang dapat menanggung turbin dan generator yang digunakan.
3. Membutuhkan biaya pemeliharaan yang lebih besar karena turbin dan generator berada di atas.

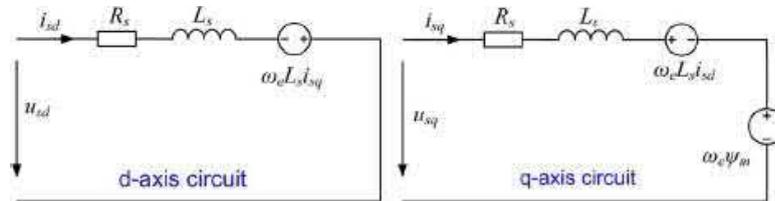


Gambar 2.1 HAWT dan VAWT (Setyanto, 2017)

2.2.2 *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Pada sistem pembangkit listrik dengan turbin angin *variable speed* atau variasi kecepatan angin dapat digunakan beberapa macam generator untuk mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik seperti *Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)*, *Wound Rotor Induction Generator (WRIG)*, *Double Fed Induction Generator (DFIG)*. Serta *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*. Pada skala kecil penggunaan sistem turbin angin dengan PMSG lebih sering digunakan karena memiliki efisiensi yang tinggi (C.Janani, 2011).

PMSG adalah sebuah generator sinkron yang menggunakan magnet permanen sebagai sumber eksitasinya. PMSG akan mengubah daya mekanik dari turbin angin menjadi daya elektris.



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen PMSG (Zhou *et al.*, 2015)

Gambar 2.2 merupakan rangkaian ekivalen dari PMSG. Persamaan matematis dari rangkaian ekivalen PMSG adalah

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - L_s \omega_e I_{sq} \quad (2.2)$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + L_s \omega_e I_{sd} + \omega_e \psi_m \quad (2.3)$$

Keterangan:

V_{sd}, V_{sq} = tegangan stator pada d dan q axis

R_s = hambatan pada stator

I_{sd}, I_{sq} = arus stator pada d dan q axis

ω_e = frekuensi angular dari arus stator

L_s = induktansi

ψ_m = fluks rotor

2.2.2.1 Rugi Daya Pada PMSG

Rugi – rugi daya yang terjadi pada generator sinkron terdiri dari rugi – rugi tembaga, rugi besi, dan rugi mekanik (Riyono, 2004).

a. Rugi Listrik

Rugi-rugi daya merupakan daya yang hilang dalam penyaluran daya listrik dari sumber daya listrik utama ke suatu beban seperti ke rumah-rumah, ke gedung-

gedung, dan lain sebagainya. Dalam setiap penyaluran daya listrik ke beban pasti terdapat rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh faktor-faktor tertentu seperti jarak saluran listrik ke beban yang terlalu jauh, yang juga akan berakibat bertambah besarnya tahanan saluran kabel yang digunakan. Rugi listrik juga dikenal dengan rugi tembaga yang terdiri dari kumparan armatur, kumparan medan seri dan kumparan medan *shunt*.

Rugi kumparan armatur ($P_{ar} = I_a^2 \times R_a$) besarnya sekitar 30 sampai 40 % dari rugi total pada beban penuh. Sedangkan rugi kumparan medan shunt ($P_{sh} = I_{sh}^2 \times R_{sh}$) bersama – sama dengan kumparan medan seri ($P_{sr} = I_{sr}^2 \times R_{sr}$) besarnya sekitar 20 sampai 30 % dari rugi beban penuh.

b. Rugi Besi

Rugi besi disebut juga rugi magnetic yang terdiri dari rugi histerisis dan rugi arus pusar yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada besi mesin dengan hanya lilitan peneral utama yang diberi tenaga pada generator sinkron, rugi ini dialami oleh besi armatur, meskipun pembentukan pulsa fluks yang berasal dari mulut celah akan menyebabkan rugi pada besi medan juga, terutama pada sepatu kutub atau permukaan besi medan.

Rugi histerisis (P_h) besarnya adalah :

$$P_h = \eta_h \times B_{max}^{1.6} \times f \times v \times \text{(watt)}$$

Keterangan :

η_h = koefisien steinmetz histeris

B = kerapatan fluks (Wb/m²)

V = volume inti (m³)

F = frekuensi

Dari persamaan diatas, besar koefisien steinmetz histerisis, kerapatan flux dan volume inti adalah konstan sehingga nilai rugi histerisis adalah merupakan fungsi dari frekuensi atau ditulis:

$$P_h = F(f)$$

Jadi makin besar frekuensi sinyal dengan tegangan output makin besar rugi histerisis yang diperoleh. Adapun rugi arus pusar besarnya adalah:

$$P_e = k.B^2 \max.f^2.t^2.v \text{ (watt)}$$

Dimana ; k = konstanta arus pusar yang tergantung pada ketebalan laminasi masing – masing lempengan dan volume inti armature. Oleh karena nilai k dan B adalah konstan, maka besar kecilnya rugi arus pusar adalah tergantung pada nilai frekuensi kuadrat yang ditulis :

$$P_e = F(f)^2$$

Besar rugi besi adalah sekitar 20 sampai 30 % dari rugi total pada beban penuh.

c. Rugi Mekanik

Rugi mekanik terdiri dari :

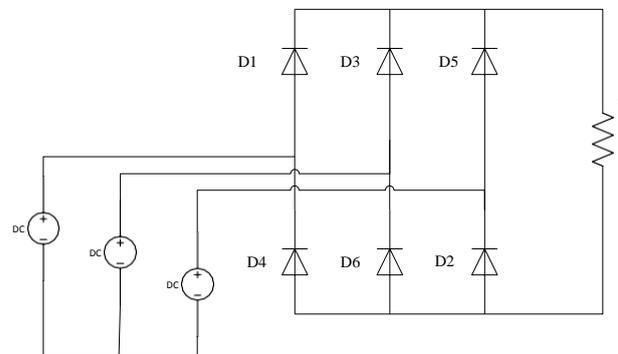
1. Rugi gesek yang terjadi pada pergesekan sikat dan sumbu. Rugi ini dapat diukur dengan menentukan masukan pada mesin yang bekerja pada kecepatan yang semestinya tetapi tidak diberi beban dan tidak literal.
2. Rugi angin (*windage loss*) atau disebut juga rugi buta (*stray loss*) akibat adanya celah udara bagian rotor dan bagian stator.

