



TUGAS AKHIR -TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KOMBINASI KONVERTER
BOOST KUADRATIK DAN *BOOST* TIGA TINGKAT UNTUK
APLIKASI PANEL SURYA**

Jitu Ayatullah
NRP 2211 100 166

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

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

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT -TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF COMBINED
QUADRATIC BOOST CONVERTER AND THREE-LEVEL
BOOST CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC MODULE**

Jitu Ayatullah
NRP 2211 100 166

Advisor
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI KOMBINASI
KONVERTER *BOOST* KUADRATIK DAN *BOOST*
TIGA TINGKAT UNTUK APLIKASI PANEL SURYA**

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

Dosen Pembimbing II

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

NIP. 197311192000031001

NIP. 198006032006041003

SURABAYA

JULI, 2015

Desain dan Implementasi Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat untuk Aplikasi Panel Surya

Jitu Ayatullah
2211100166

Dosen Pembimbing I : Dedet Candra Riawan, ST., MT., Ph.D

Dosen Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

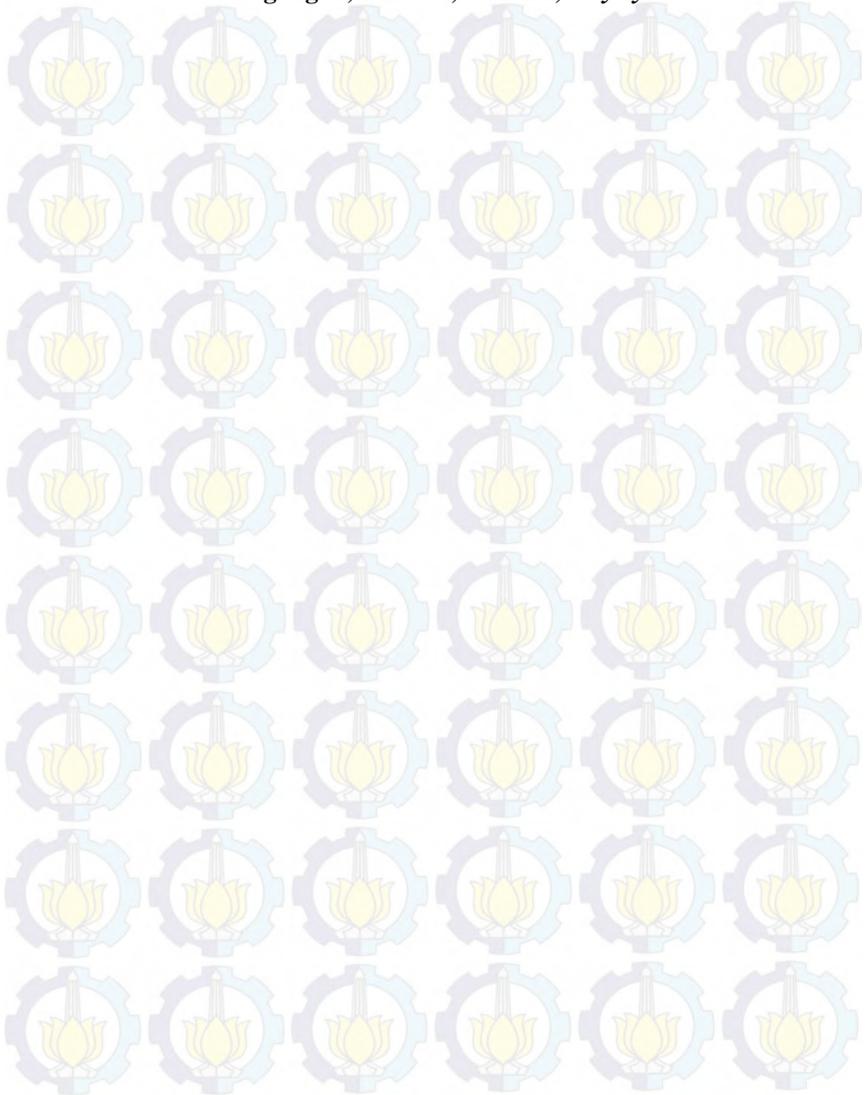
ABSTRAK

DC-DC *Converter* adalah rangkaian elektronika daya yang mengubah tegangan DC ke tahap tegangan DC dengan keluaran yang berbeda. DC-DC *Converter* terdiri dari banyak jenis, salah satunya adalah *boost converter* konvensional. Namun, *boost converter* konvensional memiliki kekurangan yaitu rasio konversi tegangan yang rendah. Konverter dengan rasio konversi yang tinggi dibutuhkan untuk meningkatkan tegangan masukan *photovoltaic* yang rendah menjadi tegangan yang tinggi. Topologi konverter ini berasal dari penggabungan dua dc-dc konverter yaitu *quadratic boost converter* dan *three level boost converter*.

Dalam Tugas Akhir ini, perancangan dan implementasi akan dilakukan melalui rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan *boost* tiga tingkat. Rangkaian ini merupakan pengembangan dari *quadratic boost converter* yang memiliki rasio konversi tegangan yang tinggi. Akan tetapi, konverter ini masih memiliki kelemahan yaitu *stress* tegangan yang besar ketika tegangan keluaran konverter besar. Dengan mengombinasikan *quadratic boost converter* dan *three level boost converter*, *stress* tegangan *switch* akan berkurang menjadi setengah tegangan *output*.

Dalam implementasinya, rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan *boost* tiga tingkat mampu melakukan konversi tegangan dari 40 volt menjadi 400 volt pada *duty cycle* 78%. Efisiensi yang diperoleh mencapai 72.85 % saat dioperasikan dengan daya keluaran 105 watt.

Kata kunci : *Quadratic boost converter, three level boost converter, stress tegangan, konversi, efisiensi, duty cycle.*



Design and Implementation of Combined Quadratic Boost Converter and Three-Level Boost Converter for Photovoltaic Module

Jitu Ayatullah
2211100166

1st Advisor : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

2nd Advisor : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

The DC-DC Converter is a power electronic circuit that converts DC to DC voltage with variety of output one results including a conventional boost converter. However, the conventional boost converter is disadvantage by its a low-voltage conversion ratio, whereas as high voltage converter is required to increase conversion rate. This converter topology is derived from the merger of two dc-dc converter consisting quadratic single switch boost converter and three-level boost converter.

In this project we try to design and implement the combined circuit of Quadratic Boost Converter and Three-Level Boost Converter. This circuit is developed from a quadratic boost converter that has a high-voltage conversion ratio. Nonetheless, this converter still has the disadvantage of having a large voltage stress when the converter output voltage is also large. Combining a quadratic boost converter with a three-level boost converter will reduce the switch voltage stress into half of the output voltage.

Combined circuit of Quadratic Boost Converter and Three-Level Boost Converter is able to convert the voltage from 40 volts to 400 volts at 78% duty cycle. In its implementation, obtaining the efficiency of 72.85% when operated with a power output of 105 watts.

Keywords : *Quadratic boost converter, three level boost converter, voltage stress, conversion, efficiency, duty cycle.*



Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT karena atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Desain dan Implementasi Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat untuk Aplikasi Panel Surya”.

Tugas Akhir ini dilaksanakan guna memenuhi salah satu syarat kelulusan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik. Laporan Tugas Akhir ini disusun berdasarkan pembelajaran yang diperoleh selama kuliah melalui pembimbing maupun studi literatur yang tersedia.

Laporan Tugas Akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik apabila tidak mendapat dukungan penuh dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, karena telah memberikan keberkahan, kerahmatan, serta keselamatan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua penulis, Evivaldi dan Mustaidah yang selalu memberikan dukungan moral, mental, maupun finansial kepada penulis.
3. Kakak dan abang penulis, Marselina dan Egi yang selalu memberi semangat.
4. Kedua dosen pembimbing penulis, Bapak Dedet Candra Riawan, ST, M.Eng., Ph.D., dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D. yang tiada lelahnya membimbing, mengarahkan, dan menuntun penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini belum sempurna, oleh karena itu kritik dan saran penulis harapkan demi perbaikan di masa yang akan datang. Semoga lapran Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat umum.

Surabaya, 3 Juni 2015

Penulis



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Metodologi	2
1.6. Sistematika Penulisan	3
1.7. Relevansi	4
BAB 2 RANGKAIAN KOMBINASI KONVERTER BOOST KUADRATIK DAN KONVERTER BOOST TIGA TINGKAT PADA SISTEM PHOTOVOLTAIC	
2.1. <i>Photovoltaic</i>	5
2.1.1. Rangkaian Ekuivalen <i>Photovoltaic</i>	5
2.1.2. Pengaruh <i>Irradiance</i> pada Sel Surya	6
2.2. DC-DC <i>Converter</i>	7
2.2.1. Topologi <i>Quadratic Boost Converter</i> dan <i>Three Level Boost Converter</i>	7
2.3. Prinsip Rangkaian Kombinasi Konverter <i>Boost</i> Kuadratik dan Konverter <i>Boost</i> Tiga Tingkat	9
2.3.1. Mode Operasi 1	10
2.3.2. Mode Operasi 2	11
2.3.3. Mode Operasi 3	12
2.3.4. Mode Operasi 4	12

2.4.	Perhitungan Nilai Induktor dan Kapasitor	16
2.4.1.	Persamaan Nilai Induktor	16
2.4.2.	Persamaan Nilai Kapasitor.....	17
2.5.	<i>Pulse Width Modulation</i>	18

BAB 3 DESAIN DAN SIMULASI RANGKAIAN KOMBINASI KONVERTER BOOST KUADRATIK DAN KONVERTER BOOST TIGA TINGKAT

3.1.	Desain Rangkaian Kombinasi Konverter Boost Kuadratik dan Konverter Boost Tiga Tingkat.....	19
3.2.	Penentuan Nilai <i>Duty Cycle</i> (D).....	21
3.3.	Penentuan Nilai Kapasitor.....	22
3.4.	Penentuan Nilai Induktor.....	22
3.5.	Penentuan Komponen Induktor.....	23
3.6.	Simulasi <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) Pada Rangkaian Kombinasi Konverter <i>Boost</i> kuadratik dan Konverter <i>Boost</i> Tiga Tingkat.....	24
3.7.	Simulasi Tegangan dan Arus Rangkaian Kombinasi Konverter <i>Boost</i> Kuadratik dan Konverter <i>Boost</i> Tiga Tingkat.....	26
3.8.	Simulasi Rangkaian Kombinasi Konverter <i>Boost</i> Kuadratik dan Konverter <i>Boost</i> Tiga Tingkat Terhadap Perubahan <i>Duty Cycle</i>	31
3.9.	Simulasi Pengujian Dinamis.....	32
3.9.1.	Pengujian Terhadap Perubahan Tegangan Masukan....	32
3.9.2.	Pengujian Terhadap Perubahan Beban.....	33
3.10.	Pembangkit Sinyal <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) Pada Rangkaian Kombinasi Konverter Boost Kuadratik dan Boost Tiga Tingkat.....	34
3.11.	Kontrol Proporsional Integral.....	35

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

4.1.	Pengujian Sinyal <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM).....	38
4.2.	Pengujian <i>Steady State</i>	39
4.2.1.	Pengujian Gelombang Arus dan Tegangan.....	39
4.2.2.	Pengujian Rasio <i>Duty Cycle</i>	42
4.2.3.	Pengujian Efisiensi Terhadap Perubahan Beban.....	43

4.3. Pengujian Dinamis.....	44
4.3.1. Pengujian Respon Tegangan Keluaran Terhadap Perubahan Tegangan Masukan.....	44
4.3.2. Pengujian Respon Tegangan Keluaran Terhadap Perubahan Beban.....	45

BAB 5 PENUTUP

5.1. Kesimpulan.....	47
5.2. Saran.....	47

DAFTAR PUSTAKA	49
-----------------------------	----

RIWAYAT HIDUP PENULIS	51
------------------------------------	----

LAMPIRAN	53
-----------------------	----



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

TABEL		HALAMAN
Tabel 3.1	Spesifikasi Panel Surya	20
Tabel 3.2	Parameter Konverter.....	21
Tabel 3.3	Pengaruh <i>Duty Cycle</i> Terhadap Tegangan Keluaran Yang Diinginkan	22
Tabel 3.4	Komponen kapasitor dan induktor yang tersedia dipasaran.....	24
Tabel 3.5	Pengujian rangkaian kombinasi konverter boost kuadratik dan konverter boost tiga tingkat terhadap perubahan <i>Duty Cycle</i>	31



Halaman ini sengaja dikosongkan

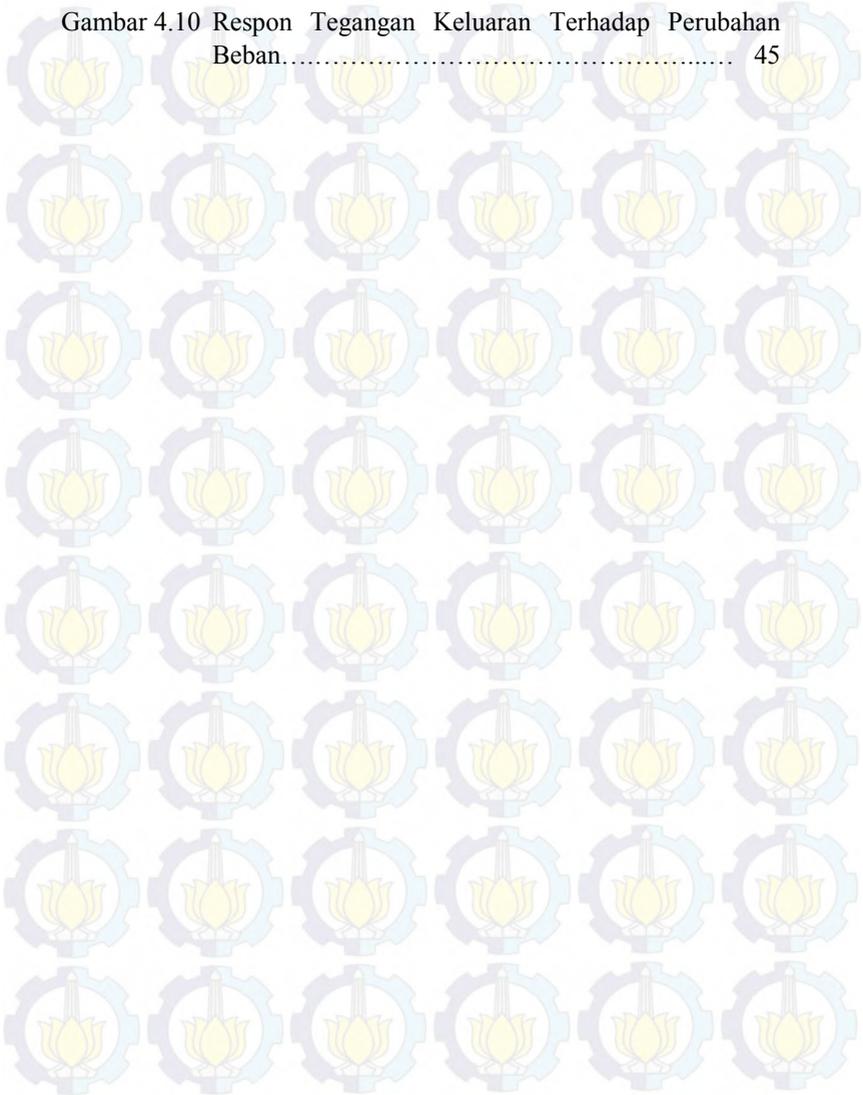
DAFTAR GAMBAR

GAMBAR		HALAMAN
Gambar 2.1	Rangkaian Ekuivalen <i>Photovoltaic</i>	5
Gambar 2.2	Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan irradiance[4].....	6
Gambar 2.3	Topologi Konverter <i>Boost</i> Kuadratik.....	7
Gambar 2.4	Topologi Konverter <i>Boost</i> Tiga Tingkat	8
Gambar 2.5	Topologi Rangkaian kombinasi konverter <i>boost</i> kuadratik dan konverter <i>boost</i> tiga tingkat.....	8
Gambar 2.6	Kondisi Saklar S1 dan S2 Dalam Satu Periode dengan <i>duty cycle</i> $D > 0.5$	9
Gambar 2.7	Rangkaian kombinasi konverter <i>boost</i> kuadratik dan konverter <i>boost</i> tiga tingkat saat S ₁ dan S ₂ tertutup	10
Gambar 2.8	Rangkaian kombinasi konverter <i>boost</i> kuadratik dan konverter <i>boost</i> tiga tingkat saat S ₁ tertutup dan S ₂ terbuka	12
Gambar 2.9	Rangkaian kombinasi konverter <i>boost</i> kuadratik dan konverter <i>boost</i> tiga tingkat saat S ₁ terbuka dan S ₂ tertutup.. ..	12
Gambar 2.10	Bentuk gelombang <i>charge</i> dan <i>discharge</i> tegangan kapasitor dan arus induktor.. ..	12
Gambar 3.1	Desain rangkaian kombinasi konverter <i>boost</i> kuadratik dan konverter <i>boost</i> tiga tingkat secara keseluruhan.....	19
Gambar 3.2	Spesifikasi Panel Surya.....	20
Gambar 3.3	Implementasi Induktor L ₁ dan L ₂	24
Gambar 3.4	Rangkaian Pembangkit Sinyal PWM.....	25
Gambar 3.5	Proses Pembentukan Sinyal PWM.....	25
Gambar 3.6	Dua buah sinyal PWM dengan perbedaan fasa 180° <i>duty cycle</i> 77 % menggunakan <i>software</i> Psim....	26
Gambar 3.7	Gelombang sinyal PWM, tegangan V _{L1} , dan arus I _{L1}	27

Gambar 3.8	Gelombang sinyal PWM, tegangan V_{L2} , dan arus I_{L2}	27
Gambar 3.9	Gelombang tegangan dan arus MOSFET 1 dan 2.....	28
Gambar 3.10	Gelombang arus dioda D1,D2,D3, dan D4.....	28
Gambar 3.11	Gelombang tegangan kapasitor V_{co1} dan V_{co2}	29
Gambar 3.12	Gelombang tegangan kapasitor C_1 dan V_o	29
Gambar 3.13	Simulasi Rangkaian Kombinasi Konverter Boost Kuadratik dan Konverter Boost Tiga Tingkat.....	30
Gambar 3.14	Grafik Perubahan Duty Cycle Terhadap Tegangan Keluaran.....	30
Gambar 3.15	Simulasi Pengujian Dinamis.....	32
Gambar 3.16	Respon tegangan keluaran terhadap perubahan <i>Irradiance</i>	33
Gambar 3.17	Respon tegangan keluaran terhadap perubahan beban.....	33
Gambar 3.18	Rangkaian Mikrokontroler.....	34
Gambar 4.1	Implementasi Rangkaian Kombinasi Konverter <i>Boost</i> Kuadratik dan <i>Boost</i> Tiga Tingkat.....	37
Gambar 4.2	Sinyal PWM 78 %.....	38
Gambar 4.3	<i>Ripple</i> Arus Induktor I_{L1} dan Sinyal PWM.....	39
Gambar 4.4	<i>Ripple</i> Arus Induktor I_{L2} dan Sinyal PWM.....	40
Gambar 4.5	Tegangan <i>Switch</i> 1 dan 2.....	40
Gambar 4.6	(a) Tegangan dan Arus Masukan.....	41
	(b) Tegangan dan Arus Keluaran.....	41
Gambar 4.7	Grafik Perubahan Rasio Duty Cycle terhadap tegangan keluaran.....	42
Gambar 4.8	Grafik pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi.....	43

Gambar 4.9 Respon Tegangan Keluaran Terhadap Tegangan Masukan..... 44

Gambar 4.10 Respon Tegangan Keluaran Terhadap Perubahan Beban..... 45





Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Jitu Ayatullah lahir di Duri pada 13 Maret 1993, anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menyelesaikan studi dan lulus dari TK Al-Khadijah Duri, SDN 051 Duri, SMPS Cendana Duri, SMAS Cendana Duri. Saat ini Penulis sedang menyelesaikan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis mempunyai hobi bermain sepakbola, futsal, dan *travelling*. Penulis mempunyai motto hidup “Hidup bukan merupakan sebuah tujuan melainkan sebuah perjalanan, jalani dan nikmati”.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kekhawatiran tentang pemanasan global, menipisnya bahan bakar fosil, dan kebutuhan untuk mengurangi emisi karbon memberikan stimulus untuk mencari sumber energi terbarukan. Energi surya menjadi salah satu pilihan alternatif energi karena memiliki kelebihan yaitu lebih ramah lingkungan dan tidak ada kebisingan karena tidak adanya bagian yang bergerak. Meskipun biaya instalasi cukup tinggi dan efisiensi konversi energi rendah telah menghalangi popularitasnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan riset untuk mengurangi biaya instalasi dan meningkatkan efisiensi konversi energi surya pada *photovoltaic* (PV) dan mencari solusi untuk mengurangi biaya investasi. Selain masalah diatas, seperti yang kita ketahui photovoltaic sebagai alat pengkonversi energi surya menjadi energi listrik memiliki kekurangan yaitu tegangan dan arus yang dihasilkan kurang stabil. *Photovoltaic* juga memiliki karakteristik dimana PV memiliki satu titik tegangan yang dapat menghasilkan daya maksimum.

Photovoltaic (PV) merupakan sistem yang sangat penting dan umum pada sistem distribusi. Akan tetapi, kapasitas daya dari suatu PV biasanya antara 100 W sampai 300 W dan tegangan *Maximum Power Point* (MPP) antara 15 V sampai 40 V. Angka ini masih terhitung rendah apabila kita bandingkan dengan *input* inverter yang dibutuhkan saat terhubung dengan *grid* [1]. Salah satu topologi konverter yang menyediakan rasio konversi tegangan dengan interval yang lebar adalah *cascade* konverter konvensional. Konverter ini terdiri atas dua buah atau lebih konverter DC ke DC yang terhubung secara *cascade* atau bertingkat. Dampak negatif penggunaan rangkaian *cascade* ini adalah dapat menyebabkan kenaikan rugi-rugi daya pada konverter[2]. Salah satu pengembangan *cascade* konverter konvensional adalah konverter *boost* kuadratik dengan satu saklar. Konverter ini mempunyai rasio konversi tegangan yang tinggi, yaitu fungsi kuadrat dari *duty ratio*-nya. Bila dibandingkan dengan *boost* konverter biasa, besarnya range tegangan *output*-nya jauh lebih besar dengan menggunakan konverter *boost* kuadratik. Namun, tekanan tegangan pada switch menjadi tinggi. Dengan menggabungkan konverter ini dengan konverter *boost* tiga tingkat maka tegangan pada *switch* akan lebih rendah yaitu setengah dari tegangan *output*.

1.2. Permasalahan

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, maka dirumuskan masalah dalam tugas akhir ini adalah bagaimana mengatur tegangan *output boost* konverter agar didapatkan titik tegangan maksimal dan konstan agar dapat dioperasikan menjadi *input* inverter.

1.3. Batasan Masalah

Untuk memperjelas pembahasan dalam tugas akhir ini serta karena keterbatasan penulis, maka perlu adanya batasan masalah, yaitu :

1. Penulis hanya mendesain sampai beban resistif, tidak membahas aplikasi menuju grid.
2. Penurunan rumus dilakukan dalam kondisi *steady state*
3. Tidak membahas mengenai tekanan arus pada *switch*

1.4. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah meningkatkan tegangan keluaran yang konstan pada *photovoltaic* menggunakan konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat.

1.5. Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Penulis melakukan studi terhadap berbagai referensi-referensi penelitian, jurnal ilmiah (*paper*) yang berkaitan tentang *photovoltaic*, konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat beserta referensi-referensi lain yang dianggap perlu untuk mendapatkan bahan penelitian yang akan membantu pengerjaan tugas akhir.

2. Pemodelan *Photovoltaic*

Pada tahap ini dilakukan penelitian beberapa karakteristik dari *photovoltaic* sebagai sumber energi listrik. Salah satu ciri karakteristik *photovoltaic* yaitu memiliki satu titik daya maksimum.

3. Pengaturan Konverter *Boost*

Terdapat dua konverter *boost* yaitu konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat. Konverter *boost* kuadratik digunakan untuk mendapatkan peningkatan tegangan yang tinggi sedangkan Konverter *boost* tiga tingkat terdapat dua *switching*. Pengaturan *switching* dilakukan untuk mencapai konversi tegangan yang tinggi.

4. Simulasi

Simulasi pemodelan Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat menggunakan *software Psim*.

5. Implementasi

Data dari hasil simulasi kemudian diimplementasikan menggunakan beban resistif

6. Kesimpulan

Data dari hasil simulasi kemudian dianalisa untuk diambil kesimpulan akhir sebagai tujuan dari tugas akhir ini.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab, dengan uraian sebagai berikut:

BAB 1 : Pendahuluan

Bagian ini membahas dasar-dasar penyusunan Tugas Akhir ini meliputi latar belakang, tujuan, perumusan masalah, pembatasan masalah, sistematika pembahasan, metodologi, dan relevansi.

BAB 2 : Teori Penunjang

Bab ini membahas tentang konsep mppt pada photovoltaic dan cara kerja Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat

BAB 3 : Perencanaan dan Pembuatan Alat

Bagian ini berisi proses desain, simulasi, perhitungan serta langkah-langkah dalam pembuatan alat.

BAB 4 : Pengujian dan Analisa

Bagian ini berisi tentang pengujian alat untuk mendapatkan data yang diperlukan dan kemudian data tersebut dianalisis.

BAB 5 : Penutup

Bagian ini membahas tentang kesimpulan dan saran .

1.7. Relevansi

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

1. Dapat menjadi referensi penelitian untuk peneliti selanjutnya dalam mengembangkan desain Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat.
2. Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pada panel surya.

BAB 2

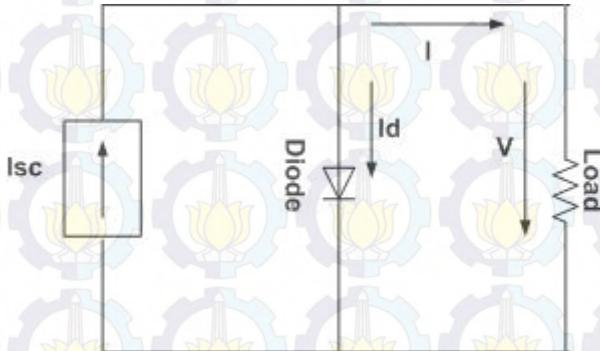
RANGKAIAN KOMBINASI KONVERTER *BOOST* KUADRATIK DAN KONVERTER *BOOST* TIGA TINGKAT PADA SISTEM *PHOTOVOLTAIC*

2.1. *Photovoltaic*

Photovoltaic atau sel surya menggunakan sumber matahari sebagai energi masukannya dan mengubah ke energi listrik sebagai energi keluarannya. Sumber energi keluaran *photovoltaic* merupakan sumber listrik DC. Sel surya merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Namun, karena efisiensi dari sel surya rendah dan harga yang tergolong mahal menyebabkan *photovoltaic* tidak banyak digunakan sebagai sumber energi khususnya di Indonesia.

2.1.1. Rangkaian Ekuivalen *Photovoltaic*

Rangkaian ekuivalen *photovoltaic* dimodelkan dengan sumber arus yang terpasang secara paralel dengan dioda[4]. Pemodelan rangkaian ekuivalen *photovoltaic* dapat dijelaskan pada gambar sebagai berikut.



Gambar 2.1. Rangkaian Ekuivalen *Photovoltaic*

Ada dua kondisi pada rangkaian ekuivalen *photovoltaic* yaitu saat *short circuit* dan *open circuit*. Saat *short circuit* maka akan diperoleh arus I sesuai dengan persamaan berikut :

$$I = I_{sc} - I_d \quad (2.1)$$

$$I = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Saat *open circuit* maka akan diperoleh tegangan V_{oc} . V_{oc} adalah tegangan maksimum dari sel surya dan ini terjadi pada arus pada sel surya sama dengan nol ($I=0$). Sehingga akan diperoleh persamaan

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \quad (2.3)$$

Keterangan :

I : Arus *output photovoltaic* (A)

I_{sc} : Arus yang terbangkit pada *photovoltaic* (A)

I_o : Arus saturasi dioda

q : Muatan elektron = 1.6×10^{-19} (Coulomb)

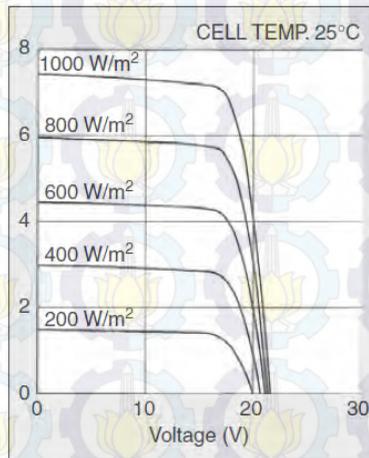
k : Konstanta boltzman (j/K)

T : Suhu (K)

V : Tegangan *output photovoltaic* (V)

2.1.2. Pengaruh *Irradiance* pada Sel Surya

irradiance merupakan sumber energi bagi sel surya, sehingga keluarannya sangat bergantung oleh perubahan *irradiance*. Gambar 2.2 merupakan contoh dari perubahan *irradiance* terhadap kurva daya modul surya.



Gambar 2.2. Karakteristik kurva V-I terhadap perubahan *irradiance*[4]

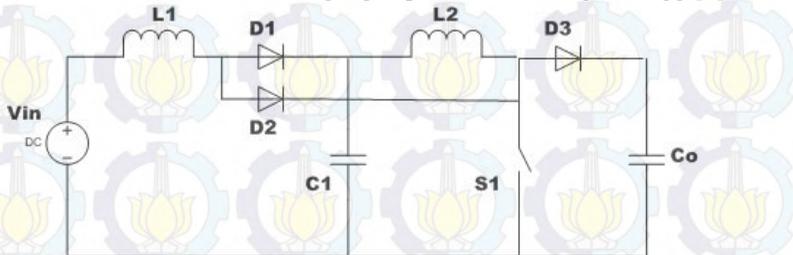
Dilihat dari Gambar 2.2 I_{sc} lebih berpengaruh terhadap perubahan *irradiance* daripada V_{oc} . Hal ini sesuai dengan penjelasan bahwa cahaya merupakan paket-paket foton. Pada saat *irradiance* tinggi maka arus yang dihasilkan juga besar. Demikian pula sebaliknya, sehingga arus yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah foton[4].

2.2. DC-DC Converter

Dc-dc Converter merupakan rangkaian elektronika power untuk mengubah suatu masukan tegangan dc menjadi tegangan dc keluaran dengan nilai yang lebih besar atau kecil[5]. Dalam tugas akhir ini, rangkaian *dc-dc converter* yang akan dibahas merupakan rangkaian kombinasi dari konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat. Topologi konverter ini merupakan *switched-mode dc-dc converter*, atau biasa disebut dengan *switching power supply*. Tegangan keluaran dc yang ingin dicapai dapat diperoleh dengan pengaturan lamanya proses *switching*. Proses *switching* dapat dilakukan dengan memberikan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM). PWM merupakan suatu metode pengaturan tegangan dengan mengubah atau mengatur periode ON (t_{on}) pada tegangan berfrekuensi dengan periode yang sama. Siklus kerja ini didapatkan dari perbandingan antara lamanya tegangan saat t_{on} dengan lamanya tegangan saat t_{off} kondisi ini biasa disebut dengan *duty cycle* (D).

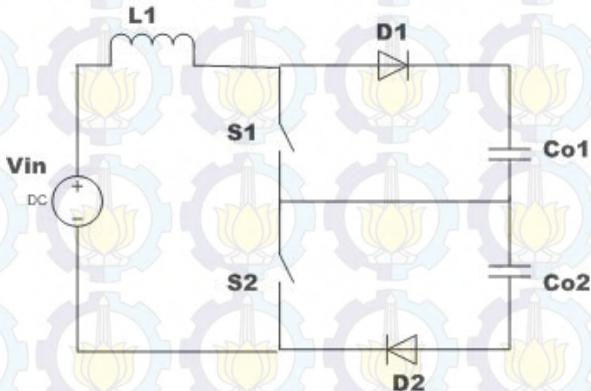
2.2.1. Topologi Quadratic Boost Converter dan Three Level Boost Converter

konverter *boost* kuadratik (Gambar 2.3) mempunyai rasio konversi tegangan yang tinggi, yaitu fungsi kuadrat dari *duty ratio*-nya. Bila dibandingkan dengan konverter *boost* biasa, besarnya range tegangan keluarannya jauh lebih besar dengan menggunakan konverter *boost* kuadratik. Namun, tekanan tegangan pada switch menjadi tinggi[1].

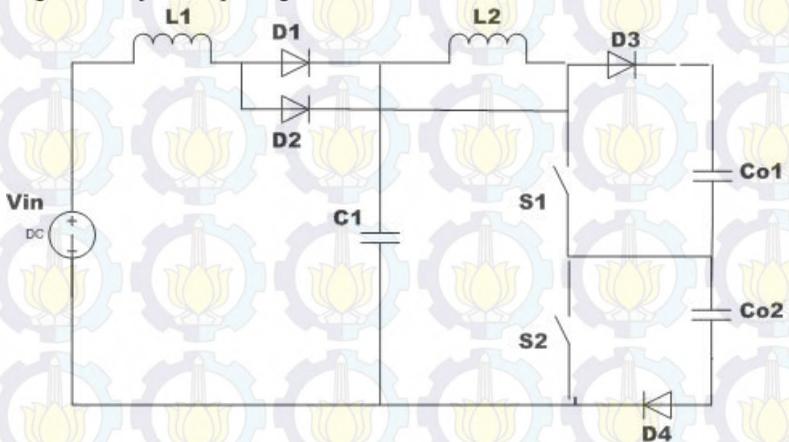


Gambar 2.3. Topologi Konverter *Boost* Kuadratik

Tekanan *switch* pada konverter ini akan tinggi apabila tegangan keluaran yang diinginkan tinggi karena pada konverter ini tegangan *switch* sama dengan tegangan keluaran dc. Apabila konverter ini dikombinasikan dengan konverter *boost* tiga tingkat (Gambar 2.4) maka tekanan pada *switch* menjadi setengah dari tegangan keluaran dc.



Gambar 2.4. Topologi Konverter *Boost* Tiga Tingkat
Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut.

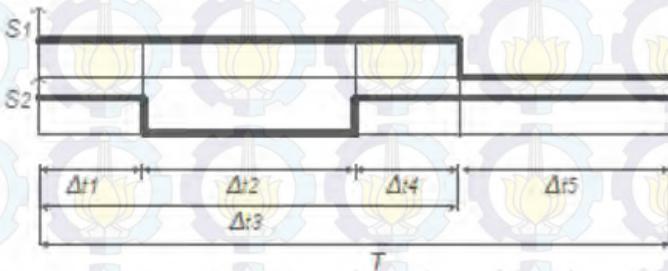


Gambar 2.5. Topologi Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat

2.3. Prinsip Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat

Konverter ini menggunakan dua sinyal PWM untuk proses *switching*. Strategi modulasi PWM yang diusulkan memiliki dua pulsa yang tertunda 180 derajat [1]. Prinsip operasi dan analisis topologi konverter ini menggunakan operasi *Continuous Conduction Mode* (CCM). Selain itu, konverter ini memiliki dua siklus yaitu pada saat $D < 0.5$ dan $D > 0.5$. Namun, pada buku tugas akhir ini tidak membahas mode CCM saat $D < 0.5$.

Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat dapat dianalisis pada saat saklar terbuka dan saklar tertutup. Pada rangkaian konverter ini, analisis dilakukan pada keadaan *steady state*. Terdapat empat kondisi dalam satu periode dengan *duty cycle* $D > 0.5$ seperti gambar 2.6 berikut.



Gambar 2.6. Kondisi Saklar S_1 dan S_2 Dalam Satu Periode dengan *duty cycle* $D > 0.5$ [1]

Pada gambar 2.6 dapat dilihat bahwa saklar S_1 dan S_2 tertutup selama rentang waktu Δt_1 . Sedangkan kondisi saat saklar S_1 tertutup dan S_2 terbuka berlangsung selama Δt_2 , saklar S_1 tertutup dan S_2 tertutup berlangsung selama Δt_4 , serta saklar S_1 terbuka dan S_2 tertutup berlangsung selama Δt_5 . Maka, Persamaan $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_4$, dan Δt_5 dapat diturunkan sebagai berikut.

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$

$$D = \frac{\Delta t_3}{T}$$

$$\Delta t_3 = DT \quad (2.4)$$

Karena $T = \Delta t_3 + \Delta t_5$, maka :

$$\Delta t_5 = T - DT$$

$$\Delta t_5 = T(1 - D) \quad (2.5)$$

Pada gambar 2.6 terlihat bahwa lamanya $\Delta t_1 = \Delta t_4$ dan $\Delta t_2 = \Delta t_5$, sehingga dapat ditulis persamaan

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_4$$

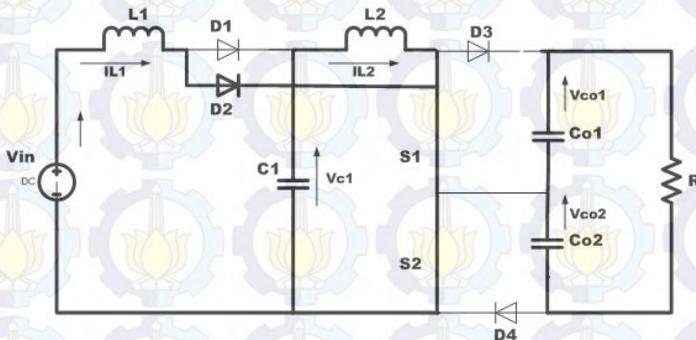
$$\Delta t_3 = 2\Delta t_1 + \Delta t_2$$

$$DT = 2\Delta t_1 + T(1 - D)$$

$$\Delta t_1 = \frac{T(2D - 1)}{2} \quad (2.6)$$

2.3.1. Mode Operasi 1

Kondisi 1 dimulai pada saat saklar S_1 tertutup dan saklar S_2 tertutup. Skema rangkaian pada kondisi 1 digambarkan oleh gambar berikut ini.



Gambar 2.7. Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat saat S_1 dan S_2 tertutup

Pada kondisi ini, dioda D_1 , D_3 , dan D_4 mengalami *reversed biased* saat dioda D_2 mengalami *forward biased* sedangkan induktor L_1 dan L_2 mengalami *charge*. Pada saat saklar S_1 dan S_2 tertutup, induktor L_1 akan

dihubung-singkatkan dengan tegangan sumber dan induktor L_2 akan dihubung-singkatkan dengan tegangan kapasitor V_{C1} . Persamaan tegangan rangkaian dapat dituliskan dalam persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= V_{L1} \\
 V_{in} &= \frac{L_1 \Delta i_{L1}}{\Delta t_1} \\
 L_1 &= \frac{V_{in} \Delta t_1}{\Delta i_{L1}} \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

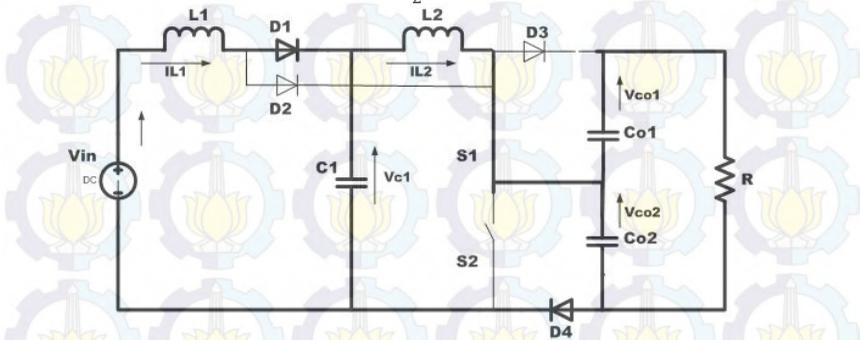
$$\begin{aligned}
 V_{C1} &= V_{L2} \\
 V_{C1} &= \frac{L_2 \Delta i_{L2}}{\Delta t_1} \\
 L_2 &= \frac{V_{C1} \Delta t_1}{\Delta i_{L2}} \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

2.3.2. Mode Operasi 2

Kondisi 2 dimulai pada saat saklar S_1 tertutup dan saklar S_2 terbuka. Skema rangkaian pada kondisi 1 digambarkan oleh gambar 2.8. Pada kondisi ini, dioda D_1 dan D_4 mengalami *forward biased* saat dioda D_2 dan D_3 mengalami *reserved biased* sedangkan induktor L_1 dan L_2 sama –sama mengalami *discharge*. Pada kondisi ini kapasitor C_1 akan mengalami *charge* dan kapasitor C_{O2} juga mengalami proses *charging* sedangkan kapasitor C_{O1} akan mengalami proses *discharge*. Persamaan matematis saat kondisi S_1 tertutup dan S_2 terbuka sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V_{in} + V_{L1} &= V_{C1} \\
 V_{in} + \frac{L_1 \Delta i_{L1}}{\Delta t_2} &= V_{C1} \\
 V_{C1} + V_{L2} &= V_{C_{O2}} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

$$V_{C1} + \frac{L_2 \Delta i_{L2}}{\Delta t_2} = V_{Co2} \quad (2.10)$$



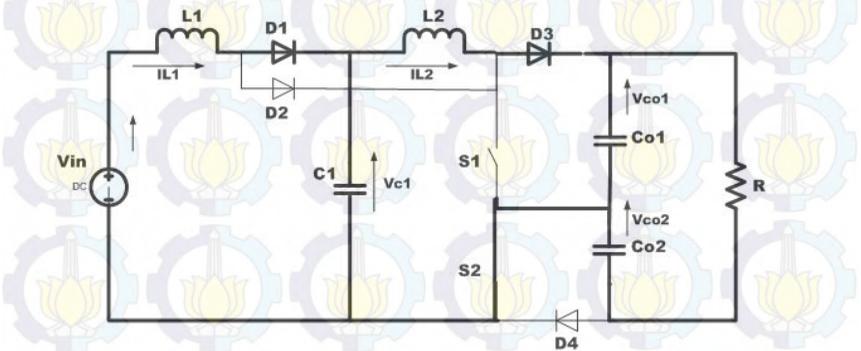
Gambar 2.8. Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadrat dan konverter *boost* tiga tingkat saat S_1 tertutup dan S_2 terbuka

2.3.3. Mode Operasi 3

Pada kondisi 3 ini sama dengan kondisi 1 yang ditunjukkan oleh gambar 2.7. Kondisi dimana saklar S_1 tertutup dan S_2 juga tertutup. Persamaan yang diperoleh juga sama yaitu persamaan 2.7 dan 2.8

2.3.4. Mode Operasi 4

Kondisi 4 dimulai pada saat saklar S_1 terbuka dan saklar S_2 tertutup. Skema rangkaian pada kondisi 4 digambarkan oleh gambar berikut ini.



Gambar 2.9. Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat saat S1 terbuka dan S2 tertutup

Pada kondisi ini, dioda D₁ dan D₃ mengalami *forward biased* saat dioda D₂ dan D₄ mengalami *forward biased* sedangkan induktor L₁ dan L₂ sama –sama mengalami *discharge*. Persamaan matematis saat kondisi S₁ tertutup dan S₂ terbuka sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V_{in} + V_{L1} &= V_{C1} \\ V_{in} + \frac{L_1 \Delta i_{L1}}{\Delta t_2} &= V_{C1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} V_{C1} + V_{L2} &= V_{Co1} \\ V_{C1} + \frac{L_2 \Delta i_{L2}}{\Delta t_5} &= V_{Co1} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dengan mensubsituisi persamaan 2.8 dengan persamaan 2.10 maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V_{C1} + \frac{V_{C1} \Delta t_1}{\Delta t_2} &= V_{Co2} \\ V_{C1} \left(1 + \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right) &= V_{Co2} \\ V_{C1} \left(1 + \frac{T \left(\frac{2D-1}{2} \right)}{T(1-D)} \right) &= V_{Co2} \\ V_{C1} \left(1 + \frac{(2D-1)}{2(1-D)} \right) &= V_{Co2} \\ V_{Co2} &= V_{C1} \left(\frac{1}{2(1-D)} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Begitu juga dengan mensubsitisi persamaan 2.8 dengan persamaan 2.12 maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$V_{C1} + \frac{V_{C1} \Delta t_1}{\Delta t_5} = V_{Co1}$$

$$V_{C1} \left(1 + \frac{\Delta t_1}{\Delta t_5} \right) = V_{Co1}$$

$$V_{C1} \left(1 + \frac{T \left(\frac{2D-1}{2} \right)}{T(1-D)} \right) = V_{Co1}$$

$$V_{C1} \left(1 + \frac{(2D-1)}{2(1-D)} \right) = V_{Co1}$$

$$V_{Co1} = V_{C1} \left(\frac{1}{2(1-D)} \right) \quad (2.14)$$

Untuk memperoleh persamaan *duty cycle* akan dijelaskan pada persamaan berikut.

$$V_{Co1} + V_{Co2} = V_0$$

$$V_0 = V_{C1} \left(\frac{1}{2(1-D)} \right) + V_{C1} \left(\frac{1}{2(1-D)} \right)$$

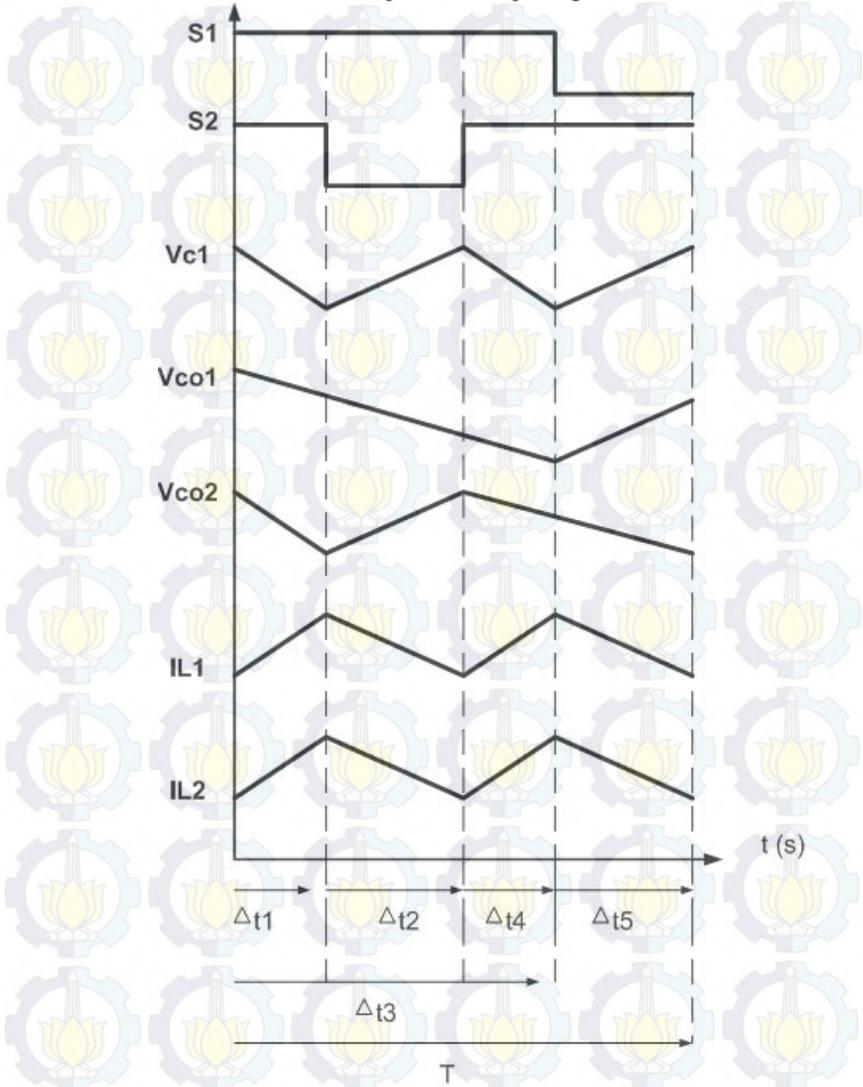
$$V_0 = \frac{2V_{C1}}{2(1-D)}$$

$$V_0 = \frac{V_{C1}}{(1-D)}$$

$$V_0 = \frac{V_{in} \left(\frac{1}{2(1-D)} \right)}{(1-D)}$$

$$V_0 = \frac{V_{in}}{2(1-D)^2} \quad (2.15)$$

Proses *charge* dan *discharge* tegangan kapasitor dan arus induktor dalam 4 kondisi diatas akan diperlihatkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.8. Bentuk gelombang *charge* dan *discharge* tegangan kapasitor dan arus induktor

2.4. Perhitungan Nilai Induktor dan Kapasitor

Berdasarkan analisis prinsip kerja yang sudah dijelaskan sebelumnya, maka nilai induktor dan kapasitor dapat diperoleh melalui persamaan berikut.

2.4.1. Persamaan Nilai Induktor

Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat menggunakan 2 buah induktor. Untuk menghitung nilai induktor L_1 dan L_2 dari persamaan yang telah dianalisis dalam berbagai kondisi, maka nilai induktor L_1 dan L_2 adalah sebagai berikut.

$$L_1 = \frac{V_{in} \Delta t_1}{\Delta i_{L1}}$$

$$L_1 = V_o \left[\left(\frac{2(1-D)^2}{\Delta i_{L1}} \right) \left(\frac{T(2D-1)}{2} \right) \right]$$

$$L_1 = V_o \left[\frac{(1-D)^2 (2D-1)}{\Delta i_{L1} f} \right] \quad (2.16)$$

$$L_2 = \frac{V_{C1} \Delta t_1}{\Delta i_{L2}}$$

$$L_2 = V_o \left[(1-D) \left(\frac{T(2D-1)}{2 \Delta i_{L2}} \right) \right]$$

$$L_2 = V_o \frac{(1-D)(2D-1)}{2 \Delta i_{L2} f} \quad (2.17)$$

Dimana $\Delta i_L = \text{prosentase nilai ripple (\%)} \times I_L$. Nilai *ripple* arus yang melalui induktor merupakan perkalian antara prosentase nilai *ripple* dan I_L yang merupakan arus yang mengalir melalui induktor. Dimana prosentase nilai *ripple* dapat ditentukan sendiri. Biasanya besar nilai persentase *ripple* arus dalam rentang 15% - 40%.

2.4.2. Persamaan Nilai Kapasitor

Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat menggunakan 3 buah kapasitor, yaitu kapasitor C_1 , C_{O1} , dan C_{O2} . Untuk menentukan nilai dari masing-masing kapasitor maka dari analisis prinsip kerja yang sudah dijelaskan sebelumnya maka akan diperoleh persamaan kapasitor C_1 sebagai berikut

$$P_O = P_{in}$$

$$V_O I_O = V_{C1} I_{L2}$$

$$\frac{V_{C1}}{(1-D)} I_O = V_{C1} I_{L2}$$

$$I_{L2} = \frac{I_O}{(1-D)} \quad (2.18)$$

$$\Delta Q = C_1 \Delta V_{C1}$$

$$I_{L2} \Delta t_1 = C_1 \Delta V_{C1}$$

$$C_1 = \frac{I_{L2} \Delta t_1}{\Delta V_{C1}}$$

$$C_1 = \frac{2 I_O (2D - 1)}{2(1-D) f \Delta V_{C1}}$$

$$C_1 = \frac{I_O (2D - 1)}{(1-D) f \Delta V_{C1}} \quad (2.19)$$

Sedangkan untuk persamaan nilai kapasitor C_{O1} dan C_{O2} adalah sebagai berikut.

$$\Delta Q = C_{O1} \Delta V_{C_{O1}}$$

$$I_o \Delta t_3 = C_{o1} \Delta V_{C_{o1}}$$

$$I_o \frac{D}{f} = C_{o1} \Delta V_{C_{o1}}$$

$$C_{o1} = C_{o2} = \frac{I_o D}{\Delta V_o f} \quad (2.20)$$

Keterangan :

L_1 = Induktor 1

L_2 = Induktor 2

C_1 = Kapasitor C1

C_{o1} = Kapasitor keluaran 1

C_{o2} = Kapasitor keluaran 2

D = *Duty Cycle*

f = Frekuensi

Δi_{L1} = Riak arus induktor 1

Δi_{L2} = Riak arus induktor 2

ΔV_{C1} = Riak tegangan kapasitor C1

ΔV_o = Riak tegangan keluaran konverter

2.5. Pulse Width Modulation (PWM)

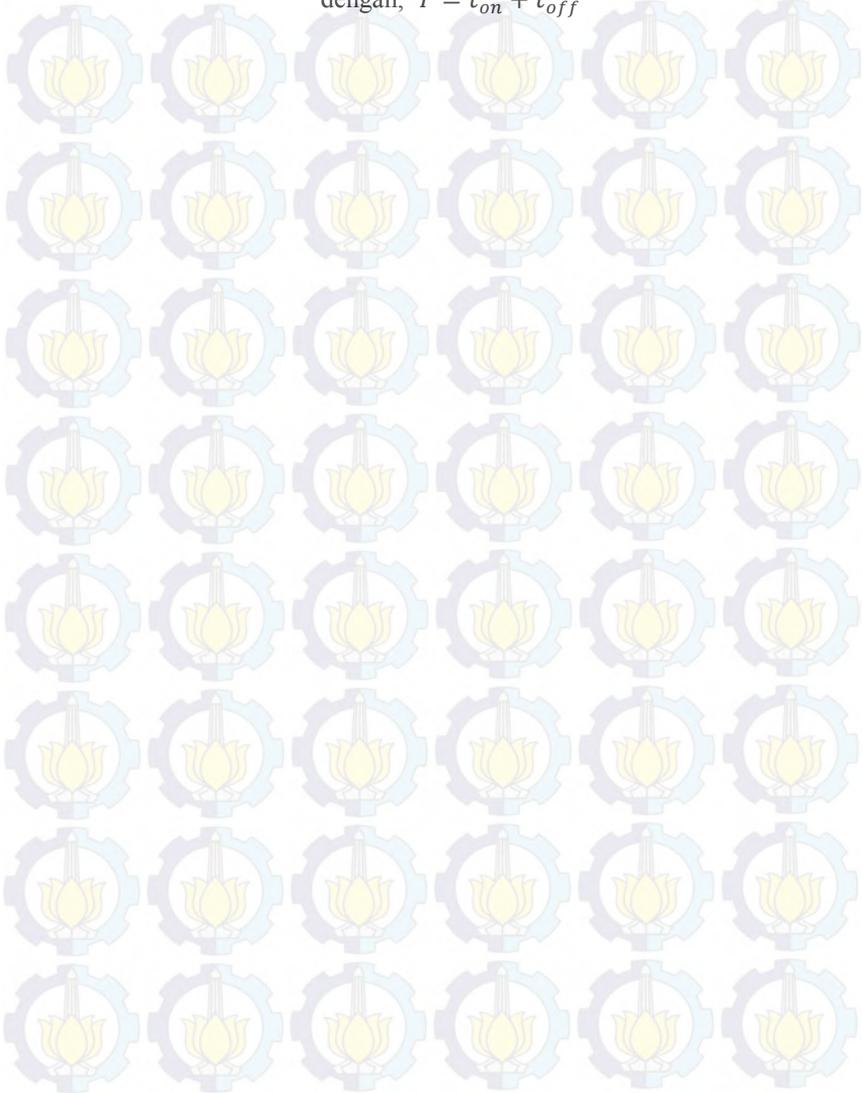
Pulse Width Modulation (PWM) secara umum adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam suatu periode, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar Pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, Sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi (antara 0% hingga 100%).

Gelombang PWM berbentuk kotak dan dapat dihasilkan dari tiga komponen utama, yaitu tegangan DC sebagai referensi, sinyal segitiga sebagai sinyal pembawa, dan komparator sebagai pembanding antara dua gelombang tersebut (V_{ref} dan sinyal segitiga). *Duty cycle* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

(2.21)

$$D = \frac{t_{on}}{T} \times 100\%$$

dengan, $T = t_{on} + t_{off}$

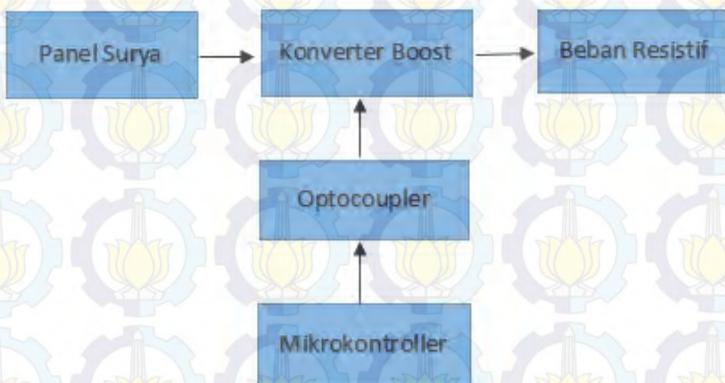


BAB 3

DESAIN DAN SIMULASI RANGKAIAN KOMBINASI KONVERTER BOOST KUADRATIK DAN KONVERTER BOOST TIGA TINGKAT

3.1. Desain Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat

Pada sub bab ini akan membahas mengenai desain, simulasi, serta implementasi rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat. Blok diagram pada (Gambar 3.1) akan menjelaskan keseluruhan rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat.



Gambar 3.1 Desain rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat secara keseluruhan

Gambar 3.1 akan menjadi parameter untuk melakukan simulasi. Seperti yang terlihat pada gambar sumber tegangan diperoleh dari *photovoltaic* yang nantinya akan dikonversi menjadi tegangan yang lebih tinggi menggunakan konverter *boost*. Konverter *boost* yang digunakan adalah kombinasi dari rangkaian konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat yang telah dibahas sebelumnya pada bab 2. Spesifikasi *photovoltaic* yang digunakan saat melakukan simulasi tercantum pada tabel 3.1. Namun, nantinya saat pengujian implementasi sumber yang digunakan adalah sumber DC.

Tabel 3.1 Spesifikasi Panel Surya

PV Module		PV Array		
Parameter	Value	Parameter	Value	Unit
Max Power	80	n Seri	4	
V _{mpp}	17.6	n Parallel	1	
I _{mpp}	4.63	Max Power	320	W _p
V _{oc}	21.6	V _{mpp}	70.4	V
I _{sc}	5.09	I _{mpp}	4.63	A
Max System Voltage	800	V _{oc}	86.4	V
		I _{sc}	5.09	A
		Max System Voltage	800	V

Panel surya yang digunakan merupakan panel surya yang memiliki *Maximum Power Point (MPP)* 80 watt peak. Pada simulasi panel surya ini akan diseri dengan 4 buah panel surya sehingga menghasilkan MPP 320 watt peak. Dibawah ini merupakan gambar dari model *photovoltaic* yang digunakan.



Gambar 3.2 Spesifikasi Panel Surya

Desain daya keluaran rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat ini menggunakan daya sebesar 160 watt dengan tegangan masukan minimum sebesar 40 volt dan tegangan keluaran dipertahankan pada tegangan 400 volt. Untuk menentukan parameter yang digunakan untuk simulasi konverter maka dapat ditentukan melalui persamaan-persamaan yang telah dibahas bab 2 buku Tugas Akhir ini. Dibawah ini (tabel 3.2) merupakan tabel parameter yang digunakan saat melakukan simulasi.

Tabel 3.2 Parameter Konverter

Parameter Komponen	
Variabel	Nilai
V_{in}	40 Volt
V_{out}	400 Volt
$\Delta V_o, \Delta V_{Co1}, \Delta V_{Co2}$	0.15 %
Δi_{L1} dan Δi_{L2}	15 %
P_o	160 Watt
Frekuensi	46875 Hz
Duty Cycle	0.77
Beban Resistif	1000 ohm

Dalam perancangan simulasi, daya keluaran yang diterapkan sebesar 160 watt. Namun, pada implementasinya rangkaian ini hanya mampu dengan daya sebesar 105 watt. Hal ini dikarenakan keterbatasan alat dan komponen yang ada dipasaran

3.2. Penentuan Nilai Duty Cycle (D)

Penentuan nilai duty cycle (D) sangat mempengaruhi tegangan keluaran yang diinginkan. Pada bab 2 telah dijelaskan penurunan persamaan nilai *duty cycle*. *Duty cycle* pada Tugas Akhir ini dibatasi untuk $D > 5$ karena untuk $D < 5$ memiliki mode CCM yang berbeda. Persamaan *duty cycle* dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$1 - \frac{V_{in}}{2V_o} = D \quad (3.1)$$

Konverter ini memiliki spesifikasi tegangan masukan minimum sebesar 40 V dan tegangan keluaran maksimum sebesar 80 V. Berikut akan dijelaskan pengaruh *duty cycle* terhadap tegangan keluaran yang diinginkan pada tabel 3.3. Percobaan dilakukan dengan tegangan masukan minimum sampai tegangan maksimum yaitu 40 volt sampai 80 volt sedangkan tegangan keluaran dipertahankan pada tegangan 400 volt. Dari hasil terlihat bahwa perubahan *duty cycle* sangat mempengaruhi tegangan yang diinginkan.

Tabel 3.3 Pengaruh *duty cycle* terhadap tegangan keluaran yang diinginkan

D	V _{in} (V)	V _{out} (V)
0.77	40	400
0.75	50	400
0.726	60	400
0.704	70	400
0.683	80	400

Dari tabel 3.3 terlihat bahwa semakin besar perubahan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran maka *duty cycle* (D) yang diinginkan akan semakin besar.

3.3. Penentuan Nilai Kapasitor

Pada topologi kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat memiliki total 3 kapasitor dan 2 kapasitor berada disisi tegangan keluaran konverter. Dengan memasukkan parameter konverter yang tertera pada tabel 3.2 dapat diperoleh *ripple* tegangan keluaran kapasitor. Dari tabel 3.2 *ripple* tegangan dari konverter adalah 0.15 % dari tegangan keluaran 400 volt. Maka akan didapatkan riak gelombangnya adalah 0.6 volt sehingga persamaannya menjadi

$$C_{o1} = C_{o2} = \frac{0.4 \times 0.77}{0.6 \times 46875} = 11.04 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.2)$$

$$C_1 = \frac{0.4((2 \times 0.77) - 1)}{(1 - 0.77) \times 46875 \times 0.6} = 35.16 \text{ } \mu\text{F} \quad (3.3)$$

Pada saat implementasi kapasitor yang digunakan adalah kapasitor yang tersedia dipasaran yaitu untuk C₀₁ dan C₀₂ menggunakan kapasitor *elco* 22 μF sedangkan untuk C₁ menggunakan kapasitor *elco* 47 μF .

