



TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN SIMULASI *BOOST CONVERTER* EMPAT
TINGKAT DENGAN KONTROL *MPPT* UNTUK APLIKASI
*SOLAR WATER PUMPING***

RADI DWI SUSETYO
NRP 2210100096

Dosen Pembimbing
Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND SIMULATION BOOST CONVERTER FOUR
LEVEL WITH MPPT CONTROL FOR SOLAR WATER
PUMPING APPLICATION**

Radi Dwi Susetyo
NRP 2210100096

Counsellor Lecturer
Dr. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng.
Heri Suryoatmojo, ST, MT, Ph.D.

ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**DESAIN DAN SIMULASI BOOST CONVERTER EMPAT
TINGKAT DENGAN MPPT KONTROL UNTUK
APLIKASI SOLAR WATER PUMPING**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

23/01/15

Dosen Pembimbing II

Dr. Dedet Candra Riawan ST., M.Eng.

NIP. 197311192000031001

Heri Survoatmojo, ST., MT., Ph.D.

NIP. 198006032006041003

**SURABAYA
Januari, 2015**

DESAIN DAN SIMULASI *BOOST CONVERTER* EMPAT TINGKAT DENGAN KONTROL MPPT UNTUK APLIKASI *SOLAR WATER PUMPING*

Radi Dwi Susetyo
2210100096

Pembimbing I : Dr. Dedet Candra Riawan ST., M.Eng.
Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Pada dasarnya air bersih merupakan sumber daya alam yang sangat penting guna memenuhi kebutuhan hidup manusia, kesehatan manusia, dan menjamin produksi bahan pangan. Sehingga pompa air sangat diperlukan untuk memenuhi kebutuhan sumber daya air bersih. Namun masyarakat di daerah terpencil yang jauh dari jaringan listrik menggunakan genset berbahan bakar minyak untuk mengoperasikan pompa air. Oleh karena itu, sistem pompa air dengan sumber energi terbarukan *photovoltaic* sangat tepat digunakan di daerah terpencil.

Dalam tugas akhir ini dibahas *Solar Water Pumping System* yang menggunakan kontrol *MPPT P&O* untuk menentukan daya maksimum dari *photovoltaic (PV)*. Sistem ini menggunakan *boost converter* empat tingkat untuk meningkatkan tegangan keluaran *PV* dari 150 Volt menjadi 600 Volt dengan *duty cycle* 0.25. Adanya *DC-Link Control* membuat tegangan *DC-Link* tetap konstan, sehingga tegangan masukan *inverter* tiga fasa akan stabil. Motor induksi tiga fasa sebagai penggerak pompa sentrifugal mampu bekerja optimal dengan kontrol *V/F* konstan.

Kata kunci : *Boost Converter, DC-Link, MPPT, PV, V/F* konstan

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND SIMULATION OF FOUR LEVEL BOOST CONVERTER WITH MPPT CONTROL FOR SOLAR WATER PUMPING APPLICATIONS

Radi Dwi Susetyo
2210100096

Advisor I : Dr. Dedet Candra Riawan ST., M.Eng.
Advisor II : Heri Suryoatmojo , ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Basically, water is natural resource that is important to fulfill the needs of human life, human health, and ensuring food production. So, water pump is needed to fulfill of clean water. However, people in remote areas far from the power grid using oil-fuel generators to operate pumps. Therefore, water pump system with photovoltaic renewable energy sources is very appropriate to be used in remote areas.

In this final project discussed about Solar Water Pumping System which uses P&O MPPT control to determine the maximum power of photovoltaic (PV). This system uses a four-level boost converter to increase the PV output voltage of 150 Volt to 600 Volt with a duty cycle of 0,25. DC-Link control makes the DC-Link voltage remains constant, and then the three phase voltage inverter will be stable. Three phase induction motor as prime mover of centrifugal pump can work optimally with v/f control.

Keywords : *Boost Converter, DC-Link, MPPT, PV, V/F konstan*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji sukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

DESAIN DAN SIMULASI BOOST CONVERTER EMPAT TINGKAT DENGAN MPPT KONTROL UNTUK APLIKASI SOLAR WATER PUMPING

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Keluarga yang telah banyak memberikan dorongan dan doa untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr. Dedet Candra Riawan ST., M.Eng., PhD. dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan.
3. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS, serta Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberi ilmu selama penulis menempuh kuliah.
5. P.T. Fokus Indo Lighting yang telah memberikan pengalaman kerja di dunia kelistrikan dan sel surya.
6. Rekan-rekan mahasiswa e-50 Jurusan Teknik Elektro ITS, terutama teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang telah memberikan doa dan semangat.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga buku Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Januari 2015
Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
1.6 Relevansi	3
BAB 2 SISTEM SOLAR WATER PUMPING BERBASIS BOOST CONVERTER EMPAT TINGKAT	
2.1 Sel Surya (PV).....	5
2.1.1 Rangkaian Ekuivalen PV	5
2.1.2 Karakteristik Arus-Tegangan PV	6
2.1.3 <i>Fill Factor</i>	7
2.1.4 Efek Suhu dan <i>Irradian</i>	8
2.2 <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT)	9
2.3 Topologi <i>Boost Converter</i> Empat Tingkat.....	12
2.4 Inverter Tiga Fasa	15
2.5 Motor Induksi Tiga Fasa.....	16
2.5.1 Konstruksi Motor Induksi	17
2.5.2 Analisis Torsi-Kecepatan.....	17
2.6 Kontrol <i>V/F</i> Konstan.....	19
2.7 Kontroler PI	20
2.7.1 Karakteristik Kontroler	20
2.7.2 Metode <i>Process Reaction Curve</i>	21
2.8 Pompa Sentrifugal	22

BAB 3	DESAIN SISTEM PANEL SURYA BERBASIS BOOST CONVERTER EMPAT TINGKAT	
	3.1 Pemodelan Sistem.....	25
	3.2 Desain Rangkaian <i>Photovoltaic</i>	25
	3.3 Desain <i>Boost Converter</i> Empat Tingkat	27
	3.3.1 Rangkaian <i>Boost Converter</i> Empat Tingkat...	27
	3.3.2 Penentuan Parameter Rangkaian.....	28
	3.3.3 Desain Kontrol MPPT	31
	3.4.4 Desain Kontrol <i>Duty Cycle</i>	32
	3.4 Desain Kontrol <i>DC-Link</i>	33
	3.5 Desain Kontrol <i>V/F</i> Konstan.....	33
	3.6 Desain <i>Inverter (VSI)</i> Tiga Fasa.....	34
	3.6 Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa	35
	3.7 Pemodelan Pompa Sentrifugal	36
BAB 4	PENGUJIAN SISTEM DAN ANALISIS DATA	
	4.1 Pengujian Sistem PV dengan <i>MPPT P&O</i> dan <i>Boost Converter</i> Empat Tingkat.....	39
	4.2 Analisis Perbedaan Topologi-Topologi <i>Boost Converter</i>	49
BAB 5	PENUTUP	
	5.1 Kesimpulan	55
	5.2 Saran	55
	DAFTAR PUSTAKA	57
	DAFTAR RIWAYAT HIDUP	59
	LAMPIRAN	61

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Panel Surya SPM-60P	26
Tabel 3.2	Parameter Rangkaian <i>Boost Converter</i> Empat Tingkat	31
Tabel 3.3	Data Parameter Motor Induksi.....	37
Tabel 4.1	Perbandingan Parameter Topologi Boost Converter ..	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rangkaian Ekvivalen Sel Surya	5
Gambar 2.2	Sel Surya Dihubungkan Seri (a) dan Paralel (b)	6
Gambar 2.3	Grafik V-I dan V-P pada <i>Photovoltaic</i>	7
Gambar 2.4	Kurva V-I dengan perubahan nilai <i>irradiant</i>	8
Gambar 2.5	Kurva V-P dengan perubahan nilai <i>irradiant</i>	8
Gambar 2.6	Kurva V-I dengan perubahan suhu matahari	9
Gambar 2.7	Kurva V-P dengan perubahan suhu matahari	9
Gambar 2.8	Kurva Titik Kerja PV Akibat Perubahan Beban	10
Gambar 2.9	Flowchart dari Algoritma P&O	11
Gambar 2.10	DC-DC Multilevel Boost Converter for N+1 levels ...	12
Gambar 2.11	Switch ON state of Multilevel Boost Converter	13
Gambar 2.12	Switch OFF state of Multilevel Boost Converter	13
Gambar 2.13	Topologi standar inverter 3 fasa	16
Gambar 2.14	Penampang stator dan rotor motor induksi	17
Gambar 2.15	Rangkaian ekivalen motor induksi	17
Gambar 2.16	Kurva torsi dan kecepatan Motor Induksi	18
Gambar 2.17	Rangkaian ekivalen motor induksi bagian stator	19
Gambar 2.18	Tiga Daerah Kurva Torsi-Kecepatan <i>V/F Control</i>	20
Gambar 2.19	Process Reaction Curve	21
Gambar 2.20	Bagian dalam Pompa sentrifugal dan motor penggerak	22
Gambar 2.21	Kurva karakteristik torsi-kecepatan motor induksi dengan beban pompa	22
Gambar 3.1	Konfigurasi Sistem <i>Solar Water Pumping</i>	25
Gambar 3.2	Blok Diagram PV Array	26
Gambar 3.3	Rangkaian Boost Converter Empat Tingkat	27
Gambar 3.4	Arus induktor saat <i>boundary point</i>	29
Gambar 3.5	Kontrol Duty Cycle Boost Converter Empat Tingkat..	32
Gambar 3.6	Pensaklaran Boost Converter Empat Tingkat	32
Gambar 3.7	Rangkaian kontrol DC-Link	33
Gambar 3.8	Blok diagram prinsip kerja V/F konstan loop tertutup..	35
Gambar 3.9	Rangkaian kontrol V/F konstan loop tertutup	35
Gambar 3.11	Rangkaian VSI 3 Fasa Terhubung Beban	26
Gambar 3.12	Diagram blok pemodelan karakteristik torsi pompa..	37
Gambar 4.1	Skema <i>Solar Water Pumping System</i> dengan MPPT kontrol dan topologi <i>Boost Converter</i> empat tingkat..	40
Gambar 4.2	Kurva <i>Irradian</i> pada pengujian sistem	41

Gambar 4.3	Kurva daya maksimal PV dan daya PV	41
Gambar 4.4	Grafik Persentase eror MPPT P&O terhadap perubahan Irradian..	42
Gambar 4.5	Kurva tegangan <i>DC boost</i> dan tegangan PV.....	42
Gambar 4.6	Kurva tegangan Inverter, tegangan rms, dan frekuensi sistem.....	43
Gambar 4.7	Grafik tegangan inverter terhadap frekuensi.....	44
Gambar 4.8	Grafik rasio V/F terhadap frekuensi.....	44
Gambar 4.9	Kurva kecepatan motor dan kecepatan referensi terhadap waktu.....	45
Gambar 4.10	Grafik kecepatan motor terhadap frekuensi.....	45
Gambar 4.11	Kurva torsi motor dan torsi pompa.....	46
Gambar 4.12	Grafik torsi motor terhadap kecepatan motor.....	47
Gambar 4.13	Grafik debit air terhadap <i>Irradiant</i>	47
Gambar 4.14	Kurva volume air terhadap <i>Irradiant</i>	47
Gambar 4.15	Grafik persentase daya terserap terhadap <i>irradiation</i>	48
Gambar 4.16	Kurva arus induktor topologi <i>boost converter</i>	50
Gambar 4.17	Kurva tegangan IGBT <i>boost converter</i>	51
Gambar 4.18	Kurva tegangan kapasitor <i>boost converter</i>	53
Gambar 4.19	Kurva tegangan keluaran <i>boost converter</i>	54

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dasarnya air bersih merupakan sumber daya alam yang sangat penting untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia, kesehatan manusia, dan sebagai komponen penting produksi bahan pangan. Sumber daya air juga diperlukan untuk menjaga ekosistem untuk kepentingan sosial dan ekonomi masyarakat [1]. Sehingga, masyarakat menggunakan sistem pompa air untuk memenuhi kebutuhan sumber daya air bersih. Namun untuk masyarakat di daerah terpencil dan jauh dari jaringan listrik PLN akan kesulitan untuk menjalankan pompa air, dan akhirnya mereka menggunakan genset dengan bahan bakar minyak. Pada tugas akhir ini akan membahas *Solar Water Pumping System* sebagai solusi permasalahan tersebut.

Solar Water Pumping System sangat tepat untuk diterapkan pada daerah yang tidak terdapat jaringan listrik [2]. Sistem pompa ini menggunakan *Photovoltaic (PV)* sebagai sumber energi dan motor induksi tiga fasa sebagai penggerak pompa air. Sistem pompa membutuhkan inverter untuk mengubah tegangan arus searah keluaran *PV* menjadi tegangan arus bolak-balik. Namun, tegangan keluaran dari *PV* tidak cukup tinggi untuk dijadikan tegangan masukan inverter. Oleh karena itu, *DC-DC converter* berupa *boost converter* umumnya digunakan untuk menaikkan tegangan *PV*.

Pada aplikasi tegangan tinggi, *boost converter* konvensional memerlukan peralatan semikonduktor ber-rating tegangan tinggi yang menghasilkan rugi-rugi konduksi yang tinggi dan rugi-rugi *switching* yang tinggi pula [3]. Oleh karena itu, *multilevel converter* sangat penting sebagai alternatif untuk aplikasi dalam daya tinggi [4].

Pada penelitian sebelumnya, yakni *boost converter* tiga tingkat, nilai induktansi dari induktor dapat direduksi secara signifikan dan rating tegangan dari peralatan semikonduktor menjadi setengah dari tegangan keluaran [5]. Pada tugas akhir ini diusulkan sistem *PV* dengan menggunakan *boost converter* empat tingkat dan inverter tiga fasa satu tingkat. Keuntungan *multilevel boost converter* dibandingkan *boost converter* tiga tingkat maupun konvensional yaitu memiliki rating tegangan yang lebih kecil pada komponen, dan rasio konversi yang luas untuk menaikkan tegangan *DC* dengan nilai *duty cycle* yang kecil [6].

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah bagaimana memodifikasi rangkaian *boost converter* konvensional untuk menaikkan tegangan keluaran dari PV, cara menentukan *duty cycle* yang tepat pada *boost converter* empat tingkat dan menggunakan kontrol *MPPT* pada sistem *PV* agar mendapatkan daya keluaran yang optimal.

1.3 Tujuan

Pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Mengetahui prinsip kerja dari rangkaian *boost converter* empat tingkat.
2. Mengoptimalkan daya keluaran dari PV dengan menggunakan kontrol *MPPT*.