Besar rugi mekanik sekitar 10 sampai 20% dari rugi total pada beban penuh.

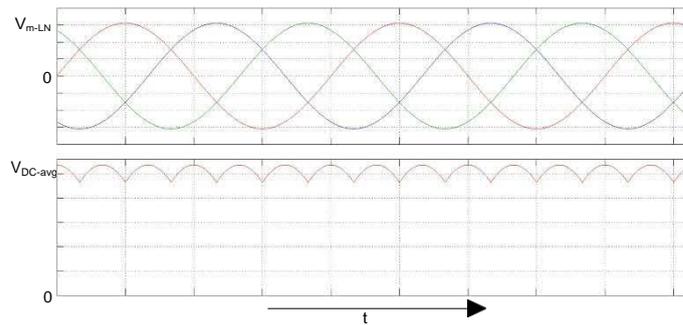
2.2.3 Rectifier

Rectifier digunakan untuk mengubah tegangan AC dari PMSG kemudian dikonversikan menjadi tegangan DC menggunakan *rectifier* (C.Janani, 2011; Daniel W.Hart, 2011). Pada penelitian ini digunakan penyearah dengan dioda sehingga disebut penyearah tak terkontrol. Penyearah tiga fasa tak terkontrol terdiri dari enam buah dioda.

Dioda bagian atas (D1,D3,D5) dan Dioda bagian bawah (D4, D6, D2). Dioda yang terhubung dengan fasa yang sama tidak akan konduksi secara bersamaan. Tegangan *output* yang mengalir pada beban ada tegangan *line-to-line* dari sumber. Terdapat enam kombinasi tegangan *line-to-line*.Tegangan DC yang dihasilkan memiliki enam pulsa yang dihasilkan dari masing masing kombinasi tersebut. (Daniel W.Hart, 2011).



Gambar 2.3 Rangkaian *Rectifier* (Daniel W.Hart, 2011)



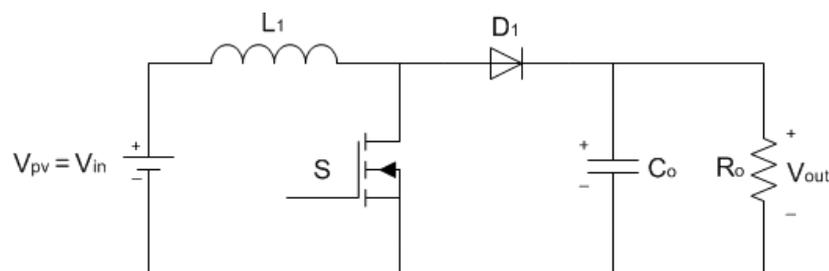
Gambar 2.4 Grafik tegangan *input* (AC 3-fasa) dan *output* (DC) (Daniel W.Hart, 2011)

Gambar 2.4 menunjukkan tegangan tiga fasa dan hasil kombinasi dari tegangan *line-to-line*. Persamaan gelombang tegangan keluaran rata-rata (V_{dc}) adalah:

$$V_{DC-avg} = \frac{3V_{m-LL}}{\pi} \quad (2.4)$$

2.2.4 Boost Converter

Boost converter merupakan salah satu topologi *step-up converter* yang umum digunakan pada sistem PLTB terhubung *grid*. *Boost converter* berfungsi menaikkan level tegangan dari *rectifier* dengan arus masukan yang kontinu, sedangkan arus keluarannya diskontinyu (Xiao *et al.*, 2007: 1368). Ketika arus terputus maka tegangan yang terukur akan sama dengan tegangan rangkaian terbuka.



Gambar 2.5 Rangkaian *Boost Converter* (Daniel W.Hart, 2011:212)

Bahwa nilai tegangan keluaran yang diperoleh *Boost converter* ditentukan dari nilai *duty cycle* yang diberikan. Nilai *duty cycle* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5 (Daniel W.Hart, 2011).

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (2.5)$$

Keterangan:

D = *Duty Cycle*

V_{in} = Tegangan *rectifier* (V)

V_{out} = Tegangan *output* (V)

Nilai *duty cycle* yang telah diperoleh tersebut digunakan untuk menghitung nilai induktor. Sebelum menghitung nilai induktor, *ripple* arus induktor ditentukan terlebih dahulu sebesar 20%-40% dari arus *output Boost converter*. Persamaan 2.6 digunakan untuk menentukan *ripple* arus induktor pada *Boostconverter*.

$$\Delta I_L = (20\% - 40\%) \times I_{out} \times \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

ΔI_L = *Ripple* arus induktor (A)

Nilai *ripple* arus induktor yang telah diperoleh digunakan untuk menghitung nilai induktor menggunakan persamaan 2.7 (Hart, 2011: 212).

$$L = \frac{V_{out} \times D}{\Delta I_L \times f_s} \quad (2.7)$$

Keterangan:

f_s = Frekuensi *Switching* (Hz)

Penentuan nilai komponen berikutnya adalah nilai kapasitor *output* menggunakan persamaan 2.8 (Hart, 2011: 212).

$$C_0 = \frac{I_{out} \times D}{f_s \times \Delta V_{out}} \quad (2.8)$$

Keterangan:

C_0 = Kapasitor *Output* (F)

I_{out} = Arus *Output* (A)

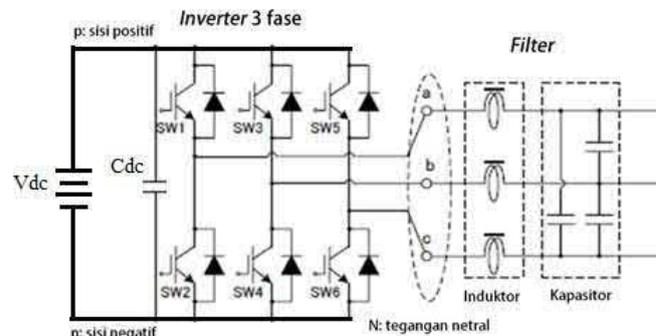
ΔV_{out} = *Ripple* Tegangan *Output* (V)

2.2.5 *Inverter*

Inverter adalah perangkat elektronika yang digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. Keluaran suatu *inverter* dapat berupa tegangan AC dengan bentuk gelombang sinus (*sine wave*), gelombang kotak (*square wave*) dan sinus modifikasi (*sine wave modified*). Sistem energi terbarukan sebagian besar terhubung ke suatu *grid* melalui *inverter* (Kharjule, 2015).