3.4. Penentuan Nilai Induktor

Pada topologi kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat memiliki 2 buah induktor. Penentuan nilai kedua induktor ini ditentukan melalui persamaan yang telah dibahas pada bab 2. Dengan memasukkan parameter konverter yang telah ditentukan pada tabel 3.2 maka dapat diperoleh riak arus yaitu sebesar 15 % dari arus

masuk konverter. Arus masukan konverter untuk tegangan masukan 40 V dan tegangan keluaran 400 V adalah 3.33 A sehingga *ripple* gelombang arus 15 % dari 3.33 A yaitu 0.5 A. Dengan memasukkan nilai riak arus yang didapatkan melalui persamaan bab 2 maka akan diperoleh nilai induktor 1 dan induktor 2 sebagai berikut :

$$L_1 = 400 \left[\frac{(1 - 0.77)^2 ((2 \times 0.77) - 1)}{0.5 \times 46875} \right] = 471.711 \mu H \quad (3.4)$$

$$L_2 = 400 \left[\frac{(1 - 0.77)((2 \times 0.77) - 1)}{2 \times 0.5 \times 46875} \right] = 1054.77 \mu H \quad (3.5)$$

3.5. Penentuan Komponen Induktor

Komponen induktor terdiri dari batang besi ferit dan kawat yang dililit pada batang besi ferit tersebut. Batang besi ferit menggunakan tipe *magnetics 77439A7* dan kawat *email 0.8 mm*. Besarnya jumlah lilitan yang dibutuhkan dapat ditentukan menggunakan persamaan (3.6).

$$n = 1000 \times \sqrt{\frac{L}{A_L}} \quad (3.6)$$

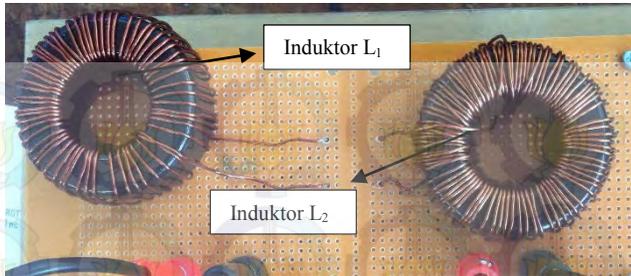
Nilai induktor L_1 dan L_2 yang telah dibahas sebelumnya adalah $475.515 \mu H$ dan $1063.284 \mu H$. Dengan parameter yang didapat dari *datasheet magnetics 77439A7* maka dapat dihitung jumlah lilitan dari persamaan (3.9).

$$n_1 = 1000 \times \sqrt{\frac{L_1}{A_L}}$$

$$n_1 = 1000 \times \sqrt{\frac{0.475515}{135}} = 59.349$$

$$n_2 = 1000 \times \sqrt{\frac{L_2}{A_L}}$$

$$n_2 = 1000 \times \sqrt{\frac{1.063284}{135}} = 88.747$$



Gambar 3.3 Implementasi Induktor L_1 dan L_2

Setelah menghitung nilai kapasitor dan induktor yang digunakan maka harus disesuaikan juga dengan ketersediaan komponen yang ada dipasaran. Di bawah ini merupakan tabel komponen yang tersedia dipasaran dan akan digunakan untuk implementasi.

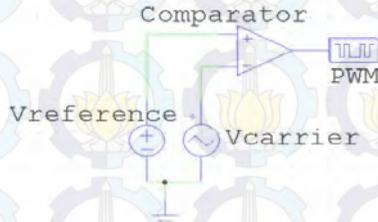
Tabel 3.4 Komponen kapasitor dan induktor yang tersedia dipasaran

Komponen	Seri
Kapasitor C_{O1} dan C_{O2}	<i>elco</i> 22 uF
Kapasitor C_1	<i>elco</i> 47 uF
Induktor L_1	<i>magnetics</i> 77439A7 512 uH
Induktor L_2	<i>magnetics</i> 77439A7 1173 uH

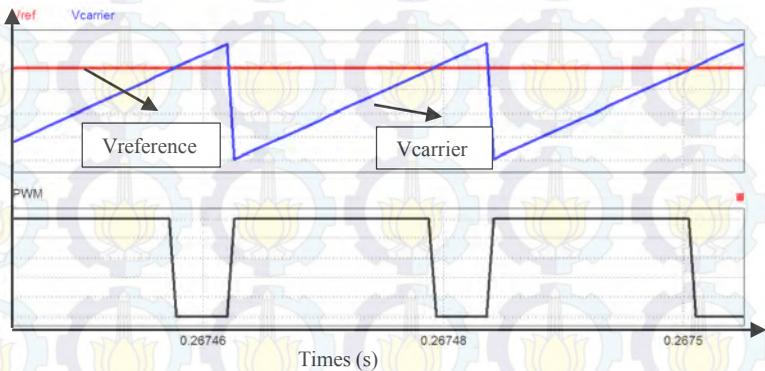
3.6. Simulasi *Pulse Width Modulation* (PWM) Pada Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat

Pada topologi rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter tiga tingkat menggunakan dua buah sinyal pembangkit PWM yang memiliki perbedaan fasa 180 derajat. Pembangkitan sinyal PWM yang paling sederhana adalah dengan cara membandingkan sinyal tegangan segitiga sebagai tegangan carrier dengan tegangan referensi menggunakan rangkaian op-amp komparator. Gambar simulasi pembangkit sinyal PWM menggunakan rangkaian komparator ditunjukkan pada gambar 3.4. Cara kerja dari komparator analog ini adalah membandingkan gelombang tegangan segitiga dengan tegangan referensi. Saat nilai tegangan referensi lebih besar dari tegangan segitiga

(*carrier*) maka output komparator akan bernilai *high*. Namun saat tegangan referensi bernilai lebih kecil dari tegangan *carrier*, maka output komparator akan bernilai *low*. Dengan memanfaatkan prinsip kerja dari komparator inilah, untuk mengubah duty cycle dari sinyal output cukup dengan mengubah-ubah besar tegangan referensi.

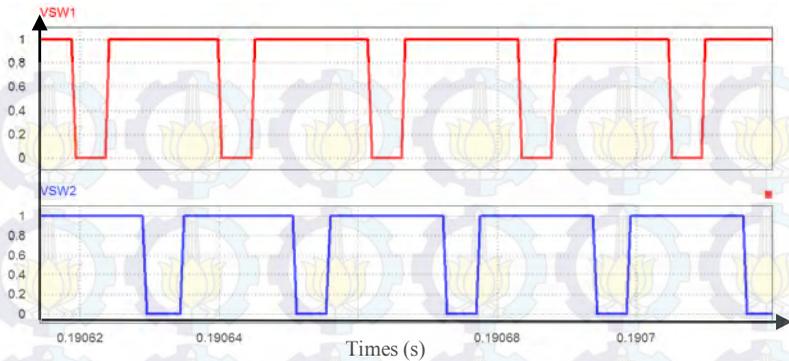


Gambar 3.4 Rangkaian Pembangkit Sinyal PWM



Gambar 3.5 Proses Pembentukan Sinyal PWM

Untuk mengatur agar terdapat perbedaan fasa 180 derajat maka tegangan segitiga (*carrier*) diatur sudut penyalannya 180 derajat sehingga akan menghasilkan sinyal PWM yang ditunda selama setengah periodenya. Rangkaian konverter ini menggunakan dua komparator yang akan menghasilkan dua sinyal PWM. Pada rangkaian komparator yang kedua diatur sudut penyalan $V_{carrier}$ sehingga PWM yang kedua akan tertunda selama setengah periode. Hasil dari kedua sinyal ini diperlihatkan pada gambar 3.6 di bawah ini.



Gambar 3.6 Dua buah sinyal PWM dengan perbedaan fasa 180° *duty cycle* 77 % menggunakan *software* Psim

Pembangkit sinyal PWM ini menggunakan frekuensi 46.875 Khz sehingga periodenya adalah 21.34 us. Sesuai dengan persamaan yang telah dibahas pada bab 2 maka kita dapat menghitung Δt kedua sinyal PWM.

$$\Delta t_1 = \Delta t_4 = \frac{21.34((2 \times 0.77) - 1)}{2} = 5.76 \text{ us} \quad (3.7)$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_5 = 21.34(1 - 0.77) = 4.9 \text{ us} \quad (3.8)$$

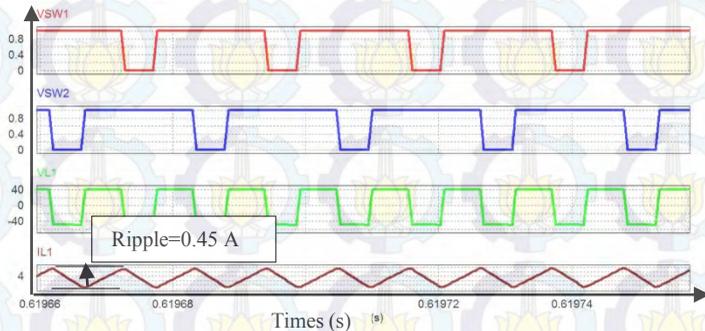
3.7. Simulasi Tegangan dan Arus Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat

Pengujian tegangan dan arus pada rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat pada simulasi untuk menguji kesesuaian teori yang telah dihitung dan juga sebagai indikator penentuan parameter komponen yang digunakan seperti *switch*, kapasitor, induktor, dan dioda. Pada pengujian implementasinya konverter ini menggunakan sumber tegangan dc.

Konverter ini memiliki spesifikasi tegangan masukan minimum 40 volt dan tegangan masukan maksimum 80 volt. Karena sumber dari konverter ini menggunakan panel surya maka tegangan keluaran akan dipertahankan sebesar 400 volt. Untuk menentukan parameter komponen yang digunakan pada simulasi digunakan tegangan masukan 40 volt dan

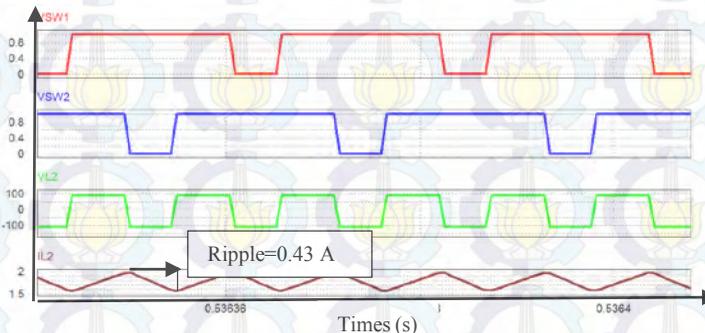
tegangan keluaran 400 volt. Karena pada saat tegangan minimum 40 volt dengan daya yang sama arus yang mengalir merupakan arus yang paling besar dan juga terjadi perubahan tegangan yang paling besar.

Switch yang digunakan pada konverter ini adalah MOSFET. Berikut akan ditampilkan arus dan tegangan yang mengalir pada komponen seperti MOSFET, dioda, kapasitor, dan induktor.



Gambar 3.7 Gelombang sinyal PWM, tegangan V_{L1} , dan arus I_{L1}

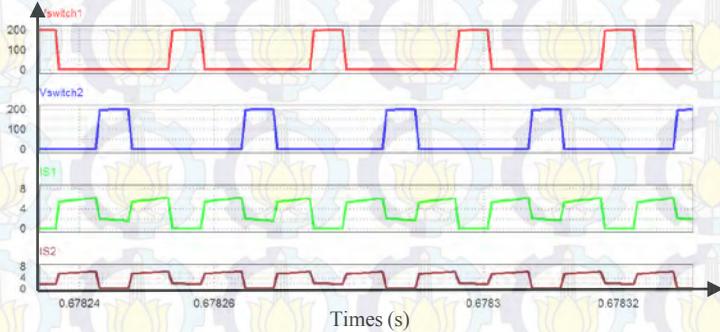
Pada gambar 3.7 *ripple* arus induktor I_{L1} sebesar 0.45 A sedangkan arus rata-rata induktor adalah 4 A. Dibawah ini merupakan bentuk gelombang induktor I_{L2}



Gambar 3.8 Gelombang sinyal PWM, tegangan V_{L2} , dan arus I_{L2}

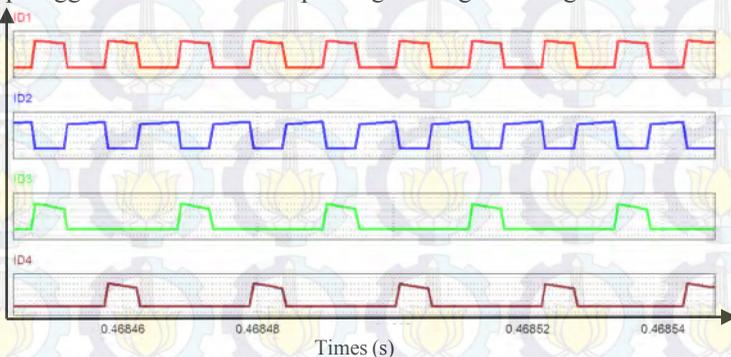
Gambar 3.7 tidak berbeda jauh dengan gambar 3.9. *Ripple* arus induktor yang dihasilkan adalah sebesar 0.43 A sedangkan arus rata-rata

induktor 2 adalah 1.76 A. Untuk menentukan komponen MOSFET yang digunakan maka harus mengetahui arus dan tegangan saklar. Gambar 3.9 akan memperlihatkan besar arus dan tegangan pada MOSFET 1 dan 2.



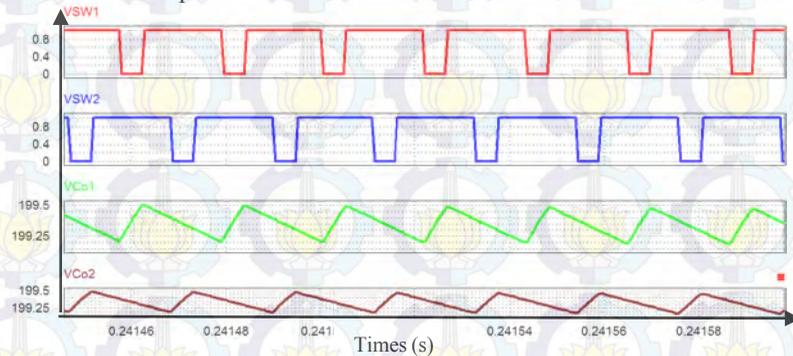
Gambar 3.9 Gelombang tegangan dan arus MOSFET 1 dan 2

Gambar 3.9 menunjukkan arus dan tegangan MOSFET. Tegangan yang dihasilkan MOSFET 1 dan 2 adalah 200 volt disaat kondisi tegangan keluaran 400 volt dan tegangan masukan 40 volt. Terlihat bahwa *stress* tegangan pada saklar berkurang sebesar setengah dari tegangan output. Arus MOSFET 1 dan 2 masing-masing sebesar 3.6 A. MOSFET yang akan digunakan adalah MOSFET dengan serin IRFP460. MOSFET dengan seri ini memiliki *rating* tegangan sebesar 600 volt dan *rating* arus sebesar 20 A. Namun, kekurangan dari MOSFET ini adalah nilai R_{ds} yang cukup tinggi. Di bawah ini merupakan gambar gelombang arus dioda.



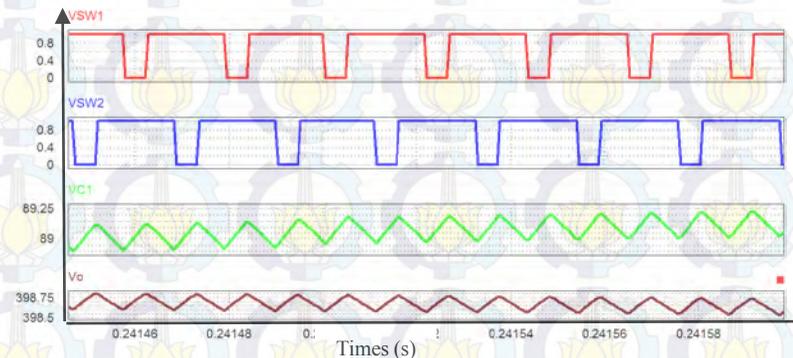
Gambar 3.10 Gelombang arus dioda D1,D2,D3, dan D4

Arus dioda 1, dioda2, dioda 3, dan dioda 4 yang ditunjukkan oleh gambar 3.10 masing-masing sebesar 1.78 A, 2.23 A, 3.9 A, dan 3.9 A. Dioda yang digunakan adalah dioda dengan seri MUR1560. Dioda ini adalah jenis dioda *ultrafast* dengan rugi pensaklaran yang rendah. Dioda ini memiliki tegangan *breakdown* 600V dengan arus maksimum yang dapat dilewatkan sampai 15A.



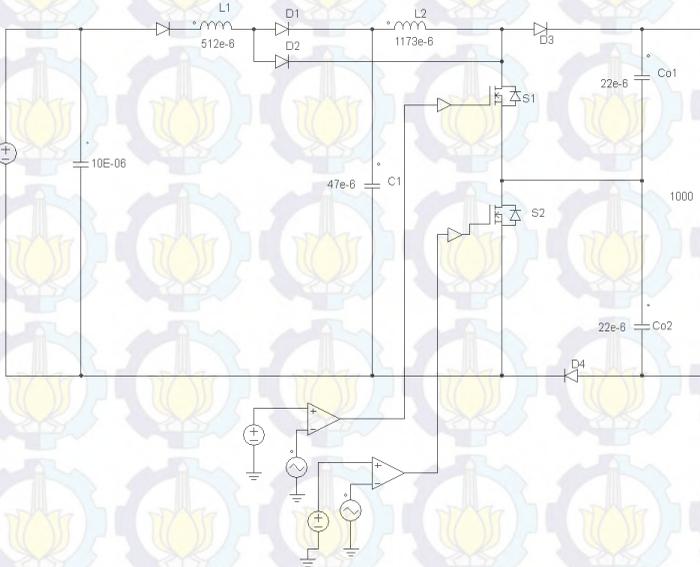
Gambar 3.11 Gelombang tegangan kapasitor V_{Co1} dan V_{Co2}

Besar *ripple* tegangan C_{o1} dan C_{o2} yang ditunjukkan pada gambar 3.11 adalah masing-masing sebesar 0.3 volt dengan tegangan rata-rata sebesar 200 volt.



Gambar 3.12 Gelombang tegangan kapasitor C_1 dan V_o

Besar *ripple* tegangan C_1 dan V_O yang ditunjukkan pada gambar 3.12 masing-masing sebesar 0.2 volt dengan tegangan rata-rata masing-masing sebesar 89 volt dan 400 volt. Pengujian tegangan dan arus dilakukan dalam keadaan *steady state*. Rangkaian simulasi konverter ditunjukkan oleh gambar 3.13 berikut



Gambar 3.13 Simulasi Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat

Berdasarkan pemodelan simulasi rangkaian konverter diatas menggunakan dua buah saklar. Saklar yang digunakan pada topologi konverter ini ada Mosfet dengan tipe NPN. Dalam implementasinya Mosfet yang digunakan adalah Mosfet dengan seri IRFP460. Mosfet dengan seri ini memiliki kemampuan arus keluaran 20 A dan tegangan $V_{DS} = 500$ V. Rangkaian ini juga memiliki 2 buah induktor, 3 buah kapasitor, 4 buah dioda, serta beban resistif dengan nilai 1000 Ohm. Pada implementasinya, dioda yang digunakan merupakan dioda dengan seri MUR1560. Dioda ini memiliki kemampuan arus sebesar 15 A dan tegangan sebesar 600 V serta merupakan dioda penyearah *ultrafast* yang memiliki rugi *switching* yang rendah.

3.8. Simulasi Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat Terhadap Perubahan Duty Cycle

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui rasio konversi dari konverter. Pengujian ini akan memperhitungkan *error duty cycle* teori dengan implementasi. Akan tetapi, pada saat simulasi tidak ada *error* atau kesalahan karena pada saat simulasi semua dianggap ideal. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan beban resistif 1000 ohm atau daya 160 watt. *Duty cycle* yang diujikan sebesar 50 % - 78 %. Tabel 3.5 menunjukkan perubahan *duty cycle* pada rangkaian konverter dan error yang dihasilkan dari rangkaian konverter ini.

Tabel 3.5 Pengujian rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat terhadap perubahan Duty Cycle.

Vin (V)	Vout Teori atau Vout Simulasi (V)	Duty Cycle (%)
40	80	50
40	98.7654321	55
40	125	60
40	163.2653061	65
40	222.2222222	70
40	320	75
40	413.2231405	78

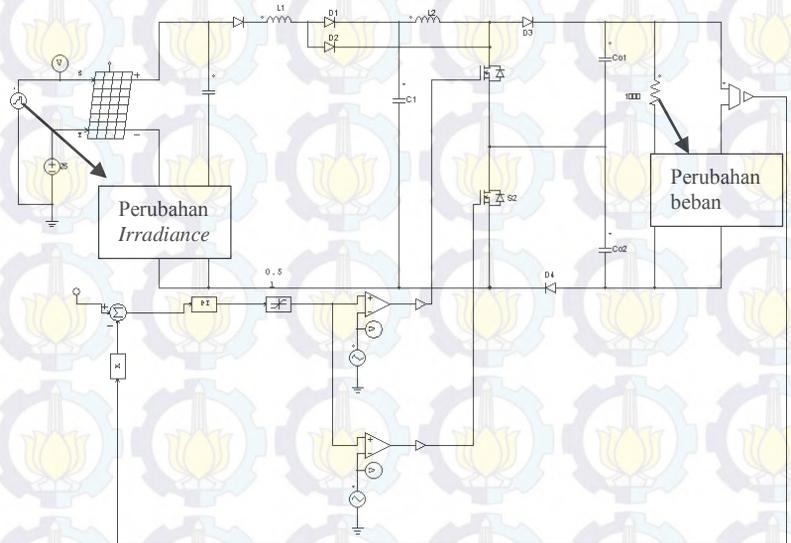


Gambar 3.14 Grafik Perubahan Duty Cycle Terhadap Tegangan Keluaran

Error duty cycle yang dihasilkan dari perhitungan teori dengan hasil simulasi tidak berbeda sama sekali. Hal ini terjadi karena pada simulasi memang semua dalam kondisi ideal. Gambar 3.14 menunjukkan perubahan *duty cycle* terhadap tegangan keluaran konverter. Pada saat simulasi semua parameter dianggap ideal sehingga tidak ada rugi-rugi yang dihasilkan. Maka, baik itu perhitungan teori maupun dengan hasil simulasi akan sama.

3.9. Simulasi Pengujian Dinamis

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon tegangan keluaran terhadap perubahan tegangan masukan dan perubahan beban. Di bawah ini adalah gambar simulasi pengujian dinamis.

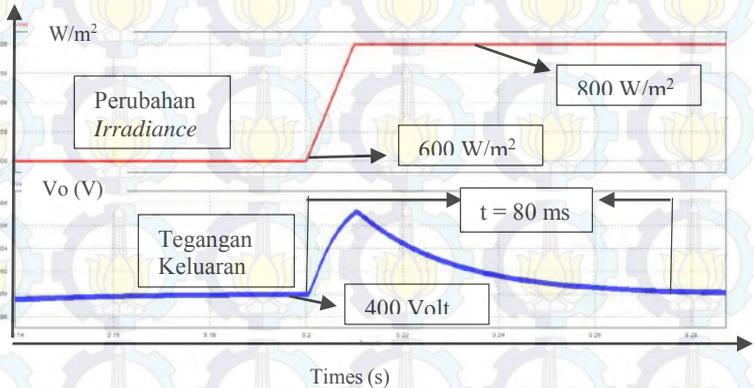


Gambar 3.15 Simulasi pengujian dinamis

3.9.1. Pengujian Terhadap Perubahan Tegangan Masukan

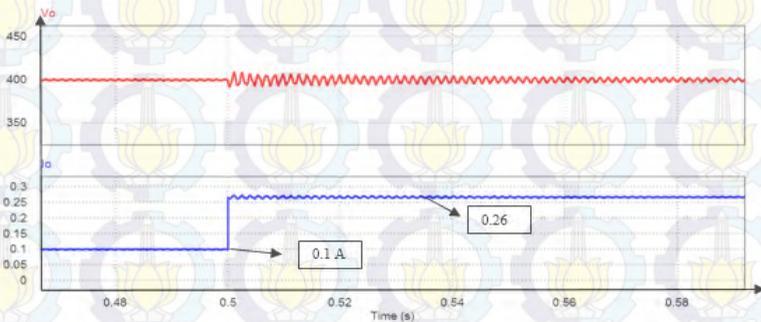
Perubahan radiasi matahari sangat mempengaruhi tegangan keluaran dari *photovoltaic*. Untuk itu tegangan keluaran dari konverter harus tetap konstan agar dapat digunakan sebagai masukan inverter. Dalam simulasi pengujian ini tegangan keluaran konverter dipertahankan pada tegangan 400 volt dimana tegangan masukan dari konverter berubah-ubah. Respon tegangan keluaran terhadap perubahan tegangan

masuk akan ditunjukkan oleh gambar berikut. Pada gambar 3.16 terlihat bahwa saat *Irradiance* berubah naik tegangan keluaran ikut naik sebesar 7 volt dan kembali konstan dalam selang waktu 80 ms.



Gambar 3.16 Respon tegangan keluaran terhadap perubahan *Irradiance*

3.9.2. Pengujian Terhadap Perubahan Beban



Gambar 3.17 Respon tegangan keluaran terhadap perubahan beban

Dari gambar 3.17 terlihat bahwa perubahan beban tidak mempengaruhi tegangan keluaran. Perubahan beban hanya mempengaruhi *ripple* tegangan keluaran sesuai dengan rumus yang telah

dibahas pada bab 2. Hal ini terjadi karena saat simulasi semua kondisi dianggap ideal.

3.10. Pembangkit Sinyal *Pulse Width Modulation (PWM)* Pada Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat

Rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan *boost* tiga tingkat memiliki 2 saklar yang memiliki perbedaan fasa sebesar 180 derajat. Dalam implementasinya, penulis menggunakan mikrokontroler Atmega16 dengan frekuensi kristal sebesar 12 Mhz. Rangkaian ini menggunakan PWM dengan frekuensi 46.875 Khz dengan mode *fast* PWM. Untuk memperoleh sinyal dengan frekuensi tersebut maka akan diperoleh dari persamaan 3.13 dibawah berikut :

$$f_{PWM} = \frac{f_{crystal}}{N \times 255} \quad (3.9)$$

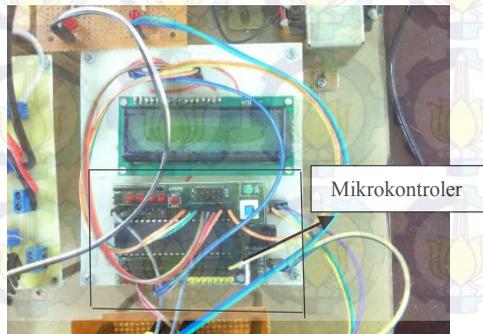
Dimana N merupakan nilai *prescaler* yang terdiri dari 1, 8, 64, 256, 1024. Untuk memperoleh frekuensi sebesar 46.875 Khz maka akan menggunakan N=1, sehingga :

$$f_{PWM} = \frac{12 \text{ MHz}}{1 \times 256}$$

$$f_{PWM} = \frac{12 \times 10^6}{1 \times 256}$$

$$f_{PWM} = 46875 \text{ Hz}$$

$$f_{PWM} = 46.875 \text{ KHz}$$



Gambar 3.18 Rangkaian Mikrokontroler

3.11. Kontrol Proporsional Integral

Untuk implementasi kontrol PI pada mikrokontroler menggunakan rumus melalui persamaan berikut.

$$error = setpoint - V_{out} \quad (3.10)$$

$$Integral = error \times \tau_s \quad (3.11)$$

$$P_{out} = K_p \times error \quad (3.12)$$

$$I_{out} = K_i \times Integral \quad (3.13)$$

$$PI_{out} = P_{out} + I_{out} \quad (3.14)$$

Dimana :

Setpoint = Besar tegangan yang ingin dipertahankan

τ_s = Time Konstan

P_{out} = Keluaran Proporsional

I_{out} = Keluaran Integral

PI_{out} = Nilai Proporsional Integral

Ada beberapa cara penalaan kontroler PI diantaranya yaitu metode *relay feedback* Ziegler-Nichols, *manual (hand-tuning/trial-error)*, metode analitik dengan optimasi, penempatan pole (*pole placement*), atau swatata (*auto tuning*). Dalam Tugas Akhir ini metode yang digunakan dalam penalaan kontroler PI adalah dengan cara *manual (hand-tuning/trial-error)*. Setelah dilakukan *hand-tuning/trial-error* didapatkan nilai $K_p = 0.0039$, $K_i = 2$, dan $\tau_s = 0.005$ s.

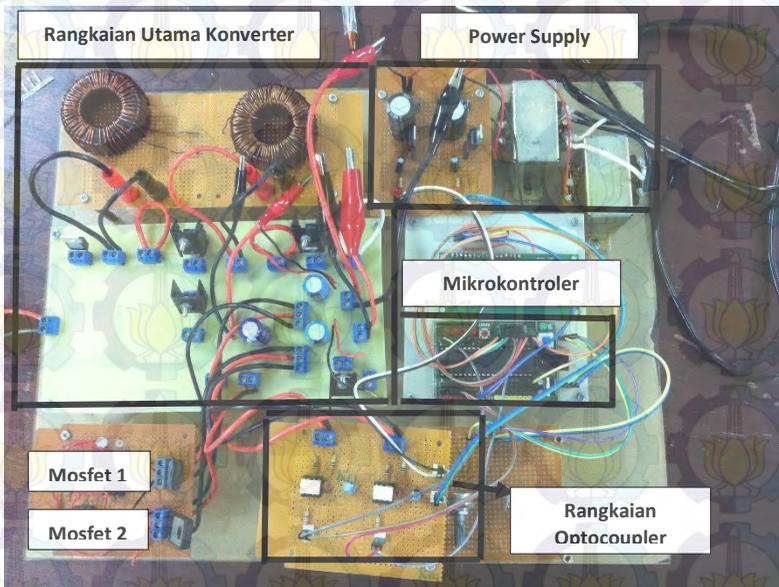


Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Bab ini akan membahas tentang data hasil pengujian alat dan membandingkan dengan data yang telah diperoleh saat simulasi. Pengujian dilakukan dengan mempertimbangkan tiga metode yaitu, pengujian terhadap perubahan beban untuk mengetahui efisiensi dari konverter, pengujian perubahan *duty cycle* untuk mengetahui tingkat kesalahan tegangan pada saat *duty cycle* tertentu, serta pengujian arus dan tegangan.



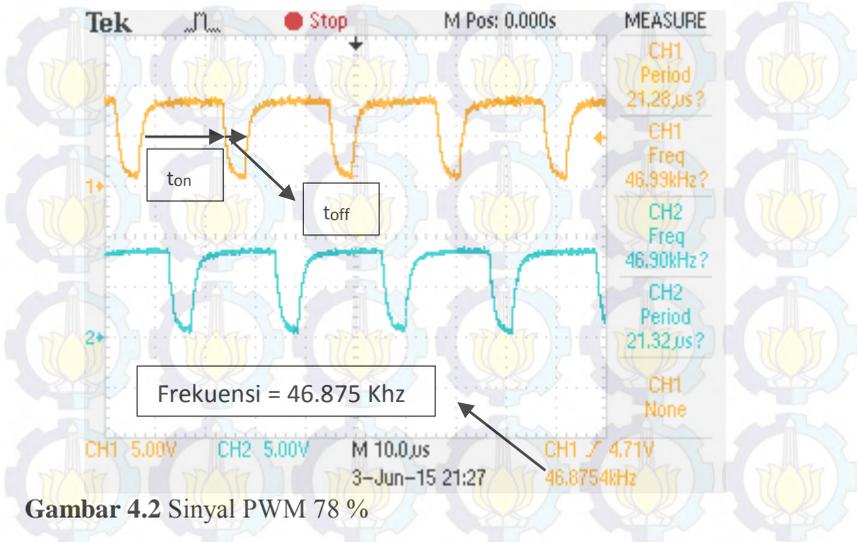
Gambar 4.1 Implementasi Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* Kuadratik dan *Boost* Tiga Tingkat

Pada tahap ini penulis mencoba untuk mengaplikasikan rangkaian kombinasi konverter boost kuadratik dan boost tiga tingkat dengan parameter-parameter lain yang telah ditentukan sebelumnya. Gambar 4.1 merupakan gambar dari implementasi rangkaian kombinasi konverter boost kuadratik dan boost tiga tingkat.

Rangkaian ini menggunakan 2 saklar yang diseri. Saklar yang digunakan adalah saklar dengan jenis Mosfet IRFP460. Saklar ini memiliki rating 20 A dan 600 V. Rangkaian ini juga menggunakan 4 buah dioda dengan seri MUR1560 sedangkan kapasitor Vc1 menggunakan 47 uF dengan tegangan 250 volt, kapasitor Vco1 dan Vco2 masing-masing sebesar 22 uF dengan tegangan 400 volt. Induktor yang digunakan adalah induktor toroid dengan tipe magnetics 77439A7. Besarnya induktor L₁ dan L₂ adalah 512 uH dan 1173 uH.

4.1. Pengujian Sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM)

Pembangkit sinyal PWM menggunakan mikrokontroler Atmega16. Sinyal PWM rangkaian kombinasi konverter *boost* kuadratik dan konverter *boost* tiga tingkat terdiri dari dua buah sinyal yang ditunda fasanya 180 derajat. Sinyal PWM yang yang dibangkitkan oleh Atmega 16 akan diisolasi menggunakan rangkaian *optocoupler* dengan tegangan *supply* sebesar 9 volt. Pengujian ini dilakukan dengan mengubah *duty cycle* menggunakan *potentiometer* dan melihat hasil dari sinyal menggunakan osiloskop. Gambar dibawah ini merupakan hasil sinyal dari pengujian PWM.



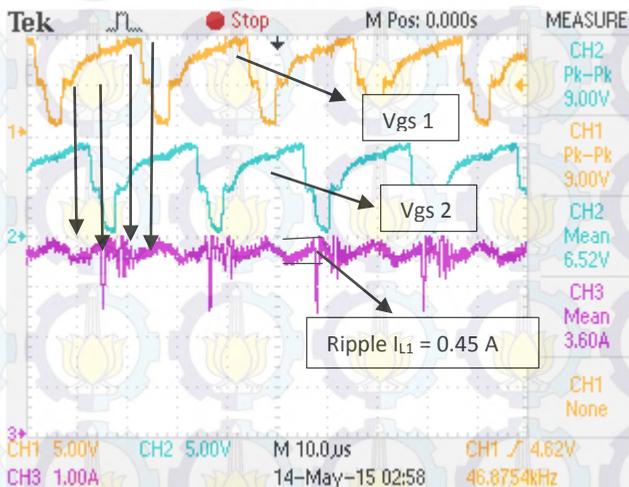
Gambar 4.2 Sinyal PWM 78 %

4.2. Pengujian *Steady State*

Pengujian ini terdiri dari 3 pengujian yaitu pengujian gelombang arus dan tegangan, pengujian rasio, dan pengujian efisiensi terhadap perubahan beban. Penjelasan pengujian tersebut akan dibahas pada sub bab berikut ini.

4.2.1 Pengujian Gelombang Arus dan Tegangan

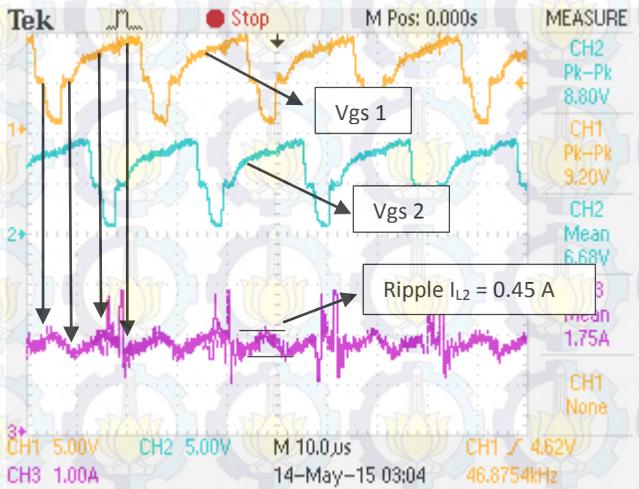
Pengujian arus dan tegangan dilakukan untuk mengetahui *ripple* arus induktor serta gambar gelombang tegangan untuk mengetahui kesesuaian hasil simulasi terhadap implementasi.



Gambar 4.3 *Ripple* Arus Induktor I_{L1} dan Sinyal PWM

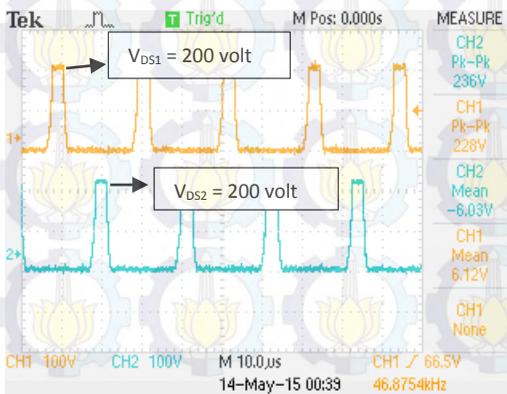
Gambar 4.3 menunjukkan gelombang *ripple* arus induktor I_{L1} . Sinyal PWM yang tertera pada gambar menunjukkan *duty cycle* pada saat 78%. Besarnya nilai tegangan PWM adalah sebesar 9 volt. Menurut *datasheet* MOSFET IRFP460 memiliki tegangan maksimum *supply* 20 volt namun dengan tegangan 5 volt MOSFET sudah mampu melakukan *trigger*. Dalam implementasi, digunakan *optocoupler* untuk mengisolir ataupun sebagai pengaman mikrokontroler. *Ripple* yang dihasilkan pada gambar 4.3 adalah sebesar 0.45 A. Nilai ini tidak berbeda jauh dengan hasil simulasi yang dibahas pada bab 3. Terlihat juga pada gambar bahwa bentuk dari sinyal PWM tidak kotak hal ini disebabkan oleh parasit

komponen dari MOSFET. MOSFET sejatinya memiliki nilai kapasitansi pada kakinya dalam hal ini kaki *gate* dan *source*. Besarnya arus rata-rata pada induktor sebesar 3.6 A.



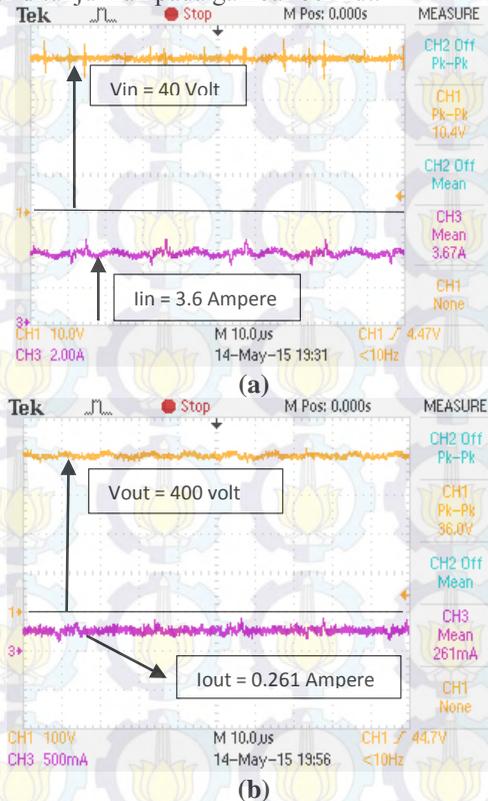
Gambar 4.4 Ripple Arus Induktor I_{L2} dan Sinyal PWM

Gambar 4.4 menunjukkan bentuk gelombang dari induktor I_{L2} . *Ripple* arus induktor I_{L2} sebesar 0.45 A dengan arus rata-rata sebesar 1.75 A.



Gambar 4.5 Tegangan Switch 1 dan 2

Gambar 4.5 merupakan gambar gelombang tegangan V_{DS1} dan V_{DS2} pada MOSFET. Tegangan *switch* pada konverter ini setengah dari tegangan keluaran. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa konverter ini dapat mengurangi *stress* tegangan pada konverter *boost* kuadratik. Sedangkan gambar tegangan dan arus masukan serta keluaran dari konverter ditunjukkan pada gambar berikut.



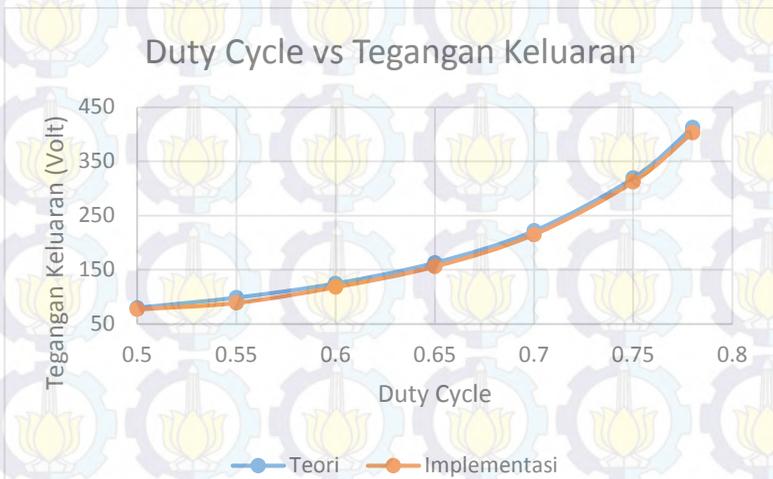
Gambar 4.6 (a) Tegangan dan Arus Masukan
 (b) Tegangan dan Arus Keluaran

Gambar 4.6 (a) dan (b) merupakan gambar tegangan serta arus masukan dan keluaran dari konverter. Dari gambar diatas dapat dilihat daya masukan dari konverter adalah 144 watt sedangkan daya keluarannya adalah 104.4 sehingga dapat dihitung efisiensi dari konverter

adalah 72.5 %. Dari perancangan desain awal, daya keluaran yang diharapkan adalah 160 watt akan tetapi karena keterbatasan alat dan komponen konverter ini hanya mampu untuk daya keluaran sekitar 105 watt.

4.2.2. Pengujian Rasio *Duty Cycle*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *error* tegangan yang diperoleh. *Error* tegangan diperoleh dari perbandingan hasil perubahan *duty cycle* terhadap tegangan keluaran berdasarkan teori dengan hasil perubahan *duty cycle* tegangan keluaran saat implementasi. Representasi data pengujian dalam bentuk grafik akan dijelaskan pada gambar 4.7 berikut.

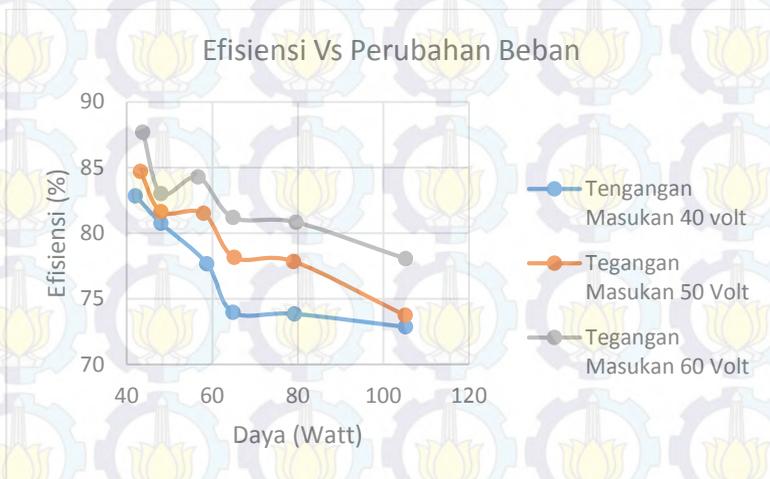


Gambar 4.7 Grafik Perubahan Rasio *Duty Cycle* terhadap tegangan keluaran

Dari hasil grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi *error* tegangan antara teori dan implementasi. Nilai konversi tegangan implementasi lebih kecil dibandingkan dengan nilai teori. Hal ini terjadi karena terjadi drop tegangan pada saat implementasi sehingga nilai tegangan implementasi lebih kecil dibanding nilai teori.

4.2.3. Pengujian Efisiensi Terhadap Perubahan Beban

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui efisiensi dari rangkaian konverter. Pengujian ini dilakukan dengan tegangan masukan 40 volt, 50 volt, dan 60 volt dengan tegangan keluaran dipertahankan pada 400 volt. Saat melakukan desain awal beban dengan daya tertinggi menggunakan 1000 ohm atau 160 watt. Namun, karena keterbatasan alat karena arus yang tinggi maka saat melakukan pengujian hanya mampu mencapai 1500 ohm atau setara dengan daya keluaran 105 watt. Setelah dilakukan pengujian pada konverter, didapatkan data pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi konverter yang direpresentasikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik pengaruh perubahan beban terhadap efisiensi

Dari data grafik diatas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa perubahan beban sangat mempengaruhi efisiensi konverter. Semakin besar daya maka semakin kecil efisiensi konverter. Hal ini terjadi karena ketika daya semakin besar maka arus yang dibutuhkan juga semakin besar untuk tegangan keluaran yang sama sehingga rugi komponen juga akan semakin besar. Grafik diatas merupakan pengujian dengan tegangan masukan 40 v olt, 50 v olt, dan 60 v olt sedangkan tegangan keluaran dipertahankan pada kondisi 400 volt. Efisiensi terbesar terjadi pada saat

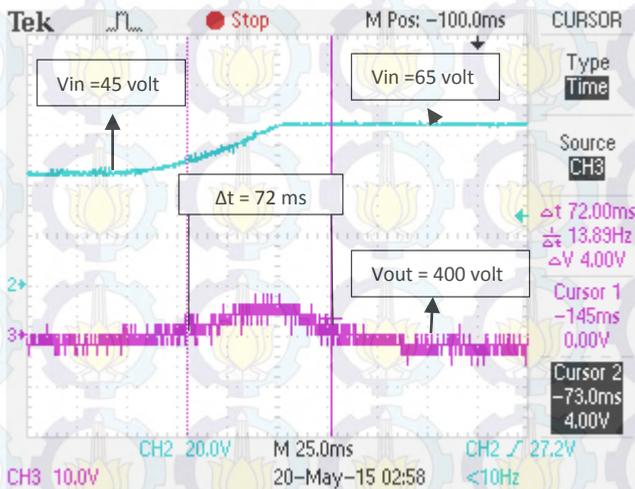
tegangan masukan 60 volt karena pada tegangan masukan 60 volt rasio konversinya lebih kecil dibanding tegangan masukan 40 volt dan 50 volt.

4.3. Pengujian Dinamis

Pada pengujian ini terdiri dari 2 pengujian yaitu pengujian terhadap perubahan tegangan masukan dan pengujian terhadap perubahan beban. Pengujian ini untuk mengetahui respon tegangan keluaran terhadap perubahan tegangan masukan dan perubahan beban. Hasil dari pengujian tersebut akan dijelaskan melalui sub bab berikut.

4.3.1 Pengujian Terhadap Perubahan Tegangan Masukan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui respon tegangan keluaran terhadap perubahan tegangan masukan. Respon dari tegangan keluaran terhadap perubahan tegangan masukan dilihat melalui osiloskop yang ditunjukkan melalui gambar 4.9.



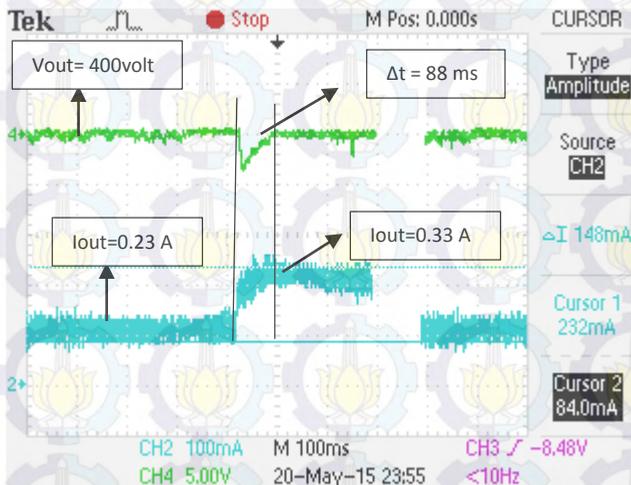
Gambar 4.9 Respon Tegangan Keluaran Terhadap Perubahan Tegangan Masukan

Dari gambar terlihat bahwa dibutuhkan waktu tegangan keluaran untuk konstan disaat tegangan masukan dinaikkan. Terlihat bahwa waktu Δt dari tegangan keluaran adalah 72 ms. Ketika tegangan masukan

dinaikkan tegangan keluaran dari sistem ikut naik sebesar 8 volt sampai akhirnya tegangan keluaran konstan.

4.3.2 Pengujian Terhadap Perubahan Beban

Perubahan beban akan berpengaruh terhadap arus keluaran. Perubahan beban akan merubah daya dan untuk tegangan konstan perubahan daya akan menyebabkan perubahan arus. Gambar dibawah akan menunjukkan respon tegangan keluaran terhadap perubahan arus keluaran.



Gambar 4.10 Respon Tegangan Keluaran Terhadap Perubahan Beban

Dari gambar diatas terlihat waktu yang dibutuhkan tegangan keluaran agar dapat konstan saat arus keluaran naik adalah 88 ms. Terlihat juga bahwa perubahan arus keluaran mempengaruhi tegangan keluaran konverter. Semakin besar arus keluaran yang dihasilkan maka akan terjadi penurunan tegangan sesaat sebelum *duty cycle* dari konverter berusaha untuk mencapai tegangan konstan.



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] João Bosco RF. Cabral, Tiago Lemes da Silva, Sérgio Vidal Garcia Oliveira, Yales Rômulo de Novaes, "A New High Gain Non-Isolated DC-DC Boost Converter for Photovoltaic Application," Power Electronics Conference (COBEP), 2013
- [2] M. G. Ortiz-Lopez, J. Leyva-Ramos, L. H. Diaz-Saldierna, J. M. Garcia-Ibarra and E. E. Carbajal-Gutierrez, "Current-Mode Control for a Quadratic boost converter with a Single Switch," Power Electronics Specialists Conference, 2007
- [3] Surojo, Mochamad.Ashari, Mauridhi Hery Purnomo, "Desain dan Simulasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) Sel Surya Menggunakan Fuzzy Logic Control untuk Kontrol Boost Konverter," 7th Basic Science National Seminar Proceeding, 2010
- [4] M. Masters, Gilbert. 2004. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- [5] W.Hart, Daniel. 1997. *Introduction to Power Electronics*. Valparaiso University, Indiana: Prentice-Hall International, Inc.
- [6] Ashari, Mochamad. 2012. *Sistem Konverter DC, Desain Rangkaian Elektronika Daya*. ITS Press. Surabaya.
- [7] Yuwono, Budi. *Optimalisasi Panel Surya Dengan Menggunakan Sistem Pelacak Berbasis Mikrokontroler AT89C51*. Universitas Sebelas Maret. 2005. Surakarta.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi, analisis data pengujian, dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat memiliki nilai rasio konversi tegangan yang tinggi dengan *stress* tegangan pada *switch* setengah dari tegangan keluaran.
2. Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat dapat dioperasikan untuk *grid connected* dengan tegangan masukan minimum 40 volt.
3. Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat memiliki efisiensi yang cukup rendah yaitu 72.85% ketika dioperasikan dengan tegangan masukan 40 volt dan tegangan keluaran 400 volt pada daya keluaran 105 watt. Hal ini disebabkan oleh parasit komponen dan rugi komponen yang besar. Namun, walaupun demikian rangkaian konverter ini memiliki rasio konversi yang tinggi.
4. Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat mampu mengurangi *stress* tegangan *switch* namun tidak mampu mengurangi *stress* arus pada *switch*.
5. Penggunaan jenis MOSFET sangat mempengaruhi efisiensi dan tegangan keluaran. Nilai R_{ds} yang besar mengakibatkan *power losses* yang besar pada MOSFET sehingga efisiensi menjadi turun

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan sehubungan dengan Tugas Akhir ini bahwa Rangkaian Kombinasi Konverter *Boost* kuadratik dan Konverter *Boost* Tiga Tingkat dapat dikombinasikan lagi dengan suatu rangkaian yang dapat mengurangi *stress* arus pada *switch*.



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

LIST PROGRAM PWM

/******

This program was produced by the
CodeWizardAVR V2.05.3 Standard

Automatic Program Generator

© Copyright 1998-2011 Pavel Haiduc, HP InfoTech s.r.l.

<http://www.hpinfotech.com>

Project :

Version :

Date : 4/30/2015

Author : Jitu

Company :

Comments:

Chip type : ATmega16

Program type : Application

AVR Core Clock frequency: 12.000000 MHz

Memory model : Small

External RAM size : 0

Data Stack size : 256

*****/

#include <mega16.h>

#include <delay.h>

// Alphanumeric LCD functions

#include <alcd.h>

#include <stdio.h>

#include <stdlib.h>

#include <math.h>

#define ADC_VREF_TYPE 0x20

char buf0[16];

char buf1[16];

//int Y;

float error;

float integral,Pvout,Ivout,PIvout,X,Y;

// Read the 8 most significant bits

```
// of the AD conversion result
```

```
unsigned char read_adc(unsigned char adc_input)
```

```
{  
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
```

```
    // Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage
```

```
    delay_us(10);
```

```
    // Start the AD conversion
```

```
    ADCSRA|=0x40;
```

```
    // Wait for the AD conversion to complete
```

```
    while ((ADCSRA & 0x10)==0);
```

```
    ADCSRA|=0x10;
```

```
    return ADCH;
```

```
}
```

```
// Declare your global variables here
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
    // Declare your local variables here
```

```
    // Input/Output Ports initialization
```

```
    // Port A initialization
```

```
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In  
Func0=In
```

```
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T  
State0=T
```

```
PORTA=0x00;
```

```
DDRA=0x00;
```

```
// Port B initialization
```

```
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=Out Func2=In  
Func1=In Func0=In
```

```
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=0 State2=T State1=T  
State0=T
```

```
PORTB=0x00;
```

```
DDRB=0x08;
```

```
// Port C initialization
```

```
// Func7=In Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In Func1=In  
Func0=In
```

```
// State7=T State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T  
State0=T
```

```
PORTC=0x00;
```

```
DDRC=0x00;
```

```
// Port D initialization
```

```
// Func7=Out Func6=In Func5=In Func4=In Func3=In Func2=In
Func1=In Func0=In

// State7=0 State6=T State5=T State4=T State3=T State2=T State1=T
State0=T
PORTD=0x00;
DDRD=0x80;

// Timer/Counter 0 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: 12000.000 kHz
// Mode: Fast PWM top=0xFF
// OC0 output: Non-Inverted PWM
TCCR0=0x69;
TCNT0=0x00;
OCR0=0x00;

// Timer/Counter 1 initialization
// Clock source: System Clock
// Clock value: Timer1 Stopped
// Mode: Normal top=0xFFFF
// OC1A output: Discon.
// OC1B output: Discon.
// Noise Canceler: Off
```

// Input Capture on Falling Edge

// Timer1 Overflow Interrupt: Off

// Input Capture Interrupt: Off

// Compare A Match Interrupt: Off

// Compare B Match Interrupt: Off

TCCR1A=0x00;

TCCR1B=0x00;

TCNT1H=0x00;

TCNT1L=0x00;

ICR1H=0x00;

ICR1L=0x00;

OCR1AH=0x00;

OCR1AL=0x00;

OCR1BH=0x00;

OCR1BL=0x00;

// Timer/Counter 2 initialization

// Clock source: System Clock

// Clock value: 12000.000 kHz

// Mode: Fast PWM top=0xFF

// OC2 output: Non-Inverted PWM

ASSR=0x00;

```
TCCR2=0x69;
```

```
TCNT2=143;
```

```
OCR2=0x00;
```

```
// External Interrupt(s) initialization
```

```
// INT0: Off
```

```
// INT1: Off
```

```
// INT2: Off
```

```
MCUCR=0x00;
```

```
MCUCSR=0x00;
```

```
// Timer(s)/Counter(s) Interrupt(s) initialization
```

```
TIMSK=0x00;
```

```
// USART initialization
```

```
// USART disabled
```

```
UCSRB=0x00;
```

```
// Analog Comparator initialization
```

```
// Analog Comparator: Off
```

```
// Analog Comparator Input Capture by Timer/Counter 1: Off
```

```
ACSR=0x80;
```

```
SFIOR=0x00;
```

```
// ADC initialization
```

```
// ADC Clock frequency: 187.500 kHz
```

```
// ADC Voltage Reference: AREF pin
```

```
// ADC Auto Trigger Source: Free Running
```

```
// Only the 8 most significant bits of
```

```
// the AD conversion result are used
```

```
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
```

```
ADCSRA=0xA6;
```

```
SFIOR&=0x1F;
```

```
// SPI initialization
```

```
// SPI disabled
```

```
SPCR=0x00;
```

```
// TWI initialization
```

```
// TWI disabled
```

```
TWCR=0x00;
```

```
// Alphanumeric LCD initialization
```

```
// Connections are specified in the
```

```
// Project|Configure|C Compiler|Libraries|Alphanumeric LCD menu:
```

```
// RS - PORTB Bit 0
```

```
// RD - PORTB Bit 1
```

```
// EN - PORTB Bit 2
```

```
// D4 - PORTB Bit 4
```

```
// D5 - PORTB Bit 5
```

```
// D6 - PORTB Bit 6
```

```
// D7 - PORTB Bit 7
```

```
// Characters/line: 16
```

```
lcd_init(16);
```

```
while (1)
```

```
{
```

```
    // Place your code here
```

```
    //.....PI.....//
```

```
    error=(float)202-read_adc(0);
```

```
    integral+=(float)error*0.005;
```

```
    Pvout=(float)0.0039*error;
```

```
    Ivout=(float)2*integral;
```

```
    PIvout=(float)Pvout+Ivout;
```

```
    X=(float)PIvout*20/51;
```

```
    Y=read_adc(0)/51;
```

```
if(integral>=200)
```

```
{  
    integral=200;  
}
```

```
if(PIvout>=195)
```

```
{  
    PIvout=181;  
}
```

```
OCR0=PIvout;
```

```
OCR2=PIvout;
```

```
lcd_gotoxy(0,0);
```

```
//lcd_putsf("PIVout=");
```

```
//Y=read_adc(0)/51;
```

```
itoa(integral,buf0);
```

```
//lcd_gotoxy(9,0);
```

```
lcd_puts(buf0);
```

```
//lcd_gotoxy(11,0);lcd_puts("oh");
```

```
lcd_gotoxy(0,1);
```

```
lcd_putsf("PWM=");
```

```
X=(float)PIvout*20/51;
```

```
itoa(X,buf1);
```

```
lcd_gotoxy(5,1);lcd_puts(buf1);lcd_puts("%");
```

```
//.....open loop.....//  
//OCR0=read_adc(0);  
//OCR2=read_adc(0);  
//Y=read_adc(0)*20/51;  
//lcd_gotoxy(0,0);  
//lcd_putsf("Bismillah...");  
//lcd_gotoxy(0,1);  
//lcd_putsf("PWM=")  
//itoa(Y,buf0);  
//lcd_gotoxy(6,1);lcd_puts(buf0);lcd_puts("%");  
//sprintf(buf0,"PWM= %0.1f ",Y);  
//lcd_gotoxy(0,1);  
//lcd_puts(buf0);  
}  
}
```

Tabel Analisis Bab 4

1. Tabel Pengujian Rasio Konverter

Teori			Implementasi			
Vin	Duty Cycle	Vout	Vin	Duty Cycle	Vout	error
39.9	0.5	79.8	39.9	0.5	77	3.508772
39.9	0.51	83.09	39.9	0.51	80	3.719298
39.9	0.52	86.589	39.9	0.52	82	5.299248
39.9	0.53	90.312	39.9	0.53	86	4.774937
39.9	0.54	94.282	39.9	0.54	88	6.662657
39.9	0.55	98.519	39.9	0.55	89	9.661654
39.9	0.56	103.05	39.9	0.56	95	7.809524
39.9	0.57	107.9	39.9	0.57	102	5.464662
39.9	0.58	113.1	39.9	0.58	108	4.505263
39.9	0.59	118.68	39.9	0.59	111	6.470677
39.9	0.6	124.69	39.9	0.6	118	5.363409
39.9	0.61	131.16	39.9	0.61	123	6.22406
39.9	0.62	138.16	39.9	0.62	130	5.904762
39.9	0.63	145.73	39.9	0.63	140	3.929825
39.9	0.64	153.94	39.9	0.64	146	5.154887
39.9	0.65	162.86	39.9	0.65	156	4.210526
39.9	0.66	172.58	39.9	0.66	165	4.390977
39.9	0.67	183.2	39.9	0.67	175	4.473684
39.9	0.68	194.82	39.9	0.68	189	2.989474
39.9	0.69	207.6	39.9	0.69	199	4.140852
39.9	0.7	221.67	39.9	0.7	215	3.007519
39.9	0.71	237.22	39.9	0.71	230	3.042607
39.9	0.72	254.46	39.9	0.72	248	2.540351
39.9	0.73	273.66	39.9	0.73	265	3.165414
39.9	0.74	295.12	39.9	0.74	289	2.073183
39.9	0.75	319.2	39.9	0.75	312	2.255639
39.9	0.76	346.35	39.9	0.76	340	1.834586
39.9	0.77	377.13	39.9	0.77	370	1.889724
39.9	0.78	412.19	39.9	0.78	403	2.229574

2. Tabel Pengujian Efisiensi

Vin = 40 V							
Beban	Pin	Vin	Iin	Vout	Iout	Pout	Efisiensi
4000	50.7	39	1.3	400	0.105	42	82.8402
3500	59.45	41	1.45	400	0.12	48	80.7401
3000	75.62	38	1.99	405	0.145	58.725	77.658
2500	87.6	40	2.19	400	0.162	64.8	73.9726
2000	107.25	39	2.75	400	0.198	79.2	73.8462
1500	144.4	40	3.61	400	0.263	105.2	72.8532
1000							

Vin=50 V							
Beban	Pin	Vin	Iin	Vout	Iout	Pout	Efisiensi
4000	51	51	1	400	0.108	43.2	84.7059
3500	58.8	52.5	1.12	400	0.12	48	81.6327
3000	71.05	49	1.45	405	0.143	57.915	81.513
2500	83.333	49.9	1.67	402	0.162	65.124	78.1491
2000	101.49	51	1.99	399	0.198	79.002	77.8422
1500	142.5	50	2.85	398	0.264	105.072	73.7347
1000							

Vin=60 V							
Beban	Pin	Vin	Iin	Vout	Iout	Pout	Efisiensi
4000	49.88	58	0.86	405	0.108	43.74	87.6905
3500	57.82	59	0.98	400	0.12	48	83.0163
3000	67.26	59	1.14	402	0.141	56.682	84.273
2500	79.8	60	1.33	400	0.162	64.8	81.203
2000	98.482	60.05	1.64	400	0.199	79.6	80.827
1500	134.775	59.9	2.25	400	0.263	105.2	78.056
1000							



Halaman ini sengaja dikosongkan