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Penulis mempelajari referensi mengenai *photovoltaic*, *multilevel DC-DC boost converter*, *DC-AC converter*, motor induksi dan pompa air *sentrifugal*, standar-standar dan parameter dari jurnal, dan buku-buku perpustakaan.
2. Pemodelan dan simulasi
Setelah mendapatkan literatur yang menunjang, penulis akan memodelkan dalam bentuk simulasi menggunakan *software PSIM*. Pemodelan terdiri dari dari PV, *boost converter* empat tingkat, inverter 3 fasa, motor induksi dan pompa *sentrifugal*. Adapun beberapa kontroler yang digunakan, seperti *MPPT*, *DC-link control*, dan kontrol *V/F* konstan. Tujuan dilakukan pengontrolan tersebut adalah untuk memastikan sistem dapat bekerja optimal saat terjadi perubahan intensitas cahaya matahari.
4. Analisis Data
Hal – hal yang yang dianalisa yaitu pengujian simulasi sistem secara menyeluruh dengan kondisi perubahan *irradiation* tertentu.
5. Penulisan Buku Tugas Akhir
Penulisan laporan dilakukan sebagai penggambaran kesimpulan dari Tugas Akhir ini. Kesimpulan merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut:

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi.
2. BAB 2 berisi teori penunjang yang membahas tentang sel surya, *MPPT P&O*, *DC-DC boost converter*, metode *switching boost converter* empat tingkat, inverter tiga fasa, kontrol *V/F* konstan, motor induksi, dan pompa sentrifugal.
3. BAB 3 berisi tentang uraian perencanaan dan pembuatan simulasi pemodelan untuk tiap komponen serta penentuan parameter untuk setiap komponen.
4. BAB 4 berisi tentang hasil pengujian sistem dan analisis terhadap simulasi yang dilakukan.
5. BAB 5 berisi tentang kesimpulan dan saran-saran.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk mendapatkan debit air yang optimal dari sebuah pompa tenaga surya.
2. Dapat menjadi referensi bagi masyarakat umum untuk mengatasi kelangkaan energi dan *global warming*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

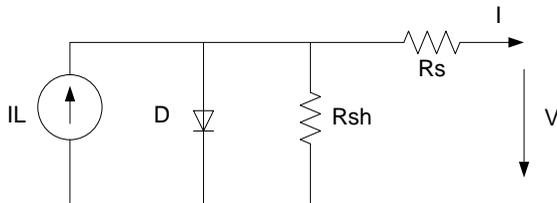
SISTEM SOLAR WATER PUMPING BERBASIS BOOST CONVERTER EMPAT TINGKAT

2.1 Sel Surya (*Photovoltaic*)

Sel surya adalah sumber energi terbarukan yang banyak digunakan orang untuk dijadikan sumber energi listrik. Sel surya memberikan banyak kemudahan yaitu mudah diimplementasikan dan cocok untuk digunakan di daerah tropis seperti Indonesia dengan intensitas panas matahari yang relatif lebih tinggi. Sel surya memiliki beberapa kelebihan yaitu, kemampuan beberapa *semiconductor* untuk mengkonversi radiasi elektromagnet secara langsung menjadi arus listrik. [7]

2.1.1 Rangkaian Ekivalen PV

Solar sel dapat direpresentasikan dengan rangkaian seperti Gambar 2.1. Adapun karakteristik tegangan-arus dinyatakan oleh persamaan 2.1 [7] :



Gambar 2.1 Rangkaian ekivalen sel surya

$$I = I_L - I_O \left(e^{\frac{q(V+I.R_S)}{A.k.T}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_S}{R_{SH}} \quad 2.1$$

Keterangan :

I = arus keluaran PV

V = tegangan keluaran PV

I_O = arus saturasi

q = muatan elektron

A = faktor kualitas dioda

T = suhu matahari

R_S = resistansi seri

R_{SH} = resistansi paralel

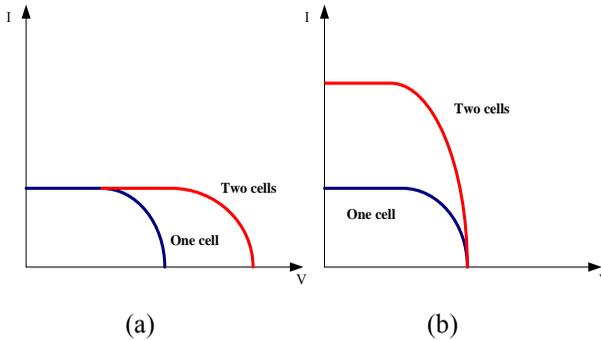
I_L = arus masukan

k = konstanta Boltzman

Namun untuk menyederhanakan rangkaian, nilai resistansi paralel dapat diabaikan, sehingga R_{SH} bernilai tak terbatas jadi persamaan 2.1 berubah menjadi :

$$I \approx n_p I_L - n_p I_0 \left(e^{\frac{q(V+I.R_S)}{A.k.T.n_s}} - 1 \right) \quad 2.2$$

dimana n_p dan n_s adalah jumlah sel surya yang disusun secara paralel dan seri. Karena dalam prakteknya untuk mendapatkan besar tegangan dan arus dengan nilai tertentu pada sel surya, maka harus dilakukan pemasangan sel surya secara seri dan paralel. Gambar 2.2 adalah grafik arus dan tegangan ($I-V$) dari dua buah sel surya identik yang dihubungkan secara seri dan paralel :



Gambar 2.2 Sel Surya dihubungkan seri (a) dan paralel (b)

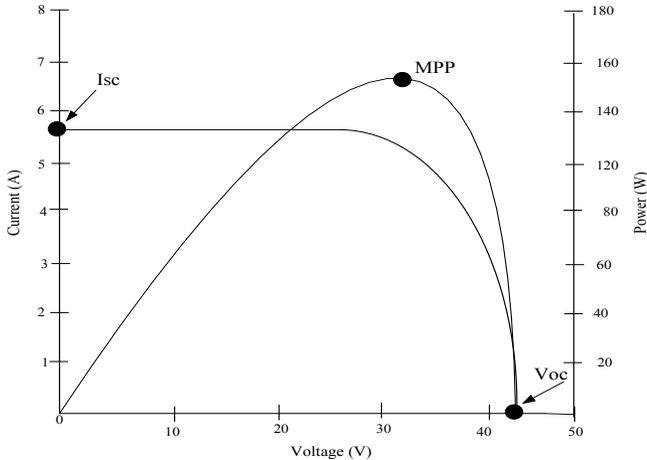
2.1.2 Karakteristik Arus-Tegangan PV

Dua hal penting dari karakteristik arus-tegangan sel surya yaitu tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) dan arus rangkaian tertutup (I_{SC}). tegangan rangkaian terbuka dapat ditentukan melalui persamaan 2.1 saat arus keluaran sama dengan nol ($I=0$) dan tahanan seri diabaikan, Sehingga persamaan (2.1) menjadi seperti persamaan (2.3). Sementara arus rangkaian tertutup adalah arus saat $V=0$ dan nilainya mendekati dengan nilai arus masukan (I_L) seperti persamaan (2.4) [7].

$$V_{OC} \approx \frac{A.k.T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.3)$$

$$I_{SC} \approx I_L \quad (2.4)$$

Maksimum daya dari solar sel terjadi saat karakteristik arus-tegangan menghasilkan perkalian tegangan (V) dan arus (I) yang maksimum. Titik ini dikenal dengan *Maximum Power Point (MPP)* dan dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Grafik V - I dan V - P pada *photovoltaic* [7]

Keterangan :

- I_{sc} = short-circuit current
- V_{oc} = open-circuit voltage
- MPP = maximum power point

2.1.3 Fill Factor (FF)

Dengan menggunakan arus dan tegangan saat MPP (I_{MPP} dan V_{MPP}), tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) dan arus rangkaian tertutup (I_{SC}), maka *fill factor* dapat ditentukan oleh persamaan (2.5) [7]:

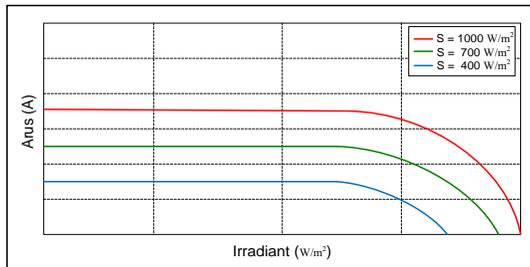
$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (2.5)$$

Fill Factor umumnya digunakan untuk mengetahui kualitas sel surya secara keseluruhan. Sebenarnya rasio persamaan (2.5) tidak dapat ditentukan, hal ini karena nilai $I_{MPP} \cdot V_{MPP}$ selalu di bawah dari nilai $I_{SC} \cdot V_{OC}$. Umumnya nilai untuk FF untuk sel surya komersial lebih dari 0.70 [7].

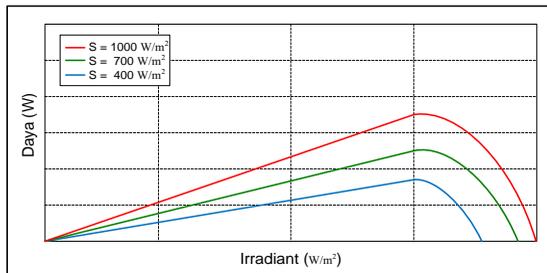
2.1.4 Efek Suhu dan *Irradiant*

Dua faktor penting yang mempengaruhi kinerja sel surya, yaitu *irradiant* dan suhu matahari. Keduanya sangat berpengaruh kuat terhadap perubahan karakteristik modul surya. Akibatnya titik maksimum daya bervariasi selama sehari dan itulah alasan mengapa titik maksimum daya harus ditentukan dan dipastikan agar daya yang dihasilkan modul surya maksimal.

Gambar 2.4 merupakan kurva V-I dan Gambar 2.5 adalah kurva V-P, modul surya pada suhu konstan 25°C dengan nilai *irradiant* bervariasi. Semakin tinggi nilai *irradiant* maka arus keluaran *PV* semakin maksimal. Semakin tinggi nilai *irradiant* maka semakin besar pula daya keluaran *PV*.



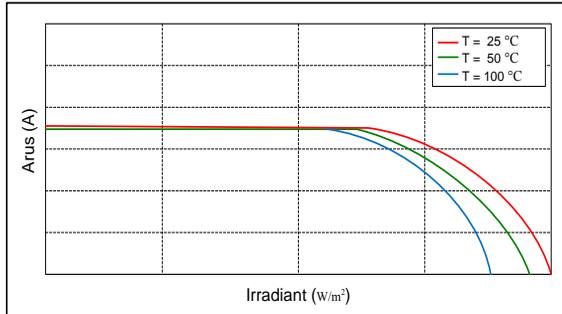
Gambar 2.4 Kurva *V-I photovoltaic* dengan perubahan nilai *irradiant*



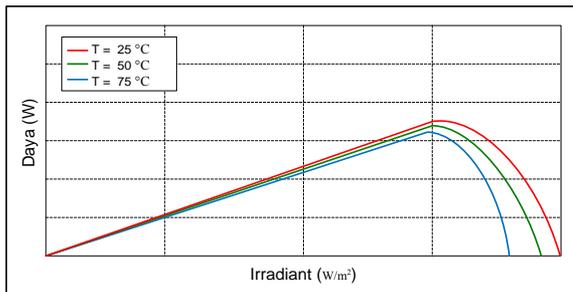
Gambar 2.5 Kurva *V-P photovoltaic* dengan perubahan nilai *irradiant*

Gambar 2.6 ialah kurva V-I dan Gambar 2.7 ialah kurva V-P modul surya dengan *irradiant* konstan dengan suhu matahari yang bervariasi. Semakin tinggi nilai suhu matahari melebihi 25°C maka

tegangan keluaran *PV* justru semakin kecil. Kemudian semakin tinggi nilai suhu melebihi 25°C, maka daya keluaran *PV* semakin kecil.



Gambar 2.6 Kurva V-I *photovoltaic* dengan perubahan nilai suhu matahari



Gambar 2.7 Kurva V-P *photovoltaic* dengan perubahan nilai suhu matahari

Apabila dalam sistem *PV* tidak menggunakan daya maksimum maka akan timbul rugi-rugi daya yang besar. Maka dari itu kita harus mencari (*track*) titik daya maksimum modul surya untuk menyakinkan bahwa daya yang dihasilkan *PV* selalu maksimum.

2.2 *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) Metode *Perturb and Observe* (P&O)

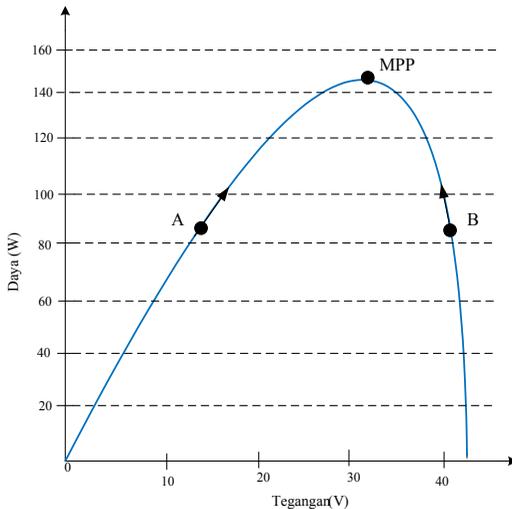
MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) adalah teknik yang digunakan untuk menjaga sistem *photovoltaic* bekerja dalam *point* MPP (*maximum power point*) (Azad, Sridhar & Miroslave, 2011). Pada Gambar 2.8 adalah grafik karakteristik dari panel surya. MPPT akan mempertahankan keluran pada daya tertingginya, yaitu pada V_{MP}

(*voltage maximum power*) dan I_{MP} (*current maximum power*). Untuk mempertahankan sistem dapat bekerja pada MPP, maka metode atau algoritma MPPT telah banyak dikembangkan yaitu :

- a) *Constant Voltage Methode*
- b) *Short Current Pulse Method*
- c) *Open Voltage Methode*
- d) *Perturb and Observe Methode*
- e) *Incremental Conductance Method*
- f) *Temperature Methode*

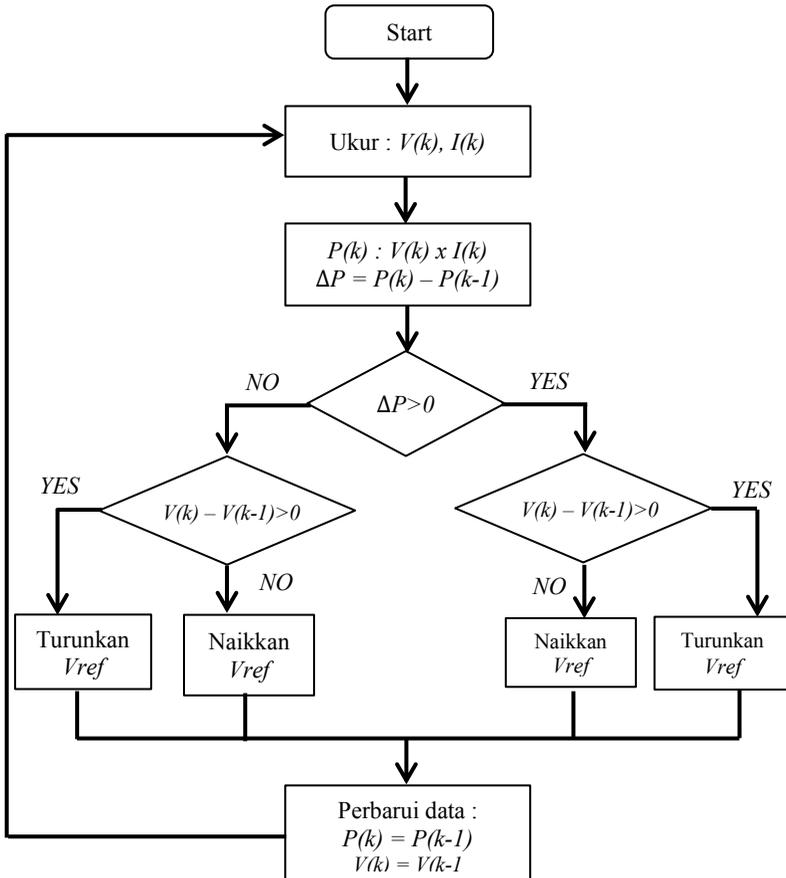
Perbedaan dari masing-masing metode misalnya peralatan sensor yang digunakan, kompleksitas algoritma, efektifitas metode, kecepatan menuju konvergensi, dan cara pelacakan (*tracking*) daerah daya maksimum modul surya.

Dalam Tugas Akhir ini digunakan metode *Perturb and Observe* atau dikenal dengan metode "*hill climbing*". Metode *P&O* sangat terkenal dan biasa digunakan dalam kehidupan sehari-hari karena metode *P&O* memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dan biaya yang dibutuhkan tidak terlalu mahal untuk implementasinya (Faranda & Leva, 2008). Prinsip kerja metode *P&O* adalah menaikkan atau menurunkan (*perturbing*) tegangan *PV* dengan kenaikan (*incremental*) yang kecil.



Gambar 2.8 Kurva titik kerja *PV* akibat perubahan beban.

Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan daya (ΔP) dan akan diperiksa (*observed*), jika ΔP bernilai positif maka akan titik daya akan beresilasi dan bergerak mendekati titik maksimum daya (*MPP*). Perubahan nilai tegangan operasi *PV* akibat *perturbing* akan bergerak mengarah ke titik maksimum daya. Jika ΔP bernilai negatif, maka titik daya akan bergerak menjauh dari *MPP*. *Flowchart* algoritma *P&O* ditunjukkan pada Gambar 2.9 berikut :

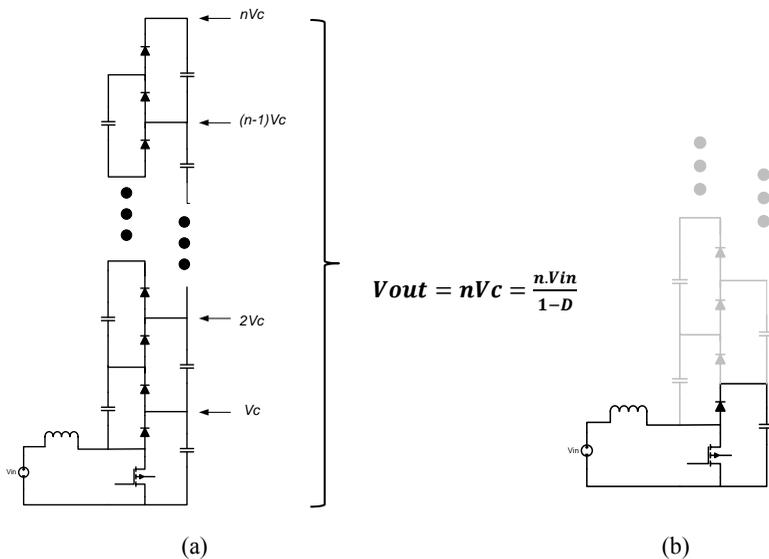


Gambar 2.9 Flowchart dari algoritma *P&O*

2.3 Topologi *Boost Converter Empat Tingkat*

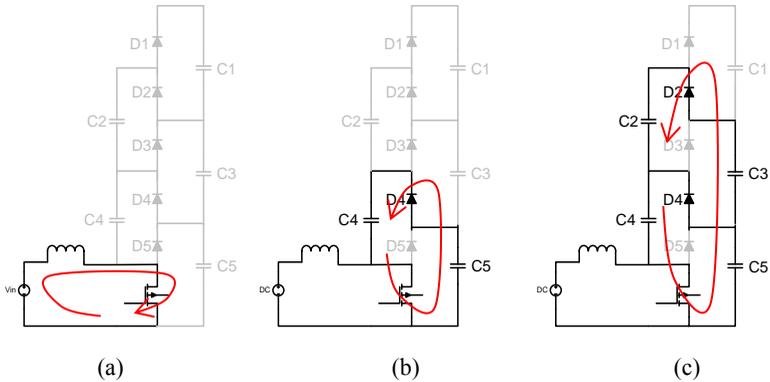
Gambar 2.10(a) menunjukkan topologi yang diusulkan dalam tugas akhir ini. Topologi ini adalah $N \times DC-DC$ converter dimana menggunakan 1 saklar, $2N-1$ dioda, dan $2N-1$ capacitor. Satu kelebihan dari topologi ini yaitu jumlah dari tingkatan (*level*) dapat ditingkatkan dengan menambah kapasitor dan diode [4].

Gambar 2.10(b) merupakan bagian terbawah dari converter yang merupakan *boost converter* konvensional. Perbedaan Antara *multilevel boost converter* dengan yang konvensional adalah pada tegangan keluaran *multilevel boost converter* yaitu V_c dikali N , dimana $N+1$ merupakan jumlah tingkatan dari *converter*.

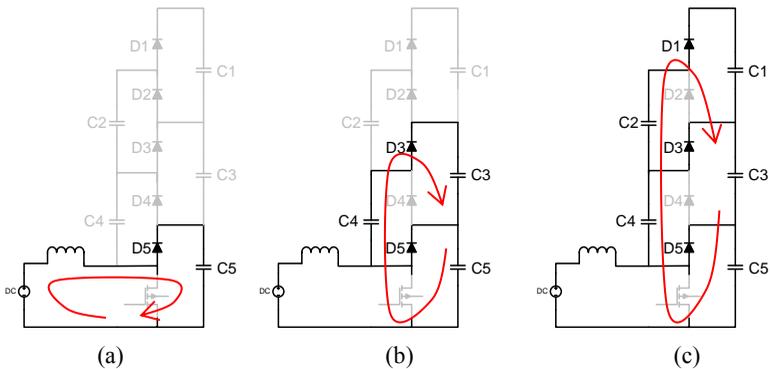


Gambar 2.10 *DC-DC multilevel boost converter for N+1 levels*

Prinsip dari topologi *boost converter* empat tingkat dijelaskan pada Gambar 2.9 dan 2.10, dengan asumsi bahwa rangkaian menggunakan *duty cycle* (D) sebesar 0.5 melalui saklar (S).



Gambar 2.11 *Switch ON state*



Gambar 2.12 *Switch OFF state*

Seperti halnya *boost converter* konvensional, prinsip kerja *boost converter* empat tingkat dibagi menjadi dua mode yaitu mode pengisian (*charging*) arus induktor (Gambar 2.11) dan mode pelepasan (*discharging*) arus induktor (Gambar 2.12).

Berdasarkan analisa rangkaian saat keadaan *switch ON* pada Gambar 2.11(a) arus dari V_{dc} mengalir melalui induktor. Lalu pada Gambar 2.11(b), jika tegangan kapasitor C_4 lebih kecil dari tegangan kapasitor C_5 , maka kapasitor C_5 akan *charging* kapasitor C_4 melalui dioda D_4 dan saklar SW , sampai tegangan keduanya sama. Pada saat yang sama (Gambar 2.11(c)) jika tegangan C_4+C_2 lebih kecil

dari tegangan kapasitor C5+C3, maka kapasitor C5+C3 akan men-*charging* kapasitor C4+C2 melalui dioda D2 dan saklar *SW* sampai tegangan keduanya sama.

Kemudian analisa rangkaian saat keadaan *switch OFF* pada Gambar 2.12(a), induktor men-*charging* kapasitor C5 melalui dioda D5. Saat dioda D5 tertutup, tegangan kapasitor C4 dan tegangan V_{dc} serta tegangan induktor akan men-*charging* kapasitor C3 dan C5 melalui dioda D3, Gambar 2.12(b). Lalu, Gambar 2.12(c) tegangan V_{dc} , tegangan induktor, tegangan C2 dan C4 akan men-*charging* kapasitor C1, C3 dan C5 melalui dioda D1.

Tegangan kapasitor pada rangkaian dirumuskan sebagai berikut :

$$V_{C1} = V_{C2} = V_C = \frac{1}{N} \cdot V_i \quad (2.6)$$

Tegangan induktor pada keadaan *switch ON* dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_i &= V_L \\ V_i &= L \cdot \frac{dI_{on}}{t_{on}} \\ dI_{on} &= V_i \cdot \frac{t_{on}}{L} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Tegangan induktor pada keadaan *switch OFF* dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} 0 &= V_i + V_L + V_C \\ -V_i &= V_L + V_C \\ -V_i &= L \frac{dI_{off}}{t_{off}} + V_o \frac{1}{N} \\ V_o \frac{1}{N} - V_i &= L \frac{dI_{off}}{t_{off}} \\ dI_{off} &= \frac{(V_o \frac{1}{N} - V_i) t_{off}}{L} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Saat keadaan *steady state*, nilai $dI_{on} = dI_{off}$, jadi persamaan (2.7) dapat disubstitusikan pada persamaan (2.8) menjadi seperti persamaan (2.9) :

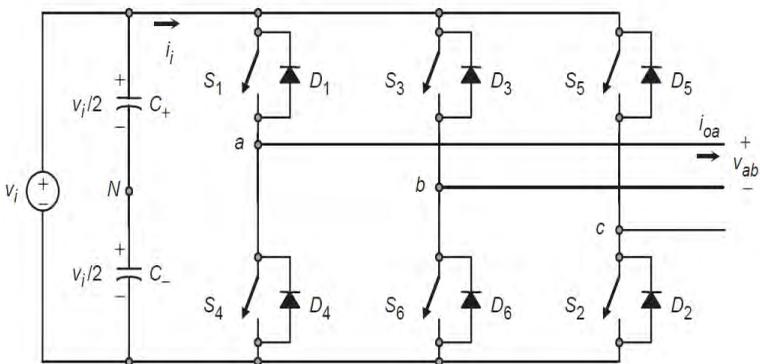
$$\frac{V_i \cdot t_{on}}{L} = \frac{\left(V_o \frac{1}{N} - V_i\right) t_{off}}{L}$$

$$V_i \cdot D = \left(V_o \frac{1}{N} - V_i\right) (1 - D)$$

$$V_o = V_i \frac{N}{(1-D)} \quad (2.9)$$

2.4 Inverter Tiga Fasa

Inverter merupakan peralatan elektronik yang dapat mengubah listrik arus searah menjadi listrik arus bolak-balik [8]. Listrik arus bolak-balik yang dihasilkan dapat diatur tegangan maupun frekuensinya dengan menggunakan transformator, peralatan saklar dan rangkaian kontrol. Aplikasi *inverter* yang saat ini banyak digunakan antara lain untuk merubah tegangan dari sumber listrik arus searah seperti baterai atau sel surya agar menjadi tegangan listrik arus bolak-balik, kemudian tegangan tersebut disuntikkan ke sistem. Secara umum terdapat dua macam *inverter* berdasarkan sinyal keluaran yang dihasilkan, yaitu sinyal sinus modifikasi dan sinyal sinus murni. Topologi standar dari inverter 3 fasa yang tepat digunakan untuk kontrol kecepatan motor dapat dilihat pada Gambar 2.13 sedangkan kondisi pensaklaran yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.13 Topologi standar inverter 3 fasa [8]

Gambar 2.13 di atas menunjukkan bahwa topologi standar inverter 3 fasa terdiri dari enam saklar yang dapat dikendalikan. Setiap fasa tersusun atas dua buah saklar. Dengan demikian arus yang dialirkan pada setiap fasa dapat diatur.

Tabel 2.1 Pensaklaran Inverter 3 Fasa

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

Tabel 2.1 menunjukkan bahwa saklar-saklar yang terletak pada satu kaki (S1 dan S4, S3 dan S6, S5 dan S2) tidak boleh ditutup secara bersamaan karena akan membuat rangkaian menjadi terhubung singkat. Saklar-saklar yang terletak pada satu kaki juga tidak boleh dibuka secara bersamaan karena akan menyebabkan *inverter* menghasilkan sinyal keluaran yang tidak terdefinisi.

Di antara delapan kondisi pensaklaran yang *valid* pada Tabel 2.1 di atas, dua di antaranya (kondisi 7 dan 8) menghasilkan tegangan 0 V sedangkan enam kondisi lainnya tidak. Tegangan keluaran yang mungkin dihasilkan oleh *inverter* adalah V_i , 0 dan $-V_i$. Untuk menghasilkan sinyal tegangan keluaran yang diinginkan, perlu dilakukan pemilihan kondisi yang dapat dicapai dengan teknik modulasi.

2.5 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi digunakan lebih dari 85% dari seluruh motor yang digunakan di industri dan aplikasi sehari-hari, termasuk pompa. Motor induksi tidak memerlukan perawatan yang terlalu sering seperti motor DC. Untuk itulah pada Tugas Akhir ini digunakan motor induksi sebagai penggerak pompa.

2.5.1 Konstruksi Motor Induksi

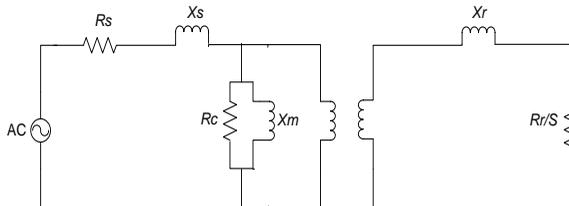
Motor induksi memiliki bagian yang disebut stator dan rotor. Stator merupakan belitan tiga fasa yang dihubungkan sumber tiga fasa dan memiliki jumlah kutub yang tertentu sesuai kecepatan yang diinginkan. Rotor merupakan bagian bergerak pada motor. Berdasarkan jenisnya terdapat dua jenis yaitu rotor sangkar dan rotor belit. Pada Tugas Akhir ini digunakan rotor sangkar karena memiliki konstruksi sederhana. Sementara rotor belit, memiliki belitan yang sama dengan belitan pada stator, namun tidak ekonomis dan biaya perawatan mahal. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y (*wye*) dan masing-masing fasa ujungnya terbuka lalu dikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor. Pada Gambar 2.14 ditunjukkan bagian motor induksi.



Gambar 2.14 Penampang stator dan rotor motor induksi [9]

2.5.2 Analisis Torsi-Kecepatan

Rangkaian ekuivalen motor induksi pada Gambar 2.15 hampir menyerupai rangkaian transformator per fasa [9].



Gambar 2.15 Rangkaian ekuivalen motor induksi [9]

Keterangan :

R_s = resistansi stator

X_s = reaktansi stator.

X_r = reaktansi rotor

S = slip

R_r = resistansi rotor

R_c = resistansi inti

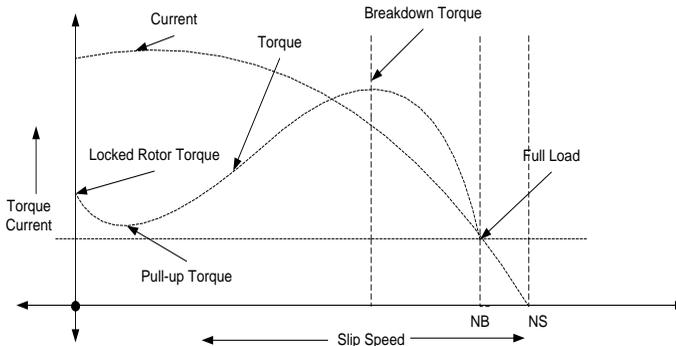
X_m = reaktansi inti

Adapun persamaan arus dan torsi rotor :

$$I = \frac{V_o}{\left(Rs + \frac{Rr}{s}\right) + j(Xs + Xr)} \quad (2.10)$$

$$T = \pm \frac{\left(\frac{3V_o^2 Rr}{s}\right)}{ws \left[\left(Rs + \frac{Rr}{s}\right)^2 + (Xs + Xr)^2 \right]} \quad (2.11)$$

Pada Gambar 2.16 menunjukkan bahwa karakteristik ideal torsi-kecepatan dari motor induksi. Pada *axis-X* menunjukkan kecepatan dan slip, sementara *axis-Y* menunjukkan torsi dan arus. Saat motor dinyalakan, maka arus akan naik hampir 7 kali lipat dari rating, hal ini disebabkan total fluk yang dihasilkan oleh stator dan rotor. Torsi mula juga bernilai sekitar 1.5 kali dari rating torsi motor.



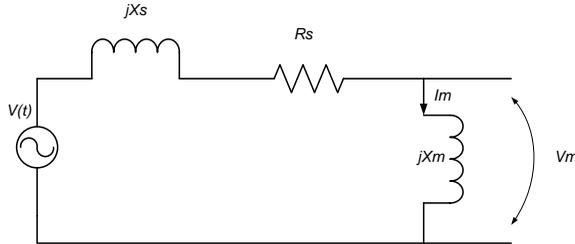
Gambar 2.16 Kurva torsi dan kecepatan motor induksi [9]

Saat kecepatan meningkat, maka arus akan turun secara perlahan dan berkurang secara signifikan saat kecepatan mencapai 80% dari rating. Pada saat motor dalam kecepatan nominal, arus akan menuju ke dalam motor, dan motor menghasilkan torsi sesuai rating.

Saat motor dalam kecepatan nominal, jika beban meningkat melebihi nilai rating torsi motor, maka kecepatan akan berkurang dan slip akan meningkat. Pada saat kecepatan 80% dari kecepatan sinkron, dan beban meningkat sampai 2.5 kali dari rating torsi, ini disebut titik *breakdown torque*. Peningkatan beban yang semakin besar akan menyebabkan torsi motor jatuh dan motor tidak dapat berputar.

2.6 Kontrol V/F Konstan

Beragam aplikasi industry, dimana tidak memerlukan performa dinamis yang tinggi (seperti pompa, ventilator, dsb.), untuk pengaturan kecepatan motor AC dapat digunakan *V/F Control*. [10]. Rangkaian pengganti motor induksi bagian stator ditunjukkan pada Gambar 2.17. Komponen penyusunnya yaitu reaktansi stator (X_s), resistansi stator (R_s), dan reaktansi magnetisasi inti (X_m).



Gambar 2.17 Rangkaian ekuivalen motor induksi bagian stator [9]

Jika tegangan $V(t) = V_m \cdot \sin \omega t$. Sehingga fluks resultan dapat ditentukan sebagai berikut [9] :

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int V(t) dt \quad (2.12)$$

$$= \frac{1}{N_p} \int V_m \cdot \sin \omega t dt \quad (2.13)$$

$$= -\frac{V_m}{\omega \cdot N_p} \cdot \cos \omega t \quad (2.14)$$

$$= -\frac{V}{f} \times \frac{1}{2\pi \cdot N_p} \cdot \cos \omega t \quad (2.15)$$

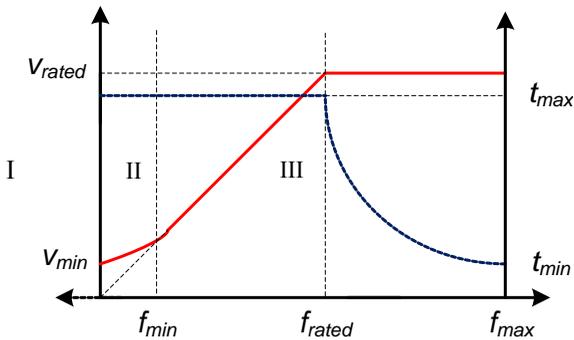
Kemudian dari Gambar 2.17 dapat diketahui saat arus magnetisasi (I_m) mengalir pada reaktansi magnetisasi inti, maka dapat ditentukan tegangan inti motor (V_m) seperti pada persamaan (2.15).

$$V_m = I_m \cdot X_m \quad (2.16)$$

$$I_m = \frac{V_m}{X_m} = \frac{1}{2\pi \cdot L_m} \times \frac{V}{f} \quad (2.17)$$

Dari persamaan (2.14) dan (2.17) diketahui bahwa jika frekuensi diturunkan, sementara tegangan stator konstan akan mengakibatkan nilai fluks (ϕ) dan arus magnetisasi (I_m) akan meningkat. Untuk mencegah hal ini maka perbandingan v/f harus dijaga konstan pada setiap perubahan frekuensi. Kontrol v/f konstan ini merupakan salah satu teknik pengaturan kecepatan motor induksi yang sering digunakan.

Ada tiga daerah pada kurva karakteristik torsi-kecepatan seperti yang tertera pada Gambar 2.18. Daerah I merupakan daerah dengan frekuensi minimum dan membutuhkan tegangan sehingga terjadi *drop* tegangan. Hal ini mengakibatkan kurva V/F tidak linier dan harus dikompensasi dengan menambah tegangan stator. Daerah II merupakan daerah dengan frekuensi nominal dan tegangan nominal. Pada daerah ini kurva V/F linier, karena rasio V/F konstan. Daerah III merupakan daerah dengan frekuensi maksimal namun tegangan tidak dapat ditingkatkan lagi. Hal ini mengakibatkan terjadinya pelemahan medan sehingga torsi yang dihasilkan akan berkurang dan kurva torsi-menjad tak linier.



Gambar 2.18 Tiga daerah karakteristik torsi-kecepatan V/F control

2.7 Kontroler PI

2.7.1 Karakteristik Kontroler

Tujuan utama pemakaian pengendali adalah untuk menghasilkan *output* yang akan membawa sinyal masukan ke dalam besaran yang diinginkan dengan cepat dan teliti serta terhindar dari osilasi. Kinerja sistem pengendalian yang ideal akan mampu bereaksi dengan cepat terhadap adanya perubahan sinyal input tanpa mengalami penundaan serta tidak terpengaruh oleh adanya gangguan [12]. Hubungan antara masukan kontroler $e(t)$, keluaran kontroler $u(t)$, penguatan proporsional (K_p) dan penguatan integral (K_i) seperti persamaan (2.17) dan (2.18).

$$u(t) = K_p \cdot e(t)dt \quad (2.17)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t)dt \quad (2.18)$$

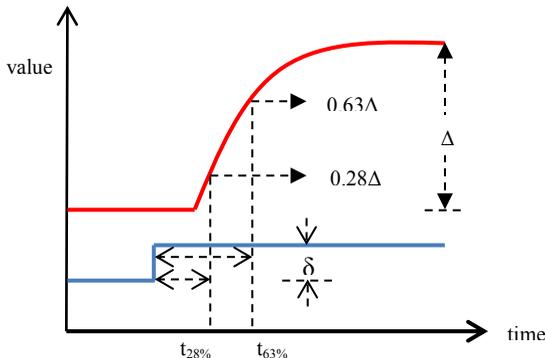
Untuk memperoleh nilai K_p dan K_i harus dilakukan *Tuning*, supaya sistem kendali dapat optimum. Adapun karakteristik respon kontroler berdasarkan perubahan nilai penguatannya (tabel 2.2).

Tabel 2.2 Karakteristik Respon Kontroler [13]

Respon Kontroler	Rise time	Overshoot	Settling time	Error Steady State
K_p	Menurun	Meningkat	Sedikit berubah	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Berubah	Tereliminasi

2.7.2 Metode *Process Reaction Curve*

Salah satu metode untuk menyetel (*tuning*) parameter kontroler berumpan balik agar mendapatkan respon *loop* tertutup yang diharapkan adalah *Process Reaction Curve*. Gambar 2.19 menunjukkan proses kurva reaksi suatu sistem yang akan dianalisis nilai-nilai kontrolernya [14].



Gambar 2.19 *Process reaction curve*

Langkah – langkah identifikasi model dengan metode ini adalah sebagai berikut :

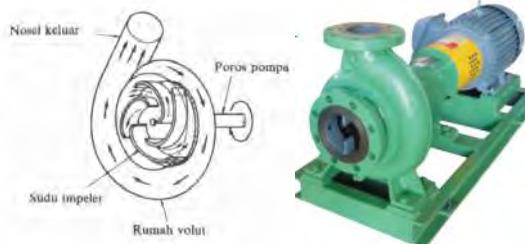
1. Mencari kurva respon tanpa sistem kontroler yang dianggap ideal dengan mengatur besar input step.
2. Menghitung parameter K_p (*gain*) dan τ (*time constant*) .

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta} \quad 2.19$$

$$\tau = 1.5(t_{63\%} - t_{28\%}) \quad 2.20$$

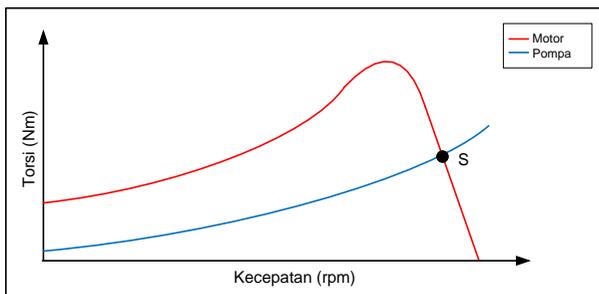
2.8 Pompa Sentrifugal

Pompa digerakkan oleh motor. Tenaga dari motor diberikan pada poros pompa untuk memutar impeler yang dipasangkan pada poros pompa [15]. Pompa sentrifugal memiliki sebuah *impeller* (baling – baling) yang bertujuan untuk mengalirkan zat cair dari suatu tempat ketempat lain dengan cara mengubah energi zat cair yang dikandung menjadi lebih besar. Akibat dari putaran impeller yang menimbulkan gaya sentrifugal, maka zat cair akan mengalir dari tengah impeler keluar lewat saluran di antara sudu - sudu dan meninggalkan impeler dengan kecepatan yang tinggi. Adapun bentuk dari motor dan pompa sentrifugal dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Bagian dalam Pompa sentrifugal dan motor penggerak [16]

Karakteristik torsi dan kecepatan motor dengan pompa dapat dilihat pada Gambar 2.21, dimana titik S merupakan titik *steady-state* operasi pompa. Misalkan titik S berada pada kecepatan 1465 rpm dan torsi 9.7 Nm, dapat dikatakan saat torsi mencapai 9.7 Nm kecepatan motor harus dijaga pada kisaran 1465 rpm. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan kerja optimal antara motor induksi dan pompa sentrifugal.



Gambar 2.21 Karakteristik torsi-kecepatan motor induksi dengan beban pompa

Untuk menentukan besar kapasitas pompa, kita terlebih dahulu memperkirakan besar debit air yang mampu dialirkan oleh pompa dengan menggunakan daya sistem. Debit air dapat dikendalikan dengan mengatur kecepatan motor penggerak. Adapun persamaan 2.21 yang menjelaskan hubungan antara debit aliran dan kecepatan, yaitu Hukum Afinitas [17].

$$\begin{array}{l} Q \sim N \\ H \sim N^2 \\ P \sim N^3 \end{array} \quad 2.21$$

Berdasarkan persamaan 2.21, dengan melakukan penggandaan kecepatan putaran pompa sentrifugal (2N), maka akan meningkatkan pemakaian daya 8 kalinya. Sebaliknya penurunan kecepatan yang kecil akan berakibat penurunan pemakaian daya yang sangat besar. Hal ini menjadikan dasar bagi penghematan energi pada pompa sentrifugal dengan kebutuhan debit yang bervariasi.

Setelah kita menentukan perkiraan kapasitas pompa (debit dan *head*) maka selanjutnya kita dapat menentukan besar daya yang dibutuhkan pompa dengan kapasitas yang kita inginkan. Adapun parameter dan persamaan yang perlu diperhatikan sebagai acuan dalam mendesain sebuah pompa [17] :

1. *Water Horse Power (WHP)* : daya yang diperlukan untuk memompa air dengan debit dan tinggi tertentu. Daya ini dinyatakan dalam daya kuda (*HP*).

$$WHP = \frac{\rho \times Q \times H \times g}{1000} \quad (2.22)$$

Dimana :

ρ = massa jenis air (kg/m^3)

Q = debit pompa (m^3/s)

H = head pompa (m)

G = percepatan gravitasi (m/s^2)

2. *Shaft Horse Power (SHP)* : daya yang diperlukan untuk menggerakkan poros pompa. Daya ini dinyatakan dalam daya kuda (*HP*).

$$SHP = \frac{WHP}{\text{Efisiensi Pompa}} \quad (2.23)$$

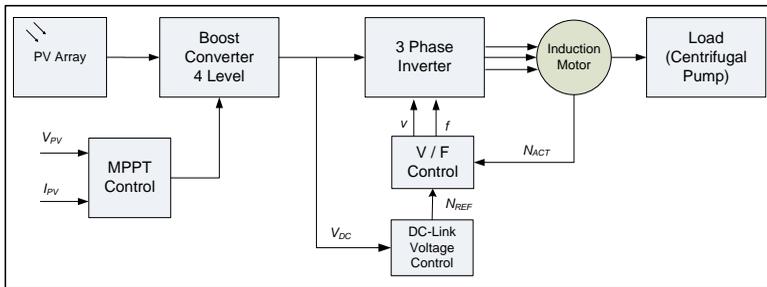
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

DESAIN SISTEM SOLAR WATER PUMPING BERBASIS BOOST CONVERTER EMPAT TINGKAT

3.1 Pemodelan Sistem

Desain sistem tenaga dengan panel surya sebagai sumber energi yang saya gunakan pada penelitian ini adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Pemodelan sistem ini hanya menunjukkan blok diagram yang berupa *subsistem* yang di dalamnya terdapat beberapa rangkaian kontrol. Tujuan pemodelan sistem ini adalah untuk mempermudah pembaca dalam melihat sistem secara keseluruhan.



Gambar 3.1 Konfigurasi Sistem *Solar Water Pumping*

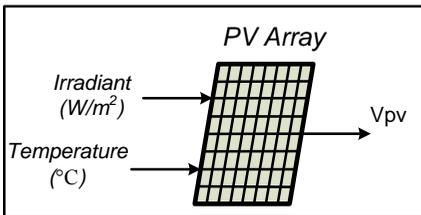
3.2 Desain Rangkaian PV Array

Pada penelitian ini menggunakan sumber daya listrik berupa panel surya (*solar cell*). Panel surya yang digunakan adalah merk *Solartech Photovoltaic Module Multicrystalline Silicon* kapasitas 60 Watts (SPM-60P). *Datasheet* PV SPM-60P ditunjukkan pada Tabel 3.1. Blok diagram modul ini ditunjukkan pada Gambar 3.2.

Beban yang digunakan pada sistem ini berupa motor induksi dengan kapasitas daya sebesar 2 HP dengan tegangan sebesar 380 Volt (terhubung secara wye) dan terkopel secara langsung dengan pompa sentrifugal. Oleh karena itu dibutuhkan penyesuaian terhadap panel surya SPM-60P, cara penyesuaian dilakukan melalui proses *sizing*. Untuk mendapatkan besar tegangan dan arus dengan nilai tertentu pada sel surya, maka harus dilakukan pemasangan PV secara seri dan paralel.

Tabel 3.1 Parameter Panel Surya SPM-60P

Parameter	Nilai
Jumlah sel surya	36
Daya maksimum	60 W
Tegangan daya maksimum	17.1 V
Arus daya maksimum	3.5 A
Tegangan rangkaian terbuka	21.1 V
Batas arus hubung singkat	3.8 V
Koefisien suhu rangkaian terbuka $-(0.38) \%/^{\circ}\text{C}$...
Koefisien suhu rangkaian hubung singkat $(0.065) \%/^{\circ}\text{C}$...
Koefisien suhu daya $-(0.68) \%/^{\circ}\text{C}$...
Tes Uji Standar	
Intensitas cahaya	1000W/m ²
Suhu	25°C



Gambar 3.2 Blok Diagram PV Array

Untuk penelitian ini saya menggunakan modul PV sebesar 1.600 Watt. Setelah mengetahui daya PV, maka langkah selanjutnya adalah mengetahui tegangan dan arus yang harus dikeluarkan oleh PV. Sistem bekerja dengan arus nominal motor yaitu 10 A sesuai rating motor. Dengan daya 60 Watt per modul, maka PV array akan tersusun 27 buah modul. Penyusunan modul secara seri-paralel tersebut akan mengubah parameter datasheet PV yang harus dimasukkan ke dalam *software* simulasi yang digunakan.

Penyusunan sel surya yang dihubungkan seri sebanyak 9 modul akan mengubah parameter-parameter sebagai berikut:

- a) Jumlah sel surya (N_s) $\times 9 = 324$
- b) Daya Maximum (P_{max}) $\times 9 = 540$ Watt
- c) Tegangan daya maksimum (V_{mp}) $\times 9 = 153.9$ Volt
- d) Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) $\times 9 = 189.9$ Volt

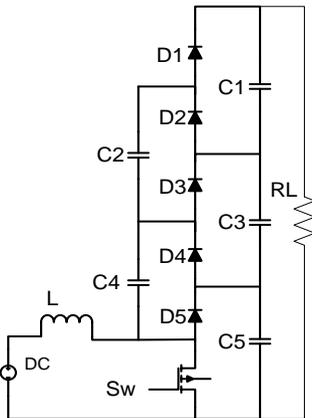
Kemudian 9 modul yang telah disusun seri tersebut diparalel sejumlah 3 kali sehingga parameter-parameter yang dimasukkan ke dalam software simulasi adalah:

- a) Daya Maksimum (P_{max}) $\times 3$ = 1620 Watt
- b) Arus daya maksimum (I_{mp}) $\times 3$ = 10.5 Ampere
- c) Arus rangkaian terbuka (I_{sc}) $\times 3$ = 11.4 Ampere
- d) Resistensi seri (R_s) $\times 0.33$ = 0.0024 Ohm
- e) Arus hubung singkat (I_{sc0}) $\times 3$ = 11.4 Ampere
- f) Arus saturasi (I_{s0}) $\times 3$ = 6.48e-8 Ampere
- g) Koefisien suhu (C_t) $\times 3$ = 0.0072 A/K

3.3 Desain Boost Converter Empat Tingkat

3.3.1 Rangkaian Boost Converter Empat Tingkat

Sistem *solar water pumping* pada Tugas Akhir ini menggunakan topologi *boost converter* empat tingkat, topologi terdiri dari satu induktor (L), satu saklar (Sw), dioda yang berjumlah lima buah ($D1-D5$), dan kapasitor berjumlah lima buah ($C1-C5$) serta resistansi RL sebagai beban bayangan. Topologi konverter ditunjukkan pada Gambar 3.3. Berdasarkan kebutuhan sistem, topologi ini diharapkan mampu mengeluarkan daya sebesar 1.6 kW serta dapat meningkatkan tegangan masukan (dari PV) sebesar 150 Volt menjadi 600 Volt dengan riak tegangan dan riak arus masing-masing sebesar 2 Ampere. Tegangan keluaran *boost converter* ini merupakan tegangan masukan inverter dan disebut tegangan *DC-Link*.



Gambar 3.3 Rangkaian *Boost Converter* Empat Tingkat

3.3.2 Penentuan Parameter Rangkaian

Rangkaian *multilevel boost converter* digunakan sebagai tegangan *DC-link* untuk sistem *PV*. Topologi ini dapat meningkatkan tegangan tanpa menggunakan transformator untuk memenuhi kebutuhan tegangan *input* dari inverter agar dapat mengeluarkan tegangan nominal 380 Vdc. Untuk penentuan tegangan *DC-link* dapat digunakan persamaan 3.1 [11] :

$$V_{ab} = \frac{m_a \sqrt{3} V_{DC}}{2} \quad (3.1)$$

Dimana :

V_{ab} = tegangan *line-line* rms keluaran inverter (volt)

m_a = indeks modulasi, $0 < m_a < 1$

V_{DC} = tegangan *DC-link*

Tegangan sistem adalah 380 Volt dengan indeks modulasi 0.75 maka tegangan *DC-link* minimal yang dibutuhkan yaitu :

$$V_{DC} = \frac{2V_{ab}}{m_a \sqrt{3}} = \frac{2 \times 380}{0.75 \times \sqrt{3}} = 585.05 \text{ Volt}$$

Jadi, tegangan tegangan masukan dari inverter dapat ditentukan sebesar 600 Vdc. Tegangan ini juga merupakan tegangan yang harus dihasilkan oleh *boost converter* empat tingkat.

Kemudian langkah selanjutnya adalah menentukan nilai resistansi sebagai beban bayangan, untuk mengetahui tegangan keluaran (V_o) berdasarkan daya (P) yang digunakan sistem dengan menggunakan persamaan 3.2 :

$$R = \frac{V_o^2}{P} \quad (3.2)$$

$$R = \frac{600^2}{1600} = 225 \Omega$$

Daya yang digunakan sistem 1.600 W dan tegangan keluaran 600 V. Jadi, nilai resistansi yang dibutuhkan rangkaian sebesar 225 Ω .

Langkah selanjutnya setelah mengetahui tegangan keluaran yaitu menentukan besar *duty cycle* yang dibutuhkan untuk menaikkan tegangan masukan konverter. Tegangan masukan berasal dari modul *PV array* sebesar 150 Vdc. Berdasarkan persamaan (2.9), maka dapat ditentukan nilai *duty cycle*

$$V_o = V_i \frac{N}{(1-D)}$$

$$D = \frac{(N \times V_i) - V_o}{-V_o}$$

$$D = \frac{(3 \times 150) - 600}{-600} = 0.25$$

Dengan demikian nilai *duty cycle* yaitu 0.25. Setelah mengetahui nilai *duty cycle* maka kita mencari nilai induktor dan kapasitor rangkaian berdasarkan persamaan. Persamaan 3.3 untuk tiap level rangkaian, kemudian persamaan 3.4 untuk keseluruhan rangkaian.

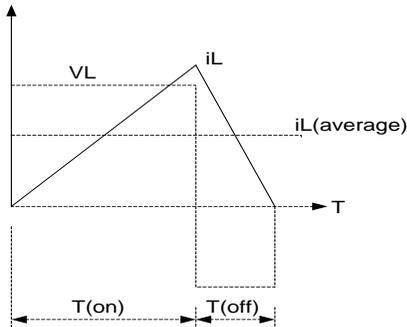
$$\frac{V_c}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3.3)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{N}{1-D} \quad (3.4)$$

$$V_i \cdot I_L = V_o \cdot I_o = V_o \cdot \frac{V_o}{R_o} = NV_c \cdot \frac{NV_c}{R_o} = \frac{N^2 V_c^2}{R_o} \quad (3.5)$$

$$I_L = \frac{V_c N^2 V_c}{V_i R_o} = \frac{N^2 V_c}{(1-D)R_o} \quad (3.6)$$

Sementara, untuk mendesain induktor harus memperhatikan nilai induktor saat keadaan *boundary point* yaitu titik diantara mode *discontinuous* dan *continuous current conduction*. Keadaan ini terjadi saat rata-rata arus induktor bernilai setengah dari arus induktor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Arus induktor saat *boundary point*

Berdasarkan Gambar 3.4, saat *boundary point* nilai induktor minimum (*critical*) merupakan setengah dari I_L [19], seperti persamaan (3.7)

$$I_{L(min)} = \frac{V_{in}}{2L}DT \quad (3.7)$$

Kemudian persamaan (3.6) disubstitusi ke persamaan (3.7)

$$\begin{aligned} I_L &= I_{L(min)} \\ \frac{N^2Vc}{(1-D)Ro} &= \frac{V_{in}}{2}DT \\ \frac{N^2V_{in}}{(1-D)^2Ro} &= \frac{V_{in}}{2L_{(min)}}DT \\ L_{min} &= \frac{(1-D)^2Ro}{2N^2}DT \end{aligned} \quad (3.8)$$

Lalu agar arus induktor tidak berubah ke dalam kondisi *DCM* saat konverter beroperasi dalam *CCM*, maka nilai L_{min} dikalikan 10.

$$\begin{aligned} L &= \frac{(1-D)^2Ro}{2N^2}DT \times 10 = \frac{5(1-D)^2Ro}{N^2}DT \\ L &= \frac{5(1-0.25)^2 \times 225}{3^2 \times 10000} \times 0.25 = 1.75 \text{ mH} \end{aligned}$$

Kemudian mencari nilai kapasitor,

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{I_c(t)}{C1//C2//C3} = \frac{3(I_L-I_O)(t)}{C_{Total}}$$

Arus induktor rata-rata (I_L) didapatkan melalui persamaan daya *input-output* sebagai berikut :

$$\begin{aligned} V_{in} \cdot I_L &= \frac{V_o^2}{R} \\ i_L &= \frac{V_o}{R(1-D)} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Sehingga penyelesaiannya menjadi:

$$\Delta V_c = \frac{3\left(\frac{V_o}{1-D} - V_o\right)}{RC_1}(t)$$

$$\Delta V_c = \frac{3D}{RC_1(1-D)}(t)$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = \frac{3V_oD}{\Delta V_c Rf} \quad (3.10)$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = \frac{3 \times 600 \times 0.25}{2 \times 225 \times 10000} = 100 \mu F$$

Dari hasil perhitungan di atas, dapat disimpulkan parameter-parameter yang diperlukan untuk desain rangkaian *boost converter* empat tingkat, seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Parameter Rangkaian Boost Converter Empat Tingkat

Parameter	Nilai
Tegangan masukan	150 V
Tegangan keluaran	600 V
Daya sistem	1.6 kW
<i>Duty Cycle</i>	0.25
Resistor	225 Ω
Induktor	1.75 mH
Kapasitor (min)	100 μF

3.3.3 Desain Kontrol MPPT

Pencarian titik daya maksimum atau *MPPT* dari *PV* adalah dengan menggunakan metode *P & O (Perturb and Observe)*. Teknik *P&O* ini digunakan untuk mengatur *duty cycle boost converter* empat tingkat. *Flowchart* untuk *MPPT* ditunjukkan pada Gambar 2.7.

Desain *MPPT* yang digunakan memiliki input berupa tegangan dan arus *PV* yang digunakan untuk memperoleh daya *PV* (P_{pv}). Kemudian P_{pv} akan diturunkan melalui proses dP_{pv}/dV_{pv} . Apabila hasil yang diperoleh tidak nol, maka berarti daya yang dialirkan *PV* belum maksimal. Hasil penurunan tersebut akan menaikkan atau menurunkan tegangan referensi *PV* yang selanjutnya diproses oleh sebuah rangkaian kontrol menghasilkan sinyal referensi V_{PVref} untuk mengatur *duty cycle*. Adapun konfigurasi kontrol *MPPT P&O* dapat dilihat pada Lampiran.

3.3.4 Desain Kontrol *Duty Cycle*

Konsep kerja dari kontroler ini adalah membandingkan tegangan referensi yang dihasilkan oleh kontrol *MPPT* dengan tegangan *PV* yang terukur. Desain kontroler *duty cycle* yang digunakan adalah seperti pada Gambar 3.5. Perbandingan ini akan menghasilkan sinyal error dengan rumusan sebagai berikut :

$$V_{PV\text{error}}(t) = V_{PV\text{ref}} - V_{PV}(t) \quad (3.11)$$

Sinyal error lalu diolah oleh kontroler PI menghasilkan sinyal referensi dengan rumusan:

$$V_{D\text{ref}}(t) = K_{pdc} \times V_{PV\text{err}}(t) + K_{idc} \int_0^t V_{PV\text{err}}(t) dt \quad (3.12)$$

Dimana,

$V_{PV\text{err}}$ = Sinyal tegangan *error* PV (volt)

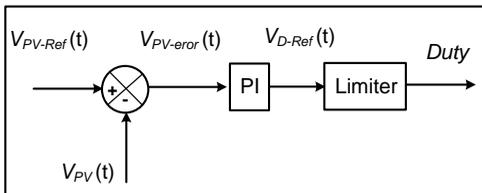
$V_{PV\text{ref}}$ = Tegangan referensi PV (volt)

V_{PV} = Tegangan PV terukur. (volt)

$V_{D\text{ref}}$ = Sinyal output PI yang akan dimodulasi (volt)

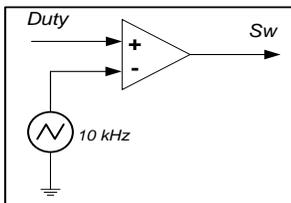
K_{pdc} = Konstanta proportional PI V_{dc} .

K_{idc} = Konstanta integral PI V_{dc} .



Gambar 3.5 Kontrol *Duty Cycle* Boost Converter Empat Tingkat.

Sinyal keluaran dari limiter (*duty cycle*) akan dikomparasikan dengan sinyal gergaji melalui komparator dan menghasilkan sinyal PWM yang digunakan untuk pensaklaran *boost converter* empat tingkat seperti pada Gambar 3.6.



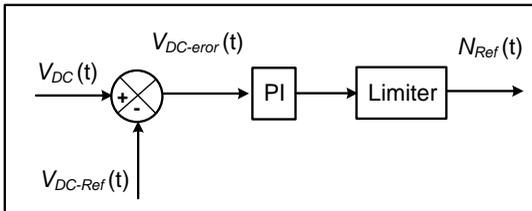
Gambar 3.6 Pensaklaran *boost converter* empat tingkat

3.4 Desain Kontrol DC-Link

Berdasarkan perubahan intensitas cahaya matahari yang diterima *PV* mengakibatkan perubahan tegangan dan daya keluaran *PV*. Apabila terjadi perubahan pada daya keluaran *PV* maka kecepatan motor induksi sebagai beban sistem juga berubah menyesuaikan daya keluaran *PV*. Kontrol *DC-link* hal ini bertujuan untuk menjaga agar tegangan keluaran *boost converter* tetap konstan. Jika tegangan masukan *inverter* dapat dijaga konstan maka tegangan keluaran *inverter* juga dijamin akan stabil. Desain kontrol *DC-Link* ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Konsep kerja dari controller ini adalah membandingkan tegangan referensi yang diinginkan dengan tegangan *DC-link* yang terukur. Perbandingan ini akan menghasilkan sinyal *error* sesuai persamaan 3.15

$$V_{DC-err}(t) = V_{DC-ref} - V_{DC} \quad (3.15)$$



Gambar 3.7 Rangkaian kontrol *DC-Link*

Sinyal *error* lalu diolah oleh controller PI menghasilkan sinyal referensi dengan rumusan:

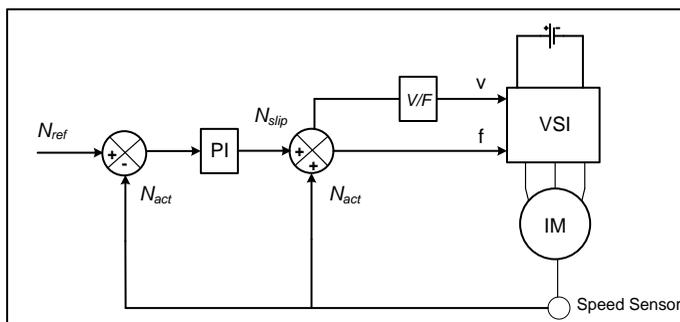
$$N_{ref}(t) = K_{pdc}(t) + K_{idc} \int_0^t V_{DC-err}(t) dt$$

Sinyal keluaran dari *DC-Link* kontrol inilah yang digunakan sebagai referensi kecepatan (N_{ref}) bagi kontrol *V/F* konstan.

3.5 Desain Kontrol V/F Konstan

Pengendalian kecepatan putaran motor AC dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya dengan kendali *V/F* konstan. Keuntungan dari metode kendali *V/F* konstan adalah memiliki struktur kendali yang sederhana, mudah dan dapat dioperasikan dengan metode loop terbuka tanpa sensor kecepatan sehingga secara ekonomis lebih murah. Namun kendali *V/F* konstan juga dapat dioperasikan dengan loop tertutup.

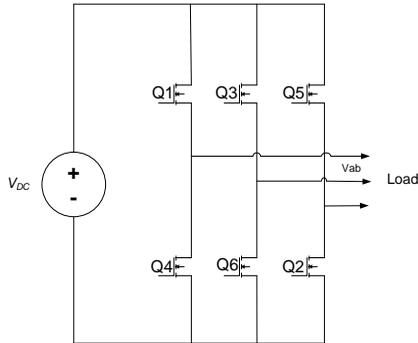
Pada tugas akhir ini menggunakan kontrol *V/F loop* tertutup, karena untuk meningkatkan optimasi sistem dan respon kendali kecepatan motor. Pada Gambar 3.8 ditunjukkan prinsip kontrol *V/F* secara *loop* tertutup. Prinsip dasar dari kontrol kecepatan *V/F* konstan pada motor induksi adalah untuk menentukan variabel nilai tegangan (v) dan variabel nilai frekuensi (f). Sensor kecepatan digunakan untuk mendapatkan besar kecepatan aktual motor. Kecepatan aktual motor ini lalu dikomparasi dengan kecepatan referensi. Proses ini menghasilkan eror kecepatan, selanjutnya eror kecepatan menuju PI untuk diproses. Keluaran dari PI ini menghasilkan slip kecepatan yang selanjutnya ditambahkan dengan kecepatan aktual motor dan menghasilkan kecepatan sinkron. Kemudian dapat ditentukan besar variabel tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan *Voltage Source Inverter (VSI)* untuk mengoperasikan motor induksi. Desain rangkaian kontrol *V/F* berdasarkan [7] ditunjukkan pada Lampiran.



Gambar 3.8 Blok diagram prinsip kerja *V/F* konstan loop tertutup

3.6 Desain Inverter Tiga Fasa

Jenis inverter yang digunakan pada penelitian ini adalah *Voltage Source Inverter (VSI)*. Komponen switching pada VSI adalah IGBT yang diasumsikan bersifat ideal. IGBT tersebut akan dikontrol melalui PWM yang dihasilkan oleh sinyal keluaran dari *V/F Control* yaitu sinyal sinusoidal yang akan menjadi sinyal referensi untuk *SPWM*.



Gambar 3.9 Rangkaian *VSI* 3 fasa terhubung beban

Tegangan keluaran inverter (V_{ab}) pada sistem ini ditentukan sebesar 380 V, hal ini disebabkan sistem terhubung dengan beban motor induksi tiga fasa dengan konfigurasi *wye* (Y). Sesuai pada rating (tabel) tertera saat hubungan *wye* (Y) adalah 380 V. Rangkaian *VSI* secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.9.

3.7 Pemodelan Motor Induksi 3 fasa

Pada Tugas Akhir ini digunakan motor induksi tiga fasa rotor sangkar dengan daya keluaran 2 HP. Berdasarkan referensi [20] didapatkan parameter motor induksi sebagai berikut :

Tabel 3.3 Data Parameter Motor Induksi

Parameter	Nilai
Model	C 90 L-4
Daya (P)	2 HP
Jumlah kutub (p)	4 kutub
Tegangan Saluran (V_{L-L})	220 / 380 V
Arus saluran (I_L)	6,47 / 3,8 A
Kecepatan putaran (n)	1485 rpm
Frekuensi (f)	50 Hz
Resistansi stator (r_r)	2,34 Ω
Resistansi rotor (r_s)	0,85 Ω
Induktansi bocor stator (L_s)	0,00265 H
Induktansi bocor rotor (L_r)	0,00265 H
Induktansi magnetisasi (M)	0,8689 H
Momen Inersia (J)	0,0112 kg.m ²

3.8 Pemodelan Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal yang digunakan pada penelitian ini digunakan untuk memompa air. Pompa sentrifugal akan digerakkan oleh motor induksi tiga fasa. Pemodelan pompa sentrifugal dibuat berdasarkan persamaan pada referensi [15]. Dalam perencanaan pompa kita dapat memberikan asumsi yaitu : debit air sebesar 10 liter/detik, total head sebesar 10 meter, efisiensi pompa sebesar 70% dan efisiensi motor penggerak 90%. Dari parameter tersebut dapat dicari nilai torsi pompa dari persamaan [2.22 – 2.23].

Parameter pertama yang kita tentukan melalui *Function Box 1* adalah *Water Horse Power (WHP)* yaitu daya (*HP*) yang dibutuhkan untuk mengalirkan cairan. Sesuai persamaan 2.22, dengan massa jenis air sebesar 1000 kg/m^3 , debit 10 liter/s, head pompa 10 meter, dan percepatan gravitasi 9.87 m/s^2 maka didapatkan hasil sebagai berikut :

$$WHP = \frac{\rho \times Q \times H \times g}{1000} = \frac{1000 \times 0.01 \times 10 \times 9.87}{1000} = 1.33 \text{ HP}$$

Pada *Function Box 2* dapat ditentukan *Shaft Horse Power* yaitu daya (*HP*) yang diperlukan untuk untuk menggerakkan batang torak. Dari persamaan 2.23 dengan efisiensi pompa sebesar 70% maka didapatkan hasil sebagai berikut :

$$SHP = \frac{WHP}{\text{Efisiensi Pompa}} = \frac{1.33 \text{ HP}}{0.7} = 1.9 \text{ HP}$$

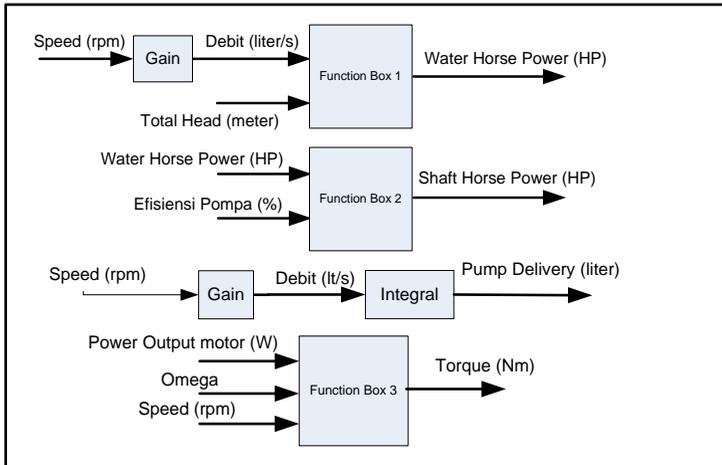
Kemudian menentukan volume air yang dialirkan, untuk menentukan volume kita harus menentukan debit pompa. Berdasarkan persamaan 2.21 debit pompa berbanding lurus dengan kecepatan maka kita dapat menentukan debit (*Q*) dengan mengalikan kecepatan (*Ns*) dengan gain.

$$Q = Ns \times \text{Gain} \quad (3.17)$$

Pada pemodelan pompa *Gain* bernilai $\frac{10}{1500}$, karena saat kecepatan 1500 rpm, debit pompa akan bernilai 10 liter/s. Lalu debit diintegrasikan dengan koefisien integral bernilai 1, hal ini bertujuan untuk mencari akumulasi volume di tiap detiknya. Pada *Function Box 3* dapat ditentukan nilai torsi pompa melalui persamaan 3.18.

$$T = \frac{P_O \times 60}{N \times 2\pi} \quad (3.18)$$

Dimana N merupakan kecepatan aktual motor dan P_o adalah daya keluaran pompa saat mengalirkan debit maksimum (10 liter/s). Setelah menentukan parameter maka dapat disusun blok diagram seperti Gambar 3.11 sesuai perhitungan di atas.



Gambar 3.11 Diagram blok pemodelan karakteristik torsi pompa

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA

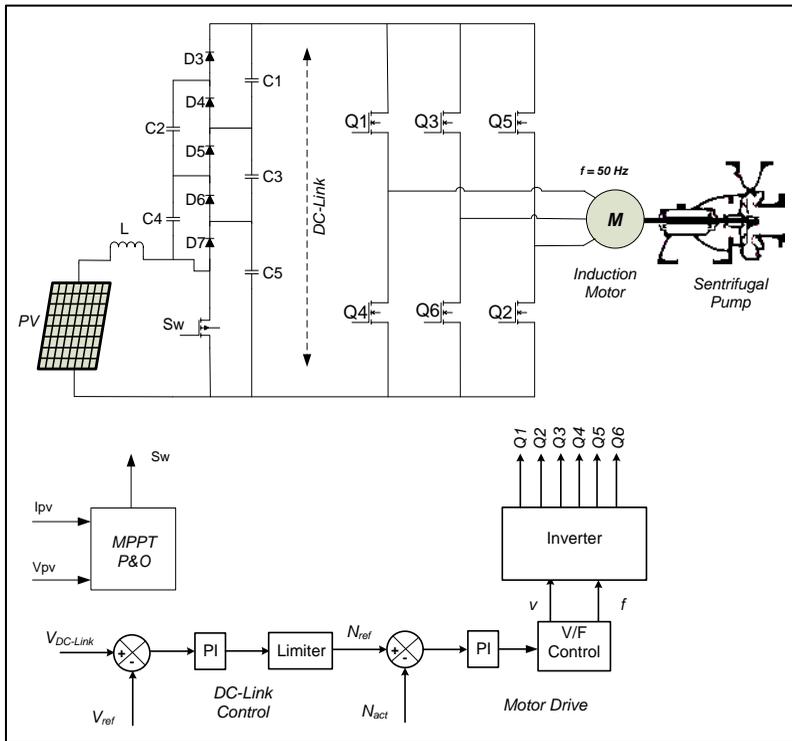
Setelah mendesain dan memodelkan sistem *solar water pumping*, maka langkah selanjutnya dilakukan pengujian sistem dan analisa data. Pengujian pertama yaitu pada sistem PV dengan MPPT kontrol dan *boost converter* empat tingkat dengan memberikan nilai *irradiant* yang berubah untuk menganalisis kinerja MPPT, kontrol tegangan DC-Link, dan kontrol V/F konstan. Pengujian yang kedua adalah membandingkan hasil pengujian *boost converter* empat tingkat, dan *boost converter* tiga tingkat serta *boost converter* konvensional untuk menganalisis perbedaan parameter dari ketiga topologi tersebut. Adapun parameter-parameter sistem adalah seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Spesifikasi Sistem *Solar Water Pumping*

Komponen	Spesifikasi	
Panel Surya	Daya	1.6 kWp
	Tegangan	150 Vdc
<i>Boost Converter</i> Empat Tingkat	Induktor	1.75 mH
	Kapasitor	100 μ F
	<i>Duty Cycle</i>	0.25
	Tegangan Keluaran	600 Vdc
	Frekuensi Pensaklaran	10 kHz
Inverter Tiga Fasa	Tegangan Keluaran	380 V (line - line)
	Indeks Modulasi	0.75
Motor Induksi	Tegangan / Daya	380 V / 2 HP
	Frekuensi	50 Hz
	Torsi Maksimum	10 Nm
Pompa Sentrifugal	Debit	10 lt/s
	<i>Head</i> Total	10 m

4.1 Pengujian Sistem Panel Surya dengan MPPT Kontrol dan *Boost Converter* Empat Tingkat

Skema rangkaian pengujian dapat dilihat pada Gambar 4.1. Sistem PV terdiri dari rangkaian PV, *boost converter* empat tingkat, inverter (VSI) tiga fasa, dan beban motor induksi sebagai penggerak pompa sentrifugal. Sistem ini diuji dengan cara mengubah intensitas cahaya matahari (*irradiant*).

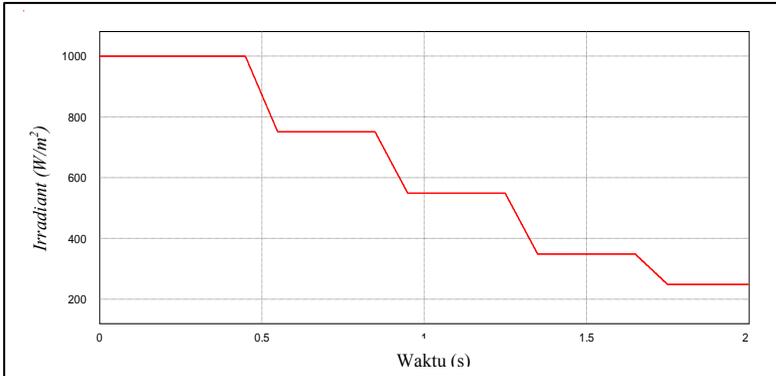


Gambar 4.1 Konfigurasi *Solar Water Pumping System*

Adapun data yang akan dianalisis pada pengujian sistem pada Gambar 4.1 adalah sebagai berikut :

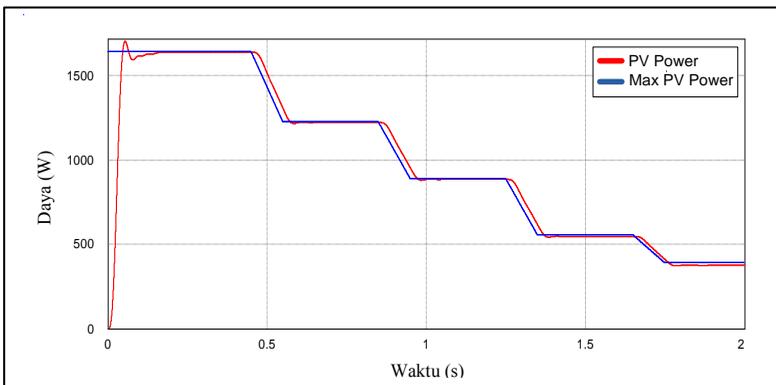
1. Perbandingan daya keluaran PV dengan daya maksimum PV.
2. Persentase error dari MPPT P&O terhadap perubahan *irradiant*.
3. Perbandingan tegangan keluaran *boost converter* dengan tegangan PV.
4. Tegangan keluaran inverter dan frekuensi sistem.
5. Hasil kontrol V/F konstan.
6. Perbandingan kecepatan motor induksi dengan kecepatan referensi.
7. Torsi motor induksi dan pompa.
8. Debit yang dihasilkan pompa terhadap perubahan *irradiant*.
9. Volume yang dikeluarkan pompa selama waktu simulasi
10. Persentase aliran daya pada sistem terhadap perubahan *irradiant*.

Adapun kurva *irradiant* matahari ditunjukkan seperti pada Gambar 4.2, kurva ini menunjukkan nilai intensitas cahaya matahari bertahap turun mulai dari 1000 W/m^2 , 750 W/m^2 , 550 W/m^2 , 350 W/m^2 , dan 250 W/m^2 . Perubahan nilai *irradiant* ini secara perlahan dan tidak turun secara drastis.



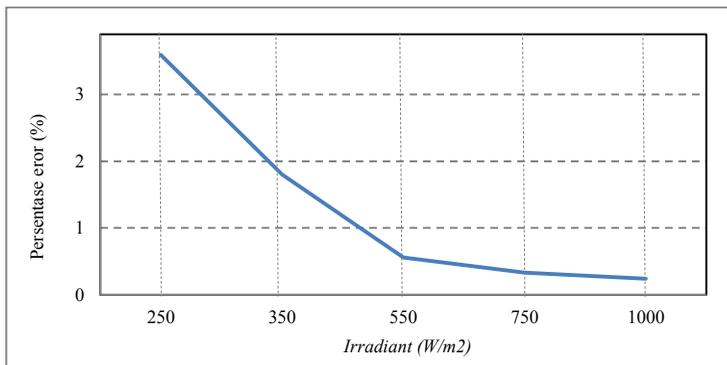
Gambar 4.2 Kurva *irradiant* pada pengujian sistem

Berdasarkan perubahan *irradiant* matahari, maka didapatkan daya PV yang berubah sebanding dengan *irradiant*. Pada pengujian ini menggunakan algoritma *MPPT Perturb and Observation*, perubahan daya PV akan mengikuti daya referensi PV, dan berusaha mencapai daya maksimal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Kurva daya maksimal *PV* dan daya *PV*

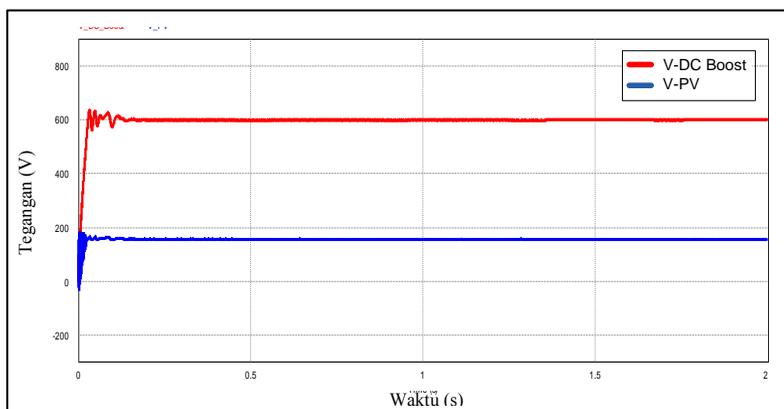
Pada Gambar 4.4 ditunjukkan saat *irradiant* maksimal yaitu 1000 W/m^2 , persentase eror hanya 0.24%. Kemudian pada *irradiant* terkecil yaitu 250 W/m^2 , persentase eror meningkat sekitar 3.59%.



Gambar 4.4 Grafik persentase eror *MPPT P&O* terhadap perubahan *irradiant*

Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa *MPPT* dapat beroperasi dengan baik, karena nilai eror yang sangat kecil sehingga daya PV selalu menuju titik daya maksimal di tiap perubahan *irradiant*.

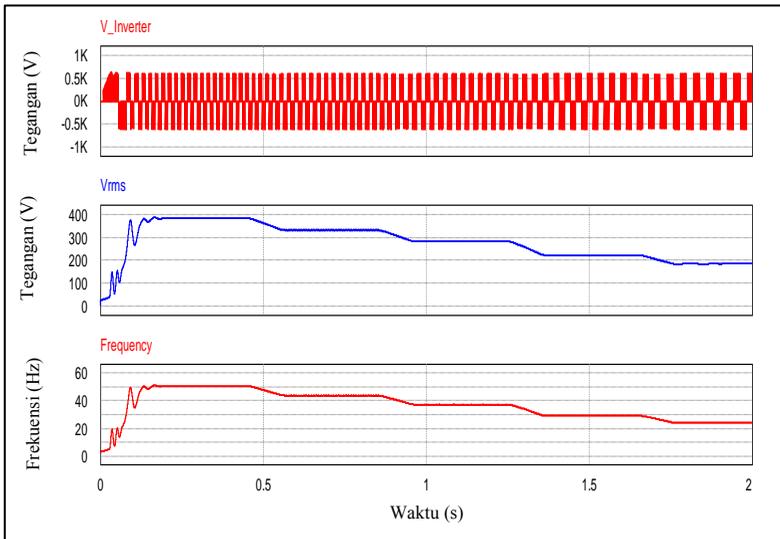
Kemudian, pada sistem ini saat terjadi perubahan daya pada PV diusahakan tegangan keluaran *boost converter* tetap konstan dan stabil. Hal ini dikarenakan tegangan ini merupakan *DC-link* dan sebagai masukan bagi inverter tiga fasa.



Gambar 4.5 Kurva tegangan *DC boost* dan tegangan PV

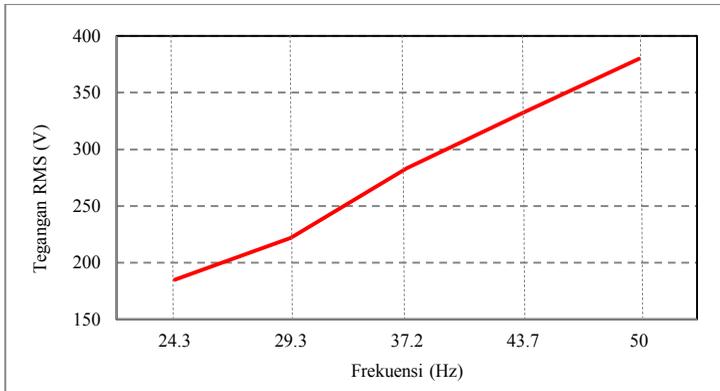
Pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa tegangan *boost converter* empat tingkat sebesar 600 V dan tegangan PV sebesar 155 V, hal ini dapat dikatakan bahwa pengaturan *duty cycle* sudah tepat sesuai perhitungan. Sementara itu, tegangan DC boost sudah stabil dan tidak terpengaruh terhadap perubahan daya yang terjadi pada PV. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol tegangan *DC-Link* sudah bekerja dengan baik.

Berdasarkan perubahan *irradiant* maka tegangan keluaran inverter juga berubah. Perubahan tegangan inverter ini diatur oleh kontrol *V/F* sehingga setiap perubahan tegangan (rms) inverter, rasio *V/F* diusahakan selalu konstan. Adapun perbandingan tegangan keluaran inverter, tegangan rms dan frekuensi seperti pada Gambar 4.6.



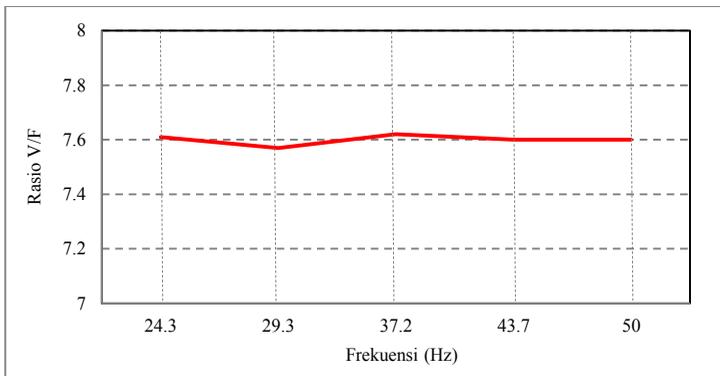
Gambar 4.6 Kurva tegangan inverter, tegangan rms, dan frekuensi sistem

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7, saat tegangan inverter (rms) bernilai 380 V maka frekuensi juga bernilai 50 Hz, begitu juga saat tegangan rms bernilai 185 V maka frekuensi juga turun mencapai 24.3 Hz.



Gambar 4.7 Grafik tegangan inverter (rms) terhadap frekuensi

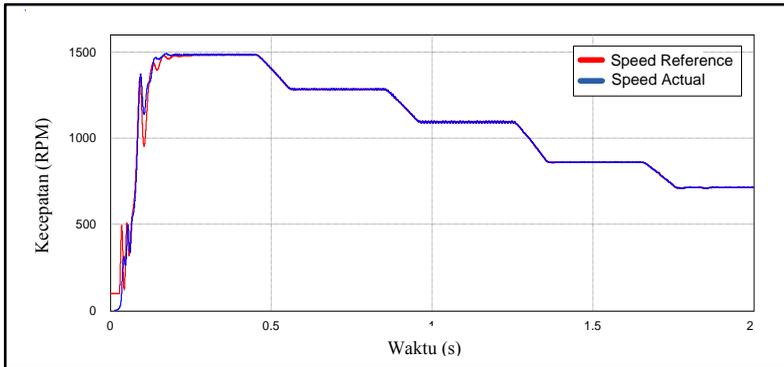
Berdasarkan hasil tersebut, dapat dikatakan kontrol V/F sudah dapat bekerja optimal dengan menjaga konstan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Saat terjadi perubahan frekuensi, rasio V/F tetap bernilai konstan sekitar 7.6 yang didapat dari $(\frac{380}{50})$.



Gambar 4.8 Grafik rasio V/F terhadap frekuensi

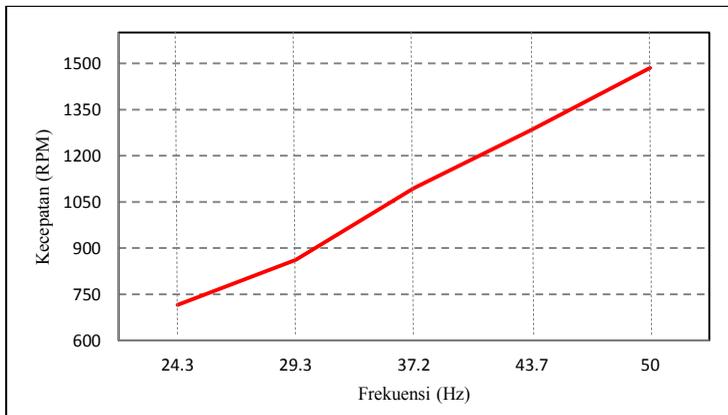
Perubahan frekuensi juga dapat mempengaruhi kecepatan motor penggerak pompa, adapun kurva perubahan kecepatan dapat dilihat pada Gambar 4.9. Kecepatan motor akan berubah secara otomatis dan berusaha mengikuti kecepatan referensi. Sesuai dengan hasil pengujian,

didapatkan slip motor bernilai sekitar 2% hal ini menunjukkan bahwa kecepatan motor tidak terpaut jauh dengan kecepatan sinkron motor



Gambar 4.9 Kurva kecepatan motor dan kecepatan referensi terhadap waktu

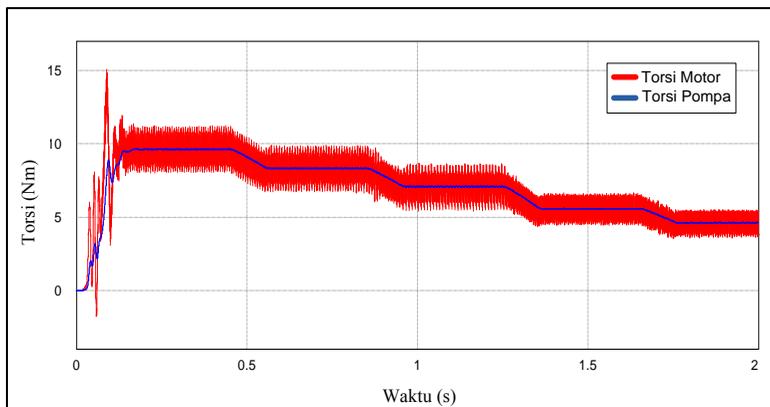
Perubahan kecepatan ini disebabkan adanya kontrol V/F untuk mengatur kecepatan. Nilai frekuensi dapat digunakan untuk mengubah nilai kecepatan motor. Sesuai persamaan 2.12 dimana, N_s merupakan kecepatan sinkron sebesar 1500 rpm, f merupakan frekuensi sistem sebesar 50 Hz, dan p adalah jumlah kutub yaitu 4 buah. Jadi, nilai frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan sinkron. Perubahan frekuensi ini dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik kecepatan motor terhadap frekuensi

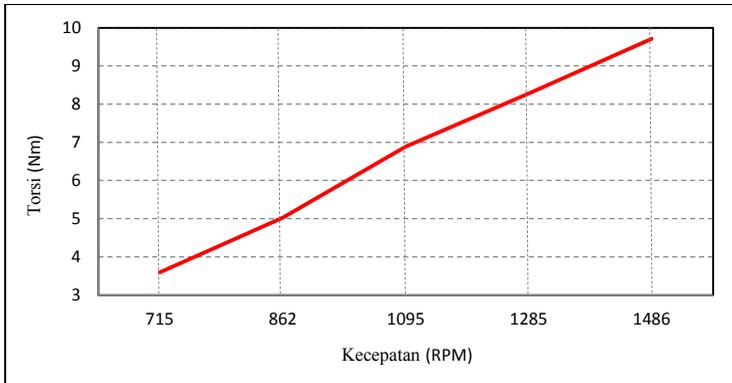
Saat frekuensi bernilai 50 Hz, maka kecepatan motor bernilai 1485 rpm. Lalu, saat frekuensi turun mencapai 24.3 Hz, maka kecepatan motor bernilai 715 rpm. Kurva kecepatan motor terhadap frekuensi ditunjukkan pada Gambar 4.10 menunjukkan bahwa semakin bertambah nilai frekuensi maka kecepatan motor akan semakin meningkat. Hal ini membuktikan bahwa kontrol kecepatan motor *V/F closed loop* sudah bekerja dengan baik.

Pada pengujian ini digunakan beban motor induksi tiga fasa sebagai penggerak dari pompa sentrifugal. Dengan perhitungan pada bab sebelumnya, didapat nilai torsi saat kecepatan maksimal sekitar 9.7 Nm. Nilai torsi ini dapat berubah-ubah karena pompa sentrifugal merupakan beban dengan torsi yang bervariasi. Pada Gambar 4.11 ditunjukkan torsi motor menyesuaikan besar torsi pompa.



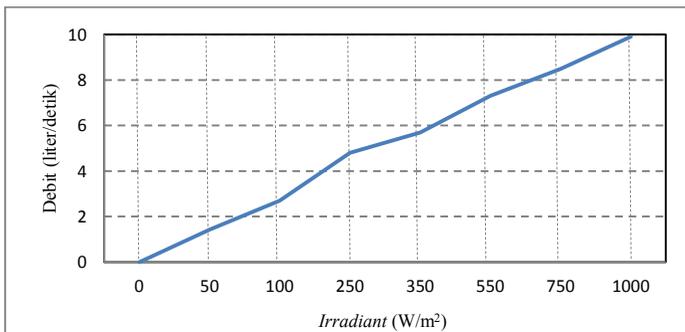
Gambar 4.11 Kurva torsi motor dan torsi pompa

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12, nilai torsi yang dihasilkan pompa berbanding lurus dengan kecepatan, namun torsi tidak akan bertambah nilainya (konstan) saat motor mencapai kecepatan maksimal (1486 rpm). Dari hasil ini maka dapat dikatakan pemodelan motor induksi tiga fasa sudah sesuai dengan spesifikasi sistem. Motor induksi tiga fasa mampu menghasilkan torsi sebesar 9.7 Nm saat *irradiant* maksimal. Kestabilan sistem *solar water pumping* dapat dilihat yaitu pada saat *irradiant* turun secara bertahap, maka perubahan nilai torsi motor induksi tetap terjaga. Hal ini bertujuan supaya torsi tidak turun secara drastis dan sistem tetap dalam keadaan optimal.



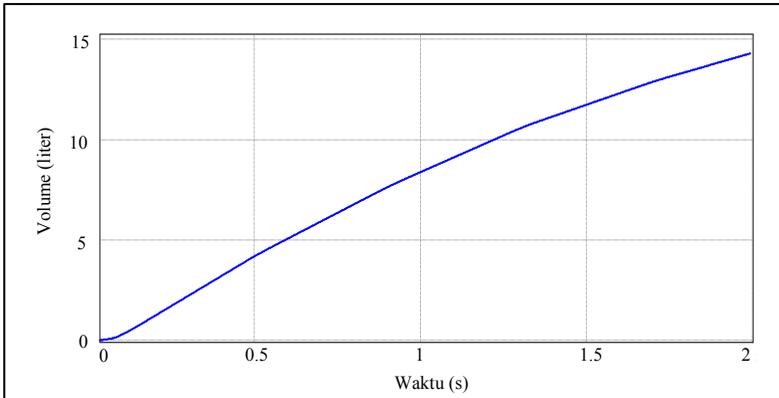
Gambar 4.12 Grafik torsi motor terhadap kecepatan motor

Pompa sentrifugal dapat mengalirkan air dengan debit tertentu, debit air yang dihasilkan pompa berbanding lurus dengan putaran torak. Apabila antara pompa dan motor penggerak dihubungkan langsung (tanpa *belt*) maka putaran torak sama dengan putaran rotor motor penggerak, sehingga debit air berbanding lurus dengan kecepatan motor. Pada penelitian ini debit air bernilai 10 liter/detik saat kecepatan motor mencapai kecepatan maksimal.



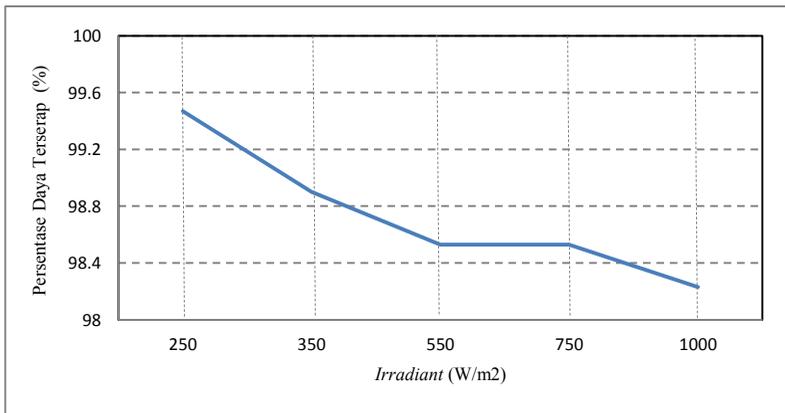
Gambar 4.13 Grafik debit air terhadap *Irradiant*

Pada pengujian ini, didapatkan data volume air yang berhasil dipompa oleh sistem selama 2 detik waktu simulasi adalah sebanyak 14.3 liter, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.14



Gambar 4.14 Kurva volume air keluaran pompa sentrifugal

Suatu sistem dapat dikatakan memiliki efisiensi tinggi jika dalam proses transfer daya dari sumber energi PV menuju ke beban tidak memiliki *losses* yang terlalu tinggi pula. Pada pengujian ini semua komponen diasumsikan ideal, sehingga daya yang dihasilkan oleh PV dapat tersalurkan dan diserap oleh motor secara maksimal. Gambar 4.15 menunjukkan bahwa persentase daya terserap mencapai 98%.



Gambar 4.15 Grafik persentase daya terserap terhadap *irradiant*

4.2 Analisis Perbedaan Topologi-Topologi Boost Converter

Topologi yang akan dianalisis yaitu *boost converter* empat tingkat, *boost converter* tiga tingkat, dan *boost converter* konvensional. Pengujian terhadap ketiga topologi ini bertujuan untuk melihat perbedaan antara parameter komponen. Adapun parameter-parameter dari ketiga topologi tersebut yang bernilai sama adalah tegangan input, tegangan keluaran, riak arus induktor, riak tegangan keluaran dan daya keluaran. Setelah itu, kita akan menganalisa perbedaan nilai induktansi, kapasitansi, rating tegangan IGBT dan rating tegangan kapasitor dari ketiga topologi itu.

Berdasarkan pada persamaan 3.8 maka nilai induktansi *pada boost converter* empat tingkat adalah sebesar 1.75 mH. Kemudian berdasarkan pada persamaan 3.9 maka nilai kapasitansi sebesar 100 μ F. Rangkaian ini menggunakan sumber DC tetap sebesar 150 V untuk dinaikkan tegangannya menjadi 600 V.

Sedangkan untuk topologi *boost converter* tiga tingkat pada penelitian sebelumnya, menggunakan sumber DC tetap sebesar 150 V untuk dinaikkan tegangannya menjadi 600 V. Maka berdasarkan pada persamaan 4.2[3] maka nilai induktansi adalah sebesar :

$$L = \frac{V_{in}(D-0.5)}{\Delta i_L f} \quad (4.2)$$

$$L = \frac{150 \times (0.75 - 0.5)}{2 \times 10000} = 1.875 \text{ mH}$$

Lalu nilai kapasitansinya berdasarkan persamaan 4.3[3] adalah sebesar :

$$C_1 = C_2 = \frac{2V_{in}(D-0.5)}{\Delta V_C R(1-D)f} \quad (4.3)$$

$$C = \frac{2 \times (150)(0.75 - 0.5)}{2 \times 225 \times (1 - 0.75) \times 10000} = 66.67 \mu F$$

Kemudian untuk parameter *boost converter* konvensional menggunakan sumber DC tetap sebesar 150 V dan digunakan untuk menaikkan tegangan menjadi 600 V. Maka nilai induktansi berdasarkan persamaan 4.4[11] adalah :

$$L = \frac{V_{PV} D}{\Delta i_L f} \quad (4.4)$$

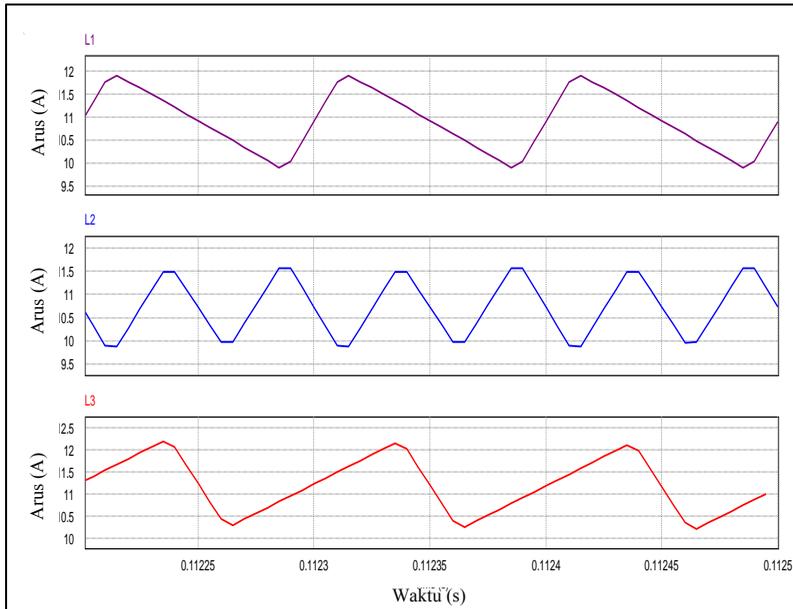
$$L = \frac{150 \times (0.75)}{2(10000)} = 5.625 \text{ mH}$$

Sedangkan nilai kapasitor (C_b) pada *boost converter* konvensional dapat dihitung berdasarkan pada persamaan 4.5 [11].

$$C = \frac{V_o \cdot D}{\Delta V_c f R (1-D)} \quad (4.5)$$

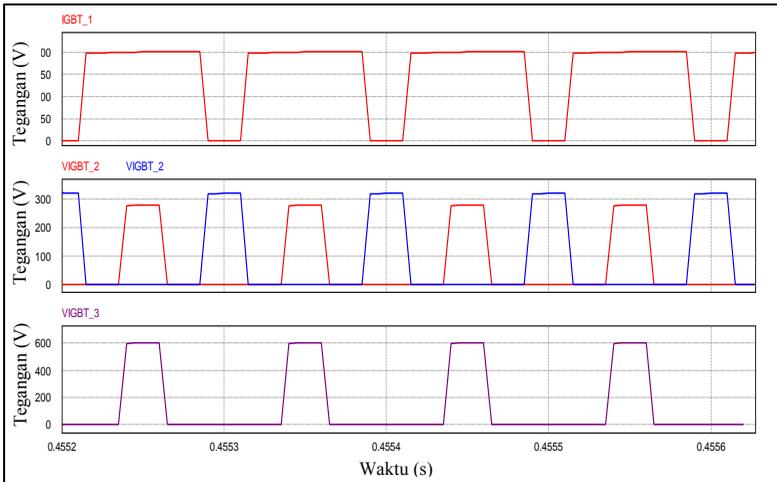
$$C = \frac{600(0.75)}{2(10000)(225)(1-0.75)} = 100 \text{ uF}$$

Gambar 4.16 menunjukkan besar riak arus pada kedua induktor masing-masing rangkaian. Berdasarkan hasil tersebut, *boost converter* empat tingkat menimbulkan riak arus sebesar $11.7 - 9.8 = 1.9 \text{ A}$. Sedangkan *boost converter* tiga tingkat menimbulkan riak arus sebesar $11.5 - 9.6 = 1.9 \text{ A}$. Sementara pada *boost converter* konvensional menimbulkan riak arus sebesar $12.2 - 10.3 = 1.9 \text{ A}$.



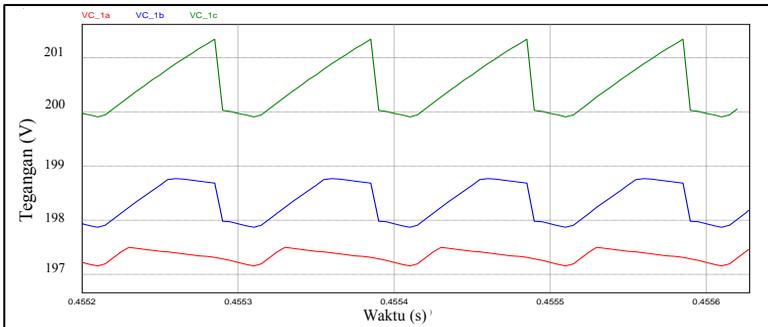
Gambar 4.16 Kurva Arus Induktor *Boost Converter* Empat Tigkat (L1), Arus Induktor *Boost Converter* Tiga Tigkat (L2) dan Arus Induktor *Boost Converter* Konvensional (L3)

Kemudian pada Gambar 4.17 menunjukkan tegangan IGBT pada *boost converter* empat tingkat ($V_{IGBT\ 1}$) dengan *duty cycle* 0.25 dapat menahan tegangan sebesar 200 Volt atau 1/3 dari tegangan output selama periode off (t_{off}). Kemudian tegangan $V_{IGBT\ 2}$ pada *boost converter* tiga tingkat) dengan *duty cycle* 0.75 dapat menahan tegangan rata-rata sebesar 300 Volt atau 1/2 dari tegangan output selama periode off (t_{off}). Lalu tegangan $V_{IGBT\ 3}$ pada *boost converter* konvensional dengan *duty cycle* 0.75 dapat menahan tegangan rata-rata sebesar 600 Volt atau sama dengan tegangan output selama periode off (t_{off}).

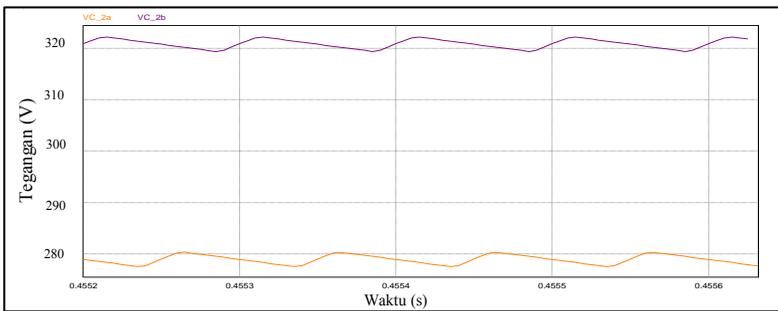


Gambar 4.17 Kurva Tegangan IGBT *boost converter* empat tingkat (VIGBT1), tiga tingkat (VIGBT2) dan *boost converter* konvensional (VIGBT3)

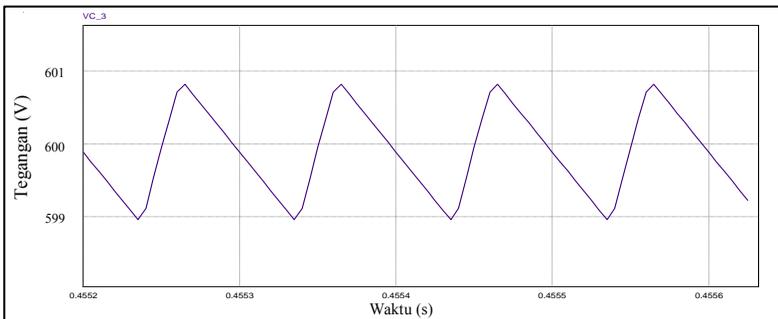
Gambar 4.18 menunjukkan tegangan yang mampu ditahan oleh tiap kapasitor pada topologi *boost converter*. Pada hasil simulasi dapat diketahui bahwa kapasitor pada *boost converter* empat tingkat (4.18a) kapasitor pertama menahan tegangan sebesar 200.5 V, kapasitor kedua 198 V dan kapasitor ketiga 197 V. Pada *boost converter* tiga tingkat (4.18b) kapasitor pertama menahan tegangan sebesar 320 V dan kapasitor kedua 280 V. Sedangkan *boost converter* konvensional kapasitornya yang hanya berjumlah satu menahan 600 V.



(a)



(b)

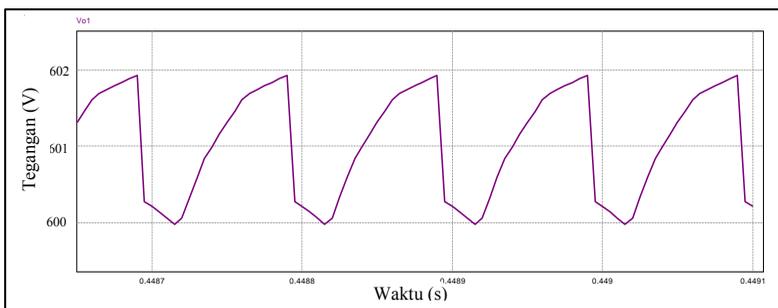


(c)

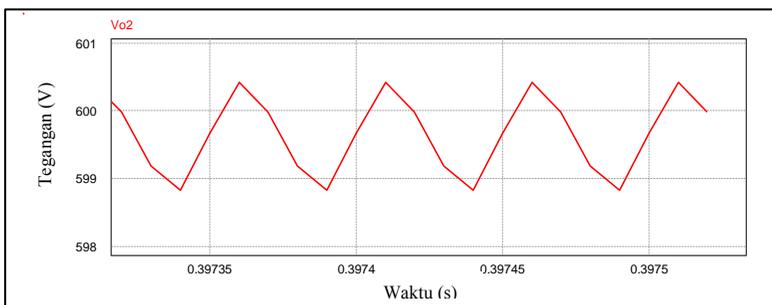
Gambar 4.18 (a) Kurva tegangan kapasitor *boost converter* empat tingkat, (b) Kurva tegangan kapasitor *boost converter* tiga tingkat dan (c) Kurva tegangan kapasitor *boost converter* konvensional

Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa kapasitor pada *boost converter* empat tingkat (Gambar 4.18a) mampu menahan tegangan rata-rata sebesar 200 V. Kapasitor pada *boost converter* tiga tingkat (Gambar 4.18b) mampu menahan tegangan rata-rata sebesar 300 V. Sedangkan kapasitor pada *boost converter* konvensional dapat menahan tegangan rata-rata sebesar 600 V (Gambar 4.18c).

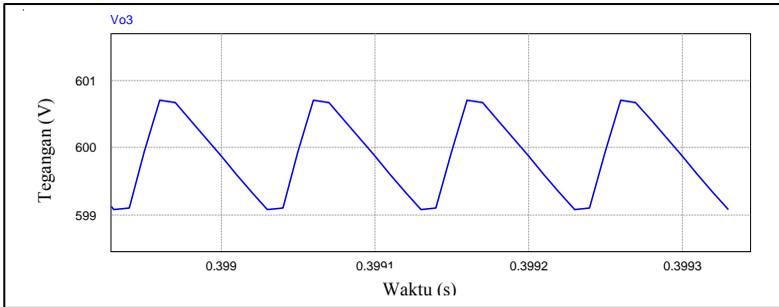
Gambar 4.19 menunjukkan besar riak tegangan keluaran masing-masing rangkaian *boost converter*. Pada *boost converter* empat tingkat menggunakan satu kapasitor sebesar $100\ \mu\text{F}$ menimbulkan riak tegangan sebesar $601.9 - 599.9 = 2\ \text{V}$. Kemudian pada *boost converter* tiga tingkat menggunakan dua kapasitor masing-masing sebesar $66.67\ \mu\text{F}$ menimbulkan riak tegangan sebesar $600.7 - 598.7 = 2\ \text{V}$. Sedangkan pada *boost converter* konvensional menggunakan lima buah kapasitor bernilai $100\ \mu\text{F}$ menghasilkan riak tegangan sebesar $600.6 - 598.6 = 2\ \text{V}$



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.19 (a) Kurva tegangan keluaran *boost converter* konvensional (b) *boost converter* tiga tingkat dan (c) *boost converter* empat tingkat

Setelah terkumpul data-data di atas, maka dapat disusun perbandingan parameter antara ketiga topologi konverter tersebut dalam bentuk tabel yang ditunjukkan pada tabel 4.1. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui kelebihan dari *boost converter* empat tingkat yaitu memiliki rating tegangan yang lebih kecil pada tiap komponen (*low voltage stress*) dan dapat meningkatkan tegangan dengan *duty cycle* yang kecil. Namun, kelemahan dari topologi ini yaitu membutuhkan komponen penyusun yang lebih banyak, yaitu dioda jumlahnya $2N-1$ dan kapasitor berjumlah $2N-1$, dimana $N+1$ merupakan jumlah level.

Tabel 4.1 Perbandingan Parameter Topologi *Boost Converter*

Parameter	<i>Boost Converter</i>		
	Empat Tingkat	Tiga Tingkat	Konvensional
Tegangan Input (V)	150	150	150
Tegangan Output (V)	600	600	600
Duty Cycle (D)	0.25	0.75	0.75
Frekuensi Switching (Hz)	10.000	10.000	10.000
Induktor (mH)	1.75	1.87	5.63
Kapasitor (μF)	100 (5)	66.67 (2)	100
Resistor (Ω)	225	225	225
Riak Arus Induktor (A)	1.9	1.9	1.9
Riak Tegangan Output (A)	2	2	2
Rating Tegangan IGBT (V)	> 200	> 300	> 600
Rating Tegangan Kapasitor (V)	> 200	> 300	> 600

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis dapat disimpulkan bahwa topologi *boost converter* empat tingkat yang diaplikasikan pada sistem *solar water pumping* dapat mengubah tegangan keluaran *PV* sebesar 150 Volt menjadi 600 Volt dengan *duty cycle* 0.25, riak arus bernilai 2 Ampere dan riak tegangan bernilai 2 Volt.

Pada pengujian sistem dengan perubahan *irradiant* menunjukkan daya keluaran *PV* dapat dimaksimalkan menggunakan kontrol MPPT dengan efisiensi rata-rata 98%, tegangan *DC-Link* dapat dijaga konstan pada tegangan 600 Volt dan kontrol *v/f* konstan mampu mengatur kecepatan motor dengan menjaga rasio *v/f* tetap bernilai 7,6.

Pengujian sistem *solar water pumping* dilakukan dengan perubahan intensitas cahaya. Saat *irradiant* maksimum (1000 W/m²), didapat kecepatan motor 1486 rpm dengan torsi 9.7 Nm dan debit pompa 10 liter/detik. Sedangkan saat *irradiant* minimum (250 W/m²), didapat kecepatan motor 715 rpm dengan torsi 3.59 Nm dan debit pompa 4.8 liter/detik.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk tugas akhir ini adalah :

1. Diharapkan kedepannya dapat dilakukan penelitian menggunakan metode *MPPT* lain seperti *hill-climbing*, *fuzzy logic* dan sebagainya.
2. Diharapkan kedepannya hasil simulasi dapat lebih diperbaiki dan dapat diimplementasikan pada *plant* secara nyata.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Akhihiro Oi, “*Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System*”, Thesis of Master of Science in Electrical Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.
- [2] Chris Callahan, PE, “*Solar Water Pumping Basic*”, Project of Agricultural Engineering, The University of Tennessee, 2013.
- [3] Jung-Min Kwon, Bong-Hwan Kwon, Kwang-HeeNam, “Three-phase photovoltaic system with three-level boosting MPPT control”, IEEE transactions on power electronics, vol. 23, no. 5, sept. 2008.
- [4] Julio C. Rossas-Caro; Juan M. Ramirez; Pedro Martin Garcia-Vite; “Novel DC-DC Multilevel Boost Converter”. 978-1-4244-1668-4/08/\$25.00 ©2008 IEEE
- [5] Dedet C. Riawan, Vita L. Budiharto Putri, and Febby Widiyanto, “Desain dan Simulasi Boost Converter Tiga Tingkat dengan Kontrol MPPT pada Sistem Panel Surya untuk Pembangkit Tersebar”, JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1, 1-6 (2013)
- [6] Mostafa Mousa, Ahmed Alaa El-koussi, “*Optimum Design for Multilevel Boost Converter*”, Proceedings of MEPCON, Cairo University, Egypt, December 19-21. 2010, Paper ID 275
- [7] David S. Morales, “*Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic applications*”, Thesis of Master of Science in Technology, Aalto University.
- [8] Daniel W. Hart, “*Power Electronics*”, McGraw-Hill Companies, 2011.
- [9] Stephen J. Chapman, “*Electric Machinery Fundamentals*” McGraw-Hill Companies, 2005
- [10] Csaba SZABÓ, Maria IMECS, Ioan Iov INCZE, “*VOLT-HERTZ CONTROL OF THE SYNCHRONOUS MOTOR WITH RAMP EXCITING VOLTAGE*”, annual of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 30, 2006
- [11] M. H. Rashid, “*Power Electronics Handbook*”, Elsevier Inc 2007
- [12] Tri Artono, “Penentuan Konstanta Pengendali dengan Metode Ziegler Nichols”, Jurnal R & B, Vol. 1 No. 2 September 2001.

- [13] M. Azri bin Abd Mutalib, "*Speed Control of DC Motor Using PI Controller*", Thesis of Bachelor of Electrical Engineering Universiti Malaysia Pahang, 2008.
- [14] Jepry, "Perancangan Pengendali PID Pada Proportional Valve". Undergraduated Thesis, Teknik Elektro, FT-UI.
- [15] Sri Utami H., ST, MT, "Bahan Ajar Pompa & Kompresor", 2014
- [16] Tourishima, "*General Catalogue*", Tourishima Manufacture, 2000
- [17] Ir. Yuriadi Kusuma M.Sc, "Modul 14 Audit Energi : Pompa dan Sistem Pemompaan", Pusat Pengembangan bahan Ajar, UMB.
- [18] Dedi K. K., "Topik 8 Irigasi dan Pompa", Bahan ajar kuliah IPB, 2001
- [19] Timothy L. Skavarenina, "*The Power Electronics Handbook – Industrial Electronics Series*", Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- [20] Tasma Sucita dan Leli Alhapip, "Analisis Karakteristik Beban Nol Motor Induksi Rotor Sangkar Saat Pengasutan Menggunakan Toolbox Power System Blockset Program Simulasi Matlab Simulink", ELECT-TRANS Vol. I No. 2 September 2002 : 29-35

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Radi Dwi Susetyo dilahirkan di Blitar, tanggal 4 April 1992. Penulis adalah putra ke-2 dari pasangan Rudju Utomo (alm) dan Marsiah. Penulis memulai jenjang pendidikan di SDN Kepanjen Kidul 1 Blitar, SMP Negeri 1 Blitar, dan SMK Negeri 1 Blitar hingga lulus pada tahun 2010. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan dengan program beasiswa Bidikmisi ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Jurusan Teknik Elektro, dan kemudian mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa kuliah, penulis juga aktif sebagai pengurus di organisasi kemahasiswaan Himatekro selama 1 tahun. Selain itu, sejak tahun 2012 penulis menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik. Dalam bidang karya tulis, penulis pernah mendapat dana hibah dari Dikti melalui kegiatan PKM. Pada semester akhir, penulis pernah bekerja selama 3 bulan di salah satu perusahaan kontraktor listrik di Jakarta. Kemudian penulis kembali kuliah untuk menyelesaikan Tugas Akhir.

Halaman ini sengaja dikosongkan