



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN KONTROL MPPT MENGGUNAKAN PERTURB &
OBSERVE (P&O) BERBASIS OPTIMUM RELATION UNTUK
TURBIN ANGIN YANG TERKONEKSI DENGAN GRID**

Mochammad Fauqi Akbar
NRP 2213100092

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN KONTROL MPPT MENGGUNAKAN PERTURB &
OBSERVE (P&O) BERBASIS OPTIMUM RELATION UNTUK
TURBIN ANGIN YANG TERKONEKSI DENGAN GRID**

Mochammad Fauqi Akbar
NRP 2213100092

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN OF CONTROL MPPT USING PERTURB & OBSERVE
(P&O) BASED ON OPTIMUM RELATION FOR WIND TURBINE
CONNECTED TO GRID**

Mochammad Fauqi Akbar
NRP 2213100092

ADVISOR

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M. Eng.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Desain Kontrol MPPT Menggunakan *Perturb & Observe* (P&O) Berbasis *Optimum Relation* untuk Turbin Angin yang Terkoneksi dengan Grid**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2017

Mochammad Fauqi Akbar
NRP 2213 100 092

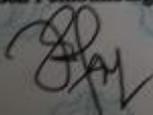
**DESAIN KONTROL MPPT MENGGUNAKAN
PERTURB & OBSERVE (P&O) BERBASIS
OPTIMUM RELATION UNTUK TURBIN ANGIN
YANG TERKONEKSI DENGAN GRID**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1



Dr. Eng. Andyono Priyandi, ST., M.Eng.
NIP. 1973 09 27 1998 03 1 004

Dosen Pembimbing 2



Heri Suryostomo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 1980 06 03 2006 04 1 003



SIURABAYA
JULI, 2017

DESAIN KONTROL MPPT MENGGUNAKAN PERTURB & OBSERVE (P&O) BERBASIS OPTIMUM RELATION UNTUK TURBIN ANGIN YANG TERKONEKSI DENGAN GRID

Nama : Mochammad Fauqi Akbar
Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Permasalahan mengenai ketersediaan energi yang bersumber dari energi fosil menjadi fokus dunia saat ini. Perlu adanya pengembangan sumber energi alternatif baru dan terbarukan yang sumbernya tidak terbatas dimana salah satu contoh energi tersebut berasal dari energi angin. Potensi energi angin yang besar perlu dioptimalkan terutama dalam penggunaannya untuk kehidupan sehari – hari yakni energi listrik. Banyak metode yang telah digunakan untuk memperoleh hasil yang stabil dan dapat diaplikasikan di masa depan. Tugas akhir ini akan membahas mengenai desain kontrol MPPT menggunakan metode *Perturb & Observe* yang berbasis *Optimum Relation* pada Turbin angin yang tidak menggunakan sensor mekanik. Diharapkan dengan penggunaan *Perturb & Observe* berbasis *Optimum Relation* ini akan memberikan daya keluaran yang optimal dan dapat sehingga efisien ketika terhubung dengan *grid*.

Kata Kunci : Turbin Angin, *Perturb & Observe* berbasis *Optimum Relation*, Terhubung *Grid*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

***DESIGN OF CONTROL MPPT USING PERTURB &
OBSERVE (P&O) BASED ON OPTIMUM RELATION
FOR WIND TURBINE CONNECTED TO GRID***

Name : Mochammad Fauqi Akbar
Advisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Advisor II : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

The Majority Problem in availability of electricity become focused by the world. Development of renewable enrgy has been increasing and wind has biggest potential for being optimalize in daily life. There is many methods used for wind turbine to get maximum power, stable system and can be applied in the future. In this final project design of control MPPT using perturb & observe based on optimum relation for wind turbine without using mechanical sensors is proposed. In this Design Perturb & Observe based on Optimum Relation hope can get maximum power and more efficient for connected to grid.

Keywords : *wind turbine, perturb & observe based on optimum relation, on grid.*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia yang tidak terkira berupa kekuatan, kesabaran, dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menyelesaikan salah satu persyaratan mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Allah SWT karena telah memberikan kelancaran dalam melaksanakan Tugas Akhir ini, dan semoga diberikan keberkahan atas apa yang telah dilalui
2. Segenap keluarga terutama Ibunda Maslucha, Ayahanda Achmad Latief serta adik tercinta Fitrotun Azizah yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng, dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya.
4. Bapak Dr.Ir. Margo Pujiantara, MT. Kepala Laboraturium Instrumentasi, Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga Listrik yang telah bersedia menerima untuk menjadi bagian dari keluarga LIPIST B204 serta pembelajaran yang telah diberikan.
5. Bu Ratna Ika Selaku pembimbing dan rekan dalam pengerjaan tugas akhir ini yang bersedia menemani dalam pengerjaan tugas akhir ini hingga larut malam.
6. Seluruh rekan asisten LIPIST "B-204" yang membantu kelancaran tugas akhir ini Aulia, Memet, Alfian, Kemal, Rizka, Iqdam, Jatu, Ali, Ipul, Talitha, Kezia, Fahmi, Guntur, Ardi, Azha, Mas Viko dan Kak Isa.
7. Sahabat Pasukan Pagelaran Seni ITS EXPO 2014 Oryza, Novita, Muhazzib, Indri dan Faiz yang menyemangati.
8. Departemen Prokesma SUPER HIMATEKTRO yang bekerja paling rajin untuk membantu meluluskan dan mengurus masalah finansial mahasiswa teknik elektro. Baihaqi, Fathan, Fio, Nanda, Bang Velix, Fahmi, Mila, Rycho, Yakin, Adit, Agung, Rusdy

9. Seluruh rekan e53 “asik – asik jos” atas kebersamaan dan kerjasamanya selama ini.
10. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, serta rekan-rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Tak ada gading yang tak retak. Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL	HALAMAN
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 Masalah	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika	4
1.7 Relevansi	4

BAB 2 TEORI PENUNJANG

2.1 Energi Angin	5
2.2 Turbin Angin.....	7
2.2.1 Karakteristik Turbin Angin	7
2.2.2 Jenis – Jenis Turbin Angin	9
2.2.2.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal	10
2.2.2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal	11
2.3 <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>	12
2.4 <i>Rectifier</i> (Penyearah Gelombang)	12
2.5 Topologi <i>Hybrid Cuk Converter Boost Mode</i>	14
2.6 <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT)	18
2.7 <i>Perturb and Observe</i> (P&O).....	20
2.8 Metode <i>Optimum Relation-Based</i>	21
2.9 <i>Perturb and Observe</i> (P&O) Berbasis <i>Optimum Relation</i>	23
2.10 <i>Grid Connected</i> Inverter Tiga Fasa.....	25
2.10.1 Rangkaian Inverter Tiga Fasa	25

2.10.2	Teknik Modulasi	26
2.10.3	Kontrol <i>Grid</i> terhubung <i>Inverter</i>	27
2.10.4	Filter LC	29

BAB 3 PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG GRID

3.1	Konfigurasi Sistem Turbin Angin Terhubung Grid	31
3.2	Desain Turbin Angin	31
3.3	Pengujian Turbin Angin	33
3.4	Parameter <i>Hybrid Cuk Converter</i>	34
3.5	Desain Kontrol MPPT	35
3.5.1	Algoritma Perturb & Observe Konvensional	35
3.5.2	Algoritma Perturb & Observe berbasis <i>Optimum Relation</i>	35
3.6	Desain Grid <i>Connected Inverter</i> Tiga Fasa	36
3.6.1	Rangkaian Inverter Tiga Fasa	36
3.6.2	Kontrol Inverter	37
3.7	Desain Filter	40

BAB 4 HASIL SIMULASI SISTEM TURBIN ANGIN DAN ANALISIS DATA

4.1	Pengujian Sistem Turbin Angin dengan Variasi nilai Kecepatan Angin Menggunakan Kinerja Algoritma Perturb & Observe Berbasis Optimal	41
4.2	Pengujian Sistem Turbin Angin dengan Variasi nilai Kecepatan Angin Menggunakan Kinerja Algoritma Perturb & Observe Konvensional	47
4.3	Pengujian Sisi Kontrol Untuk Terhubung dengan Grid	48

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	50

DAFTAR PUSTAKA	51
BIODATA PENULIS	53
LAMPIRAN	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kurva Perbandingan antara C_p , C_T , dan λ untuk Berbagai kecepatan angin	9
Gambar 2.2	Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah gelombang penuh	13
Gambar 2.3	Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah setengah gelombang	13
Gambar 2.4	Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah satu fasa	14
Gambar 2.5	Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah tiga fasa	14
Gambar 2.6	Topologi <i>hybrid cuk converter</i>	15
Gambar 2.7	Topologi <i>hybrid cuk converter</i> ketika saklar on	15
Gambar 2.8	Topologi <i>hybrid cuk converter</i> ketika saklar off.....	16
Gambar 2.9	Kurva MPPT berdasarkan hubungan kecepatan rotor dan daya generator	19
Gambar 2.10	Diagram alir metode <i>perturb and observe</i>	21
Gambar 2.11	Kurva karakteristik daya turbin angin dalam fungsi arus DC untuk kecepatan angin	22
Gambar 2.12	Diagram alir Metode Hybrid Algoritma ORB dan P&O untuk MPPT	24
Gambar 2.13	Topologi standar inverter tiga fasa	25
Gambar 2.14	Topologi inverter VSi terhubung grid tiga fasa	27
Gambar 2.15	Skema kontrol inverter	28
Gambar 3.1	Skema sistem turbin angin terhubung grid tiga fasa	31
Gambar 3.2	Pemodelan turbin anign pada Simulink	32
Gambar 3.3	Kurva karakteristik daya mekanik terhadap putaran turbin	33
Gambar 3.4	Rangkaian inverter tiga fasa	35
Gambar 3.5	Rangkaian SPWM tiga fasa inverter	36
Gambar 3.6	Rangkaian kontrol inverter (VSI) tiga fasa	37
Gambar 3.7	Skema PLL pada MATLAB/Simulink	38
Gambar 3.8	Regulator tegangan DC-link	38
Gambar 4.1	Kurva Kecepatan angin (V_w) dalam pengujian	41

Gambar 4.3	Kurva Daya dan Tegangan Hasil Pengujian Titik Kontrol MPPT.....	44
Gambar 4.4	Perbandingan Daya Kinerja MPPT dengan Daya Pengujian menggunakan Resistor Variabel	45
Gambar 4.5	Perbandingan Daya Turbin, Daya Generator dan Daya Kinerja dari Algoritma	46
Gambar 4.6	Perbandingan Daya Refrensi hasil pengujian menggunakan resistor variabel dengan Daya Keluaran dari kinerja Algoritma P&O Konvensional	47
Gambar 4.7	Perbandingan Tegangan DC link Refrensi dibandingkan Tegangan DC link Hasil Simulasi menggunakan Algoritma P&O Berbasis Optimal Relation	48
Gambar 4.8	Perbandingan Tegangan DC link Refrensi dibandingkan Tegangan DC link Hasil Simulasi menggunakan Algoritma P&O Konvensional	49
Gambar 4.9	Perbandingan Daya Refrensi dari Pengujian dan Daya simulasi kinerja Algoritma P&O berbasis optimal relation	49
Gambar 4.10	Perbandingan Daya Refrensi dari pengujian dan Daya simulasi kinerja Algoritma P&O	50
Gambar 4.11	Tegangan fasa sistem turbin angin terhubung <i>grid</i>	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Tingkatan kecepatan angin dan kondisi ala yang terjadi.....	6
Tabel 2.2. Kondisi penyaklaran 3 fasa	26
Tabel 3.1. Data Turbin angin EGRA 1.7.....	27
Tabel 3.2. Parameter PMSG pada Turbin Angin	32
Tabel 3.3. Parameter Algoritma perturb and observe berbasis optimal relation	34
Tabel 3.4. Parameter Algoritma perturb and observe	34
Tabel 4.1. Daya Turbin Angin Maksimal dengan pendekatan nilai torsi dan kecepatan generator.....	42
Tabel 4.2. Perbandingan Daya Refrensi dan Daya Hasil Simulasi untuk Daya Keluaran Turbin Angin.....	43
Tabel 4.3. Perbandingan Daya Turbin dan Daya generator	43
Tabel 4.4. Perbandingan Daya Generator dan Daya Rectifier	44
Tabel 4.5. Perbandingan Daya refrensi dan Daya Keluaran dari Kinerja Algoritma	45
Tabel 4.6. Perbandingan Nilai Daya Turbin, Daya Generator dan Daya Kinerja dari MPPT	46
Tabel 4.7. Perbandingan Nilai Daya Pengujian dan Daya Kinerja Algoritma	48
Tabel 4.8. Perbandingan Nilai Daya Refrensi dan Daya Kinerja Algoritma P&O Berbasis Optimal Relation untuk keluaran menuju grid	50
Tabel 4.9. Perbandingan Nilai Daya Refrensi dan Daya Kinerja Algoritma P&O konvensional untuk keluaran menuju grid	50

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi Listrik adalah kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan sehari – hari, peningkatan kebutuhan energi listrik setiap tahunnya menuntut pihak penyedia listrik harus tanggap dalam menyelesaikan setiap permasalahan energi yang terjadi. Salah satu permasalahan mengenai energi listrik adalah ketersediaan sumber energi fosil sebagai bahan bakar pembangkitan yang setiap tahun menurun, hal ini membuat pengembangan sumber energi alternative baru dan terbarukan menjadi sebuah focus di era ini. Energi terbarukan adalah energi yang sumber bahan primernya dapat diambil secara mudah, dapat diperbarui dan digunakan kembali. Salah satu contoh dari energi terbarukan adalah energi angin [1].

Potensi energi angin untuk pembangkitan listrik di Indonesia sebesar 9.29 GW dan sekitar 0.5 GW yang dikembangkan, dalam hal ini butuh adanya optimalisasi dalam penggunaan potensi energi angin tersebut [2]. Energi angin diubah menjadi energi listrik dengan turbin angin, aplikasi turbin angin skala kecil saat ini telah banyak diterapkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang tersebar.

Turbin angin skala kecil biasanya dilengkapi dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) Karena memiliki beberapa kelebihan seperti mampu membangkitkan tenaga listrik yang handal karena tidak membutuhkan magnetisasi internal dan torsi yang sangat tinggi. Untuk mendapatkan keluaran daya yang maksimal dari turbin angin dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dibutuhkan rangkaian elektronika daya dimana sebuah topologi converter berdasarkan pada dioda penyearah bertingkat diaplikasikan pada turbin angin skala kecil karena faktor ekonomis dan keandalan yang cukup tinggi. Terdapat dua metode yang sering digunakan dalam turbin angin skala kecil yakni *Perturb and Observe* (P&O) dan *Optimum Relationship*[3].

MPPT berbasis metode *Perturb and Observe* (P&O) telah banyak digunakan dalam pencarian nilai keluaran daya maksimum. P&O merupakan metode yang mudah diimplementasikan pada sistem turbin angin karena memiliki algoritma yang sederhana[3]. Modifikasi P&O yang dilakukan dengan cara menambahkan strategi control

dalam perubahan nilai tegangan dc dan arus dc untuk diproses menggunakan *Optimal Relation Based Algorithm* sehingga dapat mengatasi perubahan daya keluaran akibat perubahan kecepatan angin. Pada tugas akhir ini akan didesain sebuah sistem turbin angin menggunakan control algoritma *Perturb & Observe* berbasis *Optimum Relation* pada MPPT sehingga mampu menghasilkan daya keluaran maksimum yang tersambung dengan grid.

1.2. Permasalahan

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana desain sebuah sistem turbin angin menggunakan kontrol algoritma *Perturb & Observe* berbasis *Optimum Relation* pada MPPT sehingga dicapai daya keluaran maksimum untuk disambungkan ke grid?
2. Bagaimana perbandingan daya hasil keluaran yang diperoleh untuk sistem turbin angin menggunakan metode konvensional P&O dan P&O berbasis *Optimum Relation*?

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah.

1. Pemodelan Sistem Turbin angin ini tidak menggunakan sensor mekanik
2. Parameter dalam pemodelan turbin angin didapatkan berdasarkan riset yang telah dilakukan sebelumnya.
3. Pemodelan dan Simulasi menggunakan MATLAB 2015a

1.4. Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Desain sistem turbin angin menggunakan *Perturb & Observe* berbasis *Optimum Relation* untuk memperoleh daya keluaran maksimum sehingga dapat tersambung dengan *grid*.
2. Membandingkan daya hasil keluaran pada sistem turbin angin metode konvensional P&O dan P&O berbasis *Optimum Relation*.

1.5. Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Mengumpulkan buku, *paper*, serta jurnal yang berkaitan dengan *maximum power point tracing* pada turbin angin dan algoritma *perturb and observe*, *permanent magnet synchronous generator* turbin angin.

2. Pengumpulan Data

Pada penelitian ini akan dilakukan pengambilan data kecepatan angina yang berada di Nganjuk dan turbin angina yang sudah terpasang di Ciheras. Data yang diambil berupa data kecepatan angina, besarnya nilai tegangan dan arus pada keluaran *permanent magnet synchronous generator* turbin angin.

3. Desain Sistem dan Perancangan MPPT dengan Algoritma P&O

Pada tahap ini dilakukan desain sistem beserta control MPPT dengan Algoritma P&O untuk mengatur control dari switch pada DC-DC konverter. Simulasi menggunakan simulink MATLAB dan parameter yang digunakan merupakan hasil dari pengumpulan data di Nganjuk dan pemodelan sistem turbin angin.

4. Pengujian desain sistem untuk terhubung ke grid dan analisis

Setelah desain sistem dapat bekerja maka akan dilakukan integrasi dengan jaringan jala – jala (*grid*) tiga fasa. Integrasi ini membutuhkan beberapa persyaratan yakni tegangan yang konstan dan frekuensi yang stabil. Selain itu akan dibandingkan penggunaan metode konvensional P&O dan *modified* P&O terhadap keluaran daya untuk sistem yang terhubung dengan jala – jala.

5. Kesimpulan

Dari tugas akhir ini akan dibuat desain sistem turbin angin menggunakan algoritma P&O yang terhubung dengan jala – jala (*grid*) dan perbandingan penggunaan metode konvensional P&O dan *modified* P&O.

6. Penyusunan buku tugas akhir

Sebagai hasil dari penelitian akan dilakukan penyusunan buku tugas akhir guna memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah tugas akhir.

1.6. Sistematika

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima BAB dengan uraian sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang masalah, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi dan manfaat
2. BAB 2 berisikan teori penunjang, yang membahas tentang algoritma *perturb & observe* berbasis *optimum relation*, turbin angin, *mppt* dan *hybrid cuk converter*.
3. BAB 3 berisikan perancangan dan pemodelan turbin angin yang membahas mengenai Bagaimana pemodelan tiap bagian dari turbin angin, *PMSG*, *rectifier*, *converter*, *inverter* dan kontrol sistem ke *grid*.
4. BAB 4 berisikan pengujian dan analisis data, yang membahas tentang pengujian pemodelan turbin angin, *pengujian Hybrid Cuk Converter Boost Mode* dan pengujian turbin sistem turbin angin terhubung dengan *grid*.
5. BAB 5 berisikan Kesimpulan dan Saran.

1.7. Relevansi dan Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat terhadap perkembangan sistem turbin angina dengan control MPPT yang menggunakan *Perturb & Observe* berbasis *Optimum Relation* untuk konverternya sehingga dapat terhubung dengan *grid* tiga fasa. Diharapkan dengan modifikasi pada algoritma P&O, MPPT akan menghasilkan daya keluaran yang lebih optimal dan kecepatan pencarian nilai daya maksimum yang baik.

BAB 2

TEORI PENUNJANG

Dalam bab ini akan dijelaskan teori-teori terkait mengenai topik tentang implementasi algoritma *perturb & observe* berbasis optimum *relation* pada turbin angin PMSG untuk mendapatkan daya yang optimal. Bab ini terdiri dari beberapa sub-bab, yaitu energi angin, turbin angin, *maximum power point tracking*, *permanent magnet synchronous generator (PMSG)*, *rectifier*, *boost converter*, dan *perturb & observe* berbasis optimum *relation*.

2.1. Energi Angin

Energi angin adalah salah satu jenis sumber energi terbarukan yang potensial untuk menghasilkan energi listrik melalui proses konversi. Energi angin merupakan bentuk tidak langsung dari energi matahari karena proses pembentukan angina bermula dari adanya perbedaan tekanan di permukaan bumi menyebabkan udara bergerak dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah, perbedaan tekanan atmosfer ini diakibatkan pemanasan permukaan bumi oleh panas matahari yang tidak merata.

Pemanfaatan energi angin untuk pembangkitan tenaga listrik saat ini menjadi fokus karena potensinya yang sangat besar belum dimaksimalkan, menurut *World Wind Energy Association (WWEA)* energi angin yang terpasang di dunia mencapai 456 GW pada tahun 2016. Hal ini disebabkan energi angin memiliki keunggulan dalam proses konversinya yang bersih dan ramah lingkungan, selain itu bila dibandingkan dengan energi baru dan terbarukan yang lain maka energi angina unggul dalam besarnya biaya investasi perKWhnya.

Mengacu pada kebijakan energi nasional di Indonesia, pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) ditargetkan 250 MW pada tahun 2015. Hal ini dapat tercapai jika melihat potensi Indonesia mengenai energi angina mencapai 9.29 GW dan potensi tersebut berada di pesisir selatan Jawa, Sumatera serta pulau – pulau di Indonesia bagian timur. Hasil penelitian Lentera Angin Nusantara pada tahun 2012 menunjukkan besarnya potensi energi angin di kepulauan timur Indonesia sangat tinggi dan hal ini berbanding

terbalik dengan ketersediaan kebutuhan listrik di daerah tersebut yang masih sangat minim.

Proses konversi energi angina menjadi energi listrik melalui dua tahapan yakni bermula dari energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor kemudian menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah sebagai berikut :

- a. Rotor (kincir), rotor turbin sangat bervariasi jenisnya, diameter rotor akan berbanding lurus dengan daya listrik. Semakin besar diameter semakin besar pula listrik yang dihasilkan.
- b. Kecepatan angin, kecepatan angina akan mempengaruhi kecepatan putaran rotor yang akan menggerakkan generator.
- c. Jenis generator, generator terbagi dalam beberapa karakteristik yang berbeda dan generator yang cocok untuk sistem konversi energi angina adalah generator yang dapat menghasilkan arus listrik pada putaran yang rendah.

Terdapat syarat dan kondisi untuk menghasilkan energi listrik jika dilihat dari kecepatan anginnya. Tingkat kecepatan angina 10 meter di atas permukaan tanah berdasarkan standar Puslitbang BMKG di tahun 2011 beserta kondisi alam disajikan dalam tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Tingkatan kecepatan angin dan kondisi alam yang terjadi.

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan tanah		
Kelas	Kecepatan (m/s)	Kondisi Alam di daratan
1	0 – 0.2	Tidak terjadi apa – apa
2	0.3 – 1.5	Angin tenang, asap lurus keatas
3	1.6 – 3.3	Asap bergerak mengikuti arah angina
4	3.4 – 5.4	Daun di ranting bergoyang pelan
5	5.5 – 7.9	Ranting pohon bergoyang dan kerikil bergerak

Tabel 2.1 Tingkatan kecepatan angin dan kondisi alam yang terjadi.(lanjutan)

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan tanah		
Kelas	Kecepatan (m/s)	Kondisi Alam di daratan
6	8.0 – 10.7	Ranting pohon bergoyang kencang dan bendera berkibar
7	10.8 – 13.8	Ranting pohon besar bergoyang dan air genangan berombak
8	13.9 – 17.1	Ujung pohon melengkung dan hembusan angin tedengar di telinga
9	17.2 – 20.7	Mampu mematahkan ranting pohon besar
10	20.8 – 24.4	Dapat merubuhkan pohon
11	24.5 – 28.4	Menimbulkan kerusakan parah
12	28.5 – 32.6	Tornado

Berdasarkan tabel 2.1 untuk menghasilkan energi listrik dengan turbin angin berjari – jari 1 meter klasifikasi yang sesuai adalah kecepatan angin kelas 3 sampai kelas 8. Variasi perubahan kecepatan angin dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor yang memberikan dampak signifikan terhadap perubahan tersebut antara lain pemanasan matahari terhadap permukaan bumi, gaya Coriolis dan kondisi geografis.

2.2. Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang digunakan untuk menangkap energi kinetik angin sebelum dikonversi menjadi energi listrik. Angin yang melewati area dari sudu bilah turbin angin akan memutar angin.

2.2.1. Karakteristik Turbin Angin

Proses konversi energi dari kecepatan angin ke daya mekanik (P_m) dan produksi torsi (T_m) dapat diberikan melalui persamaan (2.1) dan (2.2) berikut :

$$Pm = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p \quad (2.1)$$

$$Tm = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_w^2 C_T \quad (2.2)$$

Dimana :

- C_p adalah koefisien daya
- C_T adalah koefisien torsi
- ρ adalah kerapatan udara (kg/m^3)
- πR^2 adalah area Sapuan rotor turbin angin (m^2)
- v_w adalah kecepatan angin

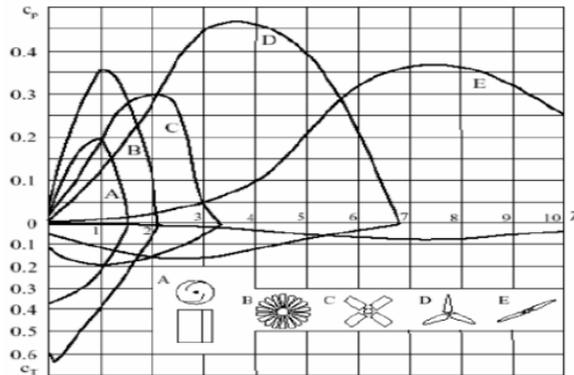
Koefisien daya merupakan perbandingan antara daya mekanik pada *shaft* turbin terhadap daya yang terdapat pada angin tersebut. Faktor yang mempengaruhi nilai daya mekanik antara lain jumlah *blade*, bagian *airfoil*, permukaan *blade* (bentuk dan sudut). Ketika kecepatan angin berubah maka kecepatan rotasi ω_m harus mencapai nilai C_p terbaik. Hal ini berarti kecepatan rotasi (ω_m) dan kecepatan angin (v_w) harus digabung dalam sebuah parameter sebelum sebuah kurva dapat digambarkan. Variabel ini merupakan perbandingan antara $R\omega_m$ terhadap kecepatan angin v_w dapat disebut perbandingan kecepatan ujung λ (*tip speed ratio*) yang diberikan pada persamaan (2.3) [1].

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{v_w} \quad (2.3)$$

Hubungan antara C_p, C_T , dan λ untuk jenis turbin angin yang berbeda diperlihatkan pada gambar 2.1. Dari gambar tersebut didapatkan bahwa C_p dan C_T merupakan fungsi dari perbandingan kecepatan *shaft* terhadap angin yang disebut sebagai kecepatan angin ujung yang hubungannya diberikan pada persamaan (2.4).

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.4)$$

Dari gambar 2.1 terdapat satu titik dimana nilai koefisien daya mencapai harga maksimum dan tertinggi pada tipe 3 *blade*. Pada sistem operasi kecepatan tetap maka kecepatan turbin ω_m dijaga tetap. Sehingga karena kecepatan angina berubah – ubah, maka perbandingan kecepatan ujung dan koefisien dayanya pun akan ikut berubah. Karena karakteristik C_p yang hanya memiliki satu nilai maksimum pada nilai tertentu maka koefisien daya ini hanya akan bernilai maksimum pada satu nilai kecepatan angin.



Gambar 2. 1 Kurva perbandingan antara C_p , C_r , dan λ untuk berbagai jenis turbin angin [Kartiwa I,2008]

Berbeda dengan operasi pada kecepatan tak tetap pada penelitian yang akan dilakukan, pada sistem operasi kecepatan tak tetap sistem dapat menyesuaikan perubahan kecepatan angin terhadap kecepatan turbin sehingga sistem akan selalu bekerja pada titik puncak koefisien daya. Hal ini dapat memaksimalkan pembangkitan daya untuk setiap nilai kecepatan angin yang berbeda, untuk mendapatkan daya puncak maka rotor harus dijaga pada kondisi *tip speed ratio* optimal yang berarti kecepatan angular rotor harus berubah secara proporsional terhadap kecepatan angin. Karena kecepatan angular rotor tergantung pada frekuensi generator maka *tip speed ratio* optimal daya rotor maksimum yang tersedia bervariasi sesuai dengan frekuensi generator.

2.2.2. Jenis – jenis Turbin Angin

Turbin angin digunakan pertama kali pada alat penggiling gandum untuk pembuatan tepung yang disebut *windmill*. Dengan berkembangnya teknologi, pemanfaatan turbin angin digunakan untuk mendapatkan energi listrik dengan cara mengkopelnya dengan generator.

Klasifikasi turbin angin berdasarkan jenis baling – baling turbin angin terhadap sumbu putarnya dibagi menjadi dua jenis turbin angin sumbu horizontal (TASH) dan turbin angin sumbu vertical (TASV). Kedua jenis turbin angin ini memiliki keunggulan dan kelemahan masing – masing dan penggunaannya disesuaikan sesuai kebutuhan.[4]

2.2.2.1. Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin horizontal adalah bentuk umum dari turbin angin pada awalnya, desain yang mirip dengan kincir angin ini memiliki *blade* yang mirip *propeller* dan berputar pada sumbu vertical.

Turbin angin horizontal memiliki poros rotor dan generato pada puncak *tower* dan harus iarahkan ke arah angin bertiup. Turbin yang berukuran kecil mengarah ke angin dengan bantuan *wind plane* yang diletakkan pada rotor, sedangkan untuk turbin yang berukuran besar dilengkapi dengan sensor yang terhubung motor servo sehingga dapat mengarahkan *blade* sesuai dengan arah angin. Untuk turbin yang berukuran besar biasanya memiliki gearbox yang merubah kecepatan putar rotor untuk ditransfer ke generator menjadi lebih cepat.

Karena tower penyangga untuk turbin angin jenis ini menghasilkan turbulensi maka turbin biasanya mengarah ke arah angin dari depan (*Upwind Turbine*). *Blade* turbin dibuat kaku untuk menghindari dampak terdorongnya kebelakang saat terjadi hembusan angin yang kencang. Penempatan *blade* juga harus diperhatikan agar saat terjadi arah angin dari belakang (*Downwind Turbine*) , *blade* diperbolehkan untuk dapat melengkung sehingga mampu bertahan untuk tidak patah saat terkena hembusan kencang yang berasal dari arah belakang.

Kelebihan turbin angin sumbu horizontal antara lain adalah :

- a) Pemasangannya pada tower yang tinggi memungkinkan untuk mendapatkan kekuatan angin yang besar. Pada beberapa area, setiap 10 meter kenaikan kekuatan kecepatan angin yang terjadi hingga 20% dan peningkatan daya hingga 34 %.
- b) Efisiensi yang tinggi akibat *blade* yang selalu tegak lurus terhadap arah angin menerima daya sepanjang

putaran. Sebaliknya pada turbin vertical, melibatkan gaya timbal balik yang membutuhkan permukaan *airfoil* untuk mundur melawan angin sebagai bagian dari siklus. *Backtracking* melawan angin menyebabkan efisiensi lebih rendah.

Sedangkan kekurangan untuk turbin angin sumbu horizontal adalah :

- c) Dibutuhkan konstruksi tower yang besar untuk menyangga beban *blade*, *gearbox* dan generator.
- d) Komponen dari turbin angin harus diangkat ke posisinya yang tinggi saat pemasangan, serta penambahan kontrol *yaw* sebagai mekanisme untuk mengarahkan *blade* ke arah angin.[4]

2.2.2.2. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertical memiliki poros rotor yang vertical. Desain ini dirancang untuk penempatan rotor agar tidak perlu mengarahkan ke arah angin bertiup, desain ini sesuai untuk daerah dimana arah angin sangat variatif atau memiliki turbulensi.

Dengan sumbu vertikal, generator dan komponen primer lainnya dapat ditempatkan dekat dengan permukaan tanah, sehingga jarang menggunakan struktur bangun menara sebagai penyangga dan hal ini menyebabkan pemeliharaan yang relatif mudah, kekurangan dari turbin angin jenis ini adalah efisiensi yang cenderung lebih rendah dibandingkan turbin angin sumbu horizontal akibat kecepatan angin dekat permukaan tanah yang relative lebih rendah.

Kelebihan turbin angina sumbu vertikal antara lain adalah:

- a) Tidak diperlukan mekanisme *yaw* (penahan lengkungan pada *blade* saat terdapat hembusan angina yang kencang)
- b) Pemeliharaan yang relative lebih mudah akibat peletakannya yang dekat dengan permukaan tanah.

Kelebihan turbin angina sumbu vertikal antara lain adalah:

- c) Efisiensi yang lebih rendah dibandingkan turbin angin sumbu horizontal akibat kecepatan angina di permukaan tanah relative lebih rendah.[4]

2.3. *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Generator merupakan mesin berputar yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan prinsip medan elektromagnetik. Perpotongan antara belitan dengan medan elektromagnetik dapat menghasilkan induksi yang selanjutnya terbentuk energi listrik pada belitan. Jenis generator dapat diklasifikasikan berdasarkan sinkronisasi putaran listrik dan mekanis, yakni generator asinkron dan sinkron.

Generator sinkron adalah generator yang memiliki frekuensi listrik dan mekanis sama, sehingga putaran listrik akan sama cepat dengan putaran mekanis. Pada generator sinkron dibutuhkan eksitasi berupa sumber arus searah untuk memunculkan medan magnet. Untuk generator sinkron dengan magnet permanen tidak membutuhkan sistem eksitasi karena sumber eksitasi disediakan oleh magnet permanen pada rotor, hal ini berdampak daya reaktif yang dikerluarkan oleh medan magnet tersebut menjadi tetap. Keuntungan dalam menggunakan PMSG ini adalah kestabilan di sisi tegangan, biaya yang rendah, ketahanan dan kesederhanaan sehingga sesuai untuk pembangkitan daya menggunakan turbin angin skala kecil.

Prinsip generator sinkron mengenai hubungan frekuensi dan kecepatan ditunjukkan oleh persamaan (2.5).

$$N_s = N_r = \frac{120f}{p} \quad (2.5)$$

N_r = kecepatan medan rotor (rpm)

N_s = kecepatan medan stator (rpm)

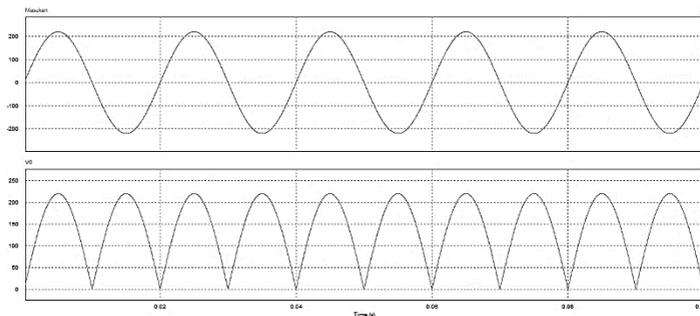
p = jumlah kutub

f = frekuensi (Hz)

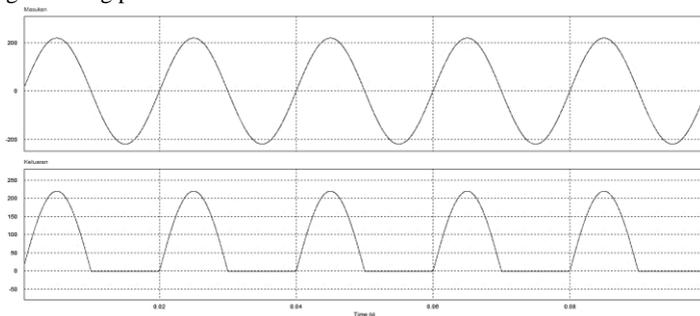
2.4. *Rectifier*

Rectifier atau penyearah gelombang merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan sumber masukan arus bolak – balik dalam bentuk sinusoida menjadi tegangan keluaran dalam bentuk searah yang tetap. Jenis sumber tegangan masukan untuk mencatu *rectifier* dapat digunakan tegangan bolak – balik satu fasa atau tiga fasa. *Rectifier*

dapat melakukan kerja penyearahan setengah gelombang maupun penyearahan gelombang penuh. Pembebanan pada rangkaian penyearah daya umumnya dipasang beban resistif atau resistif-induktif dimana efek dari beban ini akan mempengaruhi kualitas tegangan keluaran yang dihasilkan *rectifier*. Gambar tegangan masukan dan hasil penyearahan gelombang penuh dan setengah gelombang dapat dilihat pada gambar 2.2 dan gambar 2.3

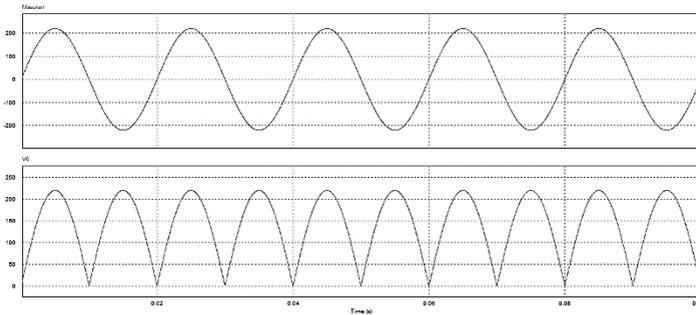


Gambar 2. 2 Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah gelombang penuh

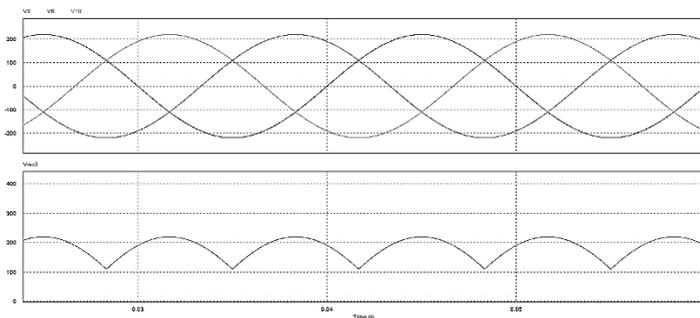


Gambar 2. 3 Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah setengah gelombang

Rectifier juga dapat diklasifikasikan berdasar jenis sumber masukan yang akan disearahkan. Pembagian berdasar jenis sumber masukan ini dibagi menjadi dua yakni penyearah satu fasa dan penyearah tiga fasa. Bentuk tegangan masukan dan keluaran penyearah satu fasa dan tiga fasa diberikan pada gambar 2.4 dan 2.5.



Gambar 2. 4 Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah satu fasa.



Gambar 2. 5 Tegangan masukan (atas) dan keluaran (bawah) penyearah tiga fasa.

Pembagian penyearah ini juga dapat berdasarkan jenis saklar penyearah yang terdiri dari tiga jenis yakni penyearah tidak terkontrol, penyearah semi terkontrol dan penyearah terkontrol penuh. Perbedaan ini terletak pada penggunaan jenis diode, dimana untuk jenis tidak terkontrol semua diode yang digunakan adalah diode biasa, untuk semi terkontrol menggunakan perpaduan diode jenis biasa dan *thyristor* untuk penyearah terkontrol semua diode menggunakan jenis *thyristor*. [5]

2.5. Topologi *Hybrid Cuk Converter Boost Mode*

Dalam merancang sebuah MPPT, salah satu yang harus diperhitungkan adalah memilih DC – DC *converter* yang efisien. Dari topologi yang ada, yakni *cuk* dan *buck-boost converter* dapat menaikkan atau menurunkan tegangan input. Meskipun

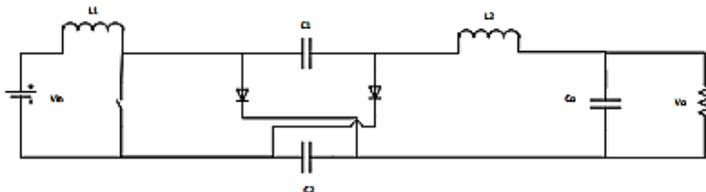
konfigurasi *buck-boost* lebih murah, tapi memiliki kelemahan berupa respon transien yang buruk. *Cuk converter* juga memiliki kelemahan berupa *switching losses* yang rendah.

Disisi lain, *cuk converter* memiliki kelemahan berupa nilai penaikkan dan penurunan yang tidak dapat dicapai untuk nilai yang ekstrim karena membutuhkan *duty cycle* yang tinggi dan dapat menyebabkan kegagalan *switching frequency* karena waktu konduksi yang singkat pada diode atau transistor.

Untuk menyelesaikan permasalahan ini, sebuah penyaklaran sederhana dengan dua struktur kapasitor untuk menaikan tegangan dimodelkan. Sebuah topologi menaikan tegangan dimasukkan pada topologi *cuk converter* untuk menghasilkan rasio tegangan yang tinggi. Penggabungan ini menghasilkan topologi baru yang bernama *Hybrid Cuk Converter Boost Mode*[6]. Adapun persamaan rasio tegangannya adalah :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1+D}{1-D} \quad (2.6)$$

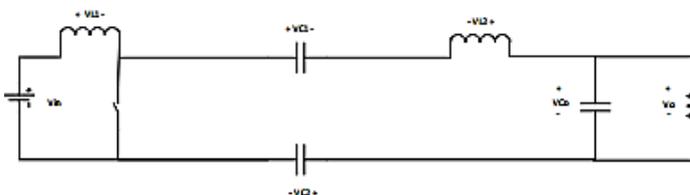
Topologi *hybrid cuk converter* diberikan pada gambar 2.6 sebagai berikut.



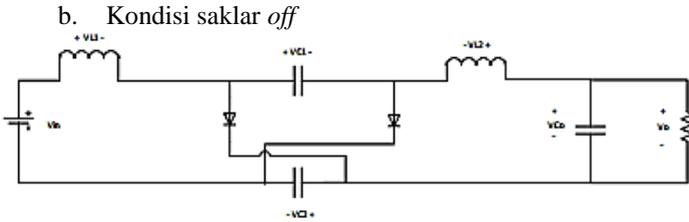
Gambar 2. 6 Topologi *hybrid cuk converter*.

Analisis rangkaian *hybrid cuk converter boost mode* dapat dilakukan pada dua kondisi penyaklaran yakni kondisi saklar *on* dan kondisi saklar *off*.

a. Kondisi saklar *on*



Gambar 2. 7 Topologi *hybrid cuk converter* ketika saklar *on*



Gambar 2.8 Topologi *hybrid cuk converter* ketika saklar *off*

Dalam mendapatkan persamaan hubungan tegangan input dan output untuk topologi *hybrid cuk converter boost* (2.6) maka analisa dilakukan melalui persamaan (2.7), (2.8) dan (2.9).

$$(V_{in}D)T_s + (V_{in} - V_c)(1 - D)T_s = 0 \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) adalah keadaan yang terjadi untuk L_1 dan didapatkan dari dua kondisi tersebut, sedangkan untuk L_2 persamaan yang digunakan adalah (2.8)

$$\begin{aligned} (V_o - 2V_c)DT_s + (V_o - V_c)(1 - D)T_s &= 0 \\ (V_o - V_c)(1 - D) &= (2V_o - V_oD) \\ V_o &= (V_c + V_cD) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Untuk persamaan antara tegangan kapasitor C_1 dan C_2 dengan tegangan *input*.

$$V_c = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (2.9)$$

Dari persamaan diatas, maka hubungan antara tegangan masukan dan tegangan output untuk topologi *hybrid cuk converter* diberikan oleh persamaan (2.10) berikut :

$$\begin{aligned} V_o &= V_c(1 + D) \\ V_o &= V_{in} \frac{(1+D)}{(1-D)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

c. Parameter komponen

- Induktor L_1

P_o adalah daya keluaran, P_{in} adalah daya masukan.

$$P_{in} = P_o$$

$$V_{in}I_{L1} = \frac{V_o^2}{R_o}$$

$$I_{L1} = \frac{V_{in}^2 \frac{(1+D)^2}{(1-D)^2}}{V_{in}R_o}$$

$$I_{L1} = \frac{(1+D)^2 V_{in}^2}{(1-D)^2 R_o} \quad (2.11)$$

Dimana V_{in} adalah tegangan masukan dengan persamaan berikut

$$V_{in} = L_1 \frac{di}{dt}$$

$$\Delta i = \frac{V_i DT}{L_1} \quad (2.12)$$

Kondisi yang digunakan pada induktor L_1 adalah CCM (*Continuous Conduction Mode*), sehingga dari persamaan 2.11 dan persamaan 2.12 didapatkan :

$$L_1 > \frac{DT(1+D)^2}{R_o(1-D)^2} \quad (2.13)$$

- Induktor L_2

P_o adalah daya keluaran, P_c adalah daya masukan.

$$P_c = P_o$$

$$V_c I_{L2} = \frac{V_o^2}{R_o}$$

$$\frac{V_{in}}{1-D} I_{L2} = \frac{V_{in}^2 \frac{(1+D)^2}{(1-D)^2}}{R_o}$$

$$I_{L2} = \frac{(1+D)^2 V_{in}}{(1-D) R_o} \quad (2.14)$$

Dimana V_o adalah tegangan keluaran dengan persamaan berikut:

$$\frac{V_{in}}{(1-D)} + \frac{V_c + V_o}{(1-D)} = \frac{V_L}{d_t} = \frac{L_2 d_i}{d_t}$$

$$\Delta i = \frac{V_i(2+D)T}{L_2} \quad (2.15)$$

Kondisi yang digunakan pada induktor L_2 juga merupakan CCM, sehingga nilai inductor L_2 didapatkan dari persamaan 2.14 dan persamaan 2.15 yakni :

$$L_2 > \frac{(2+D)(1-D)R_o T}{(1+D)^2} \quad (2.16)$$

- Kapasitor C_1 dan C_2

$$\Delta Q_c = C \Delta V_c$$

$$I_{L2} \Delta t = C \Delta V_c$$

$$C = \frac{I_{L2} \Delta t}{\Delta V_c}$$

$$C = \frac{V_o^2 (1-D) T D}{R_o V_{in} \Delta V_c} \quad (2.17)$$

- Kapasitor C_0

$$\Delta Q_o = C_o \Delta V_o$$

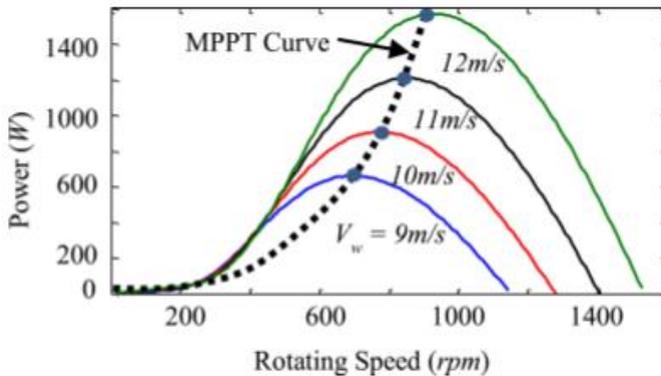
$$I_o \Delta t = C_o \Delta V_o$$

$$C = \frac{V_o D T}{R_o \Delta V_o} \quad (2.18)$$

2.6. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Efisiensi konversi energi angin sangat dipengaruhi oleh karakteristik turbin angin yang bersifat non linear dan tergantung pada kecepatan angin. Konversi energi angin dapat optimum maka sistem harus beroperasi pada titik daya maksimum. Perubahan kecepatan angin dan karakteristik turbin akan menggeser titik daya maksimum, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.9. Walaupun kecepatan angin bervariasi, turbin angin harus tetap dapat mengekstrak energi angin secara maksimal sehingga diperlukan *maximum power point tracking (MPPT)* yang

berfungsi untuk mencari titik daya maksimum dan mempertahankan sistem konversi energi angina tetap optimum walaupun terjadi perubahan kecepatan angina antara $V_{cut\ in}$ dan V_{rated} . Daya keluaran mekanik pada kecepatan angina dipengaruhi oleh *tip speed ratio* turbin. Efisiensi konversi energi tubin akan maksimal jika nilai *tip speed ratio* sehingga perubahan kecepatan angin harus diikuti dengan perubahan kecepatan rotor turbin untuk mempertahankan *tip speed ratio* pada titik optimal [1].



Gambar 2. 9 Kurva MPPT berdasarkan hubungan kecepatan rotor dan daya generator [7].

Pada kecepatan angin tertentu, daya maksimum akan didapatkan jika generator berputar pada kecepatan tertentu pula. Oleh karena itu, MPPT pada sistem *variable speed wind turbine* dilakukan dengan mengubah kecepatan rotasi generator terhadap setiap perubahan kecepatan angin sehingga daya yang dihasilkan akan maksimum. Metode yang digunakan pada MPPT bervariasi sesuai dengan algoritma yang digunakan, dimana tujuan dari algoritma ini adalah menemukan titik optimal yang berarti kecepatan tidak terlalu jatuh namun arus yang dihasilkan dalam kondisi maksimal. Jika kecepatan terlampaui rendah hal ini akibat pembebanan berlebih saat torsi maksimal telah dicapai dan torsi akan menurun diikuti kecepatan yang menurun. Sedangkan untuk pengaturan beban dilakukan oleh konverter *DC to DC* sebagai perantara.

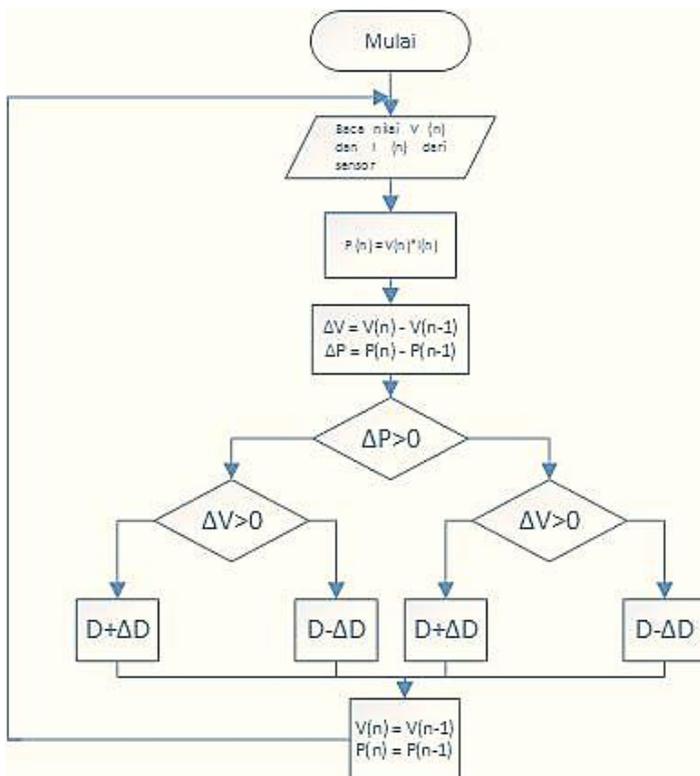
2.7. *Perturb and Observe (P&O)*

Metode P&O seringkali disebut sebagai metode *hill climbing search* (HCS). Metode ini bekerja berdasarkan pada perubahan variabel kontrol dalam ukuran kecil dan mengamati fungsi target hingga *slope* mencapai nol. Metode P&O tidak membutuhkan karakteristik turbin angin dan metode ini bersifat sederhana juga fleksibel. Metode ini mengatur dan mengamati setiap perubahan yang terjadi. Perubahan ditentukan pada *step-size* (ΔD) tertentu dan waktu tertentu. Besar nilai daya listrik yang dihasilkan akan dibandingkan dengan daya listrik sebelumnya. Hal ini menentukan variabel *step size* (D) berikutnya. Jika besar nilai daya yang dihasilkan meningkat maka variabel *step-size* (ΔD) akan bernilai tetap, jika sebaliknya nilai daya yang dikeluarkan menurun maka *variabel step-size* (ΔD) akan berubah. Diagram alir kerja dari metode ini dapat melihat pada gambar 2.10.

Metode P&O merupakan metode yang paling sederhana dan mudah diaplikasikan diantara metode lainnya. Namun metode ini memiliki keterbatasan, tingkat efisiensi dari metode ini bergantung pada besaran variabel *step-size* (ΔD). Apabila *step-size* (ΔD) besar maka sistem akan cepat menuju pada nilai maksimum, tetapi akan menghasilkan fluktuasi yang besar saat nilai mendekati titik optimum dan menghasilkan osilasi pada daya yang dihasilkan, sehingga efisiensi rendah. Jika menggunakan *step-size* (ΔD) yang kecil maka efisiensi sistem akan lebih baik, namun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai maksimum menjadi lambat sehingga sistem menjadi tidak responsif.[3]

Strategi kontrol MPPT menggunakan P&O ini termasuk dalam kategori yang *sensorless* dimana penggunaannya tidak tergantung akan pengaruh parameter turbin angin atau generator, meskipun kelemahan dari metode ini respon yang cenderung lambat terhadap perubahan kecepatan angin yang cepat terutama untuk sistem turbin dengan inersia yang tinggi. Maka dari itu perlu diperlukan metode lain yang mendukung untuk mengatasi permasalahan tersebut. Metode lain tersebut harus mampu mengatasi perubahan kecepatan angin lewat Analisa paramameter

kurva yang dioptimalkan sehingga perubahan kecepatan angin dapat ditemukan titik optimalnya dengan cepat.

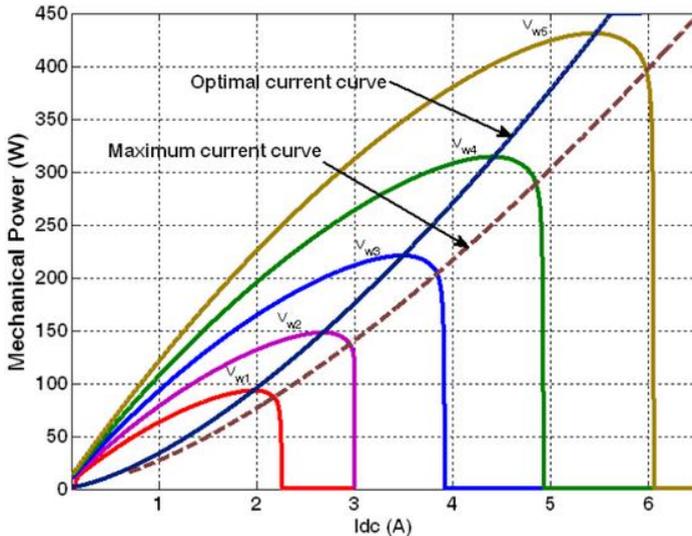


Gambar 2. 10 Diagram alir metode *perturb and observe*

2.8. Metode *Optimum Relation-Based*

Untuk mengatasi kelemahan yang terdapat pada algoritma *Perturb and Observe* konvensional maka diajukan suatu metode kontrol MPPT yang tidak memperhitungkan sensor mekanis dan dapat ditentukan melalui hubungan antara tegangan dan arus DC pada titik operasi optimum. Kurva hubungan arus dan daya mekanis pada gambar 2.11 menunjukkan bahwa titik daya maksimum dapat dicari melalui kurva arus optimal di setiap waktu. Hal ini juga menunjukkan bahwa setiap kecepatan angin

memiliki titik arus maksimum yang merepresentasikan keadaan torsi maksimal pada turbin angin. Jika pada suatu kejadian sistem bekerja melebihi nilai arus batas maka sistem akan berhenti untuk melambat dan pembangkitan akan berhenti secara tiba – tiba. Maka dari itu, nilai arus akan menjadi acuan untuk kecepatan angin tertentu dan tidak menyebabkan nilainya berlebih pada kurva arus untuk melanjutkan pembangkitan.



Gambar 2. 11 Kurva karakteristik daya turbin angin dalam fungsi arus DC untuk kecepatan angin.

Berbagai penelitian membuktikan bahwa untuk mendapatkan hubungan antara arus DC optimum dan tegangan DC dapat dilakukan pendekatan dengan persamaan berikut :

$$I_{dc-opt} = kV_{dc}^2 \quad (2.19)$$

$$k = \frac{I_{dc-peak}}{V_{dc-peak}^2} \quad (2.20)$$

Dimana $I_{dc-peak}$ dan $V_{dc-peak}$ adalah arus dan tegangan yang berhubungan pada kurva titik daya maksimum kecepatan angin tertentu. Kurva arus optimum didapatkan ketika nilai k diketahui dan dapat diimplementasikan hasilnya dengan metode ORB (*Optimum Relation-Based*). Kelemahan dari metode algoritma ini

adalah inisiasi untuk mendapatkan nilai k selain itu rugi daya yang terjadi pada sistem diharapkan tidak mempengaruhi sehingga perhitungan nilai k dapat berjalan baik.

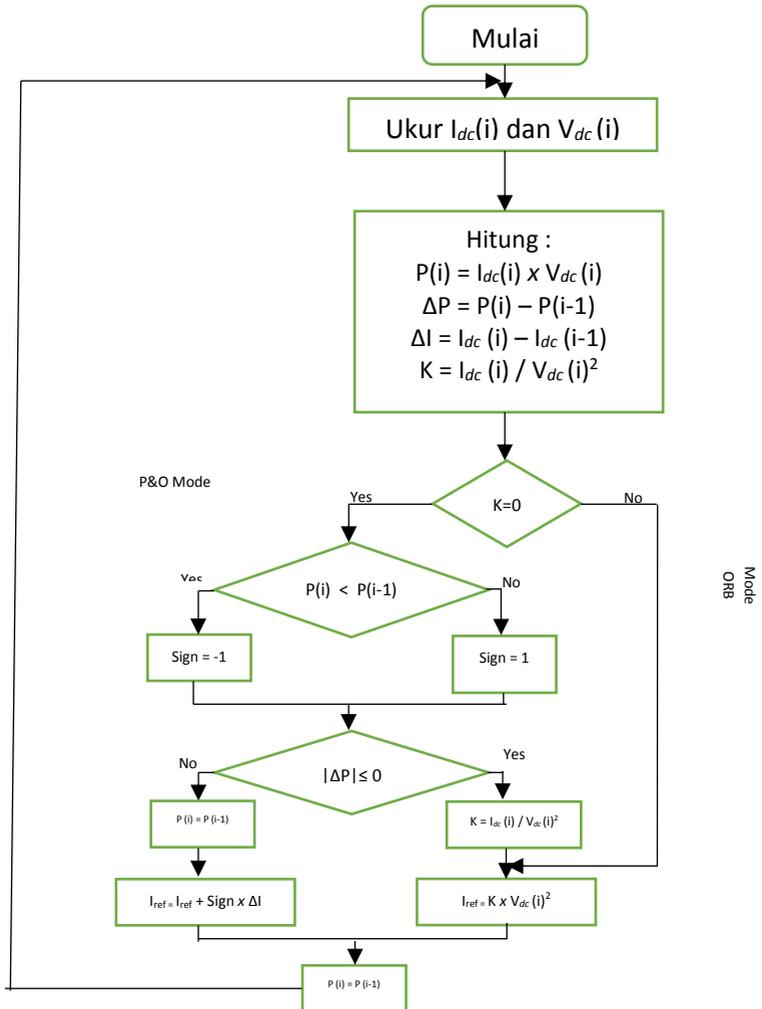
Dalam mengatasi permasalahan tersebut, solusi sederhana dan efektif untuk mengatasi kekurangan metode ORB konvensional adalah memadukan dengan metode lain yang mampu menemukan nilai k seperti algoritma konvensional P&O.[3]

2.9. *Perturb and Observe (P&O) Berbasis Optimum Relation*

Untuk mengatasi kelemahan suatu metode algoritma dalam pencarian titik daya maksimal dalam turbin angin dapat digunakan perpaduan menggunakan metode lain. Salah satunya adalah metode algoritma *Perturb & Observe (P&O)* yang dipadukan dengan metode *Optimum Relation Based (ORB)*. Gabungan dua metode yang diajukan bertujuan untuk memaksimalkan keluaran daya yang dihasilkan turbin angin, metode P&O digunakan untuk menghitung nilai k pada sebagai acuan pada metode ORB untuk mendapatkan titik arus optimal sehingga titik daya maksimum turbin angin dapat dicapai menggunakan metode ORB, dengan kata lain kelemahan metode P&O yang tidak responsif ketika terjadi perubahan kecepatan angin dapat diatasi dengan metode ORB yang mampu mencari titik daya maksimum lebih cepat ketika nilai k sudah didapatkan lewat pendekatan hubungan arus optimal dan tegangan maka titik daya maksimum akan lebih mudah didekati.

Diagram alir tentang gabungan dua metode ini dapat dilihat pada gambar 2.12 , kinerja dari gabungan dua metode ini bermula dengan ekstraksi nilai k dari nilai tegangan dan arus DC. Kemudian dihitung nilai daya inisiasi untuk syarat di proses selanjutnya, selain itu ditentukan nilai k yang menentukan apakah pada keadaan tersebut sudah dicapai keadaan titik daya optimal yang didekati lewat kurva arus optimal seperti gambar 2.11. Jika didapatkan nilai k yang sama dengan nol maka akan dicari arus optimal pada sistem turbin angin menggunakan metode P&O sehingga ketika nilai k

telah tidak sama dengan nol maka nilai tersebut sudah menjadi nilai arus referensi yang telah mencapai titik optimal.[3]



Gambar 2. 12 Diagram alir Metode Hybrid Algoritma ORB dan P&O untuk MPPT.

2.10. Grid Connected Inverter Tiga Fasa

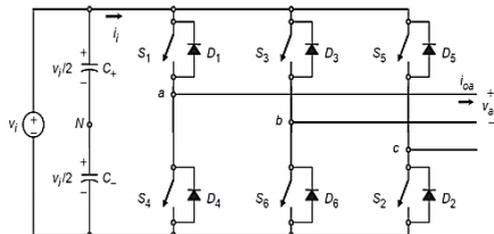
2.10.1 Rangkaian Inverter Tiga Fasa

Elemen – elemen yang termasuk dalam jenis inverter adalah sebagai berikut :

- Sumber DC
- *Switching device*
- Filter

Inverter sendiri merupakan alat elektronik yang digunakan untuk mengubah listrik arus searah menjadi arus bolak – balik. Sumber DC yang terdapat pada inverter bergantung pada aplikasinya seperti dari baterai, *fuel cell*, *photovoltaic array* dan sumber DC lain. Berdasarkan jenis penyimpanan energi sementara dari sumber DC, inverter dibagi menjadi dua yakni *Current Source Inverter* dan *Voltage Source Inverter*. *Current Source Inverter* menggunakan induktor sebagai penyimpan energi sementara sebelum daya dari sumber DC disalurkan ke sisi AC, untuk *Voltage Source Inverter* digunakan kapasitor yang fungsinya sama sebagai penyimpan energi sementara.

Switching device yang digunakan dapat berupa MOSFET, IGBT atau peralatan semikonduktor terkontrol lain yang berfungsi untuk mengalirkan daya dari sumber ke beban dimana hasil keluaran tersebut berupa sinyal pulsa yang nilai magnitude dan periodenya sangat bergantung pada sumber DC dan bentuk pensaklaran. Filter inverter digunakan untuk membentuk gelombang tegangan dan arus keluaran membentuk gelombang sesuai frekuensi fundamentalnya (sinusoidal 50Hz atau 60Hz) [8]



Gambar 2. 13 Topologi standar inverter tiga fasa

Gambar 2.13 merupakan topologi standar inverter 3 fasa yang terdiri dari enam saklar yang dapat dikendalikan. Setiap fasa tersusun atas dua buah saklar sehingga arus yang mengalir dapat diatur.

Tabel 2.2 Kondisi penyaklaran inverter 3 fasa

No.	Kondisi	Vab	Vbc	Vca
1	S1, S2, S6 on S4, S5, S3 off	V_i	0	$-V_i$
2	S1, S2, S2 on S4, S5, S6 off	0	V_i	$-V_i$
3	S2, S3, S4 on S1, S5, S6 off	$-V_i$	V_i	0
4	S3, S4, S5 on S1, S2, S6 off	$-V_i$	0	V_i
5	S4, S5, S6 on S1, S2, S3 off	0	$-V_i$	V_i
6	S1, S5, S6 on S2, S3, S4 off	V_i	$-V_i$	0
7	S1, S3, S5 on S2, S4, S6 off	0	0	0
8	S2, S4, S6 on S1, S3, S5 off	0	0	0

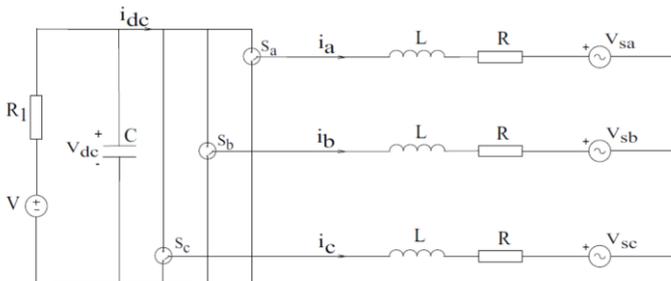
Dari tabel 2.1 diatas ditunjukkan bahwa saklar yang terletak pada satu lengan tidak boleh menutup secara bersamaan karena akan membuat rangkaian menjadi hubung singkat. Selain itu saklar yang terletak pada satu kaki tidak boleh dibuka secara bersamaan karena akan menyebabkan inverter menghasilkan keluaran yang tidak terdefinisi. Dari kondisi yang telah didapatkan maka diperlukan kondisi yang tepat dengan teknik modulasi.

2.10.2 Teknik Modulasi

Teknik modulasi yang diterapkan pada penyearah dibagi menjadi tiga jenis yakni gelombang persegi, gelombang persegi tidak simetri dan pelebaran sinyal modulasi (*pulse width modulation*). Setiap teknik akan memberikan karakteristik gelombang pensaklaran yang berbeda dan pada teknik modulasi untuk penelitian ini menggunakan teknik *pulse width modulation*.

Pulse width modulation (PWM) merupakan teknik untuk menghasilkan sinyal dengan mengatur lebar pulsa pada fungsi waktu. Teknik pensaklaran PWM dihasilkan dari gelombang dengan frekuensi fundamental yang rendah (f_o) yang dibandingkan dengan gelombang frekuensi *carrier* yang tinggi (f_c). Prinsip kerja dari teknik PWM adalah dengan menggunakan komparator.

Untuk inverter yang terhubung dengan *grid* dibutuhkan adanya kontrol untuk mengatur modulasi PWM. Tujuan dari adanya kontrol teknik modulasi adalah membuat amplitudo, frekuensi dan fasa dari tegangan tiga fasa pada *grid* sama dengan *inverter*. Berikut adalah topologi dari inverter VSI yang terhubung dengan *grid* tiga fasa[9]:



Gambar 2. 14 Topologi *inverter* VSI terhubung *grid* tiga fasa

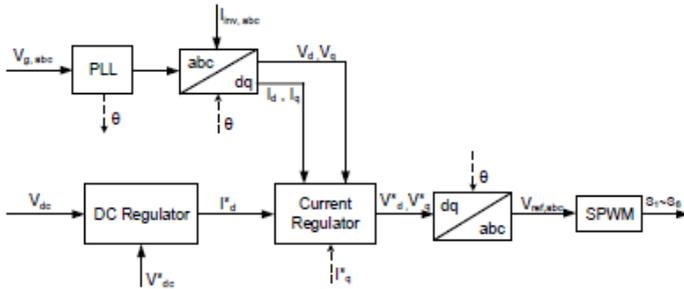
2.10.3 Kontrol *Grid* terhubung *Inverter*

Inverter yang terhubung dengan jaringan listrik harus diatur pada pensaklaran agar daya yang berasal dari sumber ke jala - jala dapat disalurkan. Terdapat dua jenis pengaturan *inverter* yakni pengaturan tegangan (*voltage control*) dan pengaturan arus (*current control*). Pada *voltage control*, pengaturan dilakukan terhadap besar magnitudo dan beda fasa dari tegangan inverter terhadap tegangan jaringan [10]. Pada tugas akhir ini digunakan *current control* untuk mengatur aliran daya pada *inverter*.

Current control merupakan sebuah mekanisme aliran daya dengan mengatur pensaklaran yang secara langsung akan menghasilkan aliran arus. Pada sistem *current control* diperlukan *feedback* arus untuk mengatur daya keluaran *inverter*. Arus yang *difeedback* akan dibandingkan dengan arus referensi sehingga didapatkan selisih nilai yang berupa sinyal error, sinyal ini kemudian masuk ke *current regulator* untuk diatur sehingga nilainya dapat menjadi kecil dan nilai arus keluaran *inverter* akan sama dengan arus sumber DC. Kontrol yang digunakan untuk *current regulator* adalah Kontrol PI sehingga didapatkan nilai

tegangan referensi untuk masuk ke modulator PWM dan memberikan sinyal untuk pensaklaran *inverter*.

Pada inverter tiga fasa, tegangan pada DC-link sisi masukan *inverter* dapat dijaga konstan pada nilai referensi tertentu dengan mengatur arus aktif yang akan disalurkan ke *grid*. Pada kondisi tegangan pada DC-link kurang dari nilai referensinya, maka *inverter* akan mengurangi aliran arus aktif ke jaringan sehingga arus yang mengalir pada kapasitor DC-link bertambah. Penambahan nilai arus pada kapasitor DC-link akan membuat tegangan DC-link akan naik[12].



Gambar 2. 15 Skema kontrol *inverter*

Gambar 2.15 di atas adalah skema kontrol *inverter* tiga fasa yang terhubung grid. Terdapat dua kontrol loop di dalam kontrol *inverter* yaitu *outer loop* berfungsi untuk meregulasi nilai tegangan DC pada DC-link dan *inner loop* berfungsi untuk meregulasi nilai arus yang disalurkan ke *grid*. Tegangan tiga fasa pada *grid* ($V_{g,abc}$) dan arus keluaran inverter yang didapatkan akan ditransformasikan kedalam dimensi d-q sesuai transformasi *park*[8]:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Komponen arus aktif referensi (I_d^*) didapat dari keluaran *DC regulator*.

$$I_d^* = K_p(V_{dc}^* - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (2.21)$$

Dimana K_p dan K_i adalah konstanta kontroler PI

Persamaan tegangan dan daya keluaran *inverter* pada sumbu *d-q* adalah :

$$\begin{cases} V_d^* = RI_d + V_d - \omega LI_q + L \frac{d}{dt} I_d \\ V_q^* = RI_q + V_q + \omega LI_d + L \frac{d}{dt} I_q \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} P = V_d I_d + V_q I_q \\ Q = -V_d I_q + V_q I_d \end{cases} \quad (2.23)$$

2.10.4 Filter LC

Filter digunakan pada sisi keluaran inverter untuk menghasilkan tegangan dan arus yang sesuai dengan frekuensi fundamental yakni 50 Hz. Terdapat berbagai jenis filter yang dapat digunakan pada sistem interkoneksi *grid* dari *inverter* seperti filter L, filter LC, filter LCL, filter LCL-LC dan masih banyak lagi modifikasi filter dengan tujuan sedapat mungkin gelombang tegangan dan arus yang dihasilkan tidak memiliki harmonisa yang berlebih[11].

Pada penelitian ini jenis filter digunakan adalah filter LC . Filter ini mengkombinasikan penggunaan induktor yang dipasang seri dengan line *grid* serta kapasitor yang terhubung Y (wye) dengan *grid* tiga fasa.[12]

Desain filter dibuat menggunakan persamaan nilai berikut

$$L_f = \frac{V_{dc}}{16f_s \Delta I_{max}} \quad (2.24)$$

Dengan f_s adalah frekuensi SPWM inverter dan digunakan *ripple arus* maksimal.

Sedangkan untuk nilai kapasitansi, perlu diperhatikan bahwa kondisi faktor daya maksimal ditentukan sebesar 5%. Sehingga nilai untuk kapasitornya adalah :

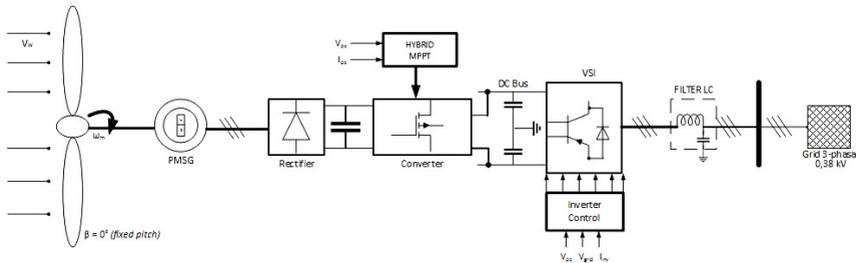
$$C_f = 0,05 \frac{1}{2\pi f Z_{base}} \quad (2.25)$$

Dimana frekuensi yang menjadi acuan adalah frekuensi grid dan impedansi dihitung dari tegangan grid dibagi sepertiga rating daya inverter.

BAB 3

PERANCANGAN DAN PEMODELAN SISTEM TURBIN ANGIN TERHUBUNG GRID

3.1 Konfigurasi Sistem Turbin Angin Terhubung Grid



Gambar 3. 1 Skema sistem turbin angin yang terhubung dengan grid

Keseluruhan sistem turbin angin PMSG pada gambar 3.1 diatas terdiri dari *wind turbine* dengan PMSG, *rectifier*, *Hybrid Cuk Converter*, MPPT, inverter tiga fasa VSI dan jaringan listrik tiga fasa. Sistem yang digunakan dalam penelitian ini tidak menggunakan sistem energi penyimpanan atau baterai sehingga daya yang diserap langsung disalurkan menuju *grid*. Dalam penyaluran dayanya , inverter (VSI) tidak menggunakan trafo atau *transformerless*.

3.2 Desain Turbin Angin

Sistem turbin angin pada penelitian ini adalah terdiri dari turbin angin, PMSG dan penyearah gelombang penuh tak terkontrol yang dihubungkan dengan *Hybrid Cuk Converter*. Turbin angin yang dihubungkan ke generator PMSG tidak menggunakan *gear* sehingga sistem turbin angin ini adalah *direct driven*. Jenis turbin angin yang digunakan pada penelitian ini adalah *Horizontal Axis Wind Turbine* dengan mode operasi *variable speed* dan *fixed pitch*.

Turbin Angin yang digunakan adalah EGRA 1.7 dengan 3 *blade propeller* yang memiliki nilai koefisien daya sebesar 46%, turbin angin jenis ini memiliki sirip pada bagian belakang yang

berguna sebagai penentu arah angin yang akan diambil. *Datasheet* dari turbin angin EGRA 1.7 ditunjukkan oleh tabel 3.1 berikut :

Tabel 3.1 Data Turbin Angin EGRA 1.7

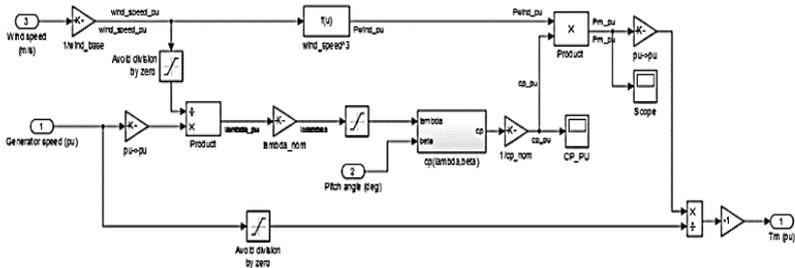
Parameter	Nilai
Daya Keluaran Maksimum	2000 Wp
Kecepatan angin <i>Start Up</i>	2.5 m/s
Kecepatan angin <i>Cut in</i>	3 m/s
Kecepatan angin Maksimum	33 m/s
Koefisien daya (C_p)	0.4
Tipe generator	3 Fasa, Magnet Permanen
Diameter <i>blade</i>	2.2 m
Kecepatan Maksimum	1000 rpm
Jumlah <i>blade</i>	3

Sedangkan MSG yang digunakan untuk pemodelan turbin angin ini memiliki parameter sebagai berikut :

Tabel 3.2 Parameter MSG pada Turbin Angin

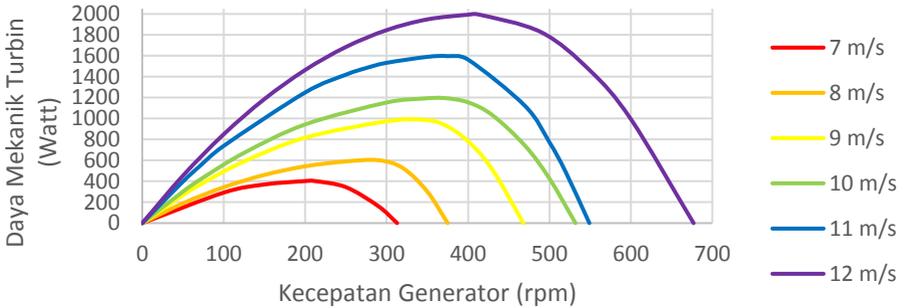
Parameter	Nilai
Tipe rotor	<i>Salient-pole</i>
Jumlah pasang kutub	9
Daya	2000 Watt
Resistansi Stator (R_s)	5.019 ohm
Induktansi <i>direct</i> (L_d)	8.5 mH
Induktansi <i>quadrature</i> (L_q)	8.5 mH
Inersia	0.01197
Tegangan operasi	26 Volt

Pemodelan turbin angin menggunakan MATLAB/Simulink yang ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut:



Gambar 3. 2 Pemodelan turbin angin pada Simulink

Kurva karakteristik desain turbin angin yang menunjukkan pengaruh putaran rotor dengan daya mekanik yang dibangkitkan untuk setiap kecepatan angin ditunjukkan oleh kurva berikut



Gambar 3. 3 Kurva karakteristik daya mekanik terhadap putaran turbin

3.3 Parameter *Hybrid Cuk Converter*

Dalam menghasilkan daya maksimum, maka dilakukan perhitungan nilai parameter – parameter dari sebuah konverter DC-DC. Berikut adalah perhitungan untuk komponen yang digunakan pada *Hybrid Cuk Converter Boost Mode* :

- a) Tegangan sistem turbin angin = 120 Volt
- b) Tegangan output Converter (DC link) = 400 Volt
- c) *Ripple* arus keluaran = ± 1 %
- d) *Ripple* tegangan keluaran = ± 1 %
- e) *Ripple* tegangan kapasitor = ± 1 %
- f) Frekuensi pensaklaran = 20 kHz

Menghitung nilai induktor L_1 berdasarkan persamaan (2.13) :

$$L_1 > \frac{DT(1+D)^2}{R_o(1-D)^2}$$

Maka dipilih nilai $L_1 = 100$ mH

Menghitung nilai induktor L_2 berdasarkan persamaan (2.16) :

$$L_2 > \frac{(2+D)(1-D)R_oT}{(1+D)^2}$$

Maka dipilih nilai $L_2 = 100$ mH

Menghitung nilai kapasitor C_1 & C_2 berdasarkan persamaan (2.17):

$$C = \frac{V_0^2(1-D)TD}{R_o V_{in} \Delta V_c}$$

Maka dipilih nilai $C = 72 \times 10^{-6} F$

Menghitung nilai induktor C_o bersarkan persamaan (2.18):

$$C_o = \frac{V_o DT}{R_o \Delta V_o}$$

Maka dipilih nilai $C_o = 640 \times 10^{-6} F$

3.4 Desain control MPPT

Dalam penelitian ini daya maksimum akan dicari menggunakan dua buah algoritma yang hasilnya akan dibandingkan, yakni algoritma P&O konvensional dan P&O berbasis *optimum relation*.

3.5.1 Algoritma *Perturb & Observe* Konvensional

Algoritma *perturb* and *observe* memiliki beberapa parameter sebagai inisiasi awal dan besar perubahan nilai *step size* dari setiap iterasi yang dilakukan. Batasan *duty cycle* digunakan untuk menjaga kemampuan konverter. Tabel 3.3 parameter yang digunakan untuk algoritma *Perturb & Observe* konvensional adalah sebagai berikut :

Tabel 3.3 Parameter algoritma *perturb* and *observe*

Batasan <i>duty cycle</i>	0.1 – 0.9
Step size	0.0015
<i>Duty cycle</i> awal	0.4

3.5.2 Algoritma *Perturb & Observe* berbasis *Optimum Relation*

Algoritma *perturb* and *observe* berbasis *Optimum Relation* memiliki parameter sebagai inisiasi awal yang disajikan dalam tabel 3.4

Tabel 3.4 Parameter algoritma *perturb* and *observe*

Batasan <i>duty cycle</i>	0.1 – 0.9
Step size	0.0015
<i>Pthresshold</i> awal	500
I awal	10

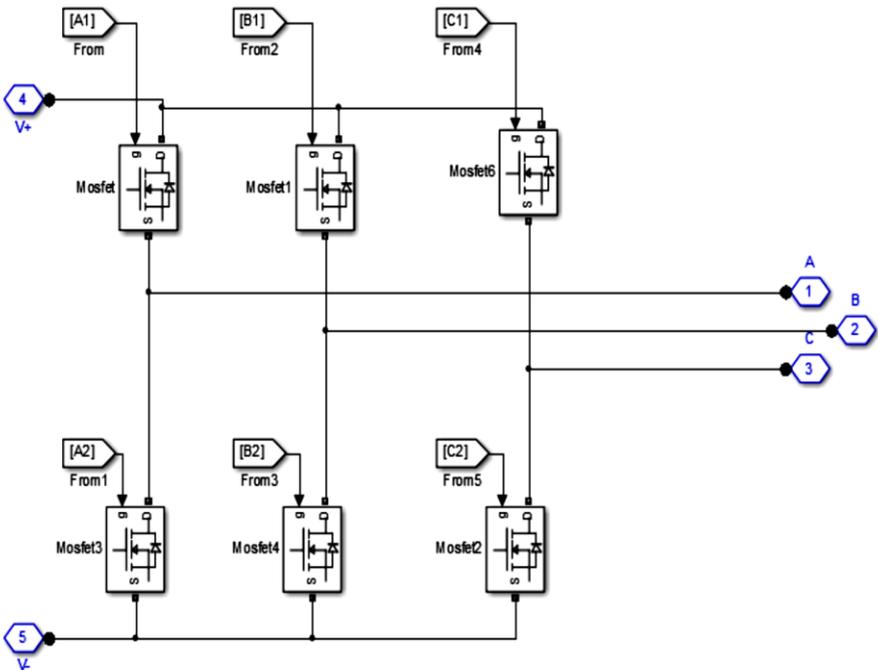
3.6 Desain Grid Connected Inverter (VSI) Tiga Fasa

3.6.1 Rangkaian Inverter Tiga Fasa

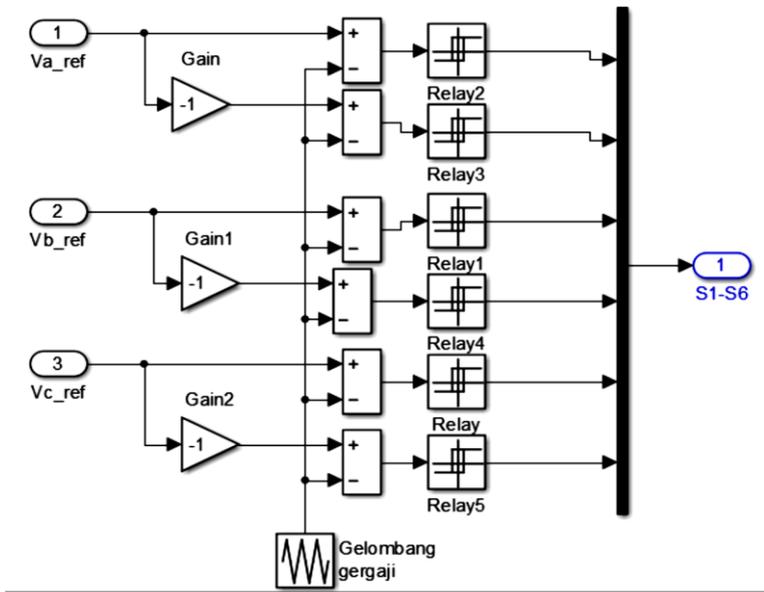
Rangkaian inverter tiga fasa terdiri atas enam buah saklar semikonduktor yang dalam penelitian ini menggunakan MOSFET. Berikut adalah gambar rangkaian pada MATLAB/Simulink. Inverter berfungsi untuk mengubah sumber AC menjadi DC dengan mengatur penyaklaran dari keenam buah saklar semikonduktor tersebut. Penyaklaran didapat dari komparator yang membandingkan tegangan referensi tiga fasa dengan gelombang gergaji pada frekuensi tertentu.

Parameter inverter yang digunakan adalah :

- Frekuensi penyaklaran, $f_s = 10000 \text{ Hz}$
- Tegangan DC-link, $V_{dc} = 400 \text{ V}$
- Modulasi frekuensi, $m_f = f_s/f_1 = 10000\text{Hz}/50\text{Hz} = 200$



Gambar 3. 4 Rangkaian inverter tiga fasa



Gambar 3. 5 Rangkaian SPWM tiga fasa inverter

Rangkaian SPWM seperti pada gambar 3.5 berfungsi untuk membangkitkan gelombang pulsa untuk melakukan penyaklaran pada semikonduktor yang terdapat pada inverter VSI.

3.6.2 Kontrol Inverter

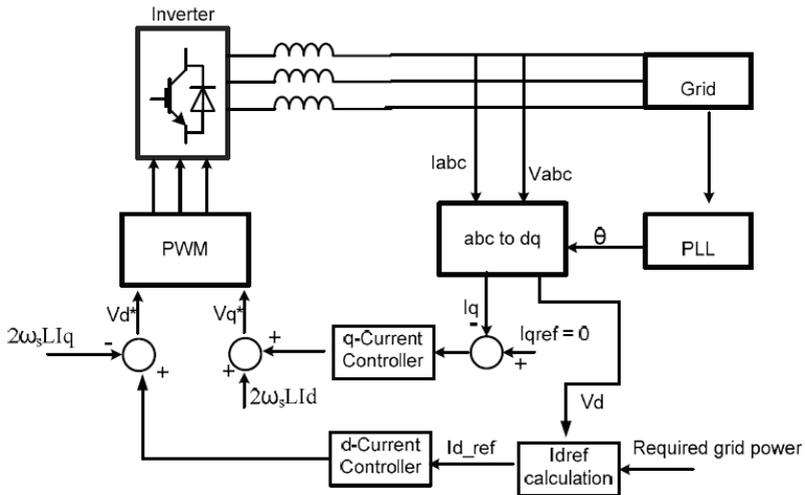
Pengaturan pensaklaran inverter yang terhubung jaringan listrik pada penelitian ini menggunakan metode *full decoupled current control* dimana ada dua kontrol loop yaitu *outer loop* dan *inner loop*. *Outer loop* digunakan untuk mengatur tegangan DC pada DC-link agar selalu bernilai konstan pada referensi tertentu. Sedangkan *inner loop* digunakan untuk mengontrol besar arus yang akan disalurkan ke jaringan. Pada *inner loop*, sinyal input berupa tegangan grid dan arus inverter yang berada koordinat tiga fasa ditransformasikan kedalam dua sumbu DC yaitu sumbu d-q untuk mempermudah kontrol dalam sistem. Skema pengaturan inverter terdiri dari pengatur tegangan pada DC-link, *Phase Locked Loop* (PLL) dan pengatur arus. Pengatur tegangan dan arus

menggunakan kontroler PI. Konstanta arus, tegangan dan parameter filter disimulasikan menggunakan nilai *per unit* (pu) dengan nilai dasar:

$$P_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$V_{base} = 12 \text{ V}$$

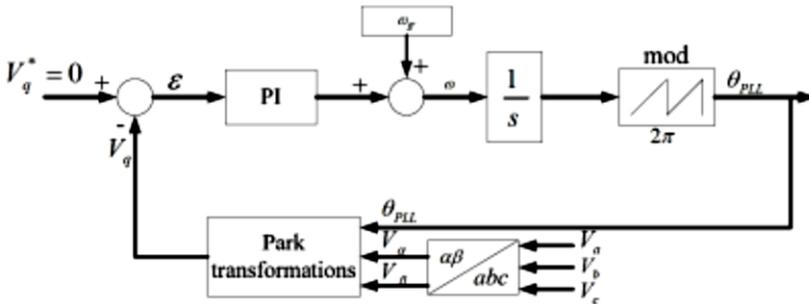
Rangkaian kontrol inverter (VSI) tiga fasa digambarkan pada gambar 3.6 sebagai berikut



Gambar 3. 6 Rangkaian kontrol inverter (VSI) tiga fasa

a) *Phase Locked Loop (PLL)*

PLL digunakan untuk mendeteksi frekuensi dan sudut fasa dari gelombang tegangan tiga fasa dan grid. Output PLL kemudian digunakan untuk kalkulasi transformasi dari sumber abc ke d-q. Berikut adalah blok diagram PLL pada MATLAB/Simulink.



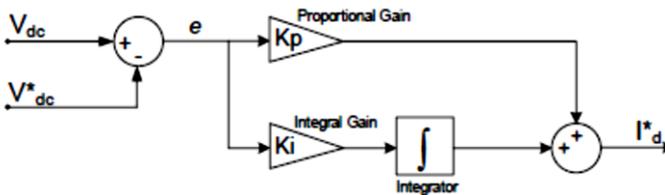
Gambar 3. 7 Skema PLL pada MATLAB/Simulink

b) Regulator Tegangan

Pengatur tegangan atau *voltage regulator* diperlukan untuk menjaga sistem tegangan pada DC-link tetap konstan. Pada penelitian ini dipilih sistem tegangan DC-link tetap pada 650 V. Prinsip dari regulator tegangan DC adalah dengan mengatur komponen arus aktif (I_{dc}) yang akan disalurkan menuju grid. Ketika tegangan DC-link terlalu rendah maka arus I_{dc} akan berkurang untuk menambah arus *charging* pada kapasitor DC-link agar tegangan kapasitor DC-link menjadi naik dimana persamaan tegangan sebuah kapasitor diberikan oleh persamaan berikut :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_c dt \quad (3.1)$$

Regulator tegangan DC-link ini menggunakan kontroler PI seperti yang ditunjukkan oleh diagram blok berikut :



Gambar 3. 8 Regulator tegangan DC-link

c) Regulator Arus

Pengatur arus atau *current regulator* berfungsi sebagai komponen yang memperbaiki sinyal eror berupa arus yang akan disuplai ke jaringan. Pada gambar 3.6 ditunjukkan skema pengatur arus yang memiliki persamaan sesuai dengan 2.19. Masukkan pada pengatur arus adalah tegangan *grid* pada sumbu d-q dan arus *inverter* pada sumbu d-q. Sedangkan output dari pengatur arus adalah berupa tegangan referensi sumbu d dan q yang kemudian di transformasikan balik kedalam sumbu a-b-c dengan cara :

$$V_a^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \times (\cos(\theta) \times V_d^* - \sin(\theta) \times V_q^*) \quad (3.2)$$

$$V_b^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \times (\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \times V_d^* - \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \times V_q^*) \quad (3.3)$$

$$V_c^* = \sqrt{\frac{2}{3}} \times (\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \times V_d^* - \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \times V_q^*) \quad (3.4)$$

Dimana :

V_d^* = tegangan referensi sumbu d

V_q^* = tegangan referensi sumbu q

V_a^* = tegangan referensi fasa a

V_b^* = tegangan referensi fasa b

V_c^* = tegangan referensi fasa c

θ = sudut

3.7 Desain Filter

Berdasarkan persamaan 2.24 dan 2.25 maka penentuan nilai filter LC adalah sebagai berikut :

$$L_f = \frac{V_{dc}}{16f_s \Delta I_{max}}$$

Dengan nilai frekuensi 10 kHz, Vdc sebesar 400 Volt dan ripple arus 2 persen maka dipilih L = 83,33 mH.

$$C_f = 0,05 \frac{1}{2\pi f Z_{base}}$$

Dengan nilai P rating adalah sebesar 2000 Watt dan frekuensi *grid* sebesar 50 Hz dan Tegangan antar fasa sebesar 380 maka dipilih $C = 100 \mu\text{F}$.

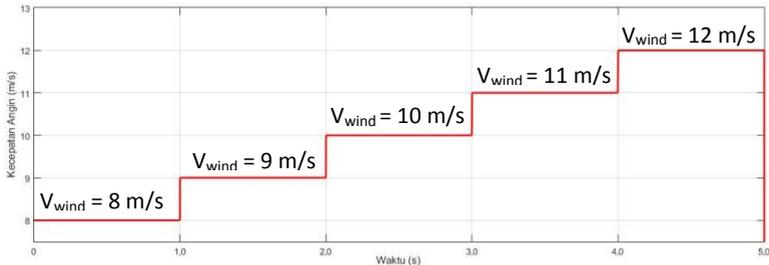
BAB 4

HASIL SIMULASI SISTEM TURBIN ANGIN DAN ANALISIS DATA

Bab ini membahas hasil simulasi dan analisis dari sistem turbin angin yang terhubung dengan jaringan listrik untuk sistem tegangan rendah dengan menggunakan *Hybrid Cuk Converter* sebagai peningkat tegangan DC-DC dan membandingkan dua buah penggunaan algoritma yakni konvensional *perturb and observe* dengan *perturb and observe* yang berbasis *optimum relation* sebagai metode pencarian titik nilai maksimum daya.

4.1 Pengujian Sistem Turbin Angin dengan Variasi nilai Kecepatan Angin Menggunakan Kinerja Algoritma Perturb & Observe Berbasis Optimal Relation

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan kinerja Algoritma Perturb & Observe berbasis Optimal Relation dalam mencari nilai daya maksimum dengan kondisi kecepatan angin yang berubah – ubah. Kurva kecepatan angin ditunjukkan oleh gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Kurva Kecepatan angin (V_w) dalam pengujian.

Dalam Pengujian ini nilai efisiensi dari kinerja algoritma *perturb and observe* berbasis *optimal relation* akan ditelusuri dengan membandingkan nilai dari daya referensi dengan daya terukur. Selain itu, akan dibandingkan pula nilai dari keluaran daya turbin, daya generator dan daya mppt untuk mengetahui efisiensi dari sistem.

Untuk mengetahui efisiensi dari sub sistem daya keluaran dari turbin angin (P_T) maka akan dibandingkan nilai karakteristik dari kurva daya-kecepatan generator sebagai referensi dengan hasil simulasi menggunakan pendekatan nilai perkalian torsi dan kecepatan generator yang dihasilkan. Kurva karakteristik turbin angin diberikan oleh gambar 3.3

Kemudian dilakukan pengujian untuk melihat efisiensi dari daya turbin angin menggunakan pendekatan nilai torsi dan kecepatan generator hasil simulasi menggunakan kinerja algoritma. Nilai keluaran daya maksimum dari turbin angin lewat hasil simulasi menggunakan pendekatan nilai torsi dan kecepatan angin disajikan dalam tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Daya Turbin Angin Maksimal dengan pendekatan nilai torsi dan kecepatan generator

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Turbin Angin Maksimal dengan pendekatan nilai torsi dan kecepatan generator (Watt)
1	8	597
2	9	983
3	10	1159
4	11	1591
5	12	1991

Perbandingan Nilai daya puncak untuk tiap kecepatan angin antara daya referensi dengan hasil simulasi menggunakan pendekatan nilai torsi dan kecepatan generator yang digunakan untuk pengujian dan nilai efisiensinya disajikan dalam tabel 4.2 berikut.

Tabel 4. 2 Perbandingan Daya Refrensi dan Daya Hasil Simulasi untuk Daya Keluaran Turbin Angin

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Refrensi (Watt)	Daya Hasil Simulasi (Watt)	Efisiensi $\left(\frac{\text{Daya Hasil Simulasi}}{\text{Daya Hasil Refrensi}} \times 100 \%\right)$
1	8	602	597	99,11%
2	9	989	983	99,39 %
3	10	1196	1159	97,74 %
4	11	1597	1591	99,61 %
5	12	1995	1991	99,7 %

Dari tabel diatas didapatkan hasil bahwa pada hasil simulasi nilai daya turbin angin memiliki efisiensi yang cukup tinggi dan mendekati nilai yang terdapat pada karakteristik turbin angin.

Kemudian untuk mengetahui efisiensi dari generator pada sistem turbin angin akan dibandingkan nilai daya turbin hasil simulasi dengan daya keluaran generator hasil simulasi. Perbandingan nilai daya keluaran dan efisiensi generator diberikan pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Perbandingan Daya Turbin dan Daya Generator

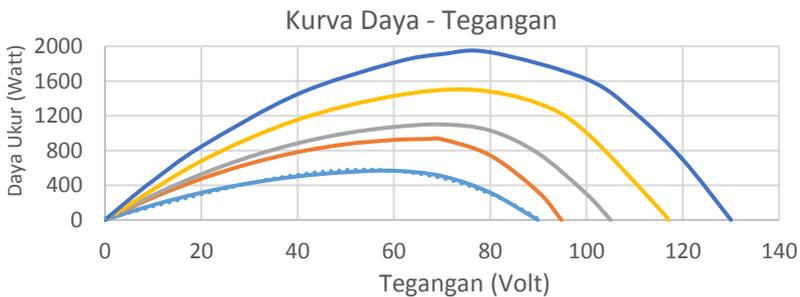
No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Turbin (Watt)	Daya Generator (Watt)	Efisiensi $\left(\frac{\text{Daya Hasil Simulasi}}{\text{Daya Hasil Refrensi}} \times 100 \%\right)$
1	8	597	570	95,41 %
2	9	983	935	95,11 %
3	10	1159	1104	95,25 %
4	11	1591	1506	94,66 %
5	12	1991	1940	97,43 %

Dari tabel 4.3 didapatkan hasil bahwa efisiensi generator dalam sistem turbin angin bernilai antara 94,66 % sampai 97,43 %. Kemudian akan dicari efisiensi dari *rectifier* pada sistem turbin angin dengan membandingkan nilai daya generator dengan daya keluaran *rectifier*, perbandingan daya tersebut disajikan dalam tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Perbandingan Daya Generator dan Daya Keluaran *Rectifier*

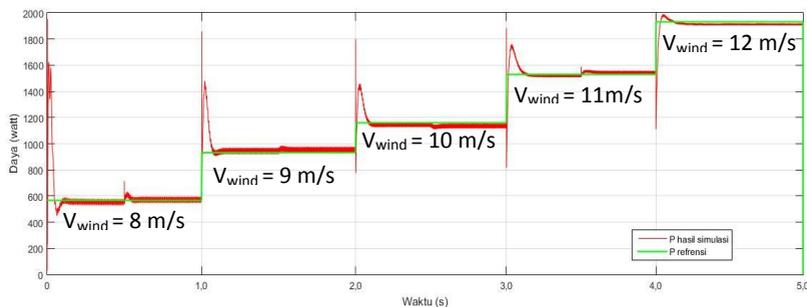
No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Generator (Watt)	Daya Keluaran <i>Rectifier</i> (Watt)	Efisiensi ($\frac{\text{Daya Hasil Simulasi}}{\text{Daya Hasil Refrensi}} \times 100 \%$)
1	8	570	563	98,77 %
2	9	935	930	99,41 %
3	10	1104	1090	98,7 %
4	11	1506	1494	99,2 %
5	12	1940	1929	99,43 %

Dari tabel diatas nilai efisiensi *rectifier* berkisar pada nilai 98,7 % sampai 99,43 %. Selanjutnya akan dicari efisiensi dari kinerja algoritma *Perturb & Observe* Berbasis *Optimal Relation* dengan membandingkan nilai hasil pengujian menggunakan rangkaian resistor variabel hingga didapatkan nilai daya maksimum untuk refrensi dengan mengukur tegangan serta arus pada nilai hambatan yang divariasikan. Hasil dari pengujian tersebut diberikan dengan gambar 4.3 berupa grafik kurva dan tegangan.



Gambar 4. 3 Kurva Daya dan Tegangan Hasil Pengujian Titik Kontrol MPPT

Nilai dari titik daya maksimum yang dijadikan sebagai referensi dari hasil pengujian tersebut akan dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan algoritma *Perturb & Observe* berbasis *Optimal Relation*, hasil perbandingan tersebut diberikan pada gambar 4.4 berikut.



Gambar 4. 4 Perbandingan Daya Kinerja MPPT dengan Daya Pengujian menggunakan Resistor Variabel

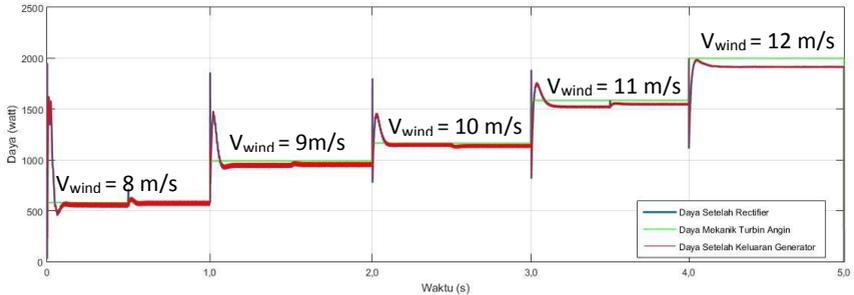
Hasil perbandingan tersebut kemudian dihitung nilai *error*-nya yang digunakan sebagai acuan apakah algoritma telah bekerja dengan baik dalam mencari daya maksimal sistem turbin angin. Yang diukur pada titik setelah *rectifier*, hasil tersebut diberikan pada tabel 4.5

Tabel 4. 5 Perbandingan Daya Refrensi dan Daya Keluaran dari kinerja algoritma.

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Refrensi (Watt)	Daya Keluaran Kinerja dari Algoritma (Watt)	Error (%)
1	8	567	563	0,71%
2	9	931	930	0,12%
3	10	1100	1090	0,91%
4	11	1501	1494	0,46%
5	12	1931	1929	0,1%

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan algoritma *perturb & observe* berbasis *optimal relation* mampu bekerja dengan baik ditunjukkan dengan nilai *error* yang kecil pada tabel 4.5.

Secara keseluruhan perbandingan nilai daya mekanik turbin, daya keluaran generator dan daya kinerja MPPT yang terukur setelah *rectifier* diberikan pada gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Perbandingan Daya Turbin, Daya Generator dan Daya Kinerja dari Algoritma.

Nilai perbandingan daya dari grafik diatas diberikan pada tabel 4.6 berikut.

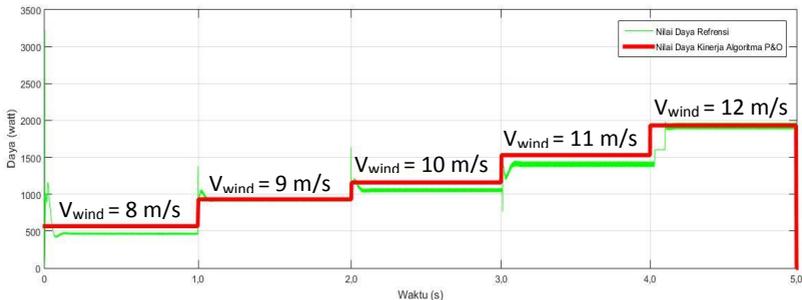
Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai Daya Turbin, Daya generator dan Daya kinerja dari MPPT .

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Turbin (Watt)	Daya Generator (Watt)	Daya Keluaran Kinerja dari Algoritma (Watt)
1	8	597	570	563
2	9	983	935	930
3	10	1159	1104	1090
4	11	1591	1506	1494
5	12	1991	1940	1929

Dari nilai tabel diatas didapatkan bahwa nilai daya yang cenderung semakin turun, hal ini disebabkan tiap komponen pada sistem turbin angin memiliki efisiensi sehingga menimbulkan rugi – rugi daya.

4.2 Pengujian Sistem Turbin Angin dengan Variasi nilai Kecepatan Angin Menggunakan Kinerja Algoritma Perturb & Observe Konvensional.

Untuk mengetahui perbandingan penggunaan Algoritma *Perturb & Observe* berbasis *Optimal Relation* dengan Algoritma *Perturb & Observe* konvensional maka dilakukan simulasi menggunakan algoritma *Perturb & Observe* konvensional untuk kemudian dibandingkan kemampuannya dalam mencapai nilai daya maksimum. Grafik hasil simulasi menggunakan Algoritma *Perturb & Observe* diberikan pada gambar 4.6



Gambar 4.6 Perbandingan Daya Refrensi hasil pengujian menggunakan resistor variabel dengan Daya Keluaran dari Kinerja Algoritma P&O Konvensional

Dari gambar 4.6 diatas kemudian dicari *error* dari kinerja algoritma, nilai refrensi ini digunakan karena nilainya yang tidak terlalu jauh dari nilai daya saat digunakan algoritma *perturb & observe* berbasis *optimal relation*. Dapat terlihat penggunaan algoritma P&O konvensional juga mampu mendekati nilai daya maksimum refrensi, *overshoot* yang lebih kecil nilainya jika dibandingkan penggunaan algoritma P&O berbasis *Optimal Relation* diakibatkan pemilihan *step-size* yang kecil, kemudian perbandingan atas nilai grafik diatas disajikan dalam tabel 4.7.

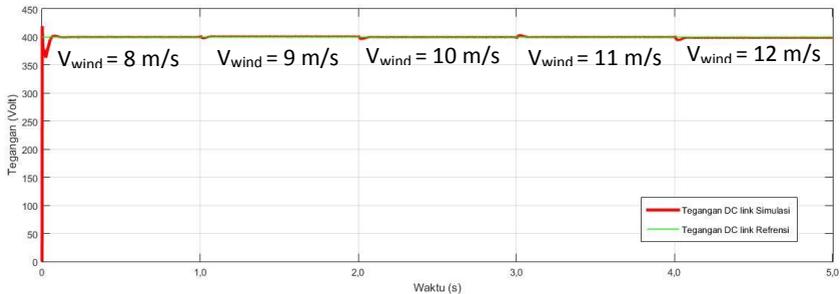
Tabel 4. 7 Perbandingan Nilai Daya Pengujian dan Daya Kinerja Algoritma

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Pengujian (Watt)	Daya Kinerja Algoritma P&O (Watt)	Error (%)
1	8	567	544	4,05%
2	9	931	896	3,76%
3	10	1100	1057	3,91%
4	11	1501	1432	4,59%
5	12	1931	1911	1,04%

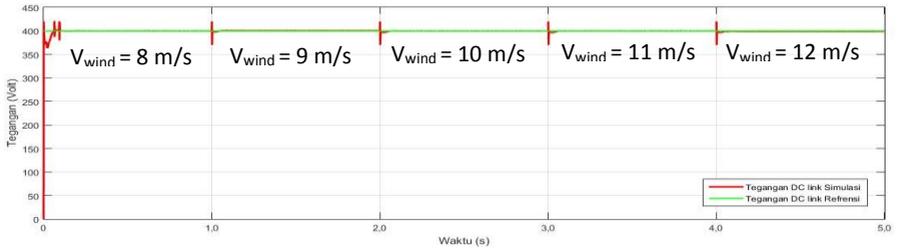
Dari tabel 4.7 diatas didapatkan bahwa nilai error atas kinerja algoritma P&O konvensional berkisar antara 1,04 sampai 4,59 persen. Hal ini menunjukkan kinerja algoritma P&O berbasis Optimal Relation lebih baik dalam mencari nilai daya maksimum.

4.3 Pengujian Sisi Kontrol Untuk Terhubung dengan Grid.

Pada pengujian ini akan dilihat nilai capaian dari tegangan DC-link sebelum ditransferkan ke sisi *grid* untuk kedua algoritma. Hasil simulasi mengenai kinerja kedua algoritma dalam mencapai tegangan dc-link dan dibandingkan dengan referensi sebesar 400 Volt disajikan pada gambar 4.7 dan gambar 4.8.



Gambar 4.7 Perbandingan Tegangan DC link Refrensi dibandingkan Tegangan DC link Hasil Simulasi menggunakan Algoritma P&O Berbasis Optimal Relation.

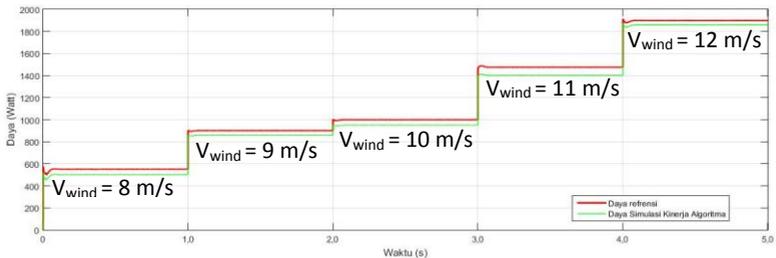


Gambar 4.8 Perbandingan Tegangan DC link Refrensi dibandingkan Tegangan DC link Hasil Simulasi menggunakan Algoritma P&O Konvensional.

Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa kedua algoritma bekerja dengan baik dalam mencapai nilai tegangan dc-link referensi, perbedaan hasil ditunjukkan untuk kinerja algoritma P&O konvensional terdapat *overshoot* disetiap perubahan kecepatan angin. Pengujian ini juga akan membandingkan kinerja dari kedua algoritma untuk mendapatkan nilai daya keluaran maksimal dengan nilai referensi berupa pemasangan nilai resistor merujuk pada tegangan DC-link referensi sebesar 400 Volt dan Daya Output Maksimum 2000 Watt sehingga didapatkan besar hambatan sebesar :

$$R = 800 \ \Omega$$

Data hasil simulasi untuk nilai daya keluaran disisi *grid* ditunjukkan oleh gambar 4.9 berikut :



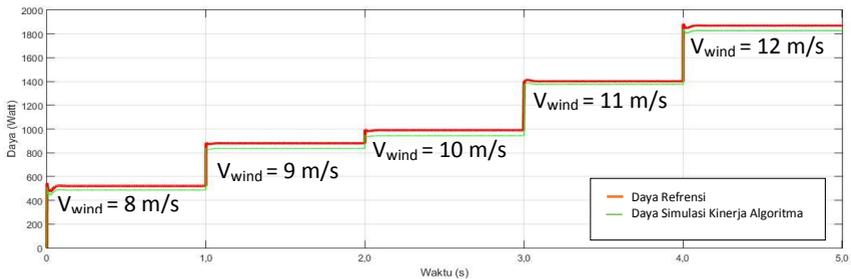
Gambar 4.9 Perbandingan Daya Refrensi dari pengujian dan Daya simulasi kinerja Algoritma P&O berbasis optimal relation

Dari grafik diatas nilai daya keluaran menuju grid diberikan pada tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Perbandingan Nilai Daya Refrensi dan Daya Kinerja Algoritma P&O Berbasis *Optimal Relation* untuk keluaran menuju *grid*

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Pengujian (Watt)	Daya Kinerja Algoritma P&O berbasis <i>Optimal Relation</i> (Watt)	Efisiensi (%)
1	8	553	499	90,23
2	9	901	862	95,66
3	10	998	943	94,48
4	11	1473	1427	96,78
5	12	1898	1851	97,53

Untuk penggunaan Algoritma P&O konvensional hasil simulasi ditunjukkan oleh gambar 4.10 berikut.



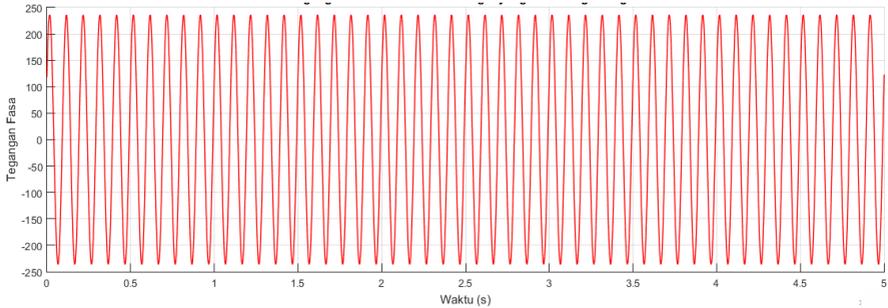
Gambar 4.10 Perbandingan Daya Refrensi dari pengujian dan Daya simulasi kinerja Algoritma P&O

Nilai dari gambar diatas disajikan dalam tabel 4.9 sebagai berikut :

Tabel 4. 9 Perbandingan Nilai Daya Refrensi dan Daya Kinerja Algoritma P&O Berbasis *Optimal Relation* untuk keluaran menuju *grid*

No.	Kecepatan Angin (m/s)	Daya Pengujian (Watt)	Daya Kinerja Algoritma P&O (Watt)	Efisiensi (%)
1	8	522	488	93,52
2	9	878	834	94,98
3	10	986	942	95,57
4	11	1398	1371	97,89
5	12	1872	1829	97,71

Berikutnya pengujian Sistem yang terhubung dengan *grid* ini akan melihat respon tegangan *grid*. Hasil simulasi mengenai tegangan telah tersambung dengan *grid* ditunjukkan oleh gambar dibawah



Gambar 4. 11 Tegangan Fasa Sistem Turbin Angin Terhubung *grid*.

Dari nilai tegangan diatas dapat disimpulkan nilai bahwa sistem telah tersambung dengan baik dengan *grid*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari Hasil Simulasi Sistem turbin angin yang terhubung dengan *grid* menggunakan algoritma P&O konvensional dan P&O berbasis *Optimum Relation*:

1. Pada pengujian sistem turbin angin dengan variasi nilai kecepatan angin menggunakan kinerja Algoritma Perturb & Observe Berbasis Optimal Relation efisiensi daya turbin angin berada pada nilai 97,74 % sampai 99,7 %.
2. Pada pengujian sistem turbin angin dengan variasi nilai kecepatan angin menggunakan kinerja Algoritma Perturb & Observe Berbasis Optimal Relation efisiensi generator berada pada nilai 94,66% sampai 97,43%.
3. Pada pengujian sistem turbin angin dengan variasi nilai kecepatan angin menggunakan kinerja Algoritma Perturb & Observe Berbasis Optimal Relation efisiensi *rectifier* berada pada nilai 98,7% sampai 99,43%.
4. Pada pengujian sistem turbin angin dengan variasi nilai kecepatan angin menggunakan kinerja Algoritma Perturb & Observe Berbasis Optimal Relation nilai error dalam mendapatkan daya maksimal berada pada nilai 0,1% sampai 0,91%
5. Pada pengujian sistem turbin angin dengan variasi nilai kecepatan angin menggunakan kinerja Algoritma Perturb & Observe Konvensional nilai error dalam mendapatkan daya maksimal berada pada nilai 1,04% sampai 4,59%

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya diharapkan mempertimbangkan *pitch degree* pada turbin angin atau penggunaan sistem baterai yang dapat dikontrol sehingga kelebihan daya dari pembangkitan turbin angin dapat disimpan.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yacine D., Jean-Paul G., Lazhar R., “*Implementation of a new maximum power point tracking control strategy for small wind energi conversion systems without mechanical sensors*”*Energi Conversion and Management*, 2 April 2015.
- [2] Kementrian ESDM RI, “*Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2006 - 2025*“, Arsip Kementerian ESDM RI Jakarta, 2006.
- [3] Dipesh K., Kalyan C., “*A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energi systems*”, *Renewable and Sustainable Energi Reviews*, 2015.
- [4] Anugrah Ernandi, Dwiyan., “*Desain maximum power point tracking untuk turbin angin menggunakan modified perturb & observe berdasarkan prediksi kecepatan angin*”. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember; Surabaya, 2016.
- [5] Mochammad Azhari, “*Sistem Konverter DC*”, ITS Press, Indonesia, 2012.
- [6] Sankarganesh R., Thangavel S., “*Maximum Powert Point Tracking in PV System using Intelligence based P&O Technique and Hybrid Cuk Converter*”. *Internasional Conference on Emerging Trends in Science*, 2012.
- [7] Rashid, Muhammad , “*Power Electronics Handbook*”, Academic Press, 2001.
- [8] Ahmed R. Ahmad Kalas and Ahmad D. “*A control Methodology of three phase grid Connected PV system*”, *Egypt*, 2014.
- [9] Bhutian, Bandana, Narayan Tiadi, “*Design of Three Phase PWM Voltage Source Inverter For Photovoltaic Application*”, *Internasional Journal of Innovative Research ISSN 2321-5526 Vol. 2 Issue 4*, 2014.

- [10] Ratna Ika Putri, Margo Pujiantara, Ardyono Priyadi, Mauridhi Hery P, Taufik “*Optimum Control Strategy of Grid Connected PMSG Wind Turbine Based on Energy Storage System*”, Internasional Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA),2016.
- [11] H.E.A. Ibrahim, “*Comparison Between Fuzzy and P&O Control for MPPT PV System Using Boost Converter*”,2012.
- [12] Hussein M., Senjyu, M. Orabi, M.A.A Wahab, and M.M. Hamada “*Control of grid connected variable speed wind energi conversion system*”,in 2012 Internasional Conference on Renewable Energi Research and Applications (ICRERA), 2012.

BIODATA PENULIS



Mochammad Fauqi Akbar, dilahirkan di Bangil, Jawa Timur pada 14 Mei 1995. Penulis adalah putra pertama dari pasangan Achmad Latif dan Maslucha. Memulai jenjang pendidikan di TK Kartika V Malang, kemudian melanjutkan pendidikan formal di MI ATTARAQQIE PUTRA kota Malang, SMPN 2 Malang, dan SMAN 5 Malang hingga lulus pada tahun 2013. Pada tahun itu juga, penulis melanjutkan pendidikan ke

jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama kuliah, penulis aktif dalam kepanitiaan serta kegiatan organisasi mahasiswa yakni departemen keprofesian dan kesejahteraan mahasiswa HIMATEKTRO ITS 2015/2016 dan sebagai ketua rumah perjuangan IECC ITS MENGAJAR 2015/2016, penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga Listrik dan koordinator asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga . Penulis dapat dihubungi melalui email fakakbar.malang@gmail.com.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]