Inverter 3 fasa merupakan *inverter* dengan keluaran tegangan AC 3 fasa. *Inverter* 3 fasa dapat dipertimbangkan sebagai gabungan dari 3 buah *inverter* 1 fasa dimana tegangan keluaran (*output*) masing-masing *inverter* 1 fasa bergeser 120°. Salah satu rangkaian dasar *inverter* 3 fasa adalah *voltage source inverter* (VSI). VSI bekerja berdasarkan tegangan DC masukannya. VSI terdiri dari 6 buah IGBT sebagai saklar, sumber tegangan VDC serta kapasitor pada sumber tegangan. Rangkaian ini ditunjukkan oleh gambar 2.6 (Wicaksana, 2016). Tegangan DC pada *inverter* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.9.

$$V_{DC} = (2\sqrt{2} \times V_{LL}) / \sqrt{3} m \quad (2.9)$$



Gambar 2.6 Voltage Source Inverter (VSI)

(Wicaksana, 2016)

Proses konversi tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik tiga fasa adalah sebagai berikut (Kharjule, 2015; Morales, 2010). Pada saat setengah siklus positif dari tegangan suplai, transistor S1, S2 dan S3 akan aktif, sedangkan untuk setengah siklus negatif dari tegangan suplai, transistor S4, S5 dan S6 akan aktif. Untuk model *inverter* 3 fasa VSI. Tabel 2.1 berikut memperlihatkan urutan penyaklaran saklar daya kondisi tegangan fasa ke fasa. Tegangan antar fasa dari keluaran *inverter* adalah perbedaan tegangan antara kaki-kaki dari *inverter* yang dapat dirumuskan pada persamaan 2.10, 2.11 dan 2.12 sistem kendali *inverter* ini bertugas mengatur arus yang di injeksikan ke *grid*. Dengan skema kendali dan modulasi yang sudah dikembangkan, suatu *inverter* dapat dengan stabil mentransfer daya dari DC DC *converter*.

$$V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \quad (2.10)$$

$$V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \quad (2.11)$$

$$V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \quad (2.12)$$

Keterangan :

V_{ab} = Tegangan *line to line* (Line a dan b)

V_{bc} = Tegangan *line to line* (Line b dan c)

V_{ca} = Tegangan *line to line* (Line c dan a)

V_{a0} = Tegangan *Line/ Line* dan netral (*line a*)

V_{b0} = Tegangan *Line/ Line* dan netral (*line b*)

V_{c0} = Tegangan *Line/ Line* dan netral (*line c*)

Tabel 2.1 Mode Saklar *Inverter* Tiga Fasa

<i>Switch State</i>	<i>State No.</i>			
S1, S5, S6 ON, / S3, S4, S5 OFF	S3	V_i	0	$-v_i$
S6, S2, S1 ON, / S4, S5, S6 OFF	2	0	V_i	$-v_i$
S2, S4, S6 ON, / S1, S5, S6 OFF	3	$-v_i$	v_i	0
S4, S5, S3 ON, / S1, S2, S6 OFF	4	$-v_i$	0	V_i
S3, S5, S4 ON, / S1, S2, S3 OFF	5	0	$-v_i$	V_i
S5, S1, S3 ON, / S2, S3, S4 OFF	6	V_i	$-v_i$	0

Pensaklaran sinyal PWM *inverter* tiga fasa menggunakan *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Pembangkitan sinyal *gating inverter* SPWM 3 fasa yang diperlihatkan pada gambar 2.7. Ada 3 sinyal referensi sinusoidal (fasa R, fasa S dan Fasa T) yang berbeda fasa 120° . Sinyal pembawa (sinyal segitiga) dibandingkan dengan sinyal referensi sinusoidal (fasa R, fasa S dan fasa T) untuk menghasilkan sinyal *gating* untuk masing-masing IGBT. Tegangan rms fasa-fasa

(V_{ab}) keluaran *inverter* adalah fungsi tegangan DC Bus dan indeks modulasi (m) seperti pada persamaan 2.13 sedangkan daya *output inverter* dijelaskan pada persamaan 2.14 (Panda *et al.*, 2009).

$$V_{abc\text{rms}} = \frac{m}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times V_s = m \times 0,612 \times V_s \quad (2.13)$$

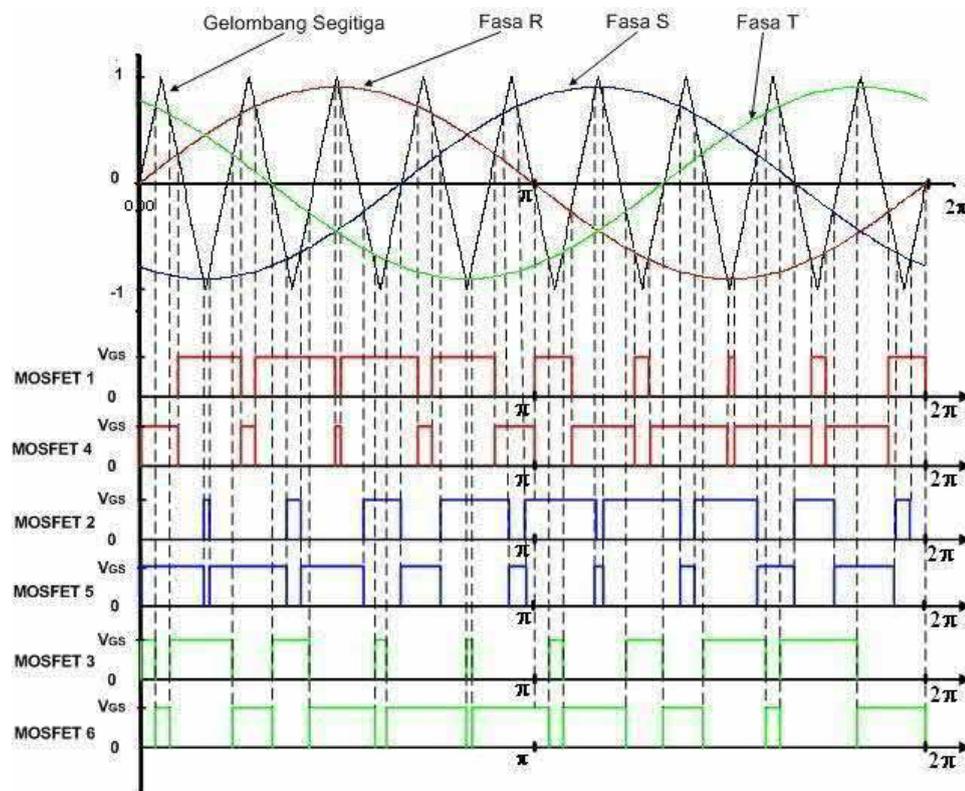
$$P_{inv} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_{DC} \times I_{peak} \quad (2.14)$$

Harmonisa dan komponennya yang muncul pada tegangan keluaran PWM berada disekitar penyaklaran *inverter*. Tegangan rms V_s dapat divariasikan dengan merubah indeks modulasi m . Bila δm adalah lebar dari pulsa ke m , maka untuk mendapatkan tegangan rms keluaran sinusoidal PWM *inverter* V_o yang diberikan seperti persamaan 2.15 (Panda *et al.*, 2009).

$$V_o = V_s \left(\sum_{m=1}^{2p} \sqrt{\frac{\delta m}{\pi}} \right) 0,5 \quad (2.15)$$

Keterangan :

$V_{abc\text{ rms}}$	= Tegangan RMS (V)
M	= Indeks Modulasi
δm	= Lebar dari pulsa ke m
V_s	= Tegangan RMS (V)
P_m	= Daya output inverter (Watt)
V_{DC}	= Tegangan DC (V)
I_{peak}	= Arus Puncak (A)
V_o	= Tegangan RMS keluran inverter (V)

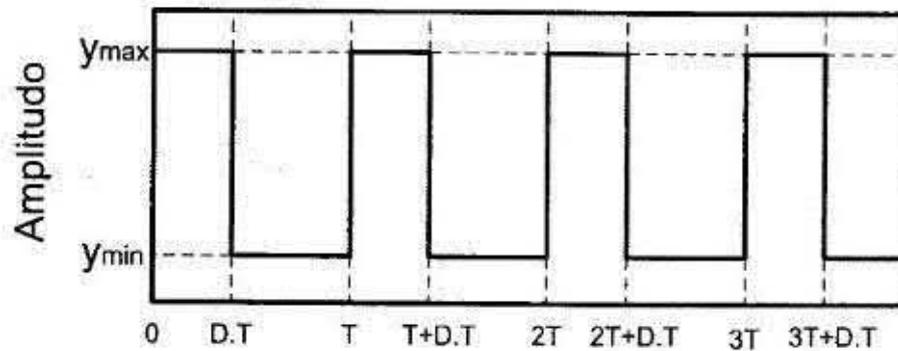


Gambar 2.7 Sinyal *Gating* dan Tegangan Keluaran *Inverter SPWM* 3 Fasa
(Panda *et al.*, 2009).

2.2.6 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) merupakan sebuah mekanisme untuk membangkitkan sinyal keluaran yang periodenya berulang antara *high* dan *low* (Sun, 2012). Durasi sinyal *high* dan *low* dapat dikontrol sesuai dengan yang diinginkan. *Duty cycle* merupakan prosentase periode sinyal *high* dan periode sinyal *low*, presentase *duty cycle* akan berbanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan (Panda *et al.*, 2009). Sinyal PWM merupakan sinyal yang biasa digunakan untuk melakukan fungsi pengaturan dari sebuah rangkaian elektronik (Sun, 2012). Sinyal PWM umumnya digunakan untuk mengendalikan suatu *switching* pada rangkaian elektronik. Bentuk sinyal PWM ini ialah suatu sinyal

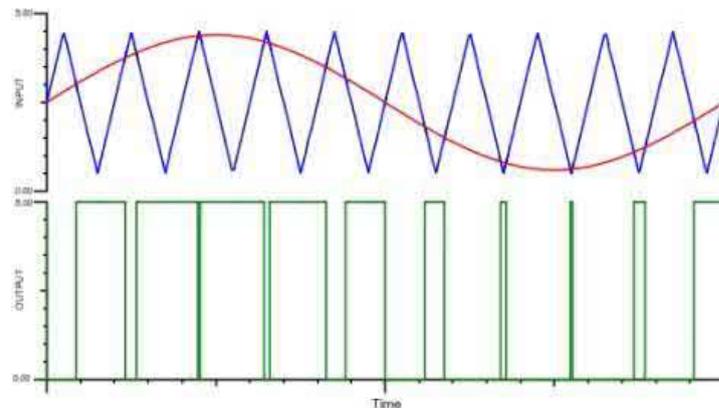
persegi panjang hasil modulasi dari sinyal referensi dengan sinyal *carrier*. Adapun bentuk dari sinyal PWM nampak sebagai gambar 2.8



Gambar 2.8 Sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM)

Sinyal PWM yang nampak pada Gambar 2.8 dapat dibentuk dengan membandingkan antara sinyal *referensi* dengan sinyal *carrier* (Caldwell, 2013). Sinyal referensi bisa berupa sinyal apapun yang ingin dijadikan *referensi*. Sedangkan sinyal *carrier* merupakan sinyal yang berupa segitiga sama kaki maupun sinyal gigi gergaji yang digunakan sebagai gelombang modulasi dan komparator. Gambar 2.9 merupakan gambar mengenai cara pembentukan sinyal PWM.

Pada Gambar 2.9 ketika sinyal *referensi* yang warna biru lebih besar daripada gelombang modulasi (berupa sinyal segitiga sama kaki, yang berwarna *orange*) maka sinyal PWM akan berada pada kondisi *high* atau bernilai 1. Begitu pula sebaliknya, ketika sinyal referensi bernilai lebih kecil dari gelombang modulasi maka sinyal PWM akan berada pada kondisi *low* atau bernilai 0. Pada Gambar 2.9 sinyal PWM yang terbentuk dinyatakan dengan warna hijau (Sun, 2012).



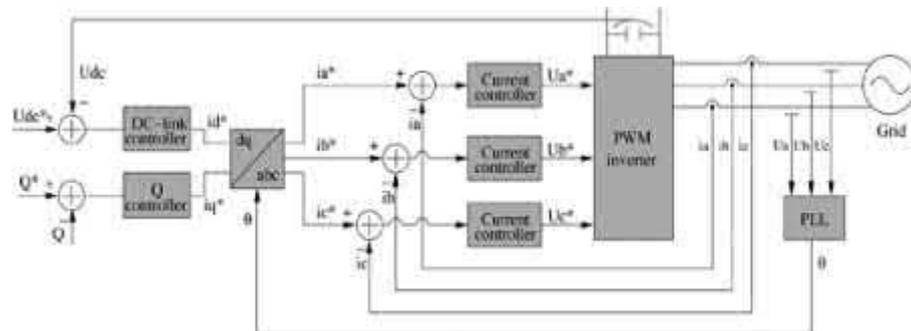
Gambar 2.9 Pembentukan Sinyal *Pulse Width Modulation (PWM)*

Pulse Width Modulation (PWM) lebar pulsa sinyal gating dibangkitkan dengan membandingkan sinyal referensi sinusoidal terhadap sinyal segitiga pembawa yang diperlihatkan pada gambar 2.9. Teknik PWM sangat banyak dipergunakan pada aplikasi industri. Amplitudo sinyal referensi menentukan indeks modulasi yang mempengaruhi tegangan *rms* keluaran. Jumlah pulsa untuk setiap setengah siklus tergantung pada frekuensi pembawa.

2.2.7 *Natural Reference Frame*

Natural reference frame adalah sebuah kontrol arus yang menggunakan metode transformasi arus *grid*. Implementasi dari *abc-controller* ini dapat dilihat pada Gambar 2.10 yang mana keluaran dari pengontrolan tegangan *dc-link* digunakan sebagai referensi arus masukan (Blaabjerg *et al.*, 2006). Dengan menggunakan sudut fasa dari tegangan *grid* yang diperoleh dari sinkronisasi, maka arus referensi dari masing-masing fasa terbentuk. Arus referensi ini kemudian dikontrol menggunakan *PI* atau *PR controller*. *Output* ini yang nantinya akan menjadi sinyal modulasi untuk membentuk PWM.

Kontrol abc ini merupakan algoritma pengaturan vektor (*vector control*), yakni dengan memanfaatkan proses transformasi. *Vector control* terdapat dua transformasi yaitu *transformasi park (dq)* dan *transformasi clarke ($\alpha\beta$)* (Report, n.d.; Microsemi, 2013). *Transformasi dq* digunakan untuk mentransformasikan sistem tiga fasa (a,b,c) atau dua fasa (α,β) menjadi sistem dua fasa berputar yaitu *direct (d)* dan *quadrature (q)*. Kerangka referensi natural ini menggunakan *invers* dari *transformasi park*.



Gambar 2.10 *Natural Reference Frame*

Dalam pengontrolan ini pada umumnya disebut *transformasi dq-abc* atau *abc-control*. Masukan dari pengontrolan merupakan *DC-link Controller* yang mana akan menghasilkan arus referensi aktif yang berupa I_d^* dan *Q Controller* yang akan menghasilkan I_q^* . Masukan berupa I_d^* dan I_q^* kemudian ditransformasikan dengan *transformasi dq-abc* sehingga menjadi 3 arus referensi. Ketiga arus referensi tersebut kemudian dibandingkan dengan arus pada jaringan atau *grid*. Kemudian dilakukan pengontrolan arus yang berupa *proporsional integral (PI) control* yang nilainya berdasarkan *trial and error* dan limiter yang berfungsi untuk membatasi nilai arus referensi tersebut (Blaabjerg *et al.*, 2006; Singh dan Ieee, 2012). Karena pengontrolan arus harus sefasa dengan tegangan *grid* maka sudut fasa yang

digunakan *transformasi abc-dq*. harus diekstrak dari tegangan *grid*. Solusinya adalah tegangan *grid* harus di-filter dan menggunakan fungsi *arctangent* untuk mengekstrak sudut fasa. Dalam hal ini *PLL* yang mengekstrak sudut fasa dari tegangan *grid* dalam kasus *distributed generation systems* (Blaabjerg *et al.*, 2006; Singh & Ieee, 2012). Pengontrolan *inverter grid-connected* dibagi menjadi dua bagian yaitu *inputside controller* dan *grid-side controller* (Meguro *et al.*, 2014).

Pada *input-side controller* bertugas untuk mengetahui daya maksimal dari sumber energi. Sedangkan, pada *grid-side controller* bertugas untuk mengatur daya terima pada *grid* dan memastikan kualitas daya tersebut serta memastikan sinkronisasi pada *grid*. Sedangkan pengontrolan *inverter grid-side controller* berdasarkan dua *cascade loop* yaitu *internal current loop* yang meregulasi arus pada *grid* dan *external voltage drop* yang bertugas untuk menyeimbangkan aliran daya pada sistem.

Proses awal dari skema *kerangka referensi natural* yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 adalah sensor arus pada *grid* dibandingkan dengan arus hasil *transformasi dq - abc* dan *transformasi abc-dq* sehingga mendapatkan keluaran berupa tegangan U_a^* , U_b^* dan U_c^* . *PLL* pada skema tersebut berfungsi untuk memberikan sudut fasa ke *transformasi abc-dq*. Lalu membandingkan selisih antara U_{dc}^* dan U_{dc} sehingga mendapatkan *Udc error* sesuai dengan Persamaan 2.16. Berdasarkan persamaan 2.9 dengan tegangan *line to line* 380 Volt dan indeks modulasi (m) 0.9 maka nilai minimum dari tegangan DC adalah 689.4V. Menurut West Rick tegangan referensi DC harus dua kali lipat lebih besar dari tegangan *line*

to line rms maka ditentukan nilai tegangan referensi DC sebesar 750 volt (West, 2012). Tegangan DC *error* dapat dihitung dengan persamaan 2.16.

$$U_{dcerror} = U^*dc - Udc \quad (2.16)$$

Keterangan :

$U_{dcerror}$ = tegangan DC error

U^*dc = tegangan DC referensi

Udc = tegangan DC

Setelah mendapatkan Udc error maka selanjutnya proses kontrol di *dc-link controller* untuk mendapatkan Iq^* . Kemudian akan ditransformasikan menggunakan *dq-abc* menjadi Ia^* , Ib^* dan Ic^* . Selanjutnya Ia^* , Ib^* dan Ic^* dibandingkan dengan Ia , Ib dan Ic yang kemudian hasil perbandingan tersebut dikontrol sehingga didapatkan Ua^* , Ub^* dan Uc^* yang akan digunakan sebagai tegangan modulasi pertama yang dikirimkan ke PWM *inverter* seperti pada persamaan 2.17, 2.18 dan 2.19.

$$Ua^* = Ia^* - Ia \quad (2.17)$$

$$Ub^* = Ib^* - Ib \quad (2.18)$$

$$Uc^* = Ic^* - Ic \quad (2.19)$$

Keterangan :

Ua^* = Tegangan modulasi fasa a (V)

Ub = Tegangan modulasi fasa b (V)

Uc^* = Tegangan modulasi fasa c (V)

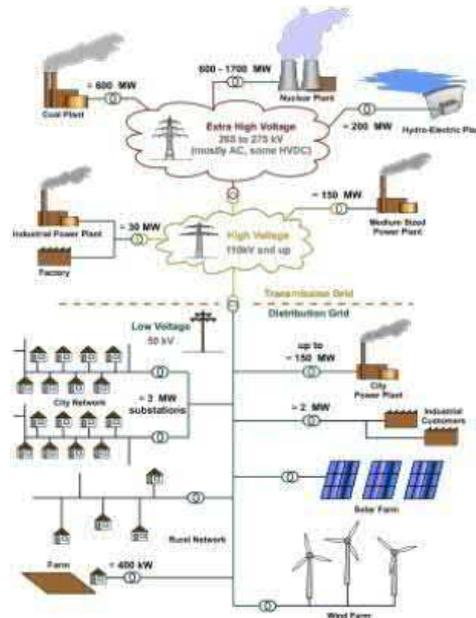
Udc = Tegangan DC (V)

Udc^* = Tegangan referensi DC (V)

Ia^*	= Arus referensi fasa a (A)
Ib^*	= Arus referensi fasa b (A)
Ic^*	= Arus referensi fasa c (A)
Id^*	= Arus transformasi d referensi (A)
Id	= Arus transformasi d (A)
Iq	= Arus transformasi q (A)

2.2.8 Jaringan Listrik (*Grid*)

Sistem *grid* terdiri atas pembangkit listrik sebagai penghasil energi listrik, kemudian disalurkan ke jaringan transmisi untuk menghantarkan energi listrik dari jarak jauh ke pusat beban dan jaringan distribusi yang terhubung langsung ke konsumen (Kaplan, 2009). Sistem *grid* dapat digunakan untuk jaringan yang luas maupun jaringan pulau yang melayani beban secara lokal. Sistem jaringan *grid* ditunjukkan oleh Gambar 2.11. Suatu sistem jaringan dapat dikatakan terkoneksi dengan *grid* apabila memiliki frekuensi dan sudut fasa yang sama dengan *grid*. Jaringan listrik atau *grid* dalam hal ini memiliki frekuensi 50 hertz dengan tegangan 380 volt, 20 kV, 150 kV ataupun tegangan kerja lainnya.



Gambar 2.11 Sistem Jaringan Listrik (*Grid*)

2.2.9 Switching Grid

Menurut Suparno (2000) proses penyambungan/paralel pembangkit dengan jaringan listrik harus didahului dengan proses sinkronisasi. Dalam pembangkitan listrik tenaga bayu untuk sinkronisasi terhadap *grid* adalah pembangkitan dalam *start* dan *stop* untuk menyuplai energi listrik. Istilah sinkron disini ialah bergabungnya sistem tenaga listrik dari sumber listrik diluar jaringan menuju jaringan yang sama. Dalam hal ini jaringan *standby* yang akan menerima suplai listrik dari pembangkit adalah *grid*. Parameter terukur dari *grid* ini merupakan acuan atau referensi untuk bergabungnya atau sinkronnya pembangkit dengan *grid*. Ada 4 syarat sinkron pembangkit dengan *grid*.

1. Urutan Phase (*Phase Sequence*)

Syarat pertama dari sinkron generator ke *grid* adalah urutan phase antara generator pembangkit dan *grid* harus sama. Seperti yang kita ketahui pada generator

pembangkit menggunakan sistem listrik AC 3 fasa dengan urutan penamaan phase yang standar adalah R S T dimana antar phase tersebut mempunyai perbedaan sudut tegangan sebesar 120° . R berbeda 120° dengan S, S berbeda 120° dengan T, begitupun T berbeda 120° dengan R dan begitulah seterusnya sehingga urutan phase sering juga dinamakan urutan rotasi phase.

2. Tegangan (*Voltage Magnitude*)

Syarat sinkron yang kedua adalah besarnya nilai tegangan harus sama dengan *grid*

3. Frekuensi (*Frequency*)

Frekuensi yang sama antara pembangkit dengan *grid*. Frekuensi disini maksudnya adalah frekuensi dari gelombang sinusoidal yang dihasilkan dari pembangkit ataupun yang terdapat pada *grid*. Besarnya nilai frekuensi yang standar di Indonesia adalah 50 Hz.

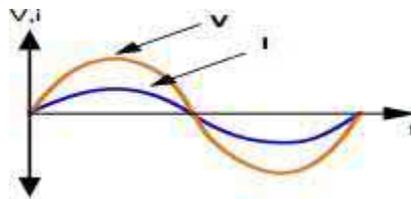
4. Sudut Phase (*Phase Angle*)

Syarat sinkron yang keempat atau yang terakhir adalah pembangkit memiliki sudut *phase* yang sama dengan *grid*.

2.2.10 Pembebanan Dinamis

Beban dinamis yang digunakan pada penelitian ini berupa beban linier yaitu beban yang impedansinya selalu konstan sehingga arus selalu berbanding lurus dengan tegangan setiap waktu. Beban linier ini mematuhi Hukum Ohm yang menyatakan bahwa arus berbanding lurus dengan tegangan. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linier akan sama dengan bentuk gelombang tegangan.

Apabila diberi tegangan *sinusoidal*, maka arus yang mengalir ke beban linier juga merupakan *sinusoidal* sehingga tidak terjadi distorsi dan tidak menimbulkan harmonisa (Amalia, 2015). Beban ini berupa elemen pasif seperti resistor dan kapasitor. Beberapa contoh beban linear adalah lampu pijar, pemanas, resistor, dan lain-lain. Gambar 2.12 berikut adalah contoh bentuk gelombang arus dan tegangan dengan beban linear.



Gambar 2.12 Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Dengan Beban Linier (T. Alexander dan Thompson, 2007)

Beban yang digunakan dalam penelitian ini adalah beban linier berupa resistor dan induktor. Kedua nilai tersebut dapat diperoleh dengan menentukan terlebih dahulu daya aktif (P) dan faktor daya ($\cos\phi$) untuk menghitung besar daya semu (S) menggunakan persamaan 2.20.

$$S = \frac{P}{\cos\phi} \quad (2.20)$$

Nilai daya semu (S) yang telah diperoleh digunakan untuk menghitung nilai daya reaktif (Q) dengan persamaan 2.21 dan juga menghitung nilai arus beban (I_L) menggunakan persamaan 2.22, sebagaimana telah diketahui bahwa tegangan *line to line* (V_{LL}) yang digunakan yakni sebesar 380 V.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.21)$$

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_{LL}} \quad (2.22)$$

Arus beban (I_L) dan daya reaktif (Q) yang telah diketahui nilainya digunakan untuk menghitung resistansi beban linear (R) dan juga reaktansi induktif (X_L) masing-masing menggunakan persamaan 2.23 dan persamaan 2.24.

$$R = \frac{P}{3 \times I_L^2} \quad (2.23)$$

$$X_L = \frac{Q}{3 \times I_L^2} \quad (2.24)$$

Besarnya nilai reaktansi induktif (X_L) digunakan untuk menghitung induktansi beban linear menggunakan persamaan 2.25, yang mana besar ω sama dengan 2π .

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad (2.25)$$

Keterangan :

- P = Daya Aktif (W)
- S = Daya Semu (VA)
- Q = Daya Reaktif (VAR)
- I_L = Arus Beban
- R = Nilai Resistansi
- XL = Nilai Beban Induktansi
- L = Nilai Induktansi
- VLL = Tegangan *Line to Line*
- ω = 3,14
- Cos θ = 0.9

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Penelitian ini mensimulasikan PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid* pada *software Power Simulator (PSIM)*. Hasil pengujian menunjukkan PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid* memiliki performa baik. Dibuktikan bahwa ketika PLTB terhubung *grid* di uji dalam kondisi *wind reted speed* dan kondisi data RETScreen daya keluaran yang dihasilkan PLTB stabil. Pada pembebanan dinamis, jika daya beban yang dibutuhkan lebih kecil dari daya PLTB maka kelebihan dari daya tersebut dapat disalurkan ke *grid*. Akan tetapi, ketika daya beban lebih besar dibanding daya yang dihasilkan PLTB maka *grid* akan mengatasi kekurangan daya tersebut.

5.2 Saran

Saran yang dapat penulis berikan berkaitan dengan skripsi ini sehingga penelitian ini dapat dikembangkan antara lain:

1. Pada PLTB pada pembebanan dinamis terhubung *grid* dapat ditambahkan baterai sebagai perangkat penyimpanan energi listrik, sehingga ketika PLTB tidak cukup menghasilkan energi listrik atau terdapat masalah akan digantikan oleh baterai tersebut sebagai sumber energi listrik.
2. Penelitian selanjutnya dapat ditambahkan pembangkit energi terbarukan yang lain untuk meningkatkan kapasitas daya.

DAFTAR PUSTAKA

- Almukhtar, E. A. H. (2012) 'Effect of Drag on The Performance for an Efficient Wind Turbine Blade Design', 18, pp. 404–415.
- Alexander Kusko dan Marc T. Thompson. 2007 "Power Quality in Electrical Systems", Mc Graw Hill.
- Amine, H. M., Abdelaziz, H. dan Najib, E. (2014) 'Wind Turbine Maximum Power Point Tracking Using FLC Tuned With GA', *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 62, pp. 364–373.
- Baoqing, X. dan De, T. (2012) 'Simulation and Test of the Blade Models ' Output Characteristics of Wind Turbine', 17, pp. 1201–1208.
- Blaabjerg, F., Teodorescu, R., Liserre, M. & Timbus, A. V. 2006. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5): 1398–1409.
- C.Janani, K. R. (2011) 'Modeling and Performance Analysis of A Small Scale Direct Driven PMSG Based Wind Energy Conversion Systems', 1(1), pp. 8–20.
- Caldwell, J. (2013) 'TI Precision Designs : Verified Design Analog Pulse Width Modulation', (June), pp. 1–21.
- Chip, L. S. M., Ju, B. dan Lee, W. H. (2012) 'RF Transmitter Using the Dual-Pulse Position Modulation Method', pp. 337–341.
- Daniel W.Hart (2011) *Power Electronics*. Valparioso, Indiana: McGraw-Hill.
- El-Sebaai, A. M. (2013) 'A Sensorless MPPT Technique For A Grid-Connected PMSG Wind Turbine System', 6.
- Eltamaly, A. M. dan Farh, H. M. (2013) 'Maximum Power Extraction From Wind Energy System Based On Fuzzy Logic Control', *Electric Power Systems Research*. Elsevier B.V., 97, pp. 144–150.
- Erdinc, O. dan Uzunoglu, M. (2012) 'Optimum Design of Hybrid Renewable Energy Systems : Overview Of Different Approaches', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 16(3), pp. 1412–1425.
- F Ronilaya, B Setiawan, A A Kusuma, I. M. dan D. M. Y. (2018) 'Design Maximum Power Point Tracking of Wind Energy Conversion Systems Using P & O and IC Methods Design Maximum Power Point Tracking of

Wind Energy Conversion Systems Using P & O and IC Methods’.

- Fournier, J. (2017) ‘Stability For Wind Turbine Using Observer Method With Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)’, *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 138, pp. 122–127.
- IEC (2010) ‘IEC Smart Grid Standardization Roadmap’, *IEC Report*, (June), pp. 1–136.
- Jansuya, P. dan Kumsuwan, Y. (2013) ‘Design of MATLAB / Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle Wind Turbine Simulator’. Elsevier B.V., 34, pp. 362–370.
- Kakran, S. dan Chanana, S. (2018) ‘Smart Operations of Smart Grids Integrated With Distributed Generation: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(December 2016), pp. 524–535.
- Kanellos, F. D., Hatziargyriou, N. D. dan Member, S. (2008) ‘Control of Variable Speed Wind Turbines in Islanded Mode of Operation’, 23(2), pp. 535–543.
- Kaplan, S. M. (2009) ‘Electric Power Transmission: Background and Policy Issues’.
- Kharjule, S. 2015. Voltage Source Inverter. (Icesa).
- Koutroulis, E. dan Kalaitzakis, K. (2006) ‘Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications’, 486 *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 53(2), pp.486–494.
- Lund,H., Østergaard P.A., Connolly David, Mathiesen, dan Brian Vad. (2017) ‘Smart energy and smart energy systems’, *Energy*, 137, pp. 556–565.
- M. A. Islam, M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, A. Nahar, dan M.Hosenuzzaman. (2014) ‘Global Renewable Energy-Based Electricity Generation and Smart Grid System for Energy Security Global Renewable Energy-Based Electricity Generation and Smart Grid System for Energy Security’, *The Scientific World Journal*. Hindawi Publishing Corporation, (August).
- Masson, G., Brunisholz, M., B. (2018) ‘2016 snapshot Of Global Photovoltaic Markets’, (April 2016).
- Meguro, H., Tsutsumi, K., Ichinose, M., Ito, T. & Kikuchi, A. 2014. Robust control technique
- Morales, D.S. 2010. Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications. *Science*, 411: 82. Tersedia di

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304397510004287>.

- Mustafa, M. N. (2017) 'Design of a Grid Connected Photovoltaic Power Electronic Converter', in. Master Degree University of Tromsø. Norwegia.
- Muyeen, S. M., Member, S. dan Al-durra, A. (2013) 'Modeling and Control Strategies of Fuzzy Logic Controlled Inverter System for Grid Interconnected Variable Speed Wind Generator', *IEEE System Journal*, pp. 1–8.
- Panda, S., Mishra, A. & Srinivas, B. 2009. Adjustable Speed Drive Applications.
- Qi, Y. dan Meng, Q. (2012) 'The Application of Fuzzy PID Control in Pitch Wind Turbine', 16(2011), pp. 1635–1641.
- Rahimi, M. (2017) 'Electrical Power and Energy Systems Modeling , control and stability analysis of grid connected PMSG based wind turbine assisted with diode rectifier and boost converter', *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. Elsevier Ltd, 93, pp. 84–96.
- Rashid, M. H. (Ed) (2011) *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications Handbook*. Third Edit. Elsevier's Science & Technology.
- Ribeiro, E. dan Boccaletti, C. (2009) 'Uninterruptible Energy Production in Standalone Power Systems for Telecommunications Uninterruptible Energy Production in Standalone Power Systems for Telecommunications', (April).
- Riyono, yon.2004. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. Yogyakarta Andi.
- Rizka Amalia dan Refdinal Nazir. 2015. ISSN: 2302 - 2949 Pemodelan dan Simulasi Beban Non-Linier 3-Fasa. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*. (2): 165–171.
- Rubmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, Jan dan Harnisch, M.(2015) 'Industry 4 . 0: The Future of Productiravity and Growth in Manufacturing Industries'.
- Setyanto, B. I. (2017) *Desain Dan Simulasi Kontrol Generator Side Converter Dan Grid Side Inverter Terhubung Jala-Jala Dengan Kontrol Logika Fuzzy Untuk Variable Speed Wind Turbine*. Skripsi.Institut Teknologi Surabaya. Surabaya.
- Shah, K., Gaur, V., Joshi, S., dan Patel, N.(2015) 'Maximum Power Point Tracking Methods for Wind and Solar Conversion Systems for Standalone Generation PSIM based Perturb and Observe Method', (April), pp. 46–54.

- Shivarama Krishna, K. dan Sathish Kumar, K. (2015) 'A Review on Hybrid Renewable Energy Systems', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 52, pp. 907–916.
- Singh, B. T. S. K. V. (2012) 'Power Balance Theory Based Control of Grid Interfaced Solar Photovoltaic Power Generating System with Improved Power Quality'.
- Sugiyono. 2009. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif R & D*. Bandung: Alfabeta.'
- Sun, J. 2012. *Pulse-Width Modulation*.
- Suparno. 2000. *Mesin Listrik 2*. Jakarta : Erlangga.
- Valenciaga, Fernando, Puleston, Pablo F dan Battaiotto, Pedro E (2003) 'Power Control of a Solar / Wind Generation System Without Wind Measurement : A Passivity / Sliding Mode Approach', 18(4), pp. 501–507.
- Wicaksana, A.G. 2016. *Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur dan Irradiasi pada Tegangan, Arus dan Daya Keluaran PLTS Terhubung Grid 380 v*. *Skripsi*. Program Sarjana UNDIP. Semarang.
- Xiao, W., Dunford, William G, Palmer, Patrick R., dan Capel, Antoine.(2007) 'Regulation of Photovoltaic Voltage', 54(3), pp. 1365–1374.
- Zhou, D., Blaabjerg, F., Franke, Toke T., Michael Lau dan Mogens. (2015) 'Comparison of Wind Power Converter Reliability with Low-Speed and edium-Speed Permanent-Magnet Synchronous Generators', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), pp. 6575–6584.