



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *QUASI-Z SOURCE BOOST*
DC-DC CONVERTER DENGAN PENGUATAN
TEGANGAN TINGGI UNTUK APLIKASI *FUEL CELL*

Agyi Muhammad
NRP 07111440000138

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF QUASI-Z SOURCE
BOOST DC-DC CONVERTER WITH HIGH VOLTAGE-
GAIN FOR FUEL CELL APPLICATION

Agyl Muhammad
NRP 07111440000138

Supervisors
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *QUASI-Z SOURCE*
BOOST DC-DC CONVERTER DENGAN PENGUATAN
TEGANGAN TINGGI UNTUK APLIKASI *FUEL*
CELL**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198006032006041003



19/7/2018

Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001



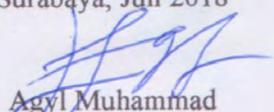
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *QUASI-Z SOURCE BOOST DC-DC CONVERTER DENGAN PENGUATAN TEGANGAN TINGGI UNTUK APLIKASI FUEL CELL***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, Juli 2018



Agyl Muhammad
07111440000138

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *QUASI-Z SOURCE BOOST DC-DC CONVERTER* DENGAN PENGUATAN TEGANGAN TINGGI UNTUK APLIKASI *FUEL CELL*

Nama mahasiswa : Agyl Muhammad
Dosen Pembimbing I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.

Abstrak:

Penelitian mengenai *fuel cell* sebagai sumber energi terbarukan semakin berkembang dengan cepat. Hal ini dikarenakan semakin meningkatnya kebutuhan akan energi listrik yang ramah lingkungan. Salah satu penggunaan *fuel cell* adalah sebagai sumber energi pada kendaraan. Penggunaan bahan bakar *fuel cell* memiliki beberapa keuntungan, antara lain memiliki efisiensi operasi yang tinggi serta emisi gas pembuangan yang sedikit. Namun terdapat kendala pada penggunaan *fuel cell*, yaitu *fuel cell* tidak bisa dihubungkan secara langsung ke beban. Hal ini dikarenakan tegangan luaran dari *fuel cell* rendah dan tidak konstan (semakin besar arus *output*, maka tegangan *output* semakin turun). Sehingga diperlukan suatu konverter untuk menaikkan tegangan luaran dari *fuel cell*. *Boost converter* merupakan suatu jenis konverter yang digunakan untuk menaikkan tegangan DC. Rangkaian yang sederhana membuat konverter jenis ini banyak digunakan pada aplikasi sumber energi terbarukan, termasuk *fuel cell*. Namun *boost converter* konvensional memiliki beberapa kekurangan, antara lain *gain* tegangan yang terbatas, yakni 2 sampai 3 kali dan tegangan *stress* pada *power switch* memiliki nilai yang sama dengan tegangan *output*. Untuk memenuhi kebutuhan konverter dengan *gain* yang tinggi, diusulkan sebuah rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi yang diaplikasikan untuk *fuel cell*. Pada pengujian rangkaian konverter ini didapatkan hasil *gain* hingga 8 kali dengan *duty cycle* 40%. Besar tegangan *stress* pada tiap komponen maksimal setengah dari tegangan *output*. Efisiensi rata-rata hasil pengujian konverter ini mencapai 80,3%.

Kata kunci: Rangkaian *quasi-z Source Boost DC-DC Converter*, Penguatan Tegangan Tinggi, Aplikasi *Fuel Cell*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF QUASI-Z SOURCE BOOST DC-DC CONVERTER WITH HIGH VOLTAGE-GAIN FOR FUEL CELL APPLICATION

Student Name : Agyl Muhammad
Supervisor I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Supervisor II : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.

Abstract:

Research on fuel cells as a renewable energy source is growing rapidly. This is due to the increasing need for environmentally friendly electrical energy. One of the use of fuel cell is as energy source in vehicle. The use of fuel cell fuel has several advantages, including having high operating efficiency and also few exhaust gas emissions. But there are constraints on the use of fuel cells, ie fuel cells can not be connected directly to the load. This is because the output voltage from the fuel cell is low and not constant (the bigger the output current, the output voltage will decrease). So we need a converter to raise the output voltage from the fuel cell. Boost converter is a type of converter used to raise DC voltage. The simple circuit makes this type of converter widely used in renewable energy source applications, including fuel cells. But conventional boost converter has some drawbacks, such as limited voltage gain, 2 to 3 times and voltage stress on power switch has the same value with output voltage. To meet the needs of converters with high gain, a quasi-z source circuit boost dc-dc converter with high voltage gain applied to the fuel cell is proposed. In this converter circuit testing obtained the gain up to 8 times with a duty cycle of 40%. The stress stress of each component is a maximum of half of the output voltage. The average efficiency of converter test results is 80.3%.

Key Word: *Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter Circuit, High Voltage Upgrade, Fuel Cell Application.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *QUASI-Z SOURCE BOOST DC-DC CONVERTER* DENGAN PENGUATAN TEGANGAN TINGGI UNTUK APLIKASI *FUEL CELL*”.**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak serta keluarga penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D. dan ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Teman-teman asisten laboratorium Konversi Energi Listrik dan teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat yang luas.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	5
1.7 Relevansi	6
BAB 2 <i>QUASI-Z SOURCE BOOST DC-DC CONVERTER</i> DENGAN PENGUATAN TEGANGAN TINGGI UNTUK APLIKASI <i>FUEL CELL</i>	7
2.1 DC-DC Boost Converter	7
2.1.1 Analisis Sakelar tertutup	8
2.1.2 Analisis Sakelar Terbuka	8
2.2 <i>Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter</i> dengan Penguatan Tegangan Tinggi	10
2.2.1 Analisis Rangkaian	11
2.2.2 Penurunan Persamaan Konversi konverter	14
2.2.3 Analisis Arus Rangkaian Konverter	17
2.2.4 Penurunan Parameter Komponen	23
2.2.5 Analisis Kondisi Dinamis	24
2.3 <i>Fuel Cell</i> atau Sel Bahan Bakar	25

BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI	33
3.1 Desain Parameter Rangkaian <i>Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter</i> dengan Penguatan Tegangan Tinggi	33
3.1.1 Penentuan Rasio Konversi dan <i>Duty Cycle</i>	35
3.1.2 Penentuan Nilai Beban	37
3.1.3 Penentuan Nilai Induktor L1 dan L2	37
3.1.4 Penentuan Nilai Kapasitor	39
3.1.5 Penentuan Komponen Dioda	41
3.1.6 Penentuan Komponen Mosfet	41
3.2 Simulasi Konverter dalam Kondisi <i>Steady State</i>	43
3.3 Simulasi Rangkaian Konverter dalam Kondisi Dinamis	47
3.4 Implementasi Rangkaian <i>Quasi-Z Source DC-DC Boost Converter</i> dengan Penguatan Tegangan Tinggi	49
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	53
4.1 Peralatan Pengujian	53
4.2 Pengujian Sinyal dan Nilai Komponen	53
4.2.1 Pengujian Penyakelaran	54
4.2.2 Pengujian Arus Induktor L1 dan L2	55
4.2.3 Pengujian Tegangan Kapasitor C1, C2, C3, C4, dan C5	56
4.2.4 Pengujian Tegangan Dioda D2, D3, D4, dan D5	58
4.2.5 Pengujian Tegangan <i>Output</i> Konverter	60
4.3 Pengujian Rasio Konversi Tegangan Konverter	60
4.4 Pengujian Efisiensi Konverter	62
4.5 Pengujian Menggunakan Modul <i>Fuel Cell</i>	63
4.6 Pengujian Konverter Dalam Kondisi Tegangan <i>Input</i> Dinamis	65
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	69

LAMPIRAN	71
BIOGRAFI PENULIS	75

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Rangkaian <i>DC-DC Boost Converter</i>	7
Gambar 2.2 Aliran Arus Saat Sakelar Tertutup	8
Gambar 2.3 Aliran Arus Saat Sakelar Terbuka.....	9
Gambar 2.4 Rangkaian <i>Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter</i> dengan Penguatan Tegangan Tinggi	11
Gambar 2.5 Rangkaian <i>Quasi-Z Source DC-DC Converter</i> Saat Sakelar Tertutup.....	11
Gambar 2.6 Rangkaian <i>Quasi-Z Source DC-DC Converter</i> Saat Sakelar Terbuka.....	12
Gambar 2.7 Karakteristik Bentuk Gelombang Tiap Komponen.....	14
Gambar 2.8 Aliran Arus Saat Sakelar Tertutup	18
Gambar 2.9 Aliran Arus Saat Sakelar Terbuka.....	19
Gambar 2.10 Diagram Blok Sistem Konverter Saat Kondisi Dinamis.....	25
Gambar 2.11 Struktur Dasar dari <i>Fuel Cell</i>	26
Gambar 2.12 Kurva Karakteristik Tegangan-Arus <i>Fuel Cell</i> Horizon H-1000	31
Gambar 2.13 Kurva Karakteristik Volume Gas-Daya <i>Fuel Cell</i> Horizon H-1000	31
Gambar 2.14 Kurva Karakteristik Daya-Arus <i>Fuel Cell</i> Horizon H-1000.....	31
Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Konverter <i>Quasi-Z Source</i> <i>Boost DC-DC</i> dengan Penguatan Tegangan Tinggi ..	33
Gambar 3.2 Kurva Karakteristik Hubungan <i>Duty Cycle</i> dengan Rasio Konversi.....	36
Gambar 3.3 Rangkaian Simulasi Konverter	43
Gambar 3.4 Bentuk Gelombang V_{GS} , V_{DS} , dan I_{DS}	44
Gambar 3.5 Bentuk Gelombang Arus Induktor L1 dan L2	45
Gambar 3.6 Bentuk Gelombang Tegangan Kapasitor C1, C2, C3, C4, dan C5	46
Gambar 3.7 Bentuk Gelombang Tegangan Dioda D2, D3, D4, dan D5	46
Gambar 3.8 Bentuk Gelombang Tegangan <i>Input</i> dan <i>Output</i> Konverter.....	47

Gambar 3.9 Rangkaian Konverter Untuk Simulasi Kondisi Dinamis	48
Gambar 3.10 Bentuk Respon Gelombang Tegangan <i>Output</i> Akibat Perubahan Tegangan <i>Input</i>	48
Gambar 3.11 Implementasi Rangkaian <i>Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter</i> dengan Penguatan Tegangan Tinggi.....	51
Gambar 4.1 Bentuk Sinyal V_{GS} , V_{DS} , dan I_{DS}	54
Gambar 4.2 Bentuk Sinyal V_{GS} , $IL1$, dan $IL2$	56
Gambar 4.3 Bentuk Gelombang Tegangan Kapasitor. (a) Kapasitor C1 dan C2. (b) Kapasitor C3 dan C4. (c) Kapasitor C5.....	57
Gambar 4.4 Bentuk Gelombang Tegangan pada Dioda. (a) Dioda D2 dan D3. (b) Dioda D4 dan D5.....	59
Gambar 4.5 Bentuk Gelombang V_{GS} dan Tegangan <i>Output</i>	60
Gambar 4.6 Perbandingan Rasio Konversi Konverter Antara Simulasi dengan Implementasi.....	61
Gambar 4.7 Pengujian Efisiensi Konverter.....	62
Gambar 4.8 Pengujian Konverter Menggunakan Modul <i>Fuel Cell</i>	63
Gambar 4.9 Hasil Pengujian Tegangan Konverter dengan Modul <i>Fuel Cell</i>	64
Gambar 4.10 Hasil Pengujian Konverter dengan Tegangan <i>Input</i> Dinamis	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Jenis - Jenis <i>Fuel Cell</i>	28
Tabel 2.2 Spesifikasi <i>Fuel Cell</i> Horizon H-1000.....	29
Tabel 3.1. Parameter Awal Desain Konverter	34
Tabel 3.2 Rasio Konversi pada Konverter Beserta Nilai <i>Duty Cycle</i>	35
Tabel 3.3 Komponen yang Digunakan dalam Aplikasi Konverter..	42
Tabel 3.4 Komponen yang Digunakan Untuk Implementasi Rangkaian Konverter	49

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini kebutuhan energi listrik semakin meningkat. Namun ketersediaan energi fosil yang menjadi sumber energi saat ini semakin berkurang. Selain itu, penggunaan energi fosil sebagai sumber energi utama dapat mencemari kondisi lingkungan. Maka dari itu dikembangkanlah sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan, salah satunya yaitu *fuel cell*. Teknologi *fuel cell* yang saat ini sedang berkembang dengan pesat yaitu pengembangan *fuel cell* yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar pada kendaraan untuk menggantikan kendaraan konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil. Penggunaan *fuel cell* sebagai bahan bakar kendaraan memiliki beberapa keuntungan, antara lain efisiensi pembakaran bahan bakar yang tinggi dan emisi gas pembuangan yang sedikit [1].

Namun *fuel cell* masih memiliki beberapa kendala dalam penggunaannya, salah satunya yaitu *fuel cell* tidak bisa dihubungkan secara langsung ke beban. Hal ini dikarenakan tegangan *output* dari *fuel cell* yang rendah serta tidak konstan (semakin besar arus *output*, maka tegangan *output* semakin kecil) [2]. Sehingga diperlukan suatu konverter untuk meningkatkan tegangan *output* dari *fuel cell* agar sesuai dengan kebutuhan beban. Salah satu cara yang digunakan untuk meningkatkan tegangan dc adalah dengan menggunakan rangkaian *boost converter*. *Boost converter* konvensional memiliki rangkaian yang sederhana, yakni hanya memiliki satu *switch*. Namun *boost converter* konvensional memiliki beberapa kekurangan, antara lain tegangan *stress* pada *power switch* yang memiliki nilai yang sama dengan tegangan *output* serta *gain* tegangan yang terbatas yaitu sebesar 2 sampai 3 kali [3]. Di sisi lain, *quasi-z source network* telah diaplikasikan untuk *boost dc-dc converter*. *Quasi-z source* merupakan suatu rangkaian impedansi yang terdiri dari dua kapasitor dan dua induktor yang dihubungkan secara silang. Keuntungan dari rangkaian ini adalah dapat meningkatkan tegangan *input* dan mengurangi tegangan *stress*. Rangkaian *quasi-z source* pernah dipadukan dengan konverter penaik tegangan dc-dc dengan *gain* tegangan yang tinggi, salah satunya pada rangkaian dengan judul “*Step-Up DC/DC*

Converters With Cascaded Quasi-Z-Source Network” [4]. Namun, rangkaian tersebut masih memiliki kekurangan seperti, rangkaian yang kompleks, biaya yang tinggi, dan mengurangi efisiensi.

Maka dari itu, diusulkan sebuah konverter tegangan dc untuk meningkatkan tegangan *output* dari *fuel cell* yang memiliki *gain* tegangan yang tinggi, rangkaian yang sederhana, tegangan *stress* yang rendah, serta memiliki efisiensi yang tinggi yang berupa *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan *gain* tegangan yang tinggi.

1.2 Perumusan Masalah

Fuel cell mempunyai tegangan *output* yang rendah serta tidak konstan, sehingga tidak bisa dihubungkan secara langsung ke beban. Diperlukan suatu konverter peningkat tegangan untuk menghubungkan *fuel cell* dengan beban. Rangkaian *boost coverter* yang digunakan diharapkan memiliki efisiensi yang tinggi, tegangan *stress* yang rendah, serta memiliki penguatan tegangan yang tinggi. Permasalahan yang akan dibahas pada penelitian tugas akhir ini adalah mendesain dan mengimplementasikan *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi untuk aplikasi *fuel cell*.

1.3 Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Merancang sebuah rangkaian *boost dc-dc converter* agar tegangan *output* pada *fuel cell* meningkat dan konstan.
2. Merancang sebuah *boost dc-dc converter* yang memiliki efisiensi tinggi, tegangan stress yang rendah, serta memiliki penguatan tegangan yang tinggi.
3. Mendesain dan mengimplementasikan *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi untuk aplikasi *fuel cell*.
4. Membandingkan dan menganalisis antara hasil implementasi dengan hasil desain dan simulasi *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang tersedia di pasaran dan peralatan di laboratorium konversi energi listrik.
2. Pengujian alat menggunakan sumber tegangan DC variabel dan modul *fuel cell* Horizon H-1000 *fuel cell stack* yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik.
3. Semua analisis dilakukan dan perhitungan dilakukan dalam kondisi ideal dan keadaan *steady state*.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Mempelajari prinsip kerja dari rangkaian *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi, sistem kerja dan karakteristik dari *fuel cell*, serta aplikasi rangkaian konverter untuk aplikasi pada *fuel cell*.

2. Desain dan Simulasi Alat

Rangkaian *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi disimulasikan menggunakan perangkat lunak PSIM. Mulanya parameter yang digunakan pada simulasi berdasarkan pada referensi yang penulis gunakan untuk mengetahui apakah rangkaian yang telah dibuat pada perangkat lunak sudah benar atau belum. Selain itu rangkaian yang disimulasikan menggunakan sistem *open loop*. Setelah itu, parameter komponen diganti sesuai dengan kebutuhan dan disesuaikan dengan nilai dari peralatan yang terdapat di laboratorium dan yang ada di pasaran. Sistem yang digunakan juga diganti menjadi *close loop*. Nilai-nilai yang terdapat pada simulasi merupakan nilai ideal yang tidak memperhatikan rugi-rugi. Hasil dari simulasi ini digunakan

sebagai data untuk membandingkan dengan hasil dari implementasi alat.

3. Implementasi Alat

Tahap ini dilakukan pembuatan rangkaian *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi berdasarkan desain dan simulasi yang telah dilakukan. Komponen yang digunakan yaitu *fuel cell*, induktor, dioda, kapasitor, sakelar semikonduktor, beban resistor, serta arduino. Setelah membuat rangkaian, maka dilakukan pengujian dan pengukuran mengenai nilai dan bentuk gelombang dari tegangan dan arus rangkaian konverter tersebut.

4. Pengujian Alat

Pengujian dilakukan untuk mengukur performa dari konverter yang telah dibuat. Proses pengujian ini juga digunakan untuk proses pengambilan data, seperti tegangan *output* konverter, bentuk gelombang tegangan pada tiap komponen, bentuk gelombang arus, efisiensi konverter, pengujian pada modul *fuel cell*, serta pengujian konverter dengan tegangan *input* yang dinamis. Mulanya pengujian menggunakan sistem *open loop*. Namun setelah dilakukan pengujian dan nilai-nilai dari parameter yang ditentukan sudah sesuai atau mendekati dengan perhitungan atau simulasi, maka konverter akan diuji dengan sistem *close loop*.

5. Analisis Data

Setelah pengujian selesai dilakukan, maka akan dilakukan analisis terhadap data yang telah didapatkan. Lalu nilai-nilai parameter yang telah didapatkan akan dibandingkan antara hasil pengujian dengan hasil simulasi.

6. Kesimpulan

Akhir dari penelitian ini akan diambil kesimpulan berdasarkan analisis yang telah didapatkan. Setelah itu akan dilakukan penyusunan laporan akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini berisi tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, serta relevansi dari penelitian ini.

Bab 2 : Kajian Pustaka

Bab ini membahas tentang teori *dc-dc boost converter*, rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi, serta teori tentang *fuel cell* atau sel bahan bakar.

Bab 3 : Desain, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini berisi mengenai perancangan rangkaian *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi menggunakan perhitungan matematis berdasarkan penurunan rumus untuk menentukan nilai-nilai komponen, simulasi dengan menggunakan perangkat lunak PSIM, serta implementasi rangkaian *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi untuk aplikasi *fuel cell*.

Bab 4 : Pengujian dan Analisis data

Bab ini berisi mengenai pengujian rangkaian *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi yang telah dibuat menggunakan peralatan yang terdapat di laboratorium. Data yang telah didapatkan akan dianalisis dengan membandingkan antara hasil pengujian dengan hasil simulasi.

Bab 5 : Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan berdasarkan analisis data yang telah dilakukan sebelumnya serta berisi saran untuk penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

Hasil yang telah diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu :

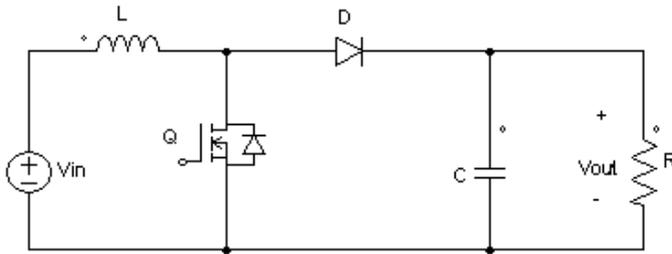
1. Dapat menjadi referensi dalam pembuatan atau pengaplikasian mengenai rangkaian konverter terutama *boost converter* yang terhubung dengan *fuel cell* sebagai sumber energi terbarukan.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan melakukan penelitian di bidang konverter untuk dihubungkan dengan sumber energi terbarukan.

BAB 2

QUASI-Z SOURCE BOOST DC-DC CONVERTER DENGAN PENGUATAN TEGANGAN TINGGI UNTUK APLIKASI FUEL CELL

2.1 DC-DC Boost Converter

DC-DC Boost Converter atau konverter penaik tegangan DC merupakan sebuah konverter yang tegangan *outputnya* lebih besar daripada tegangan *inputnya*. Rangkaian konverter ini terdiri dari beberapa komponen, antara lain sakelar semi konduktor, induktor, dioda, kapasitor, dan beban (R). Rangkaian *dc-dc boost converter* dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian *DC-DC Boost Converter*

Cara kerja konverter *boost* dipaparkan dalam 2 mode, yaitu saat sakelar tertutup dan sakelar terbuka. Pola penyalan sakelar Q didefinisikan sebagai berikut :

Duty cycle (d) = nilai perbandingan antara waktu menyala sakelar Q dan periode sistem penyakelaran.

$$d = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

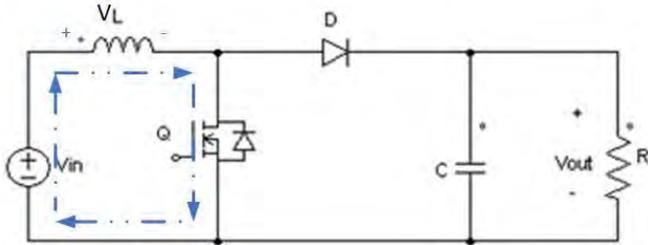
$$t_{on} = dT \tag{2.1}$$

$$\text{Sedangkan } t_{off} = T - t_{on} = T - dT$$

$$t_{off} = (1 - d)T \quad (2.2)$$

2.1.1 Analisis Sakelar tertutup

Aliran arus saat mode operasi sakelar tertutup dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Aliran Arus Saat Sakelar Tertutup

Pada saat sakelar semikonduktor Q tertutup, maka terjadi pengisian arus pada induktor. Karena semua arus mengalir melalui sakelar semikonduktor Q yang dalam posisi tertutup, maka arus yang mengalir ke beban R dapat diabaikan. Persamaan yang dapat diturunkan ketika sakelar Q tertutup yaitu :

$$V_{in} = V_L$$

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

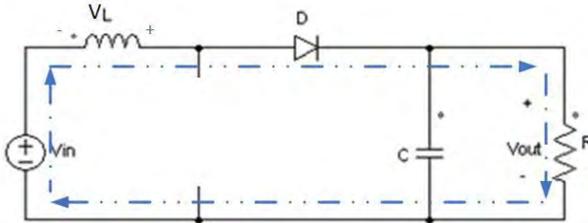
Karena sakelar beroperasi saat menutup (*on*), maka dt dapat diubah menjadi t_{on} . Sedangkan di dapat diubah menjadi Δi .

$$V_{in} = L \frac{\Delta i}{t_{on}}$$

$$V_{in} t_{on} = L \Delta i \quad (2.3)$$

2.1.2 Analisis Sakelar Terbuka

Aliran arus saat mode operasi sakelar terbuka dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Aliran Arus Saat Sakelar Terbuka

Pada saat sakelar semikonduktor Q terbuka, maka terjadi pengosongan arus yang terdapat pada induktor. Induktor akan berperan menjadi sumber arus, sehingga polaritas dari induktor akan berbalik. Persamaan yang dapat diturunkan pada saat sakelar terbuka yaitu :

$$V_{in} + V_L = V_{out}$$

$$V_{in} + L \frac{di}{dt} = V_{out}$$

Karena sakelar beroperasi pada saat terbuka (*off*), maka dt dapat diganti menjadi t_{off} . Sedangkan di dapat diubah menjadi Δi .

$$V_{in} + L \frac{\Delta i}{t_{off}} = V_{out} \tag{2.4}$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.3) pada persamaan (2.4). Persamaan akan menjadi :

$$V_{in} + \frac{V_{in} t_{on}}{t_{off}} = V_{out} \tag{2.5}$$

Lalu substitusikan persamaan (2.1) dan (2.2) pada persamaan (2.5). Sehingga persamaan menjadi :

$$V_{in} + \frac{V_{in} dT}{(1-d)T} = V_{out}$$

$$\frac{V_{in}(1-d) + V_{in} d}{(1-d)} = V_{out}$$

$$V_{out} = \frac{1}{(1-d)} V_{in} \tag{2.6}$$

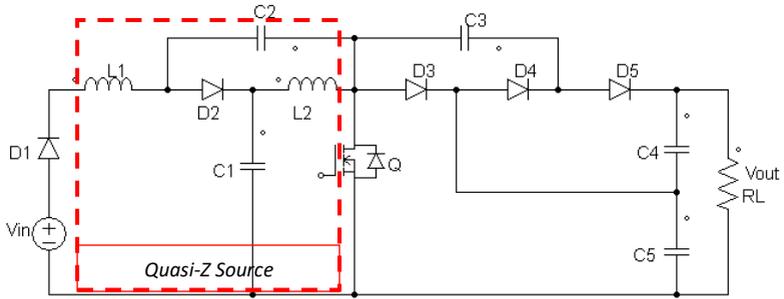
Berdasarkan persamaan (2.6), tegangan *output* dari konverter *boost* dapat diubah-ubah dengan cara mengubah nilai dari *duty cyclenya*. Pengaturan nilai *duty cycle* dapat diatur dengan menggunakan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM).

Konverter *boost* konvensional ini masih memiliki beberapa kekurangan, yaitu tegangan *stress* pada *power switch* yang memiliki nilai yang sama dengan tegangan *output* serta *gain* tegangan yang terbatas yaitu sebesar 2 sampai 3 kali [3].

2.2 Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter dengan Penguatan Tegangan Tinggi

Quasi-z source network merupakan suatu rangkaian impedansi yang terdiri dari dua kapasitor dan dua induktor yang dihubungkan secara silang. Rangkaian ini dapat meningkatkan tegangan *input* serta dapat mengurangi level tegangan *stress*.

Quasi-z source boost dc-dc converter dengan penguatan tegangan tinggi merupakan suatu rangkaian kombinasi antara rangkaian impedansi *quasi-z source* dengan rangkaian *boost dc-dc converter*. Rangkaian ini terdiri dari lima dioda, dua induktor, satu sakelar semi konduktor, lima kapasitor, serta beban (R). Karakteristik *charge* dan *discharge* dari lima kapasitor yang bekerja secara bergantian dimanfaatkan untuk meningkatkan *gain* tegangan serta mengurangi tegangan *stress* pada komponen. Kelebihan rangkaian ini dibandingkan dengan rangkaian konverter *quasi-z source* konvensional adalah *gain* rangkaian yang lebih besar dua kali lipat dan tegangan di komponen sakelar semikonduktor yang besarnya setengah dari tegangan output [5]. Sedangkan kelebihan rangkaian ini secara umum yaitu memiliki *gain* tegangan yang tinggi, rangkaian yang sederhana karena hanya memiliki satu sakelar semikonduktor dan *common ground*, tegangan *stress* komponen yang rendah, serta memiliki efisiensi yang tinggi. Rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi dapat dilihat pada gambar 2.4.

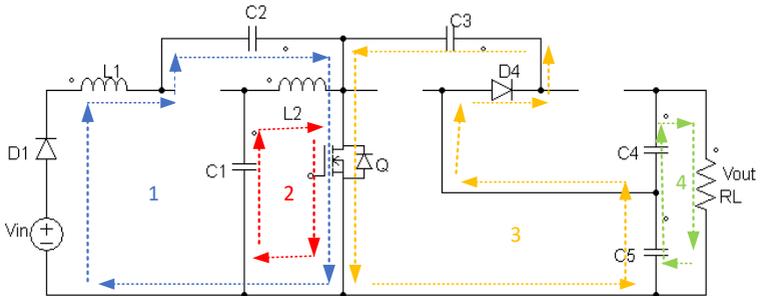


Gambar 2.4 Rangkaian *Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter* dengan Penguatan Tegangan Tinggi [5]

2.2.1 Analisis Rangkaian

Analisis rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dilakukan dengan mengamati mode operasinya. Terdapat dua operasi berdasarkan mode penyakelaran sakelar semikonduktor, yaitu saat sakelar kondisi tertutup (*on*) dan saat sakelar kondisi terbuka (*off*).

Aliran arus serta bentuk rangkaian konverter ketika kondisi sakelar tertutup dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Rangkaian *Quasi-Z Source DC-DC Converter* Saat Sakelar Tertutup

Saat sakelar Q tertutup, dioda D2, D3, dan D5 akan *off*. Tegangan *input* dan kapasitor C2 akan mentransfer energi ke induktor L1 melalui dioda D1 dan sakelar Q. Kapasitor C1 akan transfer energi ke induktor L2

melalui sakelar Q. Kapasitor C5 akan transfer energi ke kapasitor C3 melalui dioda D4 dan sakelar Q. Sementara itu kapasitor C5 dan C4 yang seri akan mentransfer energi ke beban R. Persamaan rangkaian yang dapat diturunkan ketika sakelar tertutup yaitu :

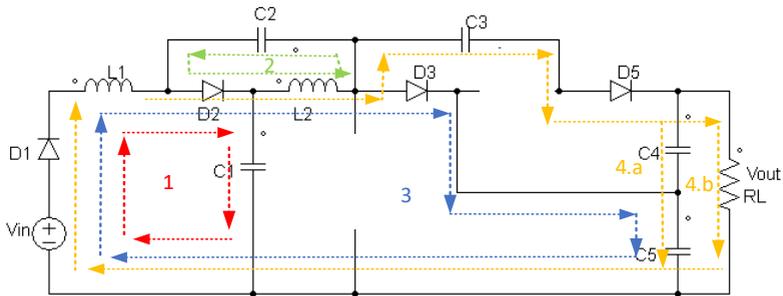
$$\text{Loop 1} : V_{in} + V_{C2} = V_{L1on} \quad (2.7)$$

$$\text{Loop 2} : V_{C1} = V_{L2on} \quad (2.8)$$

$$\text{Loop 3} : V_{C5} = V_{C3} \quad (2.9)$$

$$\text{Loop 4} : V_{C4} + V_{C5} = V_{out} \quad (2.10)$$

Sedangkan ketika kondisi sakelar terbuka, aliran arus dan rangkaiannya dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Rangkaian *Quasi-Z Source DC-DC Converter* Saat Sakelar Terbuka

Saat sakelar Q terbuka, dioda D2, D3, dan D5 akan *on*, sedangkan D4 akan *off*. Tegangan *input* dan induktor L1 akan transfer energi ke kapasitor C1 melalui dioda D1 dan D2. Induktor L2 akan transfer energi ke kapasitor C2 melalui dioda D2. Tegangan *input*, induktor L1 dan L2 akan transfer energi ke kapasitor C5 melalui dioda D1, D2, dan D3. Di waktu yang bersamaan, tegangan *input*, induktor L1 dan L2, dan kapasitor C3 dalam hubungan seri akan mentransfer energi ke kapasitor C4 dan C5 yang terhubung seri dan beban R, melalui dioda D1, D2, dan D5. Persamaan rangkaian yang dapat diturunkan ketika sakelar terbuka yaitu:

$$\text{Loop 1} : V_{in} = V_{L1off} + V_{C1}$$

$$V_{L1off} = V_{in} - V_{C1} \quad (2.11)$$

$$\text{Loop 2} : V_{L2off} = -V_{C2} \quad (2.12)$$

$$\text{Loop 3} : V_{in} = V_{L1off} + V_{L2off} + V_{C5} \quad (2.13)$$

$$\text{Loop 4.b} : V_{in} - V_{L1off} - V_{L2off} + V_{C3} - V_{out} = 0$$

$$V_{L1off} = V_{in} - V_{L2off} + V_{C3} - V_{out} \quad (2.14)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.12) ke persamaan (2.14).
Persamaan akan menjadi :

$$V_{L1off} = V_{in} + V_{C2} + V_{C3} - V_{out} \quad (2.15)$$

$$\text{Loop 4.a} : -V_{in} + V_{L1off} + V_{L2off} - V_{C3} + V_{C4} + V_{C5} = 0$$

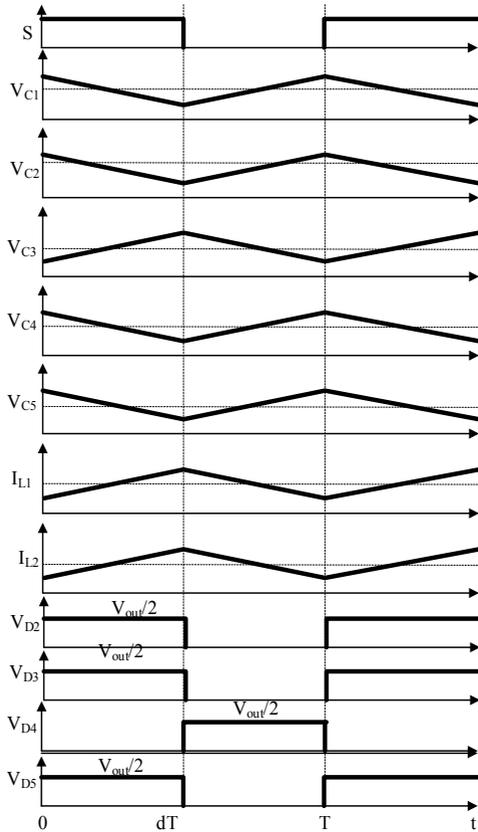
$$V_{in} + V_{C3} = V_{L1off} + V_{L2off} + V_{C4} + V_{C5} \quad (2.16)$$

Lalu substitusikan persamaan (2.13) ke persamaan (2.16).
Sehingga persamaan akan menjadi :

$$V_{L1off} + V_{L2off} + V_{C5} + V_{C3} = V_{L1off} + V_{L2off} + V_{C4} + V_{C5}$$

$$V_{C3} = V_{C4} \quad (2.17)$$

Karakteristik bentuk gelombang tiap komponen dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Karakteristik Bentuk Gelombang Tiap Komponen [5]

2.2.2 Penurunan Persamaan Konversi konverter

Penurunan persamaan konversi konverter dilakukan dalam kondisi arus induktor L1 dan L2 tidak menyentuh titik nol atau *Continuous Conduction Mode* (CCM). Metode *voltage-second balance* diterapkan pada induktor L1 dan L2. Persamaan *voltage-second balance* pada induktor L2 yaitu:

$$\int_0^{ton} V_{L2(on)} + \int_{ton}^T V_{L2(off)} = 0 \quad (2.18)$$

Substitusi persamaan (2.1) pada persamaan (2.18), sehingga persamaan menjadi :

$$\int_0^{dT} V_{L2(on)} + \int_{dT}^T V_{L2(off)} = 0$$

$$V_{L2on} dT + V_{L2off}(T - dT) = 0 \quad (2.19)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.8) dan (2.12) pada persamaan (2.19). Sehingga persamaan akan menjadi :

$$V_{C1}dT + (-V_{C2})(T - dT) = 0$$

$$V_{C1}dT + V_{C2}dT - V_{C2}T = 0$$

$$V_{C1}d + V_{C2}(d - 1) = 0$$

$$V_{C2} = \frac{-dV_{C1}}{(d-1)}$$

$$V_{C2} = \frac{dV_{C1}}{1-d} \quad (2.20)$$

Sedangkan persamaan *voltage-second balance* pada induktor L1 adalah :

$$\int_0^{ton} V_{L1(on)} + \int_{ton}^T V_{L1(off)} = 0$$

$$\int_0^{dT} V_{L1(on)} + \int_{dT}^T V_{L1(off)} = 0$$

$$V_{L1on}dT + V_{L1off}(T - dT) = 0 \quad (2.21)$$

Terdapat dua kondisi untuk V_{L1off} , yaitu sesuai dengan persamaan (2.11) dan persamaan (2.15). Sehingga dilakukan dua kali penurunan terhadap persamaan (2.21). **Pertama**, substitusi persamaan (2.7) dan (2.11) pada persamaan (2.21). Sehingga persamaan menjadi :

$$(V_{in} + V_{C2}) dT + (V_{in} - V_{C1})(T - dT) = 0$$

$$V_{in}dT + V_{C2}dT + V_{in}T - V_{in}dT - V_{C1}T + V_{C1}dT = 0$$

$$V_{C2}d + V_{in} - V_{C1} + V_{C1}d = 0$$

$$V_{C2}d + V_{in} = V_{C1}(1 - d) \quad (2.22)$$

Substitusikan persamaan (2.20) ke persamaan (2.22), sehingga persamaan akan menjadi :

$$\frac{dV_{C1}}{(1-d)} d + V_{in} = V_{C1}(1 - d)$$

$$\frac{d^2V_{C1} + V_{in}(1-d)}{(1-d)} = V_{C1}(1 - d)$$

$$d^2V_{C1} + V_{in}(1 - d) = V_{C1}(1 - d)^2$$

$$V_{in}(1 - d) = V_{C1}(1 - 2d + d^2) - d^2V_{C1}$$

$$V_{in}(1 - d) = V_{C1}(1 - 2d)$$

$$V_{C1} = \frac{(1-d)}{(1-2d)} V_{in} \quad (2.23)$$

Persamaan (2.23) disubstitusikan ke persamaan (2.20), sehingga persamaan akan menjadi :

$$V_{C2} = \frac{d(1-d)}{(1-d)(1-2d)} V_{in}$$

$$V_{C2} = \frac{d}{(1-2d)} V_{in} \quad (2.24)$$

Berdasarkan persamaan (2.9), (2.10), dan (2.17), maka diperoleh persamaan :

$$V_{C3} = V_{C4} = V_{C5}$$

$$V_{out} = V_{C4} + V_{C5}$$

$$V_{out} = 2V_{C3}$$

$$V_{C3} = \frac{v_{out}}{2} \quad (2.25)$$

Kedua, substitusi persamaan (2.7) dan persamaan (2.15) ke persamaan (2.21). Sehingga persamaan menjadi :

$$(V_{in} + V_{C2})dT + (V_{in} - V_{out} + V_{C2} + V_{C3})(T - dT) = 0$$

$$V_{in}dT + V_{C2}dT + V_{in}T - V_{in}dT - V_{out}T + V_{out}dT + V_{C2}T - V_{C2}dT + V_{C3}T - V_{C3}dT = 0$$

$$V_{in} - v_{out} + V_{out}d + V_{C2} + V_{C3} - V_{C3}d = 0 \quad (2.26)$$

Substitusi persamaan (2.25) ke persamaan (2.26), sehingga persamaan menjadi :

$$V_{in} - v_{out} + V_{out}d + V_{C2} + \frac{v_{out}}{2} - \frac{v_{out}}{2}d = 0$$

$$V_{in} + V_{C2} = v_{out} - v_{out}d - \frac{v_{out}}{2} + \frac{v_{out}}{2}d$$

$$V_{in} + V_{C2} = v_{out}(1 - d - \frac{1}{2} + \frac{1}{2}d)$$

$$V_{in} + V_{C2} = v_{out}(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}d) \quad (2.27)$$

Substitusikan persamaan (2.24) ke persamaan (2.27), sehingga persamaan menjadi :

$$V_{in} + \frac{d}{(1-2d)}V_{in} = v_{out} \frac{(1-d)}{2}$$

$$\frac{V_{in}(1-2d)+dV_{in}}{(1-2d)} = v_{out} \frac{(1-d)}{2}$$

$$\frac{V_{in}(1-d)}{(1-2d)} = v_{out} \frac{(1-d)}{2}$$

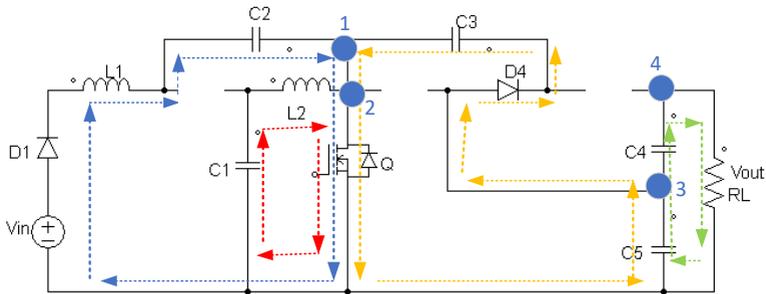
$$v_{out} = \frac{2}{(1-2d)} v_{in} \quad (2.28)$$

Jadi rasio konversi konverter *quasi-z source dc-dc boost converter* adalah :

$$M = \frac{2}{(1-2d)} \quad (2.29)$$

2.2.3 Analisis Arus Rangkaian Konverter

Analisis arus pada rangkaian konverter digunakan untuk mengetahui berapa arus yang mengalir pada tiap komponen. Nilai arus yang digunakan untuk analisis menggunakan nilai rata-rata. Terdapat dua mode yang digunakan untuk menganalisis arus rangkaian, yaitu saat sakelar tertutup dan saat sakelar terbuka. Rangkaian aliran arus saat sakelar tertutup dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Aliran Arus Saat Sakelar Tertutup

Persamaan yang dapat diturunkan ketika sakelar tertutup untuk analisis arus yaitu :

$$\text{Node 1 : } I_{C2on} + I_{L1} = 0$$

$$I_{C2on} = -I_{L1} \quad (2.30)$$

$$\text{Node 2 : } I_{C1on} + I_{L2} = 0$$

$$I_{C1on} = -I_{L2} \quad (2.31)$$

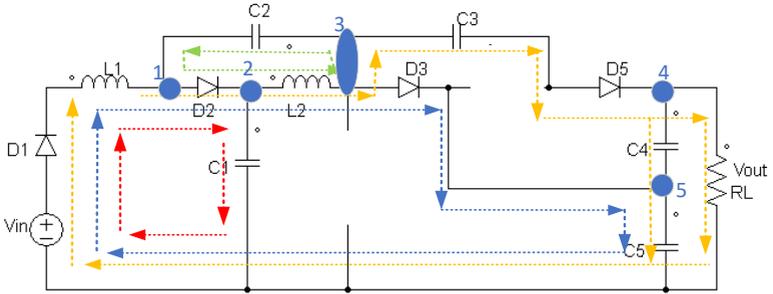
$$\text{Node 3 : } I_{C5on} + I_{C3on} = I_{C4on}$$

$$I_{C5on} = I_{C4on} - I_{C3on} \quad (2.32)$$

$$\text{Node 4 : } I_{C4on} = -I_{out}$$

$$(2.34)$$

Sedangkan gambar rangkaian dan aliran arus ketika sakelar terbuka dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Aliran Arus Saat Sakelar Terbuka

Persamaan yang dapat diturunkan ketika sakelar terbuka untuk analisis arus yaitu :

$$\text{Node 1 : } I_{L1} + I_{C2off} = I_{D2} \quad (2.35)$$

$$\text{Node 2 : } I_{D2} = I_{C1off} + I_{L2} \quad (2.36)$$

$$I_{L1} + I_{C2off} = I_{C1off} + I_{L2}$$

$$I_{C1off} = I_{L1} + I_{C2off} - I_{L2} \quad (2.37)$$

$$\text{Node 3 : } I_{L2} = I_{C2off} - I_{C3off} + I_{D3}$$

$$I_{D3} = I_{L2} - I_{C2off} + I_{C3off} \quad (2.38)$$

$$\text{Node 4 : } I_{C3off} = -I_{C4off} - I_{out} \quad (2.39)$$

$$\text{Node 5 : } I_{D3} + I_{C4off} = I_{C5off} \quad (2.40)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.38) ke persamaan (2.40), sehingga persamaan akan menjadi :

$$I_{L2} - I_{C2off} + I_{C3off} + I_{C4off} = I_{C5off} \quad (2.41)$$

Lalu substitusikan persamaan (2.39) ke persamaan (2.41), sehingga persamaan akan menjadi :

$$I_{L2} - I_{C2off} - I_{C4off} - I_{out} + I_{C4off} = I_{C5off} \quad (2.42)$$

Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (2.35) dan (2.36) ke dalam persamaan (2.42) akan didapatkan hasil akhir persamaan :

$$I_{C5off} = I_{L1} - I_{out} - I_{C1off} \quad (2.43)$$

Dengan mengasumsikan daya *input* sama dengan daya *output*, maka $V_{in}I_{in} = V_{out}I_{out}$. Lalu dengan mensubstitusikan persamaan (2.28), maka diperoleh sebuah persamaan :

$$I_{in} = \frac{2}{(1-2d)} I_{out} \quad (2.44)$$

Persamaan $I_C = C \frac{dVc}{dt}$ dimanfaatkan dengan mensubstitusikan persamaan (2.31) dan (2.37). Kemudian didapatkan persamaan :

$$C_{1on} dVc1 = -I_{L2}dT \quad (2.45)$$

$$C_{1off} dVc1 = (I_{C2off} + I_{L1} - I_{L2})(T - dT) \quad (2.46)$$

Nilai kapasitansi kapasitor selalu tetap, ketika waktu *on*, maupun ketika waktu *off*. Sehingga $C_{1on} dVc1 = C_{1off} dVc1$. Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (2.45) dan (2.46) ke dalam persamaan tersebut, maka diperoleh persamaan :

$$I_{C2off} = \frac{I_{L2}(1-2d) - I_{L2}(1-d)}{(1-d)} \quad (2.47)$$

Kemudian dengan cara yang sama, yaitu persamaan $I_C = C \frac{dVc}{dt}$ dimanfaatkan dengan mensubstitusi persamaan (2.30) dan (2.47), diperoleh persamaan :

$$C_{2on} dVc2 = -I_{L1}dT \quad (2.48)$$

$$C_{2off} dVc2 = (I_{L2}(1-2d) - I_{L1}(1-d))T \quad (2.49)$$

Karena nilai $C_{2on} dVc2 = C_{2off} dVc2$, maka diperoleh persamaan akhir :

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{in} = \frac{2}{(1-2d)} I_{out} \quad (2.50)$$

Metode *ampere-second balance* diterapkan pada beberapa kapasitor. Persamaan yang dapat diturunkan untuk metode *ampere-second balance* pada kapasitor C1 adalah sebagai berikut :

$$\int_0^{dT} I_{C1(on)} + \int_{dT}^T I_{C1(off)} = 0$$

$$I_{C1on}dT + I_{C1off}(T - dT) = 0 \quad (2.51)$$

Kemudian dengan memanfaatkan persamaan (2.31), (2.37), dan (2.50) yang disubstitusikan ke persamaan (2.51), maka akan diperoleh persamaan akhir :

$$I_{C2off} = \frac{2dI_{out}}{(1-d)(1-2d)} \quad (2.52)$$

Selain itu, dengan memanfaatkan persamaan (2.50) yang disubstitusikan ke persamaan (2.30), (2.31), dan (2.37), maka diperoleh persamaan-persamaan berikut :

$$I_{C1off} = I_{C2off} = \frac{2dI_{out}}{(1-d)(1-2d)} \quad (2.53)$$

$$I_{C1on} = -\frac{2}{(1-2d)} I_{out} \quad (2.54)$$

$$I_{C2on} = -\frac{2}{(1-2d)} I_{out} \quad (2.55)$$

Persamaan *ampere-second balance* diterapkan pada kapasitor C4, sehingga didapatkan persamaan :

$$\int_0^{dT} I_{C4(on)} + \int_{dT}^T I_{C4(off)} = 0$$

$$I_{C4on}dT + I_{C4off}(T - dT) = 0 \quad (2.56)$$

Kemudian persamaan (2.34) dan (2.39) disubstitusikan ke persamaan (2.56), sehingga diperoleh persamaan akhir :

$$I_{C3off} = -\frac{I_{out}}{(1-d)} \quad (2.57)$$

Persamaan *ampere-second balance* diterapkan pada kapasitor C5, sehingga didapatkan persamaan :

$$\int_0^{dT} I_{C5(on)} + \int_{dT}^T I_{C5(off)} = 0$$

$$I_{C5on}dT + I_{C5off}(T - dT) = 0 \quad (2.58)$$

Lalu persamaan (2.32), (2.43), (2.50), dan (2.53) dimanfaatkan dengan disubstitusikan ke persamaan (2.58), maka didapatkan persamaan akhir :

$$I_{C3on} = \frac{I_{out}}{d} \quad (2.59)$$

Selain itu, dengan menggunakan persamaan (2.32) dan mensubstitusikan persamaan (2.34) dan (2.59) ke dalamnya, maka diperoleh persamaan :

$$I_{C5on} = -\frac{I_{out}(1+d)}{d} \quad (2.60)$$

Lalu dengan memanfaatkan persamaan persamaan (2.39) dan (2.57), maka akan diperoleh suatu persamaan :

$$I_{C4off} = \frac{dI_{out}}{(1-d)} \quad (2.61)$$

Dan dengan mensubstitusikan persamaan (2.50) dan (2.53) ke dalam persamaan (2.43), maka akan diperoleh suatu persamaan :

$$I_{C5off} = \frac{(1+d)}{(1-d)} I_{out} \quad (2.62)$$

Selanjutnya berdasarkan gambar 2.8, arus akan mengalir melalui sakelar Q menuju ke *ground* (Ids). Besarnya arus Ids dapat diturunkan melalui persamaan berikut :

$$I_{ds} = I_{L1} + I_{L2} + I_{C3on} \quad (2.63)$$

Lalu dengan mensubstitusikan persamaan (2.50) dan (2.59) ke dalam persamaan (2.63), maka diperoleh persamaan :

$$I_{ds} = \frac{(1+2d)}{d(1-2d)} I_{out} \quad (2.64)$$

Besarnya arus yang melalui dioda D4 sama dengan nilai negatif arus kapasitor C5 saat *on*.

$$I_{D4} = -I_{C5on} = \frac{(1+d)}{d} I_{out} \quad (2.65)$$

Berdasarkan persamaan (2.35) dan dengan mensubstitusikan persamaan (2.50) dan (2.52) ke dalamnya, maka besarnya nilai arus yang mengalir ke dioda D2 adalah :

$$I_{D2} = \frac{2}{(1-d)(1-2d)} I_{out} \quad (2.66)$$

Besarnya arus yang mengalir pada dioda D3 berdasarkan persamaan (2.38), (2.50), (2.52), dan (2.57) maka diperoleh :

$$I_{D3} = \frac{1}{(1-d)} I_{out} \quad (2.67)$$

Besarnya arus yang mengalir pada dioda D5 berdasarkan gambar 2.8, sama dengan negatif arus yang mengalir pada kapasitor C3 saat off. Maka persamaan besarnya arus I_{D5} adalah :

$$I_{D5} = -I_{C3off} = \frac{1}{(1-d)} I_{out} \quad (2.68)$$

2.2.4 Penurunan Parameter Komponen

Rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* memiliki beberapa komponen yang harus ditentukan nilainya. Beberapa komponen yang harus ditentukan nilainya adalah induktor L1 dan L2 dan kapasitor C1, C2, C3, C4, dan C5.

Nilai induktansi induktor L dapat diturunkan ketika induktor dalam kondisi *charging*, dengan menggunakan persamaan :

$$L = U_L \frac{dt}{di_L} \quad (2.69)$$

Berdasarkan persamaan (2.50), besarnya arus yang mengalir pada induktor L1 dan L2 sama. Maka dari itu, hanya nilai induktor L2 saja yang akan diberikan. Nilai $di_L = \Delta I_L$ merupakan besarnya nilai *ripple* arus yang melewati induktor. Karena dalam kondisi *charging* (sakelar on), maka $dt = dT = d/f$ (f adalah frekuensi *switching* pada sakelar semikonduktor). Dan berdasarkan persamaan (2.8), nilai $V_{L2on} = V_{C1}$. Maka besarnya nilai induktansi induktor L1 dan L2 adalah :

$$L_1 = L_2 = \frac{d(1-d)V_{in}}{(1-2d)\Delta I_L f} \quad (2.70)$$

Sedangkan nilai kapasitansi kapasitor dapat diturunkan ketika kapasitor mengalami *charging* maupun *discharging*, dengan menggunakan persamaan 2.71.

$$C = i_C \frac{dt}{dU_C} \quad (2.71)$$

Analisis dilakukan saat sakelar tertutup (*on*), maka nilai $dt = dT = d/f$. Besarnya nilai i_C berdasarkan nilai tiap kapasitor saat *on*. Parameter $dV_C = \Delta V_C$ merupakan besarnya nilai *ripple* tegangan pada kapasitor. Maka dengan mensubstitusi masing-masing persamaan (2.34), (2.54), (2.55), (2.59), dan (2.60) pada persamaan (2.71), maka nilai kapasitansi masing-masing kapasitor adalah :

$$C_1 = \frac{2dI_{out}}{(1-2d)\Delta V_{C1}f} \quad (2.72)$$

$$C_2 = \frac{2dI_{out}}{(1-2d)\Delta V_{C2}f} \quad (2.73)$$

$$C_3 = \frac{I_{out}}{\Delta V_{C3}f} \quad (2.74)$$

$$C_4 = \frac{dI_{out}}{\Delta V_{C4}f} \quad (2.75)$$

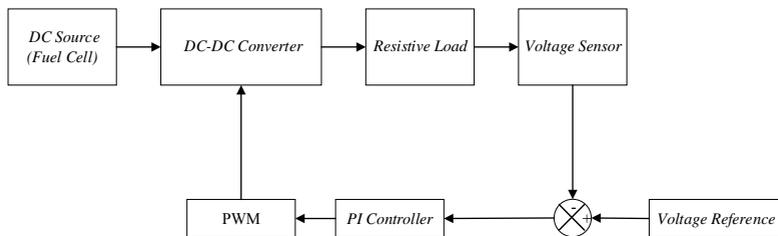
$$C_5 = \frac{(1+d)I_{out}}{\Delta V_{C5}f} \quad (2.76)$$

Sedangkan persamaan yang digunakan dalam menentukan beban resistor di sisi luaran adalah :

$$R = \frac{V_{out}^2}{P} \quad (2.78)$$

2.2.5 Analisis Kondisi Dinamis

Analisis kondisi dinamis merupakan suatu analisis yang dilakukan ketika tegangan masukan konverter berubah-ubah. Hal tersebut dilakukan karena sumber tegangan DC yang digunakan merupakan *fuel cell*. Tegangan *fuel cell* dipengaruhi oleh bahan bakar, besarnya arus, serta besar beban yang digunakan [2]. Blok diagram untuk sistem konverter saat kondisi tegangan *input* dinamis dapat dilihat pada gambar 2.10.

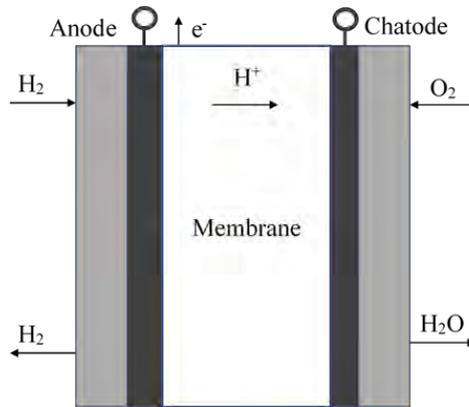


Gambar 2.10 Diagram Blok Sistem Konverter Saat Kondisi Dinamis

Tegangan *output* dari konverter akan berubah-ubah sesuai dengan perubahan nilai tegangan *input*. Namun tegangan *output* konverter dapat dijaga konstan dengan cara mengubah-ubah nilai dari *duty cycle* sinyal PWM yang diberikan. Pengaturan nilai *duty cycle* dapat dilakukan secara otomatis dengan cara pengaturan umpan balik tegangan *output* yang dilakukan oleh pengendali *Proportional Integral* (PI). Pengendali PI dapat mengatur dan memperkecil selisih antara tegangan *output* dengan tegangan referensi yang diberikan. Metode yang dilakukan untuk mencari nilai-nilai parameter pada pengendali PI, seperti K_p dan K_i menggunakan cara *trial and error*.

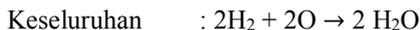
2.3 Fuel Cell atau Sel Bahan Bakar

Fuel cell atau sel bahan bakar merupakan salah satu jenis sumber energi baru terbarukan yang saat ini sedang dikembangkan untuk menggantikan sumber energi konvensional dari energi fosil. *Fuel cell* dianggap sebagai sumber energi baru terbarukan yang menjanjikan karena memiliki efisiensi pembakaran yang bagus serta dampak terhadap lingkungan yang rendah. Pengertian dari *fuel cell* sendiri adalah suatu peralatan yang memanfaatkan reaksi elektrokimia dengan mengubah energi dari hidrogen (H_2) ditambah dengan oksigen (O_2) untuk menghasilkan energi listrik. Selain energi listrik, *fuel cell* juga menghasilkan air dan panas sebagai luarannya [1]. Sama seperti baterai, *fuel cell* memiliki dua buah elektroda, yaitu katoda dan anoda yang terpisahkan oleh sebuah membran *polymer* yang berfungsi sebagai elektrolit [6]. Membran ini berukuran sangat tipis, yang memiliki ketebalan beberapa mikrometer. Struktur dasar dari *fuel cell* dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Struktur Dasar dari *Fuel Cell*

Proses reaksi elektrokimia pada *fuel cell* yang menghasilkan muatan elektron terjadi di elektroda. Cara kerja dari *fuel cell* adalah sebagai berikut, hidrogen (H_2) dialirkan ke bagian anoda, sedangkan oksigen (O_2) dialirkan ke bagian katoda. Membran yang dilapisi oleh bahan platinum dan nikel yang berfungsi sebagai katalisator membuat hidrogen tidak dapat bercampur dengan oksigen. Peran dari katalisator yaitu untuk memecah atom hidrogen menjadi proton dan elektron. Proton dapat mengalir menembus membran menuju sisi katoda, sehingga katoda yang dipenuhi oleh proton akan bermuatan positif. Sedangkan elektron tidak dapat menembus membran, sehingga sisi anoda menjadi muatan negatif. Jika katoda dan anoda dihubungkan oleh suatu konduktor listrik, maka elektron di sisi anoda dapat mengalir menuju katoda. Perpindahan elektron dari anoda menuju katoda ini menimbulkan arus listrik. Elektron yang sudah sampai di katoda akan bereaksi dengan proton dan oksigen sehingga menghasilkan air (H_2O). Reaksi kimia yang terjadi di *fuel cell* dapat diuraikan sebagai berikut :



Ada beberapa jenis *fuel cell* yang ditentukan berdasarkan bahan elektrolitnya, di antaranya adalah sebagai berikut :

1. *Alkaline Fuel Cell (AFC)*
Alkaline Fuel Cell (AFC) merupakan jenis *fuel cell* yang menggunakan *alkaline potassium hydroxyde* sebagai elektrolit. Jenis ini bisa menghasilkan efisiensi hingga mencapai 70%. AFC sering digunakan oleh NASA untuk misi luar angkasa. Harganya yang mahal menyebabkan AFC tidak dipakai untuk komersial.
2. *Proton Exchange Membrane (PEM)*
 PEM memiliki membran tipis yang terbuat dari plastik dengan lapisan platina pada kedua sisinya. Jenis ini paling banyak digunakan karena dapat beroperasi pada suhu yang rendah dan harganya yang murah.
3. *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*
 DMFC mirip dengan PEM, yaitu sama-sama menggunakan plastik *polymer* sebagai membran. Pada DMFC, hidrogen diambil secara langsung oleh katalisator dari *methanol* cair, sehingga tidak diperlukan pembaruan bahan bakar.
4. *Phosphoric Acid Fuel Cells (PAFC)*
 PAFC banyak digunakan untuk menghasilkan listrik di rumah sakit, perkantoran, dan stasiun penghasil listrik.
5. *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)*
 MCFC merupakan jenis *fuel cell* yang dapat beroperasi di temperatur tinggi. Jenis ini digunakan untuk membangkitkan energi listrik dalam skala besar, sehingga digunakan untuk keperluan industri.
6. *Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)*
 SOFC merupakan jenis *fuel cell* yang menggunakan material dari keramik keras, sehingga memungkinkan bekerja di temperatur tinggi. *Fuel cell* ini berbentuk tabung
7. *Regenerative Fuel Cell*
Regenerative fuel cell merupakan *fuel cell* jenis baru yang menggunakan elektrolisa dari tenaga panel surya. Bahan-bahan yang digunakan oleh *fuel cell* diambil dari pemecahan air menjadi hidrogen dan oksigen, yang selanjutnya dapat menghasilkan energi listrik, panas dan air. Air inilah yang akan didaur ulang untuk proses selanjutnya yang sama.

Secara keseluruhan, jenis-jenis *fuel cell* beserta karakteristiknya dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Jenis - Jenis *Fuel Cell* [1] dan [7]

Tipe	Temperatur Operasi (°C)	Daya	Elektrolit	Karakteristik
AFC	65 - 220	Sampai 20 kW	<i>Kalilauge</i> (KOH)	Efisiensi energi tinggi, memiliki kepekaan terhadap CO ₂
PEM	50 - 120	kW	<i>Polymer Electrolyte</i> (H ⁺)	Kerapatan energi tinggi, memiliki kepekaan terhadap CO (<100 ppm)
DMFC	130	Sampai 10 kW	<i>Polymer Electrolyte</i> (H ⁺)	Efisiensi sistem tinggi, peka terhadap hasil oksidasi di anoda
PAFC	150 – 210	Ratusan kW	<i>Phosphor Acid</i> (H ⁺)	Efisiensi energi terbatas, peka terhadap CO (<1,5% vol)
MCFC	600 – 700	MW	<i>Molten Carbonate</i> (CO ₃ ⁻²)	Problem Korosi
SOFC	650 - 1000	Sampai 10 MW	Lapisan Keramik (O ⁻²)	Efisiensi sistem tinggi, temperatur operasi perlu diturunkan

Modul *fuel cell* yang digunakan sebagai sumber tegangan DC pada penelitian kali ini menggunakan modul *fuel cell* dengan merk Horizon (H-1000_UM_V4.4_EN) yang terdapat pada laboratorium Konversi Energi Listrik. Spesifikasi *fuel cell* tersebut dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi *Fuel Cell* Horizon H-1000 [2]

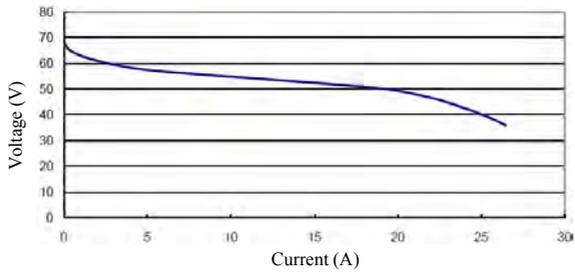
<i>Type of Fuel Cell</i>	PEM
<i>Number of Cells</i>	72
<i>Rated Power</i>	1000 W
<i>Performance</i>	43,2 V@24 A
<i>H2 SupplyValve Voltage</i>	12 V
<i>Purging Valve Voltage</i>	12 V
<i>Blower Voltage</i>	12 V
<i>Reactants</i>	<i>Hydrogen and air</i>
<i>External Temperature</i>	5 – 30°C
<i>Max. Stack Temperature</i>	65°C
<i>H2 Pressure</i>	0.45 – 0.55 bar
<i>Hydrigen Purity</i>	≥ 99.995 % dry H2
<i>Humidification</i>	<i>Self-humidified</i>
<i>Cooling</i>	<i>Air (integrated cooling fan)</i>
<i>Weight (with fan & casing)</i>	4500 gram (±100 grams)
<i>Controller</i>	400 gram (±30 grams)
<i>Dimension</i>	21.5 cm x 12.5 cm x 30 cm

Tabel 2.2 Spesifikasi *Fuel Cell* Horizon H-1000 [2] (lanjutan)

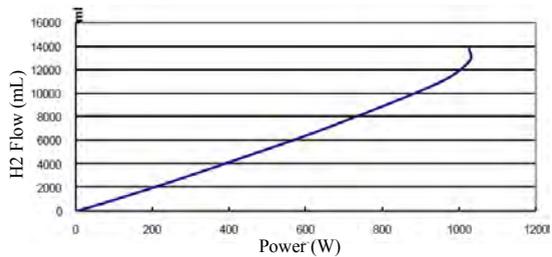
<i>Flow Rate at Max Output</i>	14 L/min
<i>Start Up Time</i>	≤ 30 S at ambient temperature
<i>Efficiency of Stack</i>	40% @43,2 V
<i>Low Voltage Shut Down</i>	36 V
<i>Over Current Shut Down</i>	30 A
<i>Over Temperature Shut Down</i>	65°C
<i>External Power Supply</i>	13 V (± 1 V), 5 ~ 8 A

Modul *fuel cell* Horizon H-1000 memiliki daya *rating* sebesar 1000 W yang dapat dicapai pada tegangan 43,2 V dan arus 24 A. Untuk mengoperasikan modul *fuel cell* tersebut, dibutuhkan tegangan suplai dari luar sebesar 13 V. Bahan bakar yang digunakan menggunakan bahan bakar hidrogen yang tekanan gasnya dijaga 0,45-0,55 bar. Efisiensi *fuel cell* mencapai 40% ketika tegangan 43,2 V. Modul *fuel cell* Horizon H-1000 memiliki sistem proteksi yang dapat mengakibatkan *fuel cell* dapat *shutdown* secara otomatis. Kondisi yang dapat menyebabkan *fuel cell shutdown* secara otomatis yaitu ketika tegangan di bawah 36 V, Arus *output fuel cell* di atas 30 A, serta jika temperatur *fuel cell* di atas 65°C. Namun nilai-nilai tersebut terkadang tidak sesuai dengan peralatan yang terdapat di laboratorium dikarenakan beberapa faktor, salah satunya yaitu usia peralatan.

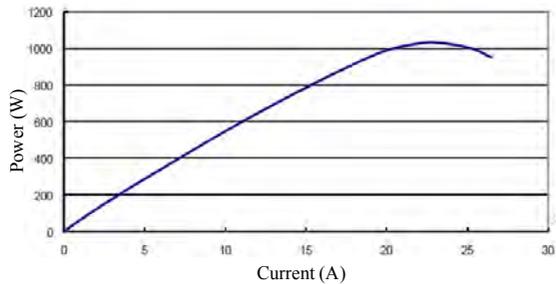
Kurva karakteristik modul *fuel cell* Horizon H-1000 seperti kurva tegangan-arus, volume gas-hari, dan daya-arus ditunjukkan pada gambar 2.12 sampai gambar 2.14.



Gambar 2.12 Kurva Karakteristik Tegangan-Arus *Fuel Cell* Horizon H-1000 [2]



Gambar 2.13 Kurva Karakteristik Volume Gas-Daya *Fuel Cell* Horizon H-1000 [2]



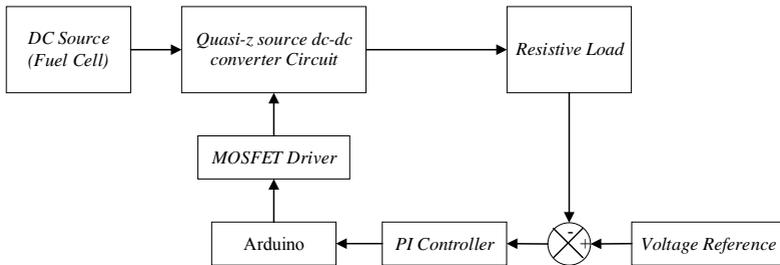
Gambar 2.14 Kurva Karakteristik Daya-Arus *Fuel Cell* Horizon H-1000 [2]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

Pada bab ini akan dibahas mengenai proses desain, simulasi, serta implementasi *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi untuk aplikasi *fuel cell*. Proses penentuan parameter komponen yang akan digunakan pada implementasi dilakukan dengan cara melakukan perhitungan menggunakan persamaan yang telah diturunkan pada bab 2. Setelah ditentukan nilai-nilai parameter komponen yang akan dilakukan, maka akan dilakukan simulasi terlebih dahulu menggunakan *software* PSIM. Simulasi dilakukan agar mengetahui apakah konverter yang telah didesain sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan. Hasil yang diperoleh dari simulasi akan digunakan sebagai bahan acuan ketika melakukan implementasi. Secara umum, diagram blok rangkaian *quasi-z source dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem Konverter *Quasi-Z Source Boost DC-DC* dengan Penguatan Tegangan Tinggi

3.1 Desain Parameter Rangkaian *Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter* dengan Penguatan Tegangan Tinggi

Proses awal dalam mendesain rangkaian konverter yaitu menentukan nilai-nilai parameter elektrik yang akan digunakan. Penentuan nilai-nilai parameter tersebut juga mempertimbangkan peralatan serta komponen yang tersedia di pasaran dan di laboratorium. Nilai-nilai parameter yang harus ditentukan di awal perencanaan, antara lain tegangan *input*, frekuensi *switching*, *ripple* arus induktor, *ripple*

tegangan kapasitor, *tegangan output*, dan daya *output*. Penentuan nilai-nilai tersebut akan menjadi acuan dalam menentukan dan mendesain komponen yang akan digunakan, seperti penentuan nilai induktansi induktor, nilai kapasitansi kapasitor, serta beban yang digunakan. Parameter awal yang digunakan dalam mendesain rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi dapat dilihat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Parameter Awal Desain Konverter

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1.	Tegangan <i>Input</i> (V_{in})	30	Volt
2.	Tegangan <i>Output</i> (V_{out})	240	Volt
3.	Daya <i>Output</i> (P_{out})	100	Watt
4.	Frekuensi <i>switching</i>	20	kHz
5.	<i>Ripple</i> Arus induktor (ΔI_L)	50	%
6.	<i>Ripple</i> tegangan kapasitor C_1	0,2	%
7.	<i>Ripple</i> tegangan kapasitor C_2	0,2	%
8.	<i>Ripple</i> tegangan kapasitor C_3	0,04	%
9.	<i>Ripple</i> tegangan kapasitor C_4	0,015	%
10.	<i>Ripple</i> tegangan kapasitor C_5	0,05	%

Pada desain awal konverter, tegangan *input* sebesar 30 Volt. Tegangan *output* didesain sebesar 240 Volt yang merupakan tegangan untuk aplikasi *input* inverter *single pulse* agar dapat dikonversi menjadi tegangan V_{rms} 220 Volt. Daya *output* sebesar 100 Watt. Frekuensi *switching* menggunakan 20 kHz untuk memperkecil nilai dari induktansi induktor. Nilai *ripple* arus induktor 50% untuk mengurangi nilai induktansi induktor, sehingga ukuran induktor tidak terlalu besar. Nilai *ripple* tegangan pada kapasitor menyesuaikan dengan komponen yang terdapat di pasaran.

3.1.1 Penentuan Rasio Konversi dan *Duty Cycle*

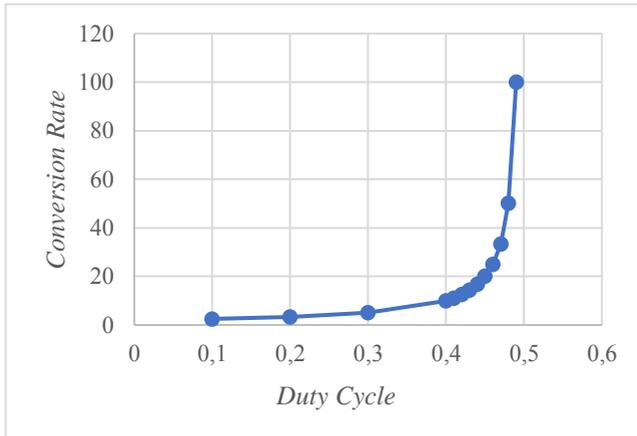
Berdasarkan persamaan (2.29) yang diperoleh dari analisis mode sakelar terbuka dan tertutup, maka rasio konversi konverter dipengaruhi oleh nilai *duty cycle*. Nilai *duty cycle* yang dapat digunakan untuk konverter adalah $0 < d < 0,5$. Ketika nilai *duty cycle* sama dengan 0,5, maka nilai rasio konversinya menjadi tak hingga. Hubungan antara nilai rasio konversi dengan nilai *duty cycle* dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Rasio Konversi pada Konverter Beserta Nilai *Duty Cycle*

Duty Cycle	Rasio Konversi
0,1	2,5
0,2	3,3
0,3	5
0,4	10
0,41	11,1
0,42	12,5
0,43	14,3
0,44	16,67
0,45	20
0,46	25
0,47	33,3
0,48	50
0,49	100

Berdasarkan tabel 3.2, maka didapatkan kurva karakteristik hubungan antara *duty cycle* dengan rasio konversi konverter. Kurva

karakteristik hubungan antara *duty cycle* dengan rasio konversi konverter dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Kurva Karakteristik Hubungan *Duty Cycle* dengan Rasio Konversi

Pada penelitian kali ini, telah ditentukan nilai tegangan *input* sebesar 30 Volt dan tegangan *output* sebesar 240 Volt. Maka besarnya nilai rasio konversi (M) sebesar :

$$M = \frac{240}{30} = 8$$

Dengan menggunakan persamaan (2.29), maka nilai *duty cycle* yang dibutuhkan untuk mencapai nilai rasio konversi sebesar 8 kali adalah:

$$M = \frac{2}{(1-2d)}$$

$$8 = \frac{2}{(1-2d)}$$

$$8-16d = 2$$

$$16d = 6$$

$$d = 0,375$$

Nilai *duty cycle* yang digunakan untuk mencapai konversi sebesar 8 kali adalah 37,5% dengan frekuensi penyakelaran 20 kHz. Kedua nilai tersebut digunakan sebagai acuan dalam pembuatan program di arduino untuk membangkitkan sinyal PWM. Sinyal PWM ini akan digunakan sebagai masukan pada sakelar semikonduktor.

3.1.2 Penentuan Nilai Beban

Nilai beban yang akan digunakan dapat ditentukan berdasarkan nilai tegangan *output* dan daya *output*. Besarnya nilai tegangan *output* dan daya *output* berdasarkan tabel 3.1 adalah 240 Volt dan 100 Watt. Dengan menggunakan persamaan (2.78), maka besarnya nilai beban yang digunakan adalah :

$$R = \frac{V_{out}^2}{P}$$

$$R = \frac{240^2}{100}$$

$$R = 576 \Omega$$

3.1.3 Penentuan Nilai Induktor L1 dan L2

Nilai induktansi induktor L1 dan L2 dihitung berdasarkan persamaan (2.70) dan dalam mode CCM (*Continuous Conduction Mode*), yakni arus yang mengalir pada induktor tidak sampai menyentuh angka nol. Sebelum menentukan nilai induktor, maka perlu mengetahui nilai arus induktor terlebih dahulu. Besarnya arus yang melewati induktor dapat dicari menggunakan persamaan (2.50). Berdasarkan persamaan tersebut, maka nilai arus induktor dipengaruhi oleh besarnya *duty cycle* dan arus *output*. Berikut perhitungan untuk mencari nilai arus yang melewati induktor :

$$P_{out} = I_{out}^2 R$$

$$I_{out} = \sqrt{\frac{P_{out}}{R}}$$

$$I_{out} = \sqrt{\frac{100}{576}}$$

$$I_{out} = 0,416 A$$

Setelah mengetahui besarnya arus *output*, maka besarnya arus induktor adalah :

$$I_{L1} = I_{L2} = \frac{2}{(1-2d)} I_{out} = \frac{2}{(1-2 \cdot 0,375)} 0,416 = 3,328 \text{ A}$$

Dengan menggunakan parameter yang telah ditentukan pada tabel 3.1, maka nilai induktor L1 dan L2 adalah sebagai berikut :

$$L_1 = L_2 = \frac{d(1-d)V_{in}}{(1-2d)\Delta I L f}$$

$$L_1 = L_2 = \frac{0,375(1-0,375) 30}{(1-2 \cdot 0,375) \cdot \frac{50}{100} \cdot 3,328 \cdot 20000}$$

$$L_1 = L_2 = 0,837 \text{ mH}$$

Dalam mendesain sebuah induktor, salah satu hal yang perlu diperhatikan adalah pemilihan kawat konduktor. Penentuan kawat berdasarkan dengan nilai frekuensi *switching* yang digunakan serta besarnya arus yang melewatinya. Frekuensi *switching* yang digunakan adalah 20 kHz.

Kawat yang digunakan sebagai pembuatan induktor menggunakan jenis AWG (*American Wire Gauge*). Kabel AWG yang tersedia di laboratorium konversi energi listrik memiliki diameter 0,45 mm. Kawat tersebut dapat digunakan untuk frekuensi *switching* 85 kHz, memiliki resistansi $0,106 \Omega/m$, serta kapasitas arus maksimum yang dapat dilewati sebesar 0,457 A [8]. Berdasarkan perhitungan, arus induktor sebesar 3,328 A. Maka dengan kawat yang tersedia harus dilakukan pemilihan pada kawat.

Dalam implementasinya, nilai arus yang melewati induktor bisa lebih besar daripada nilai yang ada di perhitungan. Hal ini bisa terjadi karena komponen yang terdapat di pasaran tidak dalam kondisi ideal. Maka dari itu, induktor didesain dapat dilewati arus melebihi nilai 3,328 A, yang dalam hal ini ditentukan nilai sebesar 7,4 A. Berdasarkan tabel kawat AWG, kawat yang dapat dilewati arus sebesar 7,4 A memiliki diameter 1,8288 mm [8]. Maka dari itu jumlah pilinan untuk kawat adalah:

$$\text{Jumlah pilinan kawat} = \frac{1,8288}{0,45} = 4,064 \approx 5 \text{ pilinan}$$

Langkah selanjutnya dalam mendesain induktor yaitu pemilihan inti induktor dan menentukan jumlah belitan yang digunakan. Inti induktor yang digunakan menggunakan jenis toroid dengan tipe 0077548A7. Inti induktor ini memiliki nilai *inductance factor* (A_L) sebesar 127 nH/T² [9]. Persamaan yang digunakan untuk mencari jumlah belitan induktor adalah:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Keterangan : N (jumlah belitan), L (nilai induktansi induktor (dalam nH)), dan A_L (*inductance factor*).

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{0,837 \cdot 1000000}{127}} = 81,18 \text{ belitan} \approx 82 \text{ belitan.}$$

3.1.4 Penentuan Nilai Kapasitor

Kapasitor yang terdapat pada rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi sebanyak 5 buah kapasitor. Dalam menentukan kapasitor, perlu diketahui besar tegangan pada tiap kapasitor. Dengan menggunakan persamaan (2.23) sampai (2.25), tegangan kapasitor C1 sampai C5 adalah sebagai berikut :

$$V_{C1} = \frac{(1-d)}{(1-2d)} V_{in} = \frac{(1-0,375)}{(1-2 \cdot 0,375)} \cdot 30 = 75 \text{ V}$$

$$V_{C2} = \frac{d}{(1-2d)} V_{in} = \frac{0,375}{(1-2 \cdot 0,375)} \cdot 30 = 45 \text{ V}$$

$$V_{C3} = V_{C4} = V_{C5} = \frac{v_{out}}{2} = \frac{240}{2} = 120 \text{ V}$$

Penentuan nilai kapasitor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.72) sampai (2.76) dengan memperhitungkan parameter yang telah ditentukan pada tabel 3.1. Besarnya nilai kapasitansi kapasitor adalah sebagai berikut :

$$C_1 = \frac{2dI_{out}}{(1-2d)\Delta V_{C1f}}$$

$$C_1 = \frac{2 \cdot 0,375 \cdot 0,416}{(1-2 \cdot 0,375) \cdot \frac{0,2}{100} \cdot 75 \cdot 20000} = 416,67 \mu F$$

$$C_2 = \frac{2dI_{out}}{(1-2d)\Delta V_{C2f}} = \frac{2.0,375.0,416}{(1-2.0,375) \cdot \frac{0,2}{100} \cdot 45.20000} = 694,44 \mu F$$

$$C_3 = \frac{I_{out}}{\Delta V_{C3f}} = \frac{0,416}{\frac{0,04}{100} \cdot 120.20000} = 434 \mu F$$

$$C_4 = \frac{dI_{out}}{\Delta V_{C4f}} = \frac{0,375 \cdot 0,416}{\frac{0,015}{100} \cdot 120.20000} = 434 \mu F$$

$$C_5 = \frac{(1+d)I_{out}}{\Delta V_{C5f}} = \frac{(1+0,375)0,416}{\frac{0,05}{100} \cdot 120.20000} = 477,43 \mu F$$

Nilai kapasitor yang digunakan untuk rangkaian konverter disesuaikan dengan yang terdapat di pasaran. Maka dari itu, nilai kapasitor yang mendekati nilai kapasitor C1, C3, C4, dan C5 adalah kapasitor dengan nilai 470 μF . Sedangkan untuk kapasitor C2, kapasitor yang mendekati nilai perhitungan dan tersedia di pasaran adalah kapasitor dengan nilai 680 μF .

Jadi nilai *ripple* tegangan pada tiap kapasitor menjadi :

$$\Delta V_{C1} = \frac{2dI_{out}}{(1-2d)C_1f} = \frac{2.0,375.0,416}{(1-2.0,375) \cdot 470.0,000001.20000} = 0,133 V = 0,177\%$$

$$\Delta V_{C2} = \frac{2dI_{out}}{(1-2d)C_2f} = \frac{2.0,375.0,416}{(1-2.0,375) \cdot 680.0,000001.20000} = 0,09 V = 0,2 \%$$

$$\Delta V_{C3} = \frac{I_{out}}{C_3f} = \frac{0,416}{470.0,000001.20000} = 0,044 V = 0,037\%$$

$$\Delta V_{C4} = \frac{dI_{out}}{C_4f} = \frac{0,375 \cdot 0,416}{470.0,000001.20000} = 0,017 V = 0,013\%$$

$$\Delta V_{C5} = \frac{(1+d)I_{out}}{C_5f} = \frac{(1+0,375)0,416}{470.0,000001.20000} = 0,06 V = 0,05\%$$

Berdasarkan persamaan (2.23) sampai (2.25), tegangan maksimal kapasitor adalah setengah dari tegangan *output*, yakni 120 Volt. Namun untuk lebih amannya karena dalam implementasi terdapat tegangan *spike* yang nilainya bisa dua kali lipat atau lebih dari tegangan nominalnya,

maka dipilih tegangan kapasitor C1, C3, C4, dan C5 400 Volt. Dan untuk kapasitor C2 yang tersedia di pasaran memiliki nilai tegangan 450 Volt.

3.1.5 Penentuan Komponen Dioda

Pada rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi, terdapat lima buah dioda yang berfungsi sebagai penentu arah aliran arus pada mode sakelar tertutup dan sakelar terbuka. Pemilihan dioda berdasarkan kapasitas tegangan, arus, serta frekuensi dioda tersebut. Dengan menggunakan persamaan (2.65) sampai (2.68), berikut nilai kapasitas arus masing-masing dioda :

$$I_{D1} = I_{in} = M \cdot I_{out} = 8 \cdot 0,416 = 3,328 \text{ A}$$

$$I_{D2} = \frac{2}{(1-d)(1-2d)} I_{out} = \frac{2}{(1-0,375)(1-2 \cdot 0,375)} 0,416 = 5,333 \text{ A}$$

$$I_{D3} = \frac{1}{(1-d)} I_{out} = \frac{1}{(1-0,375)} 0,416 = 0,667 \text{ A}$$

$$I_{D4} = \frac{(1+d)}{d} I_{out} = \frac{(1+0,375)}{0,375} 0,416 = 1,5278 \text{ A}$$

$$I_{D5} = \frac{1}{(1-d)} I_{out} = \frac{1}{(1-0,375)} 0,416 = 0,667 \text{ A}$$

Tegangan *stress* maksimal pada dioda adalah setengah dari tegangan *output*, yakni 120 Volt. Dalam implementasinya, dioda D3, D4, dan D5 dipilih dioda tipe MUR1560. Dioda ini memiliki kapasitas dapat menghantarkan arus hingga 15 A, tegangan *breakdown* 600 Volt, dan termasuk jenis dioda *ultrafast* yang memiliki *recovery time* yang cepat [10]. Sedangkan untuk dioda D1 dan D2 dipilih dioda jenis RURG8060. Dioda ini termasuk jenis dioda *ultrafast with soft recovery* yang lebih cepat daripada MUR1560. Arus yang dapat dialirkan melalui dioda ini maksimal 80 A dan memiliki tegangan *breakdown* 600 Volt [11]. Pemilihan dioda ini untuk D1 dan D2 karena dalam simulasi maupun implementasi, terdapat *spike* arus yang cukup besar.

3.1.6 Penentuan Komponen Mosfet

Rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi menggunakan satu buah sakelar semikonduktor. Sakelar semikonduktor yang dipilih menggunakan jenis MOSFET. Pemilihan jenis MOSFET yang akan digunakan berdasarkan kapasitas arus yang

mengalir pada *Drain* ke *Source* (I_{ds}), tegangan *Drain* ke *Source* (V_{ds}), serta frekuensi *switching* MOSFET. Besarnya V_{ds} dapat dihitung berdasarkan analisis ketika kondisi sakelar terbuka yang terdapat pada gambar 2.6. Tegangan V_{ds} sama dengan V_{C5} , yaitu :

$$V_{ds} = V_{C5} = \frac{V_{out}}{2} = \frac{240}{2} = 120 \text{ Volt}$$

Berdasarkan persamaan (2.64), besarnya arus I_{ds} adalah :

$$I_{ds} = \frac{(1+2d)}{d(1-2d)} I_{out} = \frac{(1+2 \cdot 0,375)}{0,375(1-2 \cdot 0,375)} 0,416 = 7,765 \text{ A}$$

Mosfet yang digunakan adalah tipe IRFP4332. Mosfet tipe ini memiliki kapasitas tegangan V_{ds} maksimal 250 Volt, arus I_{ds} maksimal 40 A. Tegangan *input* untuk *Gain to Source* (V_{GS}) maksimal 30 Volt, serta besar resistansi R_{DS} 29 m Ω ketika V_{GS} 10 Volt [12]. Spesifikasi dari mosfet IRFP4332 masih di atas nilai-nilai yang telah dihitung, sehingga mosfet ini dapat digunakan dalam implementasi konverter ini.

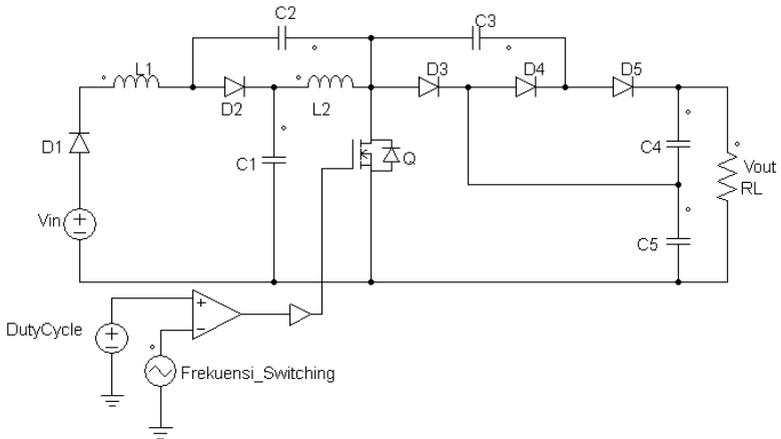
Berdasarkan hasil perhitungan desain, maka komponen yang diperlukan dalam implementasi rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi ditampilkan pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Komponen yang Digunakan dalam Aplikasi Konverter

No.	Komponen	Nilai
1.	Beban R	576 Ω
2.	Induktor L1 dan L2	0,837 mH
3.	Kapasitor C1, C3, C4, dan C5	470 μ F / 400 Volt
4.	Kapasitor C2	680 μ F / 450 Volt
5.	Dioda D1 dan D2	RURG8060
6.	Dioda D3, D4, dan D5	MUR1560
7.	Mosfet	IRFP4332

3.2 Simulasi Konverter dalam Kondisi *Steady State*

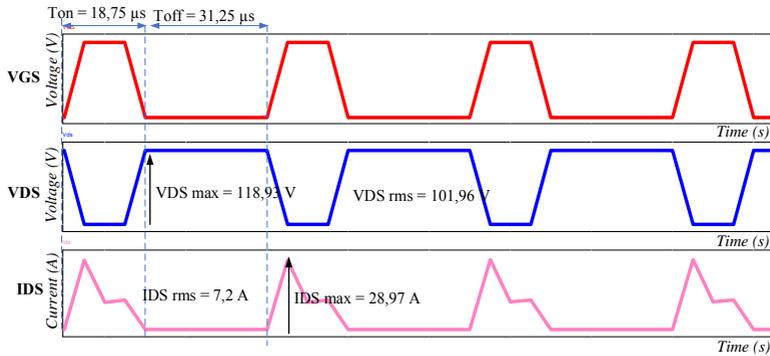
Simulasi rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi dilakukan dalam kondisi *steady state*. Rangkaian konverter untuk simulasi dalam keadaan *steady state* dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Rangkaian Simulasi Konverter

Simulasi rangkaian konverter menggunakan *software* PSIM. Tegangan *input* rangkaian ini 30 Volt dan tegangan *output* 240 Volt. Seluruh nilai komponen yang digunakan berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan dan dianggap dalam kondisi ideal atau tidak terdapat rugi-rugi. Frekuensi penyakelaran yang digunakan adalah 20 kHz dengan besar *duty cycle* 37,5%.

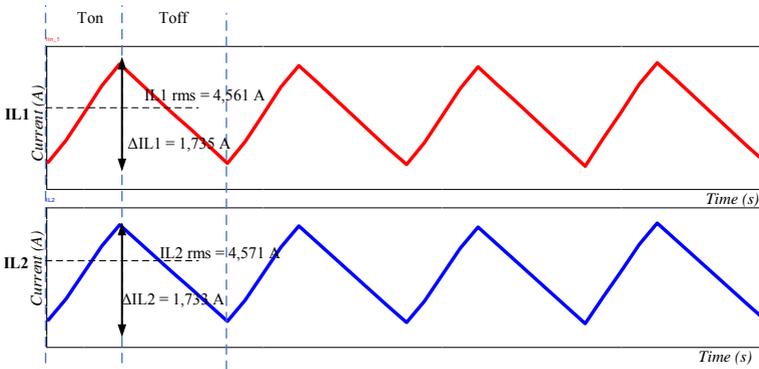
Bentuk gelombang antara V_{GS} , V_{Ds} , dan I_{ds} dari rangkaian dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Bentuk Gelombang V_{GS} , V_{DS} , dan I_{DS}

Sinyal PWM berupa sinyal logika *high* dan *low* pada periode tertentu. Nilai *duty cycle* 37,5% pada sinyal PWM yang terhubung pada sisi *Gate* mosfet memiliki waktu t_{on} selama $18,75 \mu s$ dan waktu t_{off} selama $31,25 \mu s$. Pada saat sisi *gate* mosfet menerima sinyal *high* (waktu t_{on}), maka arus akan mengalir melalui *drain* menuju *source*, sehingga muncul arus I_{ds} dan tegangan V_{ds} menjadi nol. Dan ketika sisi *gate* mosfet menerima sinyal *low*, maka arus I_{ds} akan nol dan akan muncul tegangan V_{ds} . Tegangan rms V_{ds} yang terbaca sebesar $101,96\ V$ dan arus I_{ds} yang terbaca sebesar $7,2\ A$. Tegangan maksimal V_{ds} yang terbaca saat simulasi sebesar $118,93\ Volt$ dan arus I_{ds} maksimal yang terbaca saat simulasi sebesar $28,97\ A$. Nilai tegangan dan arus maksimal DS masih di bawah kapasitas komponen mosfet yang telah dipilih, sehingga mosfet tersebut dalam implementasi dapat bekerja dalam kondisi maksimal.

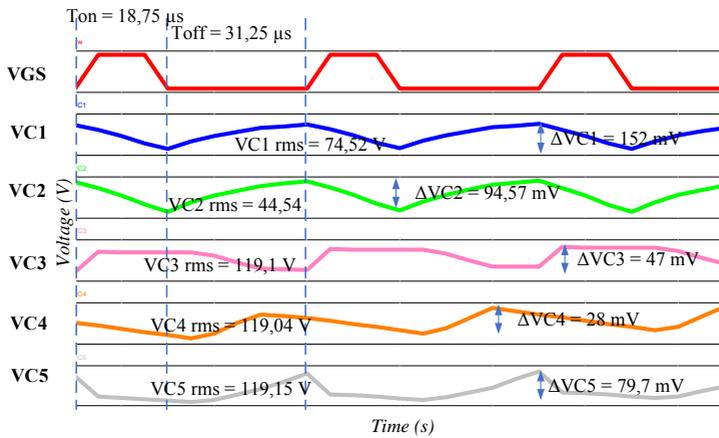
Selanjutnya bentuk gelombang arus induktor L1 dan L2 dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Bentuk Gelombang Arus Induktor L1 dan L2

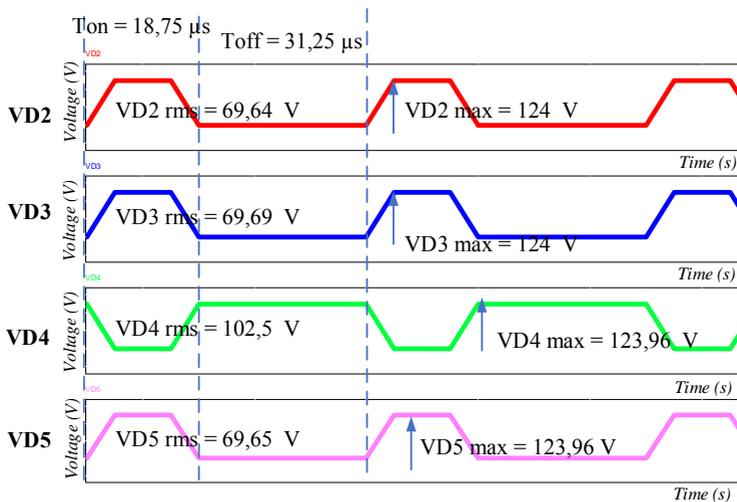
Berdasarkan gambar 3.5, besarnya nilai *ripple* arus induktor L1 sebesar 1,735 A dan *ripple* arus induktor L2 sebesar 1,733 A. Sedangkan arus rms induktor L1 sebesar 4,561 A dan arus rms induktor L2 sebesar 4,571 A. Pada saat t_{on} (sakelar tertutup), induktor mengalami fase *charging*, sehingga induktor menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Namun pada saat t_{off} (sakelar terbuka), induktor akan mengalami fase *disscharging*, sehingga energi yang tersimpan di induktor akan disalurkan ke rangkaian dan induktor akan berfungsi sebagai sumber arus.

Selanjutnya bentuk gelombang kapasitor C1, C2, C3, C4, dan C5 dapat dilihat pada gambar 3.6. Besar nilai *ripple* tegangan kapasitor C1 sebesar 152 mV, kapasitor C2 sebesar 94,57 mV, kapasitor C3 sebesar 47 mV, kapasitor C4 sebesar 28 mV, dan kapasitor C5 sebesar 79,7 mV. Besar nilai tegangan rms untuk kapasitor C1 adalah 74,52 V, kapasitor C2 sebesar 44,54 V, kapasitor C3 sebesar 119,1 V, kapasitor C4 sebesar 119,04 V, dan kapasitor C5 sebesar 119,15 V. Pada saat t_{on} , kapasitor C1, C2, C4 dan C5 mengalami fase *disscharging* yang mengakibatkan energi yang tersimpan di dalam kapasitor akan disalurkan ke rangkaian. Sedangkan kapasitor C3 mengalami fase *charging*, sehingga kapasitor akan menyimpan energi listrik dalam bentuk muatan listrik. Namun saat t_{off} , kapasitor C1, C2, C4, dan C5 mengalami fase *charging*, sedangkan kapasitor C3 mengalami fase *disscharging*.



Gambar 3.6. Bentuk Gelombang Tegangan Kapasitor C1, C2, C3, C4, dan C5

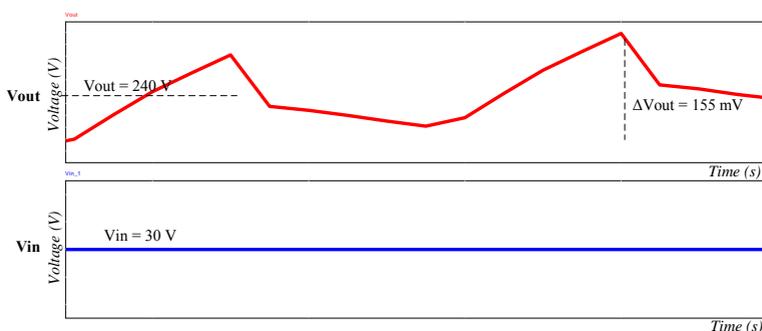
Selanjutnya bentuk gelombang tegangan dioda D2, D3, D4, dan D5 dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Bentuk Gelombang Tegangan Dioda D2, D3, D4, dan D5

Pada saat t_{on} , dioda D2, D3, dan D5 dalam keadaan *reverse biased*, sehingga tidak ada arus yang mengalir melalui dioda tersebut dan timbul tegangan *reverse* pada dioda. Sedangkan dioda D4 dalam keadaan *forward biased*, yaitu arus dapat melalui dioda tersebut, sehingga tegangan dioda menjadi nol.

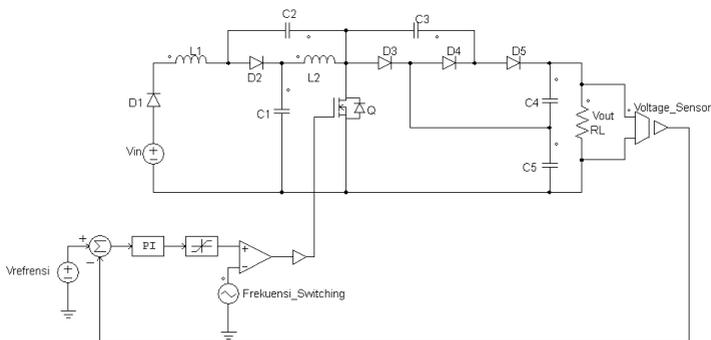
Bentuk gelombang tegangan *output* dapat dilihat pada gambar 3.8. Besar tegangan *output* konverter $V_{out\ rms}$ sebesar 240 V, sedangkan tegangan *input* sebesar 30 V. Artinya besar rasio konversi konverter sebesar 8 kali. Besar *ripple* tegangan *output* konverter sebesar 155 mV.



Gambar 3.8 Bentuk Gelombang Tegangan *Input* dan *Output* Konverter

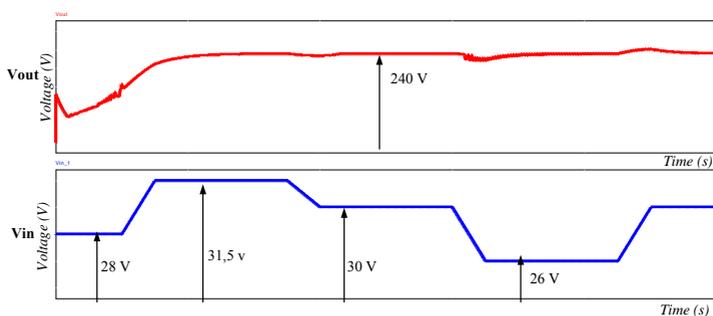
3.3 Simulasi Rangkaian Konverter dalam Kondisi Dinamis

Pada saat kondisi tegangan *input* berubah-ubah atau dinamis, konverter harus bisa mempertahankan nilai tegangan *output* yang diinginkan. Untuk mempertahankan tegangan *output* agar tetap konstan ketika tegangan *input* berubah-ubah, maka nilai *duty cycle* harus diubah-ubah secara otomatis. Pada konverter ini pengaturan *duty cycle* secara otomatis dilakukan oleh pengendali *Proportional-Integral* (PI). Penentuan nilai-nilai yang terdapat pada pengendali PI seperti K_p dan K_i dilakukan dengan cara *trial and error*. Rangkaian konverter untuk simulasi dalam kondisi dinamis dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Rangkaian Konverter Untuk Simulasi Kondisi Dinamis

Simulasi konverter dalam keadaan dinamis digunakan untuk mengetahui respon kontrol *duty cycle* terhadap perubahan tegangan *input*. Sistem kerja dari rangkaian kontrol tersebut adalah sensor tegangan akan melakukan *sensing* terhadap tegangan *output*. Lalu tegangan *output* tersebut akan dibandingkan dengan tegangan referensi yang nilainya 240 V. Jika terdapat selisih antara tegangan *output* dengan tegangan referensi, maka nilai selisih tersebut akan dijadikan sebagai nilai *error* yang kemudian oleh pengendali PI digunakan untuk mengatur nilai *duty cycle*. Proses tersebut akan berulang hingga nilai *error* mendekati nol dan tegangan *output* sama dengan tegangan referensi. Bentuk gelombang tegangan *output* sebagai respon oleh pengendali PI akibat perubahan tegangan *input* dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Bentuk Respon Gelombang Tegangan *Output* Akibat Perubahan Tegangan *Input*

Berdasarkan gambar 3.10, tegangan *output* konverter dijaga konstan pada tegangan 240 Volt meskipun tegangan *input* berubah-ubah. Pengendali PI berperan sebagai pengatur *duty cycle* sebagai respon perubahan tegangan *input* agar tegangan *output* tetap konstan.

3.4 Implementasi Rangkaian *Quasi-Z Source DC-DC Boost Converter* dengan Penguatan Tegangan Tinggi

Implementasi rangkaian merupakan tahap pembuatan rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi sesuai dengan desain yang telah ditentukan. Pada tahap ini akan dilakukan analisis mengenai kinerja rangkaian konverter tersebut yang hasilnya akan dibandingkan dengan hasil simulasi. Pada tabel 3.4 merupakan komponen-komponen yang diperlukan untuk pembuatan rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi.

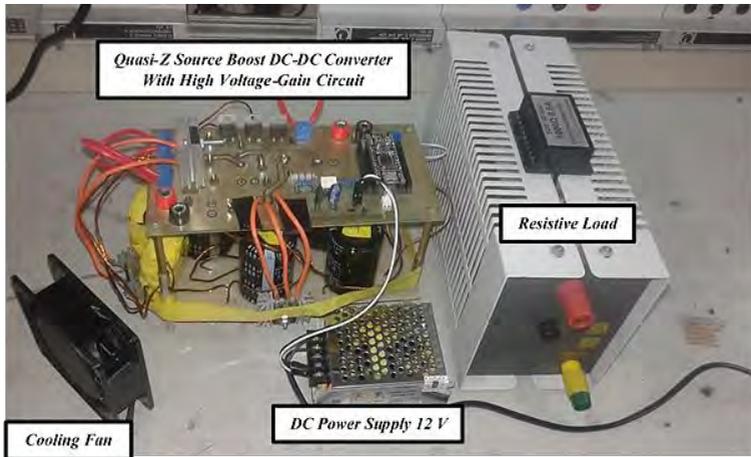
Tabel 3.4 Komponen yang Digunakan Untuk Implementasi Rangkaian Konverter

No.	Komponen	Nilai
1.	Modul <i>fuel cell</i>	Horizon H-1000
2.	Tegangan sumber DC <i>power supply</i>	30 V
3.	Tegangan <i>output</i>	240 V
4.	Mikrokontroller	Arduino Nano
5.	Mosfet	IRFP4332
6.	Optocoupler	FOD3182
7.	<i>Power supply</i> untuk Optocoupler	12 V
8.	Dioda D1 dan D2	RURG8060
9.	Dioda D3, D4, dan D5	MUR1560
10.	Induktor L1	0,836 mH

Tabel 3.4 Komponen yang Digunakan Untuk Implementasi Rangkaian Konverter (lanjutan)

No.	Komponen	Nilai
11.	Induktor L2	0,837 mH
12.	Kapasitor C1, C3, C4, dan C5	470 μ F / 400 V
13.	Kapasitor C2	680 μ F / 450 V
14.	Beban resistor	576 Ω
15.	Frekuensi <i>switching</i>	20 kHz
16.	Inti induktor	0077548A7
17.	Daya	100 W

Komponen yang digunakan untuk implementasi konverter menyesuaikan dengan komponen yang tersedia di pasaran. Pemilihan nilai komponen lebih tinggi daripada nilai berdasarkan perhitungan. Hal ini untukantisipasi fenomena yang tidak diketahui yang mungkin terjadi selama tahap implementasi. Selain itu, nilai *duty cycle* yang dibutuhkan sesuai dengan perhitungan adalah 37,5%. Namun dalam implementasi, ketika menggunakan nilai tersebut, tegangan *output* masih di bawah tegangan 240 V. Hal ini terjadi karena terdapat drop tegangan pada rangkaian. Maka dari itu untuk menghasilkan tegangan 240 V, nilai *duty cycle* dinaikkan hingga nilai 40%. Rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi yang telah dibuat dapat dilihat pada gambar 3.11. Untuk mengurangi panas pada komponen semikonduktor, seperti dioda dan mosfet, maka diperlukan peralatan tambahan seperti *heatsink* dan *cooling fan*. Hal ini dikarenakan jika komponen semikonduktor dibiarkan terlalu panas, maka drop tegangan akan besar dan rugi-rugi juga akan semakin besar.



Gambar 3.11 Implementasi Rangkaian *Quasi-Z Source Boost DC-DC Converter* dengan Penguatan Tegangan Tinggi

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai pengujian dan analisis data berdasarkan data yang telah diperoleh dari implementasi rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi untuk aplikasi *fuel cell*. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian penyakelaran, pengujian induktor, pengujian kapasitor, pengujian tegangan dioda, pengujian tegangan *output*, pengujian rasio konversi, pengujian efisiensi, pengujian menggunakan modul *fuel cell* Horizon H-1000 sebagai masukan konverter, dan pengujian respon dinamik konverter. Semua pengujian disesuaikan dengan peralatan yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik.

4.1 Peralatan Pengujian

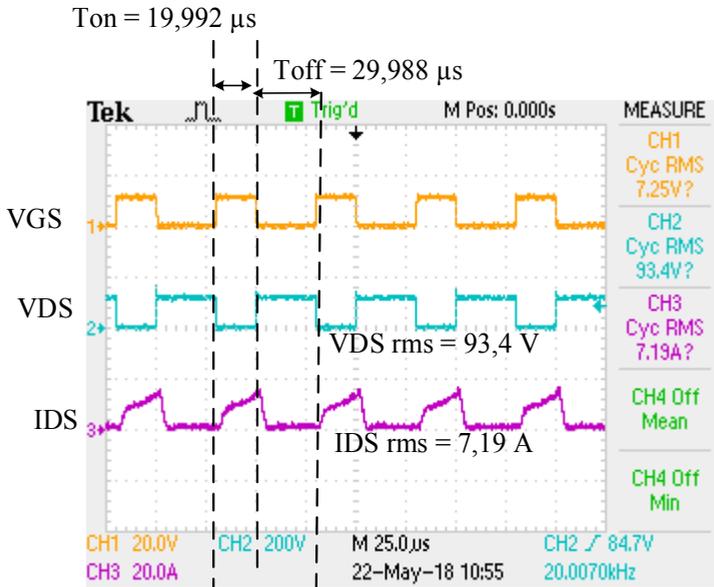
Pengujian rangkaian *quasi-z source dc-dc boost converter* dengan penguatan tegangan tinggi menggunakan peralatan yang tersedia di laboratorium konversi energi listrik. Peralatan pengujian yang tersedia antara lain, *power supply* untuk sumber DC, osiloskop, multimeter, LCR meter, dan beban resistor variabel. *Power supply* untuk sumber DC dapat menghasilkan tegangan maksimal 31,5 V dan arus maksimal 10 A ketika dihubungkan secara paralel. Dan dapat menghasilkan tegangan maksimal 63 V dan arus 5 A ketika dihubungkan secara seri. Sedangkan tegangan yang dibutuhkan untuk pengujian sebesar 30 V. Beban resistor yang dibutuhkan adalah 576 ohm dengan daya 100 Watt. *Rating* arus untuk resistor variabel sebesar 0,6 A. Komponen yang digunakan untuk menghasilkan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) adalah arduino Nano. *PI Controller* yang digunakan untuk pengujian respon dinamik, juga diimplementasikan dengan mikrokontroler arduino Nano.

4.2 Pengujian Sinyal dan Nilai Komponen

Pengujian sinyal dan nilai komponen digunakan untuk mengetahui bentuk sinyal yang dihasilkan dalam implementasi apakah sudah sesuai dengan yang terdapat di simulasi. Selain itu juga dibandingkan nilai tegangan dan arus pada komponen antara implementasi dan simulasi. Pengujian ini terdiri dari pengujian penyakelaran, pengujian induktor, pengujian kapasitor, pengujian dioda, dan pengujian tegangan *output*.

4.2.1 Pengujian Penyakelaran

Bentuk sinyal tegangan *gate-source* (V_{GS}), tegangan *drain-source* (V_{DS}), dan arus *drain-source* (I_{DS}) dapat dilihat pada gambar 4.1. Bentuk sinyal-sinyal tersebut sudah sesuai dengan bentuk sinyal di simulasi.



Gambar 4.1 Bentuk Sinyal V_{GS} , V_{DS} , dan I_{DS}

Ketika tegangan V_{GS} bernilai logika *high*, maka sakelar akan dalam posisi tertutup. Arus akan mengalir melalui *Drain* ke *source*, sehingga tegangan V_{DS} akan menjadi nol. Arus rms I_{DS} yang mengalir sebesar 7,19 A. Sedangkan saat V_{GS} bernilai nol, maka sakelar dalam kondisi terbuka. Arus I_{DS} tidak akan mengalir, sehingga terdapat nilai tegangan di sisi V_{DS} . Besar nilai V_{DS} adalah 93,4 V. Nilai-nilai tersebut tidak jauh berbeda dengan nilai-nilai yang terdapat pada simulasi. Perbedaan nilai-nilai tersebut dikarenakan komponen yang dalam kondisi tidak ideal.

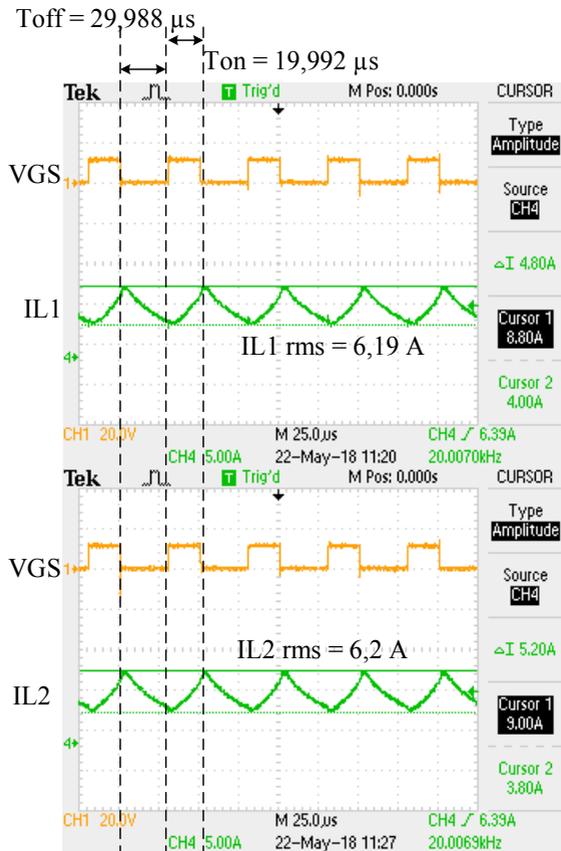
Frekuensi *switching* yang terbaca sebesar 20,007 kHz, sesuai dengan frekuensi perencanaan yakni 20 kHz. Jika dikonversi menjadi

satuan waktu, maka periode *switching* sebesar 49,98 μs . Waktu saat sakelar tertutup adalah 19,992 μs dan waktu untuk sakelar terbuka adalah 29,988 μs . Nilai *duty cycle* saat implementasi berbeda dengan nilai yang ada di simulasi. Nilai *duty cycle* saat simulasi adalah 37,5%, sedangkan nilai *duty cycle* saat implementasi adalah 40%. Ketika nilai 37,5% dimasukkan ke dalam implementasi, maka tegangan *output* konverter belum mencapai 240 V. Sehingga *duty cycle* dinaikkan hingga tegangan *output* konverter menjadi 240 V. Hal ini terjadi karena kondisi komponen yang tidak ideal yang menyebabkan terdapat drop tegangan pada *output* konverter.

4.2.2 Pengujian Arus Induktor L1 dan L2

Pengujian arus induktor L1 dan L2 digunakan untuk mengetahui bentuk sinyal dan nilai-nilai arus induktor, yang kemudian akan dibandingkan dengan hasil simulasi. Nilai arus yang dibandingkan dengan simulasi adalah besar nilai *ripple* arus dan besar arus yang terbaca. Bentuk sinyal arus induktor L1 dan L2 dapat dilihat pada gambar 4.2.

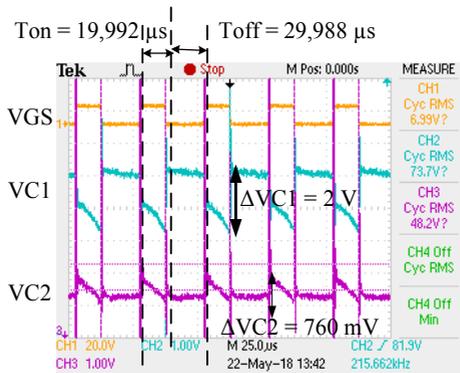
Berdasarkan gambar 4.2, bentuk sinyal arus induktor L1 dan L2 sudah sesuai dengan bentuk di simulasi. Pada saat V_{GS} bernilai *high* (sakelar tertutup), maka induktor L1 dan L2 akan mengalami fase *charging*. Sedangkan saat V_{GS} bernilai *low*, maka induktor L1 dan L2 mengalami fase *discharging*. Nilai arus induktor L1 sebesar 6,19 A, yang mana nilai tersebut lebih besar daripada nilai di simulasi. *Ripple* arus induktor L1 sebesar 4,8 A. Nilai tersebut juga lebih besar daripada nilai di simulasi. Untuk induktor L2, arus yang terbaca sebesar 6,2 A dan *ripple* arusnya sebesar 5,2 A. Nilai tersebut berbeda dengan nilai yang terdapat pada simulasi. Perbedaan nilai-nilai antara implementasi dan simulasi diakibatkan oleh beberapa faktor, seperti ketidak idealan komponen yang digunakan, desain induktor yang tidak sempurna yang mengakibatkan terdapat resistansi dalam pada induktor, serta frekuensi tinggi yang mengakibatkan perubahan nilai induktansi pada induktor. Sehingga untuk menghasilkan tegangan 240 V di sisi *output*, dibutuhkan arus yang lebih besar.



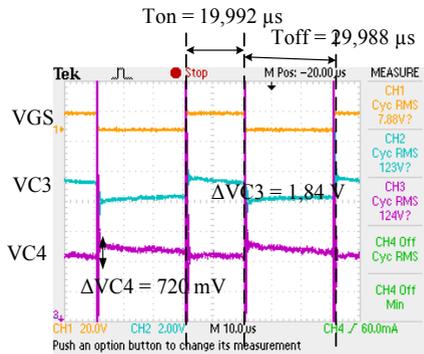
Gambar 4.2 Bentuk Sinyal V_{GS}, IL1, dan IL2

4.2.3 Pengujian Tegangan Kapasitor C1, C2, C3, C4, dan C5

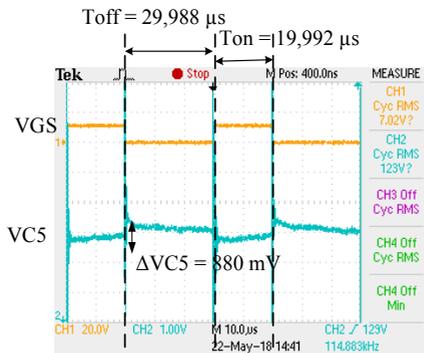
Pengujian tegangan kapasitor digunakan untuk mengetahui kesesuaian antara bentuk gelombang pada implementasi dengan simulasi. Selain itu, pengujian juga dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan dan *ripple* tegangan kapasitor. Bentuk tegangan kapasitor C1, C2, C3, C4, dan C5 dapat dilihat pada gambar 4.3.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.3 Bentuk Gelombang Tegangan Kapasitor. (a) Kapasitor C1 dan C2. (b) Kapasitor C3 dan C4. (c) Kapasitor C5

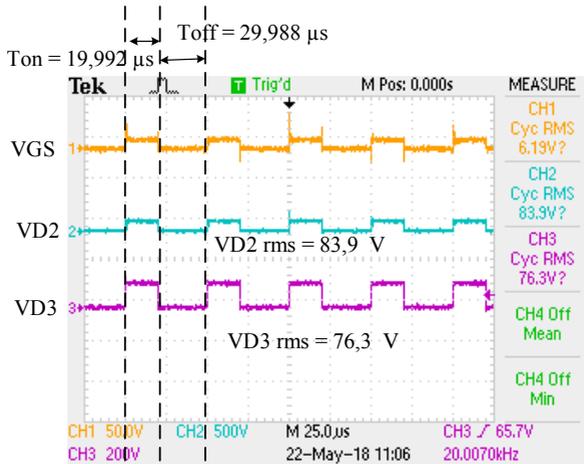
Berdasarkan gambar 4.3, dapat diketahui saat sakelar mode tertutup (t_{on}), kapasitor C1, C2, C4, dan C5 mengalami fase *discharging* dan kapasitor C3 mengalami fase *charging*. Sedangkan pada saat sakelar mode terbuka (t_{off}), kapasitor C1, C2, C4, dan C5 mengalami fase *charging* dan kapasitor C3 mengalami fase *discharging*. Nilai tegangan yang terbaca pada tiap kapasitor adalah 73,7 V untuk C1, 48,2 V untuk C2, 123 V untuk C3, 124 V untuk C4, dan 123 V untuk C5. Sedangkan *ripple* tegangan yang terbaca pada tiap kapasitor adalah 2 V untuk C1, 760 mV untuk C2, 1,84 V untuk C3, 720 mV untuk C4, dan 880 mV untuk C5. Nilai-nilai yang terbaca pada implementasi memiliki perbedaan terhadap nilai-nilai yang terdapat pada simulasi. Hal ini terjadi karena beberapa beberapa faktor, seperti komponen yang digunakan pada simulasi dalam keadaan ideal, sedangkan pada implementasi tidak dalam kondisi ideal. Hal ini dikarenakan terdapat resistansi dalam pada kapasitor. Selain itu, terdapat nilai toleransi kapasitansi pada frekuensi dan suhu tertentu yang menyebabkan nilai kapasitansi tidak terlalu sama dengan yang tertera pada produk. Dan pada kapasitor yang digunakan pada implementasi memiliki arus bocor pada nilai tertentu [13].

4.2.4 Pengujian Tegangan Dioda D2, D3, D4, dan D5

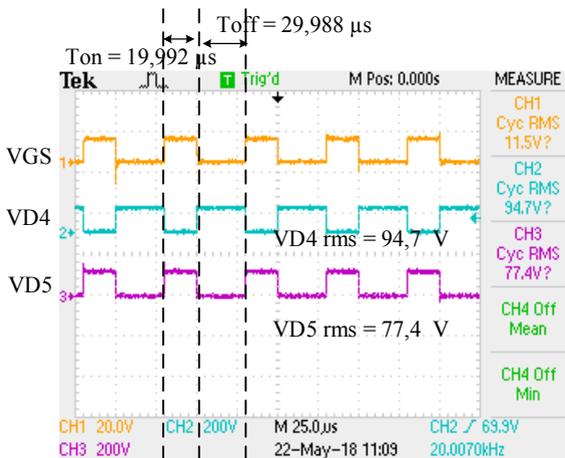
Pengujian gelombang tegangan dioda untuk mengetahui apakah sinyal yang dihasilkan oleh dioda pada implementasi sesuai dengan yang ada di simulasi. Peran dari dioda D2, D3, D4, dan D5 pada konverter ini yaitu untuk memastikan arah aliran arus saat mode sakelar tertutup maupun saat terbuka sesuai dengan simulasi. Sedangkan dioda D1 berperan sebagai penahan arus *reverse* agar sumber DC tidak rusak. Bentuk gelombang dioda D2, D3, D4, dan D5 dapat dilihat pada gambar 4.4.

Pada saat sakelar tertutup (t_{on}), tidak arus yang mengalir melalui dioda D2, D3, D5. Sehingga timbul tegangan *reverse* pada dioda. Sedangkan arus mengalir pada dioda D4 yang menyebabkan tegangan dioda nol. Namun ketika sakelar terbuka (t_{off}), arus mengalir melalui dioda D2, D3, dan D5 yang menyebabkan tegangan pada tiga dioda tersebut nol. Sedangkan pada dioda D4, arus tidak mengalir pada anoda ke katodanya, sehingga muncul tegangan *reverse* pada dioda D4. Bentuk gelombang dioda D2, D3, D4, dan D5 sesuai dengan bentuk gelombang di simulasi. Tegangan yang terbaca pada tiap dioda yaitu 83,9 V pada D2, 76, 3 V pada D3, 94, 7 V pada D4, dan 77,4 V pada D5. Nilai-nilai

tegangan yang terbaca pada implementasi berbeda dengan yang terdapat pada simulasi. Hal ini terjadi karena komponen pada implementasi dalam kondisi tidak ideal, sedangkan pada simulasi kondisi komponen ideal.



(a)

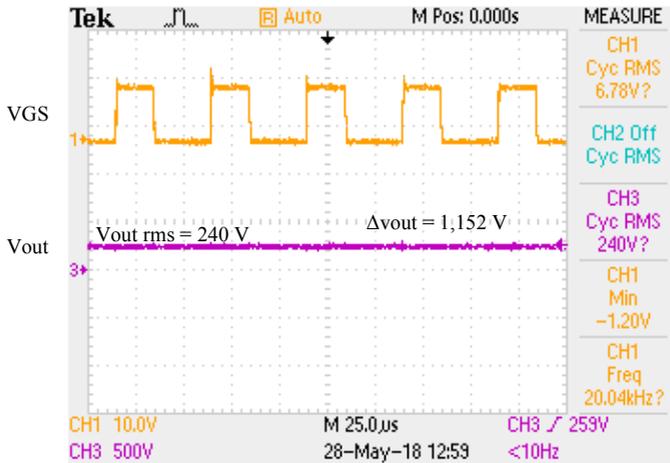


(b)

Gambar 4.4 Bentuk Gelombang Tegangan pada Dioda. (a) Dioda D2 dan D3. (b) Dioda D4 dan D5

4.2.5 Pengujian Tegangan *Output* Konverter

Pengujian tegangan *output* konverter bertujuan untuk memastikan apakah konverter telah mampu meningkatkan tegangan dari 30 Volt menjadi 240 Volt sesuai dengan desain dan simulasi yang telah dikerjakan. Bentuk gelombang tegangan *output* dapat dilihat pada gambar 4.5.



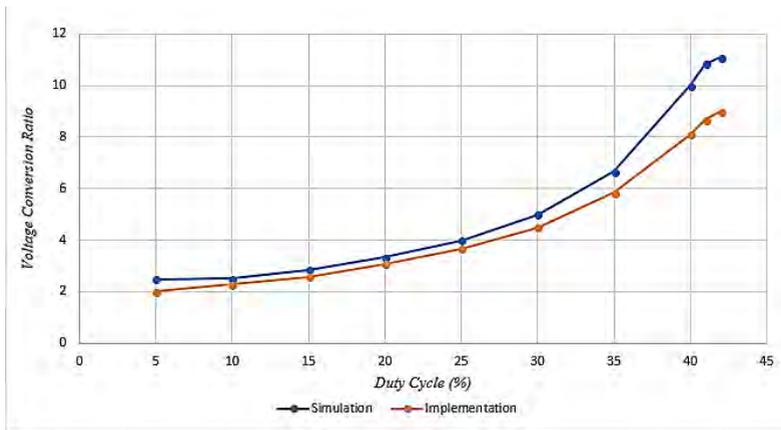
Gambar 4.5 Bentuk Gelombang V_{GS} dan Tegangan *Output*

Berdasarkan gambar 4.5, besar tegangan *output* konverter sebesar 240 V. Hal ini sudah sesuai dengan desain yang telah dilakukan. Sedangkan besar *ripple* tegangan *output* yang terukur sebesar 1,152 V. Nilai ini berbeda dengan nilai yang terdapat pada simulasi, yakni 155 mV. Hal ini terjadi karena komponen yang digunakan pada simulasi dalam kondisi ideal, sedangkan komponen yang digunakan dalam implementasi dalam kondisi tidak ideal.

4.3 Pengujian Rasio Konversi Tegangan Konverter

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui rasio konversi dari implementasi rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi. Rasio konversi tegangan merupakan perbandingan antara tegangan *input* dengan tegangan *output* konverter. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengubah nilai *duty cycle* dengan

tegangan *input* yang tetap. Secara teori, semakin besar nilai *duty cycle* maka semakin besar nilai rasio konversi tegangannya sehingga tegangan *output* akan semakin besar. Pengujian kali ini menggunakan tegangan *input* konstan 30 V. Nilai *duty cycle* diubah-ubah dari 5 - 42%. Pembatasan *duty cycle* hanya sampai 42 % karena jika *duty cycle* di atas nilai tersebut, maka arus yang melalui *drain-source* akan semakin besar yang mengakibatkan kaki *drain-source* mengalami *short circuit*. Hasil dari pengujian akan dibandingkan dengan hasil dari simulasi. Grafik rasio konversi konverter hasil pengujian yang dibandingkan dengan simulasi dapat dilihat pada gambar 4.6.

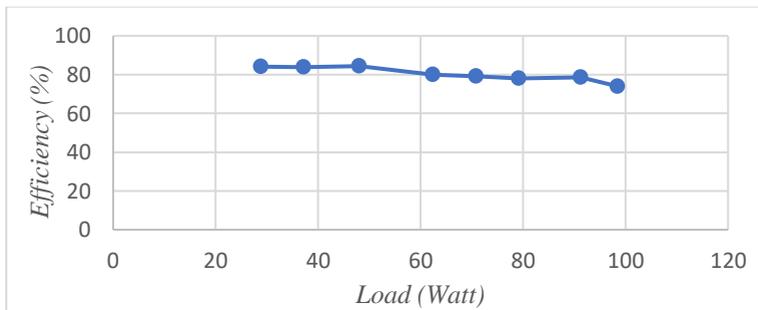


Gambar 4.6 Perbandingan Rasio Konversi Konverter Antara Simulasi dengan Implementasi

Berdasarkan gambar 4.6, dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai *duty cycle*, maka semakin besar nilai rasio konversi tegangan konverter. Selain itu, terdapat perbedaan antara simulasi dengan implementasi. Semakin besar nilai *duty cycle*, maka perbedaan rasio konversi antara simulasi dengan implementasi akan semakin besar. Perbedaan nilai rasio konversi tegangan antara simulasi dengan implementasi diakibatkan oleh faktor ketidak idealan komponen. Tiap komponen memiliki resistansi dalam yang menyebabkan terjadinya drop tegangan. Semakin besar nilai *duty cycle*, maka semakin besar arus yang masuk konverter dan semakin besar pula drop tegangan yang terjadi.

4.4 Pengujian Efisiensi Konverter

Pengujian efisiensi konverter bertujuan untuk mengetahui besarnya efisiensi konverter pada daya luaran yang berbeda-beda. Pengujian dilakukan dengan cara menjaga konstan tegangan *input* 30 V dan tegangan *output* 240 V dengan bervariasi beban rangkaian. Pada saat pengujian, diukur nilai tegangan-arus *input* dan *output*, lalu akan dibandingkan antara daya *input* dan *output* pada beban tiap beban yang ditentukan. Pengujian beban diatur mulai dari beban 30 Watt sampai 100 Watt. Hasil pengujian efisiensi dapat dilihat pada gambar 4.7.



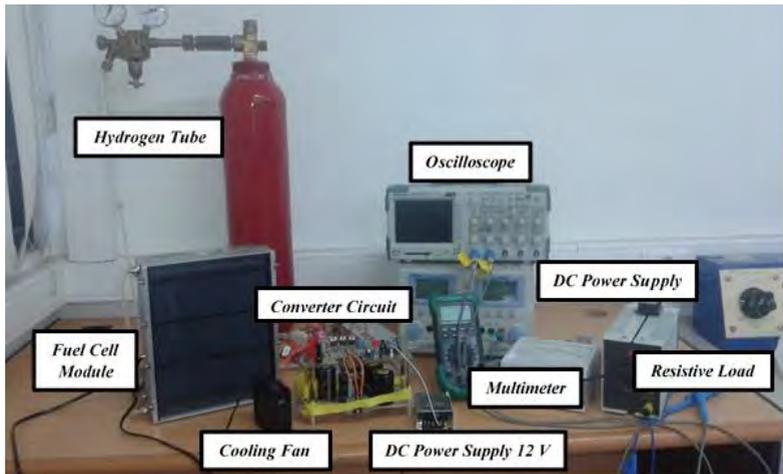
Gambar 4.7 Pengujian Efisiensi Konverter

Berdasarkan gambar 4.7, dapat diketahui bahwa konverter dapat bekerja secara optimal ketika diberi pembebanan 30 sampai 60 Watt, yang ditunjukkan dengan efisiensi di atas 80%. Rata-rata efisiensi konverter sebesar 80,3%. Semakin besar pembebanan, maka efisiensi dari konverter akan semakin turun. Hal ini dikarenakan semakin besar pembebanan, maka arus yang diserap akan semakin besar. Karena komponen yang digunakan implementasi tidak dalam kondisi ideal, maka arus yang semakin besar mengakibatkan semakin besarnya rugi-rugi daya.

Beberapa upaya dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dari konverter, seperti pemilihan spesifikasi komponen yang lebih baik lagi. Spesifikasi komponen yang baik akan mengurangi sifat *parasitic component* pada komponen yang dipilih. Selain itu, juga perlu diperhatikan sistem pendingin pada komponen semikonduktor, seperti dioda dan mosfet yang mudah panas.

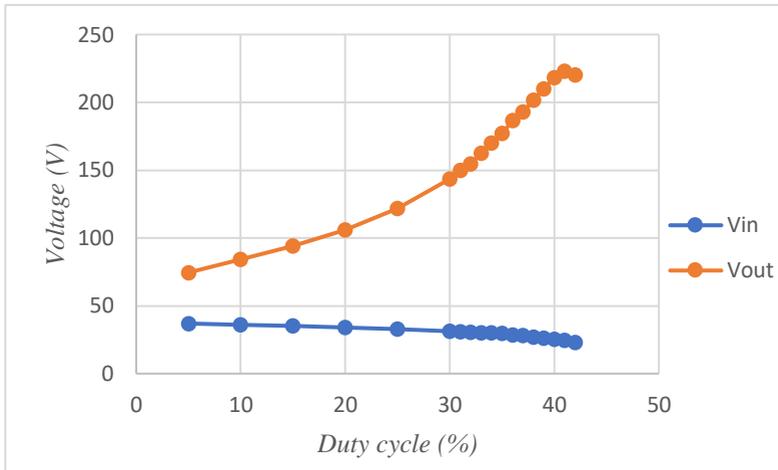
4.5 Pengujian Menggunakan Modul *Fuel Cell*

Pengujian konverter dengan menggunakan modul *fuel cell* digunakan untuk mengetahui kinerja pembangkitan tegangan konverter dengan terhubung secara langsung pada *fuel cell*. Modul *fuel cell* yang digunakan merupakan modul *fuel cell* Horizon H-1000 yang tersedia pada laboratorium konversi energi listrik. Perlengkapan yang digunakan selama pengujian konverter menggunakan modul *fuel cell* dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Pengujian Konverter Menggunakan Modul *Fuel Cell*

Dalam pengujian *fuel cell*, tekanan gas hidrogen diatur konstan antara 0,45 – 0,5 bar. Aliran gas yang masuk ke *fuel cell* akan diatur secara otomatis oleh kran hidrogen pada sistem *fuel cell*. Banyaknya gas yang masuk ke *fuel cell* bergantung dengan kebutuhan daya yang dibutuhkan. Hasil pengujian tegangan *output* konverter dengan menggunakan modul *fuel cell* dapat dilihat pada gambar 4.9.

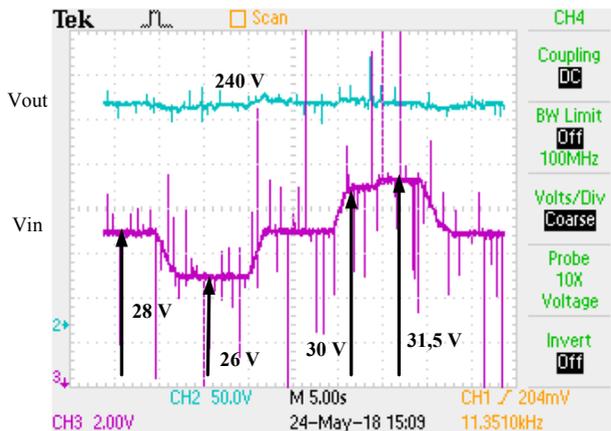


Gambar 4.9 Hasil Pengujian Tegangan Konverter dengan Modul *Fuel Cell*

Berdasarkan gambar 4.9, tegangan *input* yang berasal dari *fuel cell* akan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya nilai *duty cycle*. Hal ini karena semakin besar nilai *duty cycle*, maka arus yang mengalir juga akan semakin besar. Berdasarkan karakteristik *fuel cell*, semakin besar arus luaran *fuel cell*, maka tegangan *fuel cell* akan semakin kecil. Saat *duty cycle* 5%, tegangan *fuel cell* 36,95 V dan saat *duty cycle* 42%, tegangan *fuel cell* 23 V. Berdasarkan spesifikasi modul *fuel cell* yang terdapat di bab 2, seharusnya *fuel cell* akan *shutdown* secara otomatis. Namun karena peralatan yang terdapat di laboratorium sudah mengalami penurunan efisiensi, maka saat tegangan 23 V arus yang mengalir sebesar 6 A. Nilai arus yang relatif masih rendah dibandingkan dengan yang tertera di *datasheet* yang menyebabkan *fuel cell* tidak *shutdown* secara otomatis. Pengujian dibatasi sampai *duty cycle* sebesar 42% karena jika nilai *duty cycle* dinaikkan lagi, maka arus yang mengalir pada *drain-source* mosfet cukup besar yang akan menyebabkan kaki *drain-source* mosfet menjadi *short circuit*. Sehingga pada pengujian konverter dengan menggunakan modul *fuel cell* didapatkan tegangan *output* maksimal sebesar 223 V pada *duty cycle* 41% dengan tegangan *input* dari *fuel cell* sebesar 24,6 V.

4.6 Pengujian Konverter Dalam Kondisi Tegangan *Input* Dinamis

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah konverter dapat merespon perubahan tegangan *input* dengan menghasilkan tegangan yang konstan sesuai dengan simulasi yang telah dilakukan. Tegangan *input* menggunakan suplai dari *DC power supply*. Metode pengujian dilakukan dengan cara mengubah-ubah besar tegangan *input*. Semakin besar tegangan *input*, maka tegangan *output* juga akan semakin besar. Begitu pula dengan sebaliknya. Maka dari itu, kontrol *duty cycle* harus bisa merespon secara otomatis dengan mengubah nilai *duty cycle* yang diberikan agar tegangan *output* konstan. Hasil pengujian konverter dengan kondisi tegangan *input* berubah-ubah dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Hasil Pengujian Konverter dengan Tegangan *Input* Dinamis

Perubahan tegangan *input* yang ditunjukkan pada gambar 4.8 akan mengakibatkan nilai *duty cycle* juga berubah-ubah. Respon kontrol *duty cycle* pada konverter sudah berjalan dengan baik. Hal ini terbukti dengan tegangan *output* yang konstan pada nilai 240 V. Dapat disimpulkan bahwa konverter dapat menjaga tegangan *output* konstan meskipun tegangan *input* berubah-ubah.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan menguraikan kesimpulan dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data yang telah diperoleh dari hasil simulasi dan pengujian implementasi, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Implementasi rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi dapat menaikkan tegangan dari 30 Volt menjadi 240 Volt, sehingga nilai penguatan tegangan konverter adalah 8 kali dengan kondisi beban penuh (100 Watt).
2. Konverter memiliki penguatan tegangan (*gain*) yang tinggi karena dapat menaikkan tegangan hingga 8 kali.
3. Terdapat perbedaan nilai *ripple* tegangan pada kapasitor dan *ripple* arus pada induktor antara hasil simulasi dengan hasil pengujian implementasi. Hal ini terjadi karena komponen dalam simulasi dalam kondisi ideal, sedangkan komponen yang digunakan dalam implementasi tidak dalam kondisi ideal.
4. Besar nilai tegangan *stress* pada tiap komponen maksimal setengah dari besar tegangan *output* konverter.
5. Efisiensi rata-rata dari implementasi rangkaian *quasi-z source boost dc-dc converter* dengan penguatan tegangan tinggi sebesar 80,3%.
6. Pada sistem kerja tegangan *input* dinamis, konverter dapat mempertahankan tegangan *output* konstan 240 V dengan tegangan *input* yang diberikan berkisar 26 – 31,5 V.

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan untuk refrensi penelitian selanjutnya adalah :

1. Pemilihan komponen dengan spesifikasi lebih baik, yang dapat bekerja dengan baik di tegangan dan frekuensi tinggi.

2. Pemilihan sakelar semikonduktor dengan spesifikasi lebih baik yang memiliki resistansi *drain-source* yang lebih rendah.
3. Penggunaan sistem pendingin yang lebih baik terutama untuk komponen semikonduktor sehingga dapat mengurangi drop tegangan dan efisiensi menjadi lebih baik lagi.
4. Modul *fuel cell* yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik seharusnya sering digunakan. Karena jika modul *fuel cell* jarang digunakan, maka akan mengalami penurunan efisiensi. Panduan untuk perawatan modul *fuel cell* terdapat di *manual book* yang tersedia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Moldrik and R. Chvialek, "PEM fuel cells - The basic characteristics," *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, pp. 1–4, 2011.
- [2] H-1000 Fuel Cell Stack User Manual, V4.4, Horizon, 2013.
- [3] P. Poovarasam, M. Saraswathi, and R. Nandhini, "Analysis of high voltage gain DC-DC boost converter for renewable energy applications," in *2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, 2015, pp. 320–324.
- [4] D. Vinnikov, I. Roasto, R. Strzelecki, and M. Adamowicz, "Step-up DC/DC converters with cascaded quasi-Z-source network," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 10, pp. 3727–3736, 2012.
- [5] Y. Zhang *et al.*, "Wide Input-Voltage Range Boost Three-Level DC-DC Converter with Quasi-Z Source for Fuel Cell Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 9, pp. 6728–6738, 2017.
- [6] H. Suhada, "Fuel Cell Sebagai Pengganti Motor Bakar Pada Kendaraan," *J. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 85–91, 2001.
- [7] H. Suhada, "Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Abad 21," *J. Tek. Mesin*, vol. 3, no. 2, pp. 92–99, 2001.
- [8] American Wire Gauge Conductor Size Table, SOLARIS, pp. 53–55.
- [9] "0077548a7", MAGNETICS, no.1, p. 77548, 2016.
- [10] MUR1560 Switch-mode Power Rectifier, ON Semiconductor, pp. 1-8, 2014.
- [11] RURG8060 80A, 600V Ultrafast Diode, FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, January 2002.
- [12] PDP SWITCH IRFP4332Pbf, International IOR Rectifier, pp. 1-9, 2009.
- [13] ALUMINIUM ELECTROLYTIC CAPACITORS, nichicon, 2011.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Program Arduino

a. *Open Loop*

```
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
  
    pinMode(9,OUTPUT);  
    pinMode(A0, INPUT);  
    Serial.begin(9600);  
  
    //phase and Frequency Correct PWM  
    TCCR1A = _BV(COM1A1); //untuk mengatur up counting dan  
    downcounting  
    TCCR1B = _BV(WGM13)|_BV(CS10); //WGM untuk pengaturan  
    mode PWM // CS untuk mencari nilai N  
    ICR1 = 400; // ICR1 mencari nilai TOP untuk frekuensi  
    OCR1A= 160 ;  
}  
  
void loop() {  
    // put your main code here, to run repeatedly:  
    Serial.print(analogRead(A0));  
    Serial.print("\t");
```

```
delay(500);  
}
```

b. Close Loop

```
#include <PID_v1.h>  
  
double Setpoint, Input, Output;  
double Kp=0.08, Ki=0.5, Kd=0;  
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);  
  
void setup() {  
    // put your setup code here, to run once:  
  
    pinMode(9,OUTPUT);  
    pinMode(A0,INPUT);  
    Serial.begin(9600);  
  
    //phase and Frequency Correct PWM  
    TCCR1A = _BV(COM1A1); //untuk mengatur up counting dan  
    downcounting  
    TCCR1B = _BV(WGM13)|_BV(CS10); //WGM untuk pengaturan  
    mode PWM // CS untuk mencari nilai N  
    ICR1 = 400; // ICR1 mencari nilai TOP untuk frekuensi  
    OCR1A= Output ;
```

```

Input = analogRead(A0);
Setpoint = 483; //240/480 *1023

myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(0,172);//42%
}

void loop() {
    myPID.SetMode(AUTOMATIC);
myPID.SetOutputLimits(130,172);//42%
    // put your main code here, to run repeatedly:
Input = analogRead(A0);
    myPID.Compute();
    analogWrite(9, Output);
Setpoint = 483; //240/480 *1023
Serial.print(analogRead(A0));
    Serial.print(" ");
    Serial.println(Output);
    delay(500);
}

```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Buku penelitian dengan judul “**Desain Dan Implementasi *Quasi-Z Source Boost Dc-Dc Converter* dengan Penguatan Tegangan Tinggi Untuk Aplikasi *Fuel Cell*”** dikerjakan oleh penulis dengan nama lengkap Agyl Muhammad. Penulis yang akrab disapa dengan Agyl lahir di Sidoarjo pada tanggal 20 November 1996. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di MI Darul Muta’alimin, tingkat pertama di SMPN 1 Taman, tingkat akhir di SMA Wakhid Hasyim 2 Taman, serta sedang menempuh pendidikan tinggi di departemen teknik elektro ITS. Selama aktif sebagai mahasiswa, penulis aktif di beberapa organisasi, seperti himpunan mahasiswa teknik elektro, lembaga dakwah jurusan Kalam elektro ITS, serta tim trainer keilmiahan integrator ITS. Penulis juga aktif sebagai asisten di Laboratorium Konversi Energi Listrik Teknik Elektro ITS.

Halaman ini sengaja dikosongkan