



TUGAS AKHIR -TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI Z-SOURCE INVERTER 3
FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL
UNTUK SUPLAI MOTOR INDUKSI**

Rifki Dwisetyo Wicaksono
NRP 2213 100 089

Dosen Pembimbing
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT-TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF 3 PHASE Z-SOURCE
INVERTER WITH SIMPLE BOOST CONTROL METHOD
FOR INDUCTION MOTOR SUPPLY**

Rifki Dwisetyo Wicaksono
NRP 2213 100 089

Advisor
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.
Danar Fahmi, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Desain dan Implementasi Z-Source Inverter 3 Fasa dengan Metode Simple Boost Control untuk Suplai Motor Induksi**” 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, Januari 2017

Rifki Dwisetyo Wicaksono
NRP. 2213 100 089

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI Z-SOURCE
INVERTER DENGAN METODE SIMPLE BOOST
CONTROL UNTUK SUPLAY MOTOR INDUKSI**

TUGAS AKHIR

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

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1

13/01/17

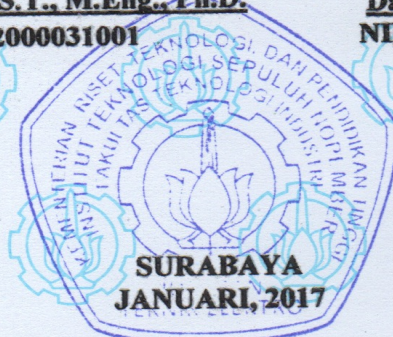
Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197311192000031001

Dosen Pembimbing 2

Daniar Fahmi, S.T., M.T.

NIP. 198909252014041002



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

ABSTRAK

Aplikasi dari energi terbarukan semakin banyak dikembangkan terutama penelitian mengenai *photovoltaic* dan *fuel cell*. Namun, kendala utama pada *photovoltaic* dan *fuel cell* yaitu memiliki tegangan keluaran yang rendah sehingga diperlukan sebuah konverter peningkat tegangan sebelum dapat diaplikasikan untuk *inverter*. Penggunaan inverter dengan penambahan topologi peningkat tegangan menyebabkan rugi – rugi konverter semakin besar. Selain itu, kendala utama pada topologi *voltage source inverter* yaitu tidak dapat beroperasi sebagai *buck-boost* konverter, diperlukannya *dead time* pada kontrol gate, dan kondisi *shoot through zero state* akan menyebabkan kerusakan pada *inverter*. Oleh karena itu, diperlukan desain topologi *inverter* yang memiliki kemampuan konversi *boost* dan tahan terhadap kondisi *shoot through zero state*. Z-Source inverter merupakan pengembangan dari *voltage source inverter* dengan penambahan rangkaian sumber impedansi dan kontrol penyalan menggunakan *simple boost control*. Efisiensi Z-Source inverter dapat mencapai 88%. Faktor peningkatan tegangan dapat mencapai 2.4 kali dengan menggunakan *shoot through duty ratio* sebesar 16%. Z-Source inverter mampu mengontrol kecepatan motor induksi berdasarkan v/f konstan dengan cara merubah nilai *shoot through duty ratio* dan frekuensi fundamental. Jadi inverter ini sangat cocok untuk diaplikasikan sebagai topologi dengan kemampuan meningkatkan tegangan input dan digunakan sebagai kontrol kecepatan motor induksi.

Kata kunci : **Motor Induksi, Simple Boost Control, Voltage Source Inverter, Z-Source Inverter**

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

ABSTRACT

The development of renewable energy such as photovoltaic and fuel cell are commonly popular. But, the main problem of photovoltaic and fuel cell is the output voltage very low so a boost converter is needed to boost the DC voltage before applied to inverter. The use of inverter with additional boost topology would make more losses in converter. Not only that but also voltage source inverter can not operate in buck-boost mode, need dead time and shoot through zero states are not allowed to avoid inverter problems. A topology with ability to boost and resist during shoot through zero states. Z-Source inverter is the development of voltage source inverter with an addition of impedance network and controlled using simple boost method. Z-Source inverter can achieve 88% in efficiency. The boost factor can go up to 2.4 times with addition of 16% shoot through duty ratio. Z-Source inverter can control induction motor speed based on v/f constant by adjusting the value of shoot through duty ratio and fundamental frequency. So, Z-Source inverter is the best topology to boost the input voltage and applicable to use it as speed control of induction motor.

Keywords : Induction Motor, Simple Boost Control, Voltage Source Inverter, Z-Source Inverter

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Pertama-tama, marilah kita panjatkan puji dan syukur kehadirat Tuhan yang Maha Esa karena atas berkat, rahmat dan hidayat-Nya, saya selaku penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul: **“Desain dan Implementasi Z-Source Inverter 3 Fasa dengan Metode Simple Boost Control untuk Suplai Motor Induksi”** dengan baik. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi orang lain terutama pembaca.

Sehubungan dengan proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang membantu dan membimbing dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Secara khusus penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Kuswadi, Ibu Herini Subekti dan Kakak Arista Hadi Pratama, yang merupakan keluarga tercinta dan senantiasa memberikan semangat, dukungan dan doa yang sangat berarti.
2. Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. dan Daniar Fahmi, ST., MT. serta dosen jurusan Teknik Elektro yang telah membimbing dengan sabar dan memberikan beberapa saran dan masukan yang sangat penting bagi penulis.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D selaku kepala laboratorium konversi energi listrik yang telah membina dan memfasilitasi asisten laboratorium
4. Rekan-rekan E53, Asisten Lab Konversi Energi Listrik, dan semua mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan semangat dan motivasi untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Angga Setyawan yang merupakan sahabat dekat dan senantiasa memberikan masukan, dukungan, semangat dan doa.
6. Abednego Indra Adiatma yang merupakan sahabat dekat dan senantiasa memberikan masukan, dukungan, semangat dan doa.
7. Ziyad Syauqi Fawwazy yang merupakan sahabat dekat dan senantiasa memberikan masukan, dukungan, semangat dan doa.
8. Azkaa Khoiruddin yang merupakan sahabat dekat dan senantiasa memberikan masukan, dukungan, semangat dan doa.
9. M. Malik Airlangga yang merupakan sahabat dekat dan senantiasa memberikan masukan, dukungan, semangat dan doa.

10. Martharika Karinda Wibowo yang telah menjadi motivasi dari proyek tugas akhir ini sehingga dapat terealisasi sesuai target dan tepat waktu.
11. Silfira Kurniasih yang telah memberikan dukungan, motivasi dan doa yang sangat berarti untuk menyelesaikan penelitian ini.
12. Seluruh teman - teman kelas Metalcore XI IA-6 SMA 3 Malang yang telah memberikan dukungan dan doa untuk menyelesaikan tugas akhir ini
13. Alumni Bhawikarsu 2013 dan 2014 yang telah mendukung dan memberikan dukungan dan doa.

Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih terhadap pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan. Mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kesalahan kata yang dapat menyinggung pembaca. Saya ucapkan sekian dan terima kasih.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5

BAB 2 Z-SOURCE INVERTER 3 FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL

2.1 <i>Voltage Source Inverter</i>	7
2.1.1 Dual Stage <i>Voltage Source Inverter</i>	8
2.1.2 Penurunan Persamaan Rasio Peningkatan Tegangan	9
2.2 <i>Z-Source Inverter</i> 3 Fasa	11
2.2.1 Analisa Rangkaian Ekuivalen <i>Z-Source Inverter</i> ..	14
2.2.2 Penurunan Persamaan Rasio Konversi Inverter	15
2.2.3 Penurunan Parameter Komponen	18
2.2.3.1 Induktor	18
2.2.3.2 Kapasitor	19
2.2.3.3 Stres Tegangan dan Arus pada Komponen	19
2.2.4 <i>Simple Boost Control</i>	20
2.3 Motor Induksi 3 Fasa	22
2.3.1 Cara Kerja Motor Induksi 3 Fasa	22
2.3.2 Kontrol Kecepatan Motor Induksi	23

BAB 3 DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI INVERTER	
3.1 Diagram Blok Sistem.....	25
3.2 Motor Induksi.....	26
3.3 Desain <i>Z-Source Inverter</i> dengan Metode <i>Simple Boost Control</i>	27
3.3.1 Penentuan Rasio Konversi dan <i>Shoot Through Duty Ratio</i>	28
3.3.2 Penentuan Nilai Induktor	28
3.3.3 Penentuan Nilai Kapasitor	29
3.4 Simulasi pada Kondisi <i>Steady State</i>	29
3.5 Implementasi <i>Z-Source Inverter</i>	34
3.5.1 Kapasitor.....	34
3.5.2 Induktor.....	34
3.5.3 Penentuan Dioda.....	36
3.5.4 Penentuan MOSFET	37
3.5.5 Desain <i>Simple Boost Control</i>	37
3.5.6 Hasil Implementasi <i>Z-Source Inverter</i>	38
 BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	
4.1 Alat Pengujian.....	41
4.2 Pengujian Sinyal <i>Simple Boost Control</i>	42
4.3 Pengujian Sinyal Pensaklaran pada Kapasitor dan Induktor	43
4.4 Tegangan DC Bus	45
4.5 Pengujian Pada Motor Induksi 3 Fasa	46
4.6 Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus Output Inverter.....	49
4.7 Pengujian Efisiensi <i>Z-Source Inverter</i>	51
4.8 Pengujian Faktor Peningkatan Tegangan	52
4.9 Pengujian Kontrol Kecepatan Motor Induksi	53
 BAB 5 PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Topologi <i>Voltage Source Inverter</i> 3 fasa.....	7
Gambar 2.2	Topologi <i>Dual Stage Voltage Source Inverter</i>	9
Gambar 2.3	Rangkaian Ekuivalen <i>Continous Conduction Mode</i> pada Saat Kondisi Saklar Tertutup.....	9
Gambar 2.4	Rangkaian Ekuivalen <i>Continous Conduction Mode</i> pada Saat Kondisi Saklar Terbuka.	10
Gambar 2.5	Sinyal Pensaklaran pada Arus dan Tegangan Induktor dari <i>Boost Converter</i>	11
Gambar 2.6	Topologi <i>Z- Source Inverter</i> 3 fasa	12
Gambar 2.7	Rangkaian Ekuivalen <i>Z-Source Inverter</i> pada Kondisi Aktif.....	14
Gambar 2.8	Rangkaian Ekuivalen <i>Z-Source Inverter</i> pada Kondisi <i>Null</i>	14
Gambar 2.9	Rangkaian Ekuivalen <i>Z-Source Inverter</i> pada Kondisi <i>Shoot Through Zero States</i>	15
Gambar 2.10	Sinyal Pensaklaran pada Tegangan dan Arus Induktor dari <i>Z-Source Inverter</i>	16
Gambar 2.11	Perbandingan Tegangan Kapasitor dan Tegangan Induktor.....	18
Gambar 2.12	Sinyal PWM dari <i>Simple Boost Control</i>	21
Gambar 2.13(a)	Rotor Jenis <i>Cage</i> pada Motor Induksi	22
Gambar 2.13(b)	Rotor Jenis <i>Wound</i> pada Motor Induksi	22
Gambar 2.14	Kurva Karakteristik Torsi vs Kecepatan pada Motor Induksi.....	23
Gambar 3.1	Diagram Blok Keseluruhan Sistem <i>Inverter</i>	25
Gambar 3.2	Rangkaian Simulasi ZSI pada Kondisi <i>Steady State</i>	30
Gambar 3.3	Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} , V_C , V_L , dan Arus I_L	31
Gambar 3.4	Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} , V_{PN} , V_{IN} , dan Arus I_{IN}	32
Gambar 3.5	Bentuk Gelombang Tegangan V_{LL_A} , V_{LL_B} , V_{LL_C} , dan Arus I_L	33
Gambar 3.6(a)	Spektrum Frekuensi Tegangan Keluaran <i>Inverter</i>	33
Gambar 3.6(b)	Spektrum Frekuensi Arus Keluaran <i>Inverter</i>	33
Gambar 3.7	Kurva Magnetisasi Bahan Inti N27.....	35
Gambar 3.8	Diagram Blok <i>Simple Boost Control</i>	38

Gambar 3.9	Hasil Implementasi Alat Z-Source Inverter	39
Gambar 4.1	Alat Pengujian Z-Source Inverter 3 Fasa	41
Gambar 4.2	Hasil Pengujian Sinyal <i>Simple Boost Control</i>	42
Gambar 4.3	Sinyal Hasil Pensaklaran MOSFET	43
Gambar 4.4	Bentuk Sinyal Pensaklaran pada Induktor dan Kapasitor	44
Gambar 4.5	Hasil Pengujian sinyal Tegangan V_{PN} , V_{IN} , V_{GS} , dan Arus Input I_{IN}	46
Gambar 4.6	Kurva Pengaruh <i>Self Boost</i> pada Z-Source Inverter.	48
Gambar 4.7	Z-Source Inverter dalam Mode DCM	49
Gambar 4.8	Bentuk Sinyal Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus <i>Output Inverter</i>	50
Gambar 4.9	Diagram Fasor Arus dan Tegangan Z-Source Inverter..	50
Gambar 4.10(a)	Spektrum Frekuensi Tegangan <i>Output Inverter</i>	51
Gambar 4.10(b)	Spektrum Frekuensi Arus <i>Output Inverter</i>	51
Gambar 4.11	Kurva Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi <i>Inverter</i>	52
Gambar 4.12	Grafik Pengujian Rasio Peningkatan Tegangan	53
Gambar 4.13(a)	Gelombang Arus <i>Output</i> pada Frekuensi 40 Hz	54
Gambar 4.13(b)	Gelombang Arus <i>Output</i> pada Frekuensi 50 Hz	54
Gambar 4.13(c)	Gelombang Arus <i>Output</i> pada Frekuensi 60 Hz	54
Gambar 4.13(d)	Gelombang Arus <i>Output</i> pada Frekuensi 70 Hz	54
Gambar 4.14	Bentuk Sinyal Pengujian Tegangan dan Arus Output pada Frekuensi 30 Hz	55
Gambar 4.15	Bentuk Sinyal Pengujian Tegangan dan Arus Output pada Frekuensi 50 Hz	55
Gambar 4.16	Bentuk Sinyal Pengujian Tegangan dan Arus Output pada Frekuensi 70 Hz	56
Gambar 4.17	Karakteristik V/f Konstan pada Z-Source Inverter sebagai Kontrol Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kondisi Pensaklaran pada VSI 3 Fasa.....	8
Tabel 2.2	Kondisi Pensaklaran pada <i>Z-Source Inverter</i> 3 Fasa	13
Tabel 3.1	Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa.....	26
Tabel 3.2	Parameter Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi 3 Fasa	27
Tabel 3.3	Spesifikasi Awal Desain <i>Inverter</i>	27
Tabel 3.4	Parameter Rangkaian Simulasi <i>Z-Source Inverter</i> dengan Metode <i>Simple Boost Control</i>	30
Tabel 3.5	Spesifikasi Inti EE65 EPCOS TDK	34
Tabel 3.6	Parameter Komponen <i>Inverter</i> Implementasi.....	38
Tabel 4.1	Hasil pengujian <i>Z-Source Inveter</i> pada pembebanan motor induksi 3 fasa dengan $V_{IN} = 48 \text{ V}$, $M = 0.8$, $f = 50 \text{ Hz}$	47
Tabel 4.2	Hasil Pengujian <i>Z-Source Inverter</i> sebagai Kontrol Kecepatan Motor Induksi untuk $V_{in} = 48 \text{ V}$, $M = 0.8$ dan $\tau = 0 \text{ N.m}$	53

--Halaman ini sengaja dikosongkan --

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik setiap tahun mengalami peningkatan seiring dengan laju pertumbuhan penduduk. Pengembangan dan penelitian mengenai konversi energi listrik menjadi topik utama dari para peneliti dan industri, terutama energi yang berasal dari energi terbarukan. Pada saat ini sistem energi terbarukan yang paling banyak diteliti yaitu *photovoltaic* dan *fuel cell*. Kedua sistem energi terbarukan tersebut berdasarkan energi matahari dan hidrogen yang tidak menimbulkan pencemaran lingkungan.

Photovoltaic dan *fuel cell* telah banyak diteliti untuk dimanfaatkan pada mobil listrik. Kendala utama pada *photovoltaic* dan *fuel cell* adalah pada tegangan DC keluaran yang sangat rendah sehingga diperlukan konverter peningkat tegangan sebelum masuk ke rangkaian inverter [1,2]. Cara yang paling umum digunakan untuk meningkatkan tegangan DC yaitu menggunakan konverter *Boost*. Konverter *Boost* adalah alat yang digunakan untuk meningkatkan tegangan DC keluaran dari *photovoltaic* atau *fuel cell* dengan cara mengatur *duty cycle*. Semakin tinggi nilai *duty cycle* maka rasio peningkatan tegangan semakin besar.

Berbagai topologi inverter telah diusulkan untuk mendapatkan efisiensi konversi dan rasio peningkatan yang tinggi. Salah satunya yaitu dengan menggunakan *dual stage boost voltage source inverter (VSI)* atau *current source inverter (CSI)*. Namun kelemahan dari topologi tersebut yaitu konversi secara *dual stage* menyebabkan efisiensi yang turun karena rugi – rugi *switching* semakin besar, *gate driver* harus didesain secara khusus agar pengaruh dari medan elektromagnetik dapat dihindari karena *shoot through zero state* pada topologi *voltage source inverter* dapat merusak komponen *switching*. Selain itu, pada topologi *voltage source inverter* tidak dapat beroperasi dalam mode *buck-boost* namun hanya dapat beroperasi dalam salah satu mode *buck* atau mode *boost* [3].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka penulis mengusulkan menggunakan topologi *Z-source inverter* dengan metode *simple boost control*. *Z-source inverter* merupakan salah satu topologi yang mampu meningkatkan rasio konversi tegangan hanya melalui satu topologi rangkaian. Dengan diterapkannya topologi ini diharapkan dapat

meningkatkan efisiensi dari *inverter* yang digunakan untuk suplai dan kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa.

1.2 Perumusan Masalah

Tegangan keluaran dari sumber energi baru terbarukan seperti *photovoltaic* dan *fuel cell* masih sangat rendah sehingga ketika akan dihubungkan ke motor induksi maka tegangan masukan harus dinaikan terlebih dahulu. *Dual stage voltage source inverter* adalah topologi yang umum digunakan untuk menaikkan tegangan DC masukan dan kemudian dilanjutkan dengan mengkonversi tegangan DC ke AC. Permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah mendesain dan mengimplementasikan *Z-source inverter* 3 fasa dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi 3 fasa.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada Tugas Akhir ini adalah :

1. Desain dan implementasi *Z-source inverter* 3 fasa dengan metode *simple boost control*.
2. Karakteristik *simple boost control* sebagai strategi pensaklaran *Z-source inverter* 3 fasa.
3. Kinerja *Z-source inverter* 3 fasa untuk aplikasi motor induksi 3 fasa.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang terdapat pada pasaran dan peralatan di laboratorium konversi energi.
2. Pengujian alat menggunakan sumber tegangan DC *variable* yang terdapat pada laboratorium konversi energi listrik dan beban menggunakan motor induksi 3 fasa dengan rating 56 V, 50 Hz dan pengeraman motor yang tersedia pada laboratorium konversi energi listrik.
3. Pengujian *Z-source inverter* hanya dilakukan pada metode *boost*.
4. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dalam kondisi *steady state* dan semua komponen dianggap ideal.

5. Pengujian dilakukan dengan mengabaikan fenomena *self boost* pada *Z-Source inverter*.

1.5 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada Tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Kegiatan mempelajari hal-hal yang berkaitan dengan *Z-Source inverter* 3 fasa dengan metode *simple boost control*. Beberapa hal yang perlu dipelajari diantaranya faktor peningkatan tegangan pada *dual stage voltage source inverter*, cara kerja *Z-Source inverter*, Penurunan parameter *Z-Source inverter*, metode pensaklaran dengan *simple boost control*, pembuatan pensaklaran *simple boost control* menggunakan Arduino dan karakteristik pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa.

2. Desain dan Simulasi

Pada tahap ini dilakukan perhitungan secara matematis mengenai *Z-Source inverter* yang diusulkan, menghitung nilai-nilai komponen yang digunakan pada *inverter*. Selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *software power simulator* untuk memastikan bahwa *inverter* dapat bekerja sesuai dengan desain yang diinginkan.

3. Implementasi Alat

Pada tahap ini dilakukan pembuatan konverter sesuai dengan perhitungan hasil desain. Beberapa komponen yang diperlukan yaitu enam buah *MOSFET*, dua buah kapasitor *polar*, dua buah induktor, satu buah *dioda fast switching*, empat buah *DC power supply* dan satu buah *Arduino Mega 2560*. Setelah tersedia semua komponen diatas, kemudian dilakukan desain *PCB* dan perakitan komponen.

4. Pengujian

Pada tahap ini dilakukan pengujian *Z-Source inverter* yang telah diimplementasikan. Pengujian dilakukan menggunakan sumber DC *variable* yang ada di laboratorium dan beban yang digunakan yaitu motor induksi 3 fasa 56V, 50 Hz dan pengeraman motor yang tersedia pada laboratorium konversi energi listrik. Pada tahap pengujian dilakukan pengambilan data sinyal menggunakan osiloskop dan pengukuran menggunakan peralatan pendukung lainnya.

5. Analisis data

Setelah dilakukan pengujian dan diperoleh data hasil pengujian maka kemudian dilakukan analisis dari data yang telah diperoleh. Analisis dilakukan untuk mengetahui *Z-Source inverter* yang diimplementasikan telah sesuai dengan hasil simulasi yang telah dilakukan pada *software power simulator*. Analisis data meliputi bentuk sinyal pensaklaran *simple boost control*, bentuk sinyal pensaklaran kapasitor dan induktor, spektrum frekuensi serta harmonisa pada tegangan dan arus, rasio peningkatan tegangan, efisiensi daya dari inverter dan performa *Z-Source inverter* untuk aplikasi kontrol kecepatan motor induksi

6. Kesimpulan

Kesimpulan didapatkan berdasarkan hasil analisis data yang diperoleh dari simulasi, perhitungan dan pengujian dari *Z-Source inverter*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisikan penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi Tugas Akhir ini.

BAB 2 Dasar Teori

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang *dual stage voltage source inverter*, *Z-source Inverter*, teknik pensaklaran dengan metode *simple boost control*, dan Motor induksi 3 fasa.

BAB 3 Perancangan dan Implementasi Sistem

Bab ini berisi mengenai perancangan *Z-Source inverter* secara matematis, simulasi menggunakan *software power simulator* dan implementasi *Z-Source inverter* 3 fasa dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi.

BAB 4 Pengujian Sistem dan Analisis Data

Bab ini berisikan pengujian dan analisis data terhadap hasil pengujian dari *Z-Source inverter* dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi 3 fasa.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisikan kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan tugas akhir diharapkan dapat memberikan manfaat, antara lain :

1. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan konverter khususnya mengenai z-source inverter 3 fasa dengan metode simple boost control
2. Menjadi referensi untuk pengembangan single stage buck dan boost inverter 3 fasa
3. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil masalah serupa untuk Tugas Akhir.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

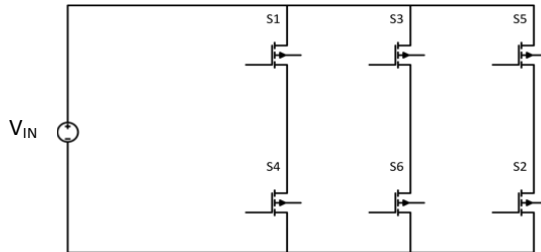
BAB II

Z-SOURCE INVERTER 3 FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL

Z-source inverter (ZSI) merupakan jenis pengembangan dari topologi *voltage source inverter (VSI)* yang terintegrasi dengan sebuah rangkaian impedansi berupa induktor dan kapasitor. *Z-Source inverter* mampu meningkatkan tegangan satu tingkat tanpa memerlukan penambahan komponen pensaklaran dengan menggunakan metode pensaklaran *simple boost control* sehingga mampu meningkatkan tegangan keluaran dari inverter.

2.1 Voltage Source Inverter 3 Fasa

Voltage source inverter merupakan sebuah topologi yang terdiri dari enam buah komponen pensaklaran. Tujuan utama dari *Voltage Source Inverter* yaitu untuk mengubah tegangan DC menjadi AC 3 fasa, dimana amplitudo, fasa dan frekuensi dapat dikontrol.



Gambar 2.1. Topologi *Voltage Source Inverter* 3 fasa.

Komponen pensaklaran S1-S6 tidak dapat dalam kondisi aktif secara bersamaan karena akan menimbulkan hubung singkat pada sumber DC. Tabel 2.1. Merupakan kondisi pensaklaran yang dapat digunakan pada *inverter* 3 fasa. Pada kondisi ke tujuh dan delapan tidak menghasilkan tegangan AC. Pada kondisi tersebut, arus AC mengalir bebas di komponen pensaklaran sisi atas dan bawah. Pada kondisi satu hingga enam, *inverter* menghasilkan tegangan keluaran AC. Untuk menghasilkan gelombang tegangan yang diinginkan, *inverter* beralih dari kondisi satu ke kondisi lainnya. Hal ini menghasilkan tegangan AC terdiri

dari angka diskrit V_i , 0, dan $-V_i$ untuk topologi pada gambar 2.1. Terdapat beberapa teknik pensaklaran yang pada umumnya digunakan untuk membangkitkan gelombang AC pada *inverter* yaitu dengan metode *PWM* dan *SPWM*. Apabila menggunakan metode pensaklaran *SPWM* maka tegangan keluaran inverter dapat dinyatakan dalam rumus

$$\widehat{V}_{ac} = M \frac{V_{in}}{2} \quad (2.1)$$

dimana M adalah indeks modulasi ($M \leq 1$), $\widehat{V}_{ac}$ adalah tegangan rms *phase to netral*, dan V_{in} adalah tegangan masukan *inverter* [4]

Tabel 2.1 Kondisi Pensaklaran pada *Voltage Source Inverter* 3 fasa

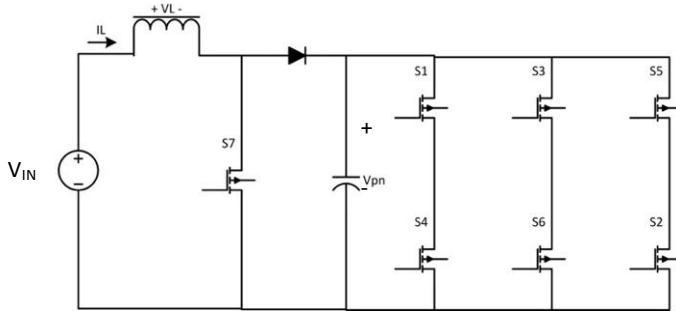
Kondisi	Komponen Pensaklaran						Output Voltage		
	S1	S4	S3	S6	S5	S2	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
Aktif	1	0	0	1	0	1	V_i	0	$-V_i$
	1	0	1	0	0	1	0	V_i	$-V_i$
	0	1	1	0	0	1	$-V_i$	V_i	0
	0	1	1	0	1	0	$-V_i$	0	V_i
	0	1	0	1	1	0	0	$-V_i$	V_i
	1	0	0	1	1	0	V_i	$-V_i$	0
Null	0	1	0	1	0	1	0	0	0
	1	0	1	0	1	0	0	0	0

2.1.1 Dual Stage Voltage Source Inverter

Dual stage voltage source inverter merupakan topologi *voltage source inverter* yang dipadukan dengan topologi tambahan yaitu konverter *boost*. Pada umumnya *Dual stage VSI* digunakan untuk mengatasi salah satu kelemahan dari *VSI* yaitu tidak dapat meningkatkan rasio tegangan masukan. Penambahan topologi konverter *boost* berfungsi sebagai peningkat rasio tegangan DC masukan. Rasio peningkatan tegangan dapat dilakukan dengan cara mengatur *duty cycle* pada komponen pensaklaran di konverter *boost*.

Gambar 2.2 merupakan rangkaian dari topologi *dual stage voltage source inverter*. *Dual stage VSI* terdiri dari tujuh buah saklar, satu buah induktor, kapasitor dan dioda. Saklar S7 berfungsi sebagai proses pensaklaran pada topologi konverter *boost*. Sedangkan pada saklar S1-S6 berfungsi seperti halnya pada inverter pada umumnya. Rasio tegangan dapat diatur dengan merubah besar *duty cycle* pada saklar S7. Semakin

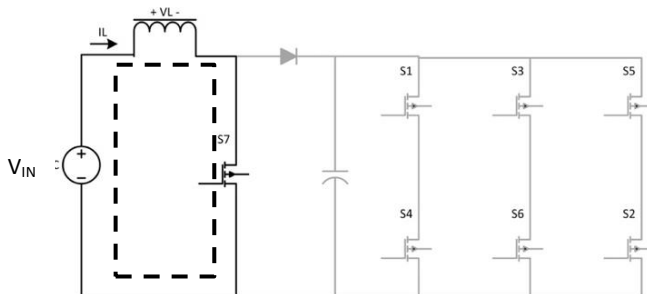
besar nilai dari *duty cycle* maka rasio tegangan akan meningkat dan sebaliknya. Induktor berfungsi sebagai penyimpan tegangan sehingga, ketika saklar S7 pada kondisi tertutup maka tegangan DC bus akan meningkat. Kapasitor C1 berfungsi sebagai filter tegangan DC hasil konversi sehingga *ripple* pada tegangan keluaran konverter *boost* dapat diperkecil. Dioda berfungsi untuk memblokir arus balik sehingga aliran arus hanya akan dialirkan ke arah beban.



Gambar 2.2. Topologi *Dual Stage Voltage Source Inverter*

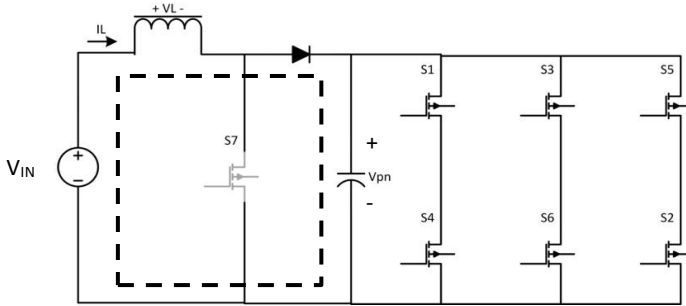
2.1.2 Penurunan Persamaan Rasio Peningkatan Tegangan

Pada stage pertama yaitu sumber DC akan ditingkatkan rasio tegangannya oleh rangkaian konverter *boost*. Pada konverter *boost*, saat kondisi saklar S7 tertutup maka arus pada induktor akan meningkat secara linear dan dioda berada dalam keadaan tidak aktif. Rangkaian ekuivalen konverter boost dalam kondisi S7 tertutup dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Rangkaian Ekuivalen *Continous-conduction mode* pada Saat Kondisi Saklar Tertutup

Pada saat saklar S7 terbuka maka energi yang tersimpan pada induktor L1 akan dilepaskan melalui dioda ke rangkaian *inverter*. Beban seolah olah akan disuplai oleh dua buah sumber yaitu dari sumber DC dan induktor seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Rangkaian Ekuivalen *Continous-conduction mode* pada Saat Kondisi Saklar Terbuka

Bentuk gelombang tegangan dan arus induktor pada kondisi *continous conduction mode* dapat dilihat pada gambar 2.5. Pada analisa *steady state* maka integral waktu dari tegangan induktor dalam satu periode adalah nol [5]

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (2.2)$$

dengan membagi persamaan 2.2 dengan periode pensaklaran, T_s maka didapatkan

$$\frac{V_{PN}}{V_{IN}} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.3)$$

Sehingga nilai tegangan keluaran dari rangkaian boost yaitu

$$V_{PN} = \frac{V_{in}}{1-D} = B V_{in} \quad (2.4)$$

Dual stage voltage source inverter dengan menggunakan SPWM ($0 < M < 1$), sehingga tegangan keluaran dari dual stage inverter yaitu

$$\begin{aligned} \widehat{V}_{ac} &= M \frac{1}{(1-D)} \frac{V_{in}}{2} \\ \widehat{V}_{ac} &= MB \frac{V_{in}}{2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Faktor peningkatan tegangan dapat dinyatakan dalam persamaan:

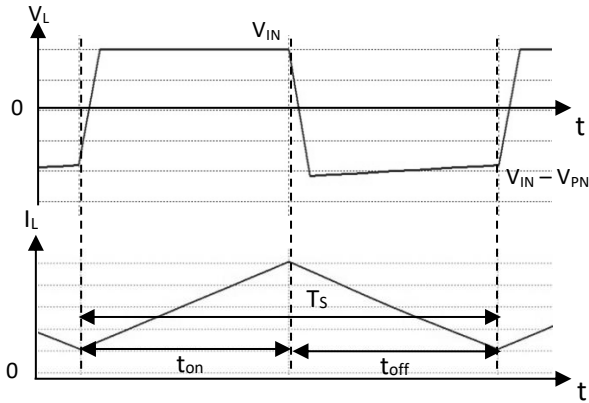
$$G = \frac{\widehat{V}_{ac}}{V_{in/2}} = BM \quad (2.6)$$

Dimana: B merupakan faktor peningkatan tegangan pada stage pertama dan M adalah indeks modulasi pada inverter

Dengan substitusi persamaan 2.4 ke persamaan 2.6 maka diperoleh persamaan:

$$G = BM = \frac{M}{1-D_{on}} \quad (0 < M < 1) \quad (2.7)$$

$$G_{max} = B = \frac{1}{1-D_{on}} \quad (M = 1) \quad (2.8)$$



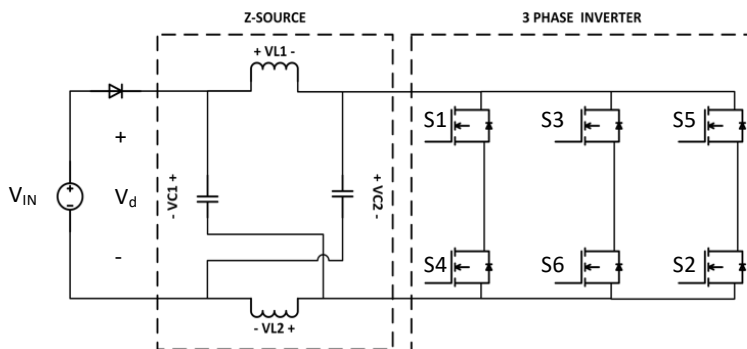
Gambar 2.5 Sinyal Pensaklaran pada Arus dan Tegangan Induktor dari Boost Converter

2.2 Z-Source Inverter 3 Fasa

Z-source converter merupakan sebuah jaringan impedansi yang terdiri dari dua buah induktor dan dua buah kapasitor yang terhubung secara silang. Z-source converter memiliki kemampuan sebagai peningkat (boost) maupun penurun (buck) tegangan tanpa memerlukan komponen switching tambahan. Selain sebagai peningkat atau penurun tegangan, jaringan impedansi tersebut berperan sebagai filter orde dua sehingga mampu mereduksi ripple tegangan, arus inrush serta harmonisa lebih baik. Jaringan impedansi tersebut dapat dihubungkan dengan sumber DC yang dapat berupa baterai, fuel cell maupun photovoltaic.

Z-source converter dapat diaplikasikan sebagai konverter DC ke AC, AC ke DC, AC ke AC dan DC ke DC. Pada umumnya, Z-Source converter digunakan sebagai converter DC ke AC yang membutuhkan faktor peningkatan maupun penurunan tegangan pada sisi output.

Aplikasi *Z-source inverter* dapat dilihat pada gambar 2.6. *Z-source inverter* mampu meningkatkan tegangan output dengan menggunakan metode pensaklaran dengan menambahkan *shoot-through zero states* pada kontrol PWM [6].



Gambar 2.6 Topologi *Z-Source inverter* 3 fasa.

Topologi *Z-source inverter* mampu mengatasi permasalahan pada inverter tradisional (CSI dan VSI). Pada VSI dan CSI, *inverter* tidak dapat beroperasi sebagai peningkat maupun penurun tegangan satu tingkat namun harus menggunakan proses konversi dua tingkat yaitu dengan menambahkan *buck* atau *boost converter*. Selain itu, *gate driver* harus didesain khusus untuk mengurangi pengaruh dari *electromagnetic interference* (EMI) yang menyebabkan kondisi *shoot through zero state* sehingga menyebabkan kerusakan pada VSI atau CSI. Topologi *Z-source inverter* hanya membutuhkan satu tingkat proses konversi tegangan, tidak memerlukan *dead time* dan penambahan *shoot through* sehingga tidak membuat inverter rusak [3,6].

Tabel 2.2. Merupakan kondisi pensaklaran yang dapat digunakan pada *Z - Source inverter* 3 fasa. *Z-source inverter* 3 fasa memiliki sembilan kondisi yang dapat berlaku dalam proses pensaklaran. Kondisi pensaklaran tersebut yang membedakan dengan *voltage source inverter* yang hanya memiliki delapan kondisi yang diperbolehkan [7].

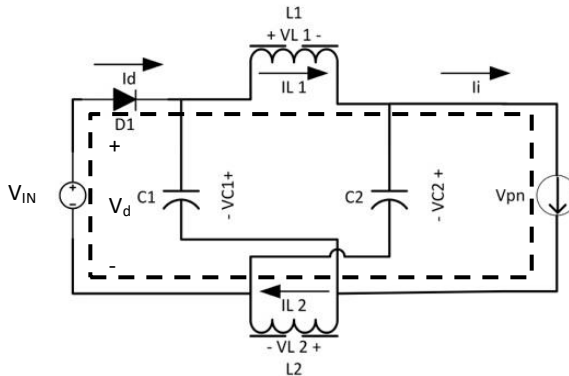
Tabel 2.2 Kondisi Pensaklaran pada *Z-Source Inverter* 3 Fasa
(!Sx menyatakan komplemen dari Sx, dimana X = 1,3,5)

No	Kondisi	Kompenen pensaklaran						Output voltage		
		S1	S4	S3	S6	S5	S2	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}
1	Aktif	1	0	0	1	0	1	V _i	0	-V _i
2		1	0	1	0	0	1	0	V _i	-V _i
3		0	1	1	0	0	1	-V _i	V _i	0
4		0	1	1	0	1	0	-V _i	0	V _i
5		0	1	0	1	1	0	0	-V _i	V _i
6		1	0	0	1	1	0	V _i	-V _i	0
7	Null	0	1	0	1	0	1	0	0	0
8		1	0	1	0	1	0	0	0	0
9	Shoot Through Zero States	1	1	S3	!S3	S5	!S5	0	0	0
10		S1	!S1	1	1	S5	!S5	0	0	0
11		S1	!S1	S3	!S3	1	1	0	0	0
12		1	1	1	1	S5	!S5	0	0	0
13		1	1	S3	!S3	1	1	0	0	0
14		S1	!S1	1	1	1	1	0	0	0
15		1	1	1	1	1	1	0	0	0

Z-source inverter memiliki enam kondisi aktif ketika sumber DC mengalir melalui beban tiga fasa dan dua buah kondisi null yaitu ketika pada komponen pensaklaran bagian atas atau bawah mengalami kondisi hubung singkat. Kondisi kesembilan yaitu *shoot through zero states* yaitu kondisi dimana pada komponen pensaklaran bagian atas dan bawah mengalami hubung singkat. Pada kondisi kesembilan tersebut merupakan hal yang harus dihindari pada voltage source inverter untuk mencegah terjadinya hubung singkat pada inverter. *Shoot through zero states* didapatkan berdasarkan tujuh buah kombinasi hubung singkat yaitu melalui salah satu fasa pensaklaran, kedua buah fasa pensaklaran maupun ketiga fasa pensaklaran. Jaringan impedansi berfungsi sebagai peningkat rasio tegangan pada saat terjadi *shoot through zero states*. Terdapat beberapa teknik pensaklaran yang dapat digunakan pada *z-source inverter* yaitu *simple boost control*, *maximum boost control*, dan *maximum constant boost control with third harmonic injection* [4,8,9]

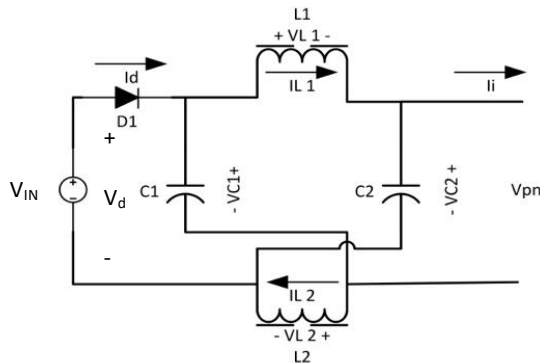
2.2.1 Analisa Rangkaian Ekuivalen Z-Source Inverter

Berdasarkan kondisi pensaklaran pada tabel II, Z-source inverter dapat dibagi kedalam tiga buah mode operasi yaitu mode aktif, *null* dan *shoot through zero states*.



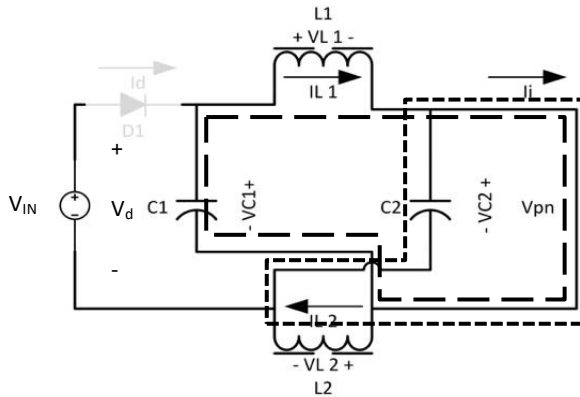
Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen Z-Source Inverter pada Kondisi Aktif

Mode I: inveter beroperasi dalam salah satu mode aktif dan rangkaian ekuivalen dapat dilihat pada gambar 2.7. Selama dalam kondisi aktif, sumber DC mengalir ke rangkaian impedansi yang terdiri dari induktor dan kapasitor. Kapasitor akan mengalami charge hingga kondisi steady state dan energi akan mengalir ke beban melalui induktor. Induktor mengalami discharge pada mode ini.



Gambar 2.8 Rangkaian Ekuivalen Z-Source Inverter pada Kondisi *Null*

Mode II: Inverter beroperasi dalam salah satu dari dua keadaan null yaitu komponen pensaklaran mengalami hubung singkat pada bagian atas atau bawah. Selama mode II, rangkaian dapat diasumsikan sebagai open circuit seperti pada gambar 2.8. Tegangan pada sumber DC akan menuju induktor dan kapasitor.

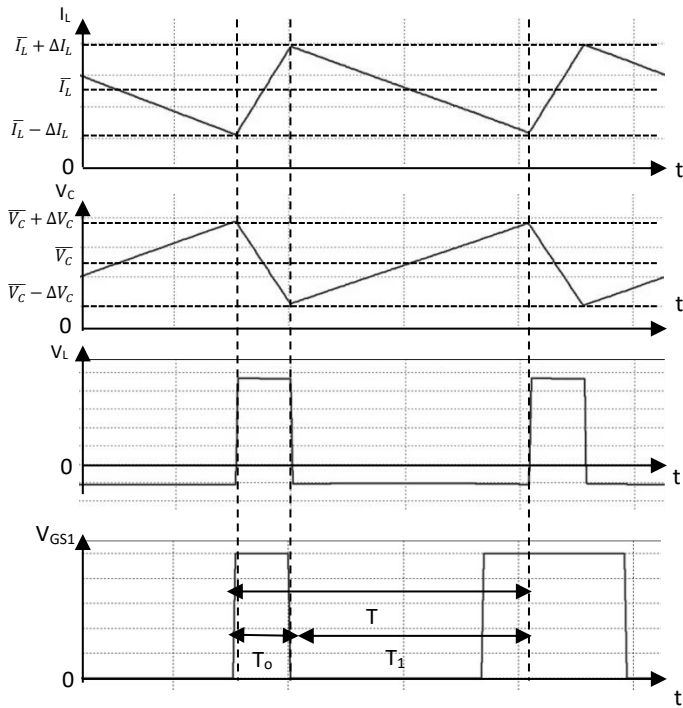


Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen Z-Source Inverter pada Kondisi *Shoot Through Zero States*

Mode III: Inverter beroperasi dalam salah satu dari tujuh keadaan *shoot through zero states*. Pada mode III, rangkaian dapat diasumsikan sebagai short circuit seperti pada gambar 2.9. Selama mode III, tidak terdapat tegangan keluaran pada inverter sama seperti dengan kondisi mode II. Tegangan DC kapasitor akan meningkat sesuai dengan besarnya rasio *shoot through duty ratio*.

2.2.2 Penurunan Persamaan Rasio Konversi Inverter

Penurunan persamaan pada z-source inverter dilakukan dengan asumsi nilai induktor L_1 dan L_2 serta kapasitor C_1 dan C_2 memiliki nilai yang sama ($L_1 = L_2 = L$ dan $C_1 = C_2 = C$). Pada saat kondisi *shoot through zero states* (T_0) maka arus induktor akan mengalami peningkatan dan tegangan pada induktor akan muncul sedangkan pada saat kondisi *non shoot through zero states* (T_1) maka arus induktor akan menurun dan tegangan induktor akan bernilai nol.



Gambar 2.10 Sinyal Pensaklaran pada Tegangan dan Arus Induktor dari Z-Source Inverter

Sehingga persamaan tegangan pada impedansi z-source inverter dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{L2} = V_L \\ V_{C1} = V_{C2} = V_C \end{cases} \quad (2.9)$$

Pada saat mode III yaitu *shoot through zero states* dengan interval waktu T_o . Berdasarkan hukum khirchoff maka persamaan tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{cases} V_L = V_C \\ V_d = 2V_C \\ V_{PN} = 0 \text{ (Shoot Through)} \end{cases} \quad (2.10)$$

Pada saat mode I dan II yaitu saat kondisi aktif dan null dengan interval waktu T_1 . Berdasarkan hukum khirchoff maka persamaan tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{cases} V_L \neq V_C, V_d = V_{in} = V_L + V_C \\ V_L = V_{in} - V_C = V_C - V_{PN} \\ V_{PN} = V_C - V_L = 2V_C - V_{in} \end{cases} \quad (2.11)$$

Pada saat kondisi steady state, tegangan rata – rata pada induktor adalah nol selama satu periode pensaklaran. Sehingga persamaan tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \bar{V}_L &= V_C * T_o + (V_{in} - V_C) * T_1 = 0 \\ \frac{V_C}{V_{in}} &= \frac{T_1}{T_1 - T_o} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dimana T_1 adalah periode saat kondisi *non shoot through*, T_o adalah periode saat *shoot through zero states* dan f_s adalah frekuensi pensaklaran. Maka periode *shoot through zero states* dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} D_o &= T_o * f_s \\ T_o &= D_o / f_s \end{aligned} \quad (2.13)$$

Sehingga persamaan tegangan DC rata – rata pada masukan inverter (V_{PN}) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{PN} &= \frac{T_o * 0 + T_1 * (2V_C - V_{in})}{T} \\ \bar{V}_{PN} &= \frac{T_1 * (2V_C - V_{in})}{T} \\ \bar{V}_{PN} &= \frac{T_1}{T_1 - T_o} V_{in} \end{aligned}$$

dengan substitusi ke persamaan 2.12 maka didapatkan

$$\bar{V}_{PN} = \frac{T_1}{T_1 - T_o} V_{in} = V_C \quad (2.14)$$

Nilai puncak dari DC link pada kondisi *non shoot through zero states* yaitu

$$V_{PN} = V_C - V_L = 2 * V_C - V_{in} \quad (2.15)$$

Substitusi V_C dari persamaan 2.14 ke persamaan 2.15 maka didapatkan

$$\bar{V}_{pn} = \frac{T}{T_1 - T_o} V_{in} = B * V_{in} \quad (2.16)$$

Dimana B ada faktor peningkat tegangan

$$B = \frac{T}{T_1 - T_o} = \frac{1}{1 - (2\frac{T_o}{T})} \geq 1 \quad (2.17)$$

($T_1 + T_o = T$)

Sehingga tegangan maksimum fasa ke netral yaitu

$$\bar{V}_{ac} = \frac{M * \bar{V}_{PN}}{2} = \frac{M * B * V_{in}}{2} \quad (2.18)$$

Dimana M adalah indeks modulasi ($M \leq 1$)

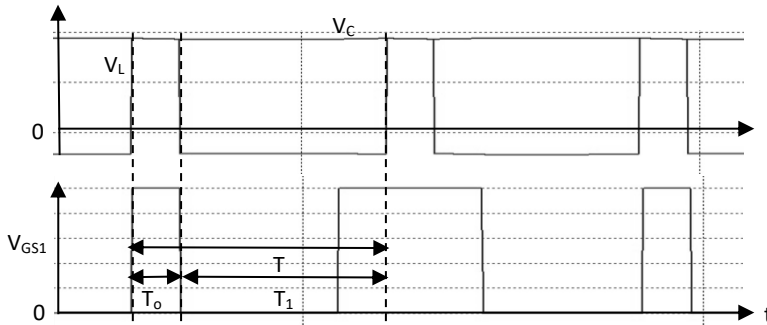
Dengan mengubah nilai shoot through duty ratio maka faktor peningkatan tegangan (B) dapat diubah – ubah. [4,10,11]

2.2.3 Penurunan Parameter Komponen

Z-Source Inverter memiliki beberapa parameter yang harus ditentukan nilainya. Parameter – parameter yang perlu ditentukan nilainya yaitu kapasitor C_1 , C_2 , dan Induktor L_1 , L_2 .

2.2.3.1 Induktor

Pada saat Z-Source inverter dioperasikan tanpa *shoot through zero states* maka tegangan input akan muncul pada kapasitor sedangkan pada induktor tidak muncul tegangan karena arus yang mengalir pada induktor adalah DC murni.



Gambar 2.11 Perbandingan Tegangan Kapasitor dan Tegangan Induktor

Pada saat Z-Source inverter dioperasikan menggunakan shoot through states maka induktor berfungsi untuk membatasi arus ripple selama mode boost. Selama mode *shoot through zero states*, arus induktor bertambah secara linear dan tegangan pada induktor sama dengan pada kapasitor seperti pada gambar 2.11. Pada saat mode *non shoot through zero states* (8 mode konvensional) maka arus pada induktor akan berkurang secara linear dan nilai tegangan induktor tidak sama dengan tegangan input dan kapasitor.

Nilai arus rata – rata pada induktor yaitu:

$$\bar{I}_L = \frac{P}{V_{in}} \quad (2.19)$$

Dimana P adalah total daya inverter

Nilai arus induktor maksimum terjadi pada saat Z-Source inverter pada mode Shoot Through Zero States. Untuk menentukan nilai induktor maka perlu ditentukan nilai peak to peak arus ripple (ΔI_L).

$$\text{Nilai maksimum arus induktor} : \hat{I}_L = \bar{I}_L + 0.5\Delta I_L \quad (2.20)$$

$$\text{Nilai minimum arus induktor} : \check{I}_L = \bar{I}_L - 0.5\Delta I_L \quad (2.21)$$

Selama mode Shoot Through Zero States maka nilai $V_L = V_C = V$

$$V = \frac{V_{in} + B * V_{in}}{2}$$

Sehingga nilai induktor dapat ditentukan menggunakan rumus

$$L = \frac{V * T_0}{\Delta I} \quad (2.22)$$

dimana $\Delta I_L = \hat{I}_L - \check{I}_L$

T_0 adalah periode shoot through zero states per switching cycle dan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.13

2.2.3.2 Kapasitor

Kapasitor pada Z-Source Inverter berfungsi untuk menyerap arus ripple dan sebagai penstabil tegangan. Induktor akan diisi oleh kapasitor ketika z-source inverter berada pada mode shoot through seperti yang telah dijelaskan pada mode III dan $I_L = I_C$.

Nilai kapasitor dapat dihitung dengan cara menentukan peak to peak ripple tegangan pada kapasitor (ΔV_C). Sehingga nilai kapasitor dapat dihitung menggunakan rumus

$$C = \frac{\bar{I}_L * T_0}{\Delta V_C} \quad (2.23)$$

2.2.3.3 Stres Tegangan dan Arus pada Komponen

Stres tegangan dan arus pada setiap dapat dihitung pada saat kondisi shoot through zero state [11]. Stres tegangan pada setiap kapasitor dan induktor dapat dicari menggunakan persamaan 2.14 yaitu

$$\begin{aligned} V_L = V_C &= \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{in} \\ V_L = V_C &= \frac{1 - D_o}{1 - 2D_o} V_{in} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Sedangkan nilai arus maksimum pada induktor dapat dicari menggunakan persamaan 2.21

$$\begin{aligned} \bar{I}_L &= \frac{P}{V_{in}} \\ \bar{I}_{Lmax} &= \bar{I}_L + \hat{I}_L \end{aligned} \quad (2.25)$$

Stress tegangan pada komponen semikonduktor dioda dan mosfet dapat dicari menggunakan persamaan 2.16

$$V_d = V_{DS} = \overline{V_{pn}} = B * V_{in} \quad (2.26)$$

Sedangkan nilai arus maksimum yang mengalir pada dioda dan DC bus (V_{PN}) yaitu

$$I_i = 2I_l \quad (2.27)$$

Maka arus yang mengalir pada setiap mosfet yaitu

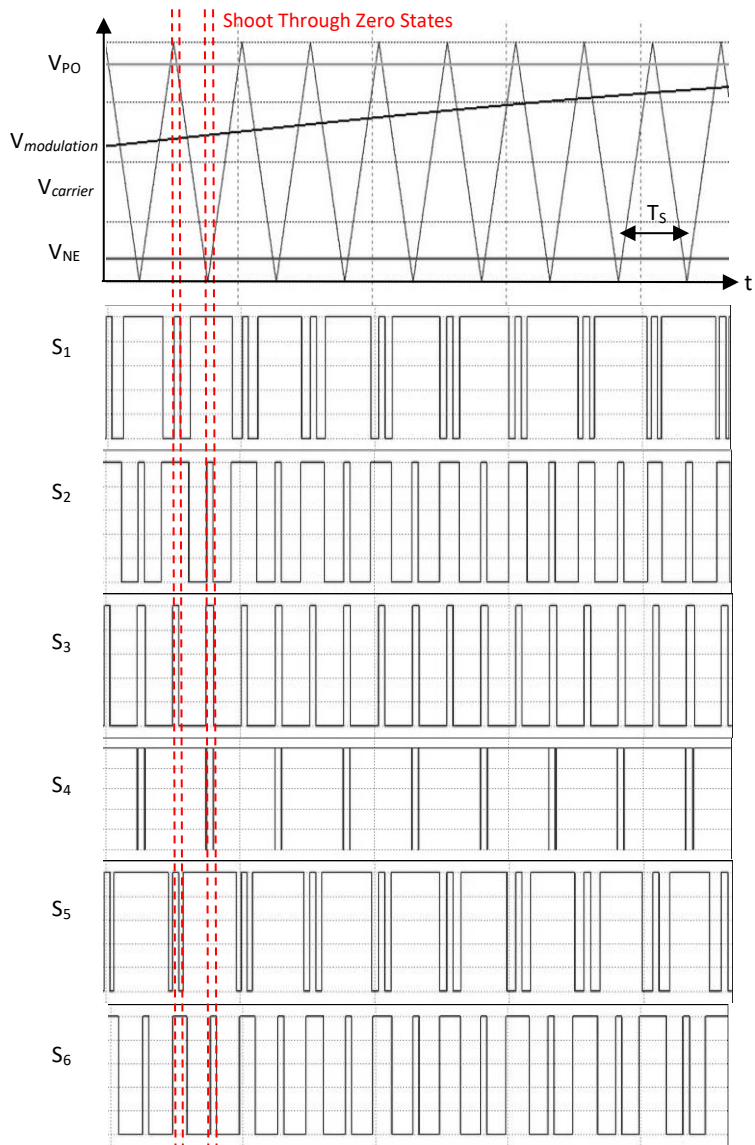
$$2I_l = \frac{3 * \widehat{V_{ac}} * \widehat{I_{ac}} * \cos\varphi}{V_{in}} + \frac{V_C * D_o}{2Lf_s}$$

$$I_{mosfet} = \frac{\widehat{V_{ac}} * \widehat{I_{ac}} * \cos\varphi}{V_{in}} + \frac{V_C * D_o}{6Lf_s} \quad (2.28)$$

2.2.4 Simple Boost Control

Simple boost control merupakan sinusoida PWM yang dimodifikasi dengan cara menambahkan *shoot through zero state* dalam satu periode *switching*.

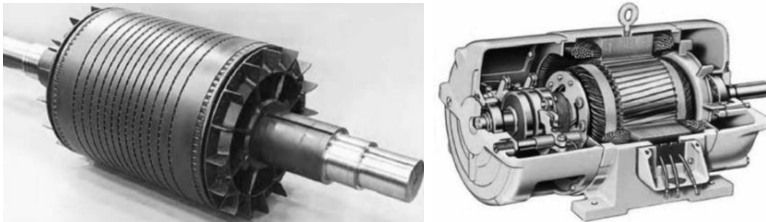
Shoot through zero states dibatasi dengan besarnya kondisi ketika saklar tidak aktif dan kemungkinan menggantikan sebagian maupun semua kondisi aktif yang bergantung pada besarnya indeks modulasi. Dua buah sinyal DC digunakan untuk membuat *shoot through duty ratio* (D_o). Sinyal DC yang pertama yaitu sama berada pada sisi positif dari sinyal referensi tiga fasa, sedangkan sinyal DC yang kedua adalah negatif dari sinyal DC yang pertama. Ketika sinyal pembawa segitiga lebih besar dari pada sinyal DC positif (V_{po}) dan lebih kecil dari pada sinyal DC batas bawah (V_{ne}) maka rangkaian akan berada dalam keadaan *shoot through* [5]. *Simple boost control* PWM dapat diilustrasikan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pembangkitan Sinyal PWM dari *Simple Boost Control*

2.3 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi tiga fasa adalah sebuah motor asinkron yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Motor induksi terbagi dalam dua jenis berdasarkan rotornya yaitu *cage* dan *wound* seperti pada gambar 2.13a dan 2.13b. Pada rotor jenis *cage*, rotor terdiri dari beberapa batang konduktor yang saling terhubung singkat melalui *shorting rings*. Sedangkan rotor jenis *wound*, rotor memiliki belitan tiga fasa yang dihubungkan secara WYE dan pada ujung belitan dihubungkan dengan *slip rings*. Belitan rotor tersebut terhubung singkat melalui sikat pada *slip ring*. Rotor jenis *wound* memiliki kelebihan yaitu arus rotor dapat diakses melalui sikat sehingga perubahan karakteristik torsi kecepatan dapat diperoleh dengan menambahkan resistansi pada rangkaian rotor.



Gambar 2.13a. Rotor Jenis *Cage* pada Motor Induksi. **Gambar 2.13b.** Rotor Jenis *Wound* pada Motor Induksi [12]

2.3.1 Cara Kerja Motor Induksi 3 Fasa

Apabila sumber tegangan tiga fasa diberikan pada stator maka akan muncul arus stator. Arus tersebut menimbulkan medan magnet $\mathbf{B}_s$ yang berputar berlawanan dengan arah jarum jam. Kecepatan medan putar dapat dirumuskan sebagai berikut

$$n_{sync} = \frac{120 f}{P} \quad (2.29)$$

Dimana f = frekuensi sistem

P = jumlah kutub pada motor induksi.

Medan putar pada stator akan menginduksikan tegangan ke rotor berdasarkan persamaan sebagai berikut

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (2.30)$$

Dimana $\mathbf{v}$ = kecepatan relatif batang terhadap medan magnet

$\mathbf{B}$ = intensitas fluks magnet

$\mathbf{l}$ = panjang konduktor.

Arus akan muncul pada rotor karena batang konduktor saling terhubung singkat. Arus mengalir pada rotor dari atas ke bawah batang konduktor. Arus pada rotor tersebut akan menghasilkan medan magnet $\mathbf{B}_R$. Sehingga motor akan terjadi induksi berdasarkan persamaan

$$\tau_{ind} = k \mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_s \quad (2.31)$$

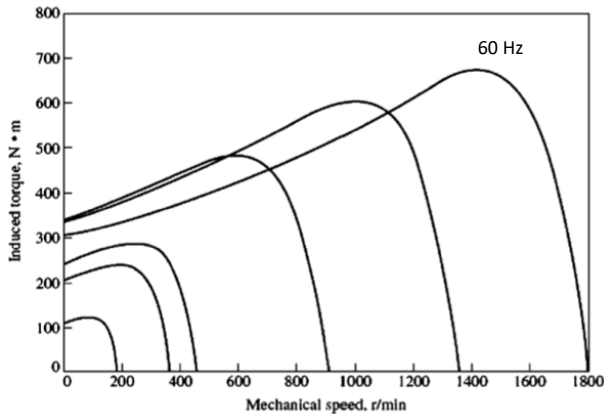
Torsi yang terinduksi berlawanan dengan arah jarum jam sehingga arah putaran motor akan bergerak berlawanan dengan arah jarum jam.

Tegangan yang terinduksi ke rotor bergantung pada kecepatan relatif dari medan magnet oleh karena itu terdapat perbedaan kecepatan antara kecepatan medan putar dan kecepatan rotor. Perbedaan kecepatan tersebut disebut dengan slip motor induksi. Persamaan slip motor induksi yaitu

$$slip (\%) = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \times 100\% \quad (2.32)$$

2.3.2 Kontrol Kecepatan Motor Induksi

Kecepatan putaran dari motor induksi dapat dikontrol melalui beberapa cara yaitu merubah frekuensi sumber, merubah jumlah pole, mengubah nilai resistansi luar pada motor jenis belit, mengubah tegangan sumber. Namun dari beberapa cara tersebut yang paling efisien yaitu dengan mengubah frekuensi sumber.



Gambar 2.14. Kurva Karakteristik Torsi vs Kecepatan pada Motor Induksi dibawah Rating Frekuensi

Apabila frekuensi sumber yang digunakan untuk suplai motor induksi dirubah maka kecepatan medan putar n_{sync} akan berubah dan kurva karakteristik torsi vs kecepatan akan berubah seperti pada gambar 2.14. Dengan mengubah nilai frekuensi sumber maka kecepatan motor induksi dapat diatur diatas maupun dibawah kecepatan nominal. Perubahan frekuensi sumber harus diikuti perubahan tegangan rms line to line secara linear yaitu berdasarkan persamaan V/f konstan sehingga fluks pada motor tetap konstan. Apabila frekuensi diturunkan sebesar 10% namun nilai tegangan rms line to line tetap maka fluks pada inti motor akan meningkat sebesar 10% dan arus magnetisasi akan naik. Naiknya arus magnetisasi akan menyebabkan terjadinya saturasi pada inti besi motor [12].

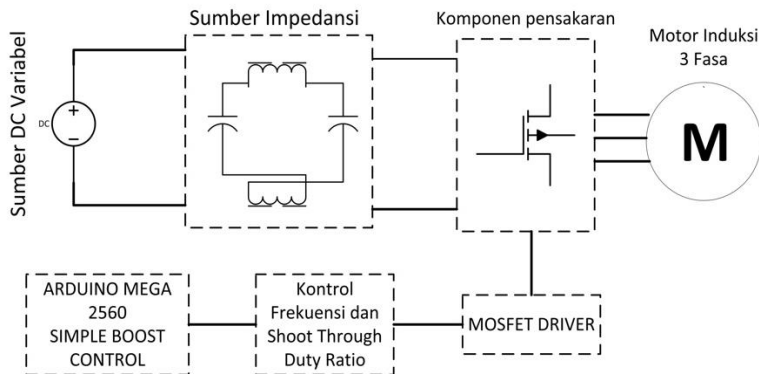
BAB III

DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI INVERTER

Pada bab 3 akan dibahas mengenai proses desain, simulasi dan implementasi *Z-Source inverter* 3 fasa dengan metode *simple boost control*. Proses desain *inverter* dilakukan dengan melakukan perhitungan dan menentukan komponen-komponen yang akan digunakan pada implementasi alat. Simulasi dilakukan untuk memastikan bahwa *inverter* dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Hasil dari desain dan simulasi akan digunakan untuk implementasi *inverter*.

3.1 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem mendefinisikan sistem keseluruhan dari *Z-Source inverter* dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi 3 fasa. Diagram blok terdiri dari sumber DC, sumber impedansi, komponen pensaklaran, *driver* MOSFET, *simple boost control* dan motor induksi 3 fasa.



Gambar 3.1 Diagram Blok Keseluruhan Sistem Inverter

Dapat dilihat dari gambar 3.1 diatas bahwa sumber DC *input* dari Inverter menggunakan sumber DC variable yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik. Sinyal *simple boost control* sebagai metode penyalan MOSFET dihasilkan dengan menggunakan Arduino Mega 2560. *Output* sinyal dari Arduino Mega 2560 terdiri dari 3 buah SPWM

yang memiliki perbedaan sudut 120° dan 2 buah PWM. Sinyal SPWM dan PWM kemudian digabung menggunakan gerbang logika OR untuk mendapat sinyal *simple boost control*. Pada implementasi, nilai dari frekuensi *fundamental* dan *shoot through duty ratio* pada *simple boost control* dapat di kontrol. Pengaturan frekuensi *fundamental* digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi sedangkan *shoot through duty ratio* digunakan untuk mengatur faktor peningkatan tegangan. Output sinyal SPWM yang dihasilkan memiliki nilai ampiltudo sebesar 5 V. MOSFET akan bekerja ketika diberi sinyal PWM dengan nilai amplitudo ± 20 volt sehingga dibutuhkan *driver* MOSFET sebagai peningkat nilai tegangan amplitudo PWM. Tegangan *output* yang keluar dari *Z-Source inverter* sebesar 56 V yang merupakan tegangan untuk aplikasi motor induksi 3 fasa.

3.2 Motor induksi

Motor induksi atau sering disebut dengan motor asinkron merupakan suatu mesin berputar yang mampu mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik.

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

Parameter	Nilai
Tegangan fasa rating	56 V
Arus rating	8.25 A
Daya Output	1 HP
Frekuensi	50 Hz
Jumlah Pole	4
Kecepatan	1390 rpm
Effisiensi	73%
Faktor Daya	0.76
Inersia Rotor	0.0021 kg.m^2
Insulation class (IS)	F
Index Protection (IP)	55

Motor induksi yang digunakan pada implementasi merupakan hasil desain ulang sehingga tegangan kerja motor yaitu 56 V dan dirangkai dalam hubungan delta. Pada tabel 3.1 menunjukan bahwa rating kecepatan dari motor induksi yaitu 1390 rpm pada frekuensi 50 Hz sedangkan nilai

dari faktor dayanya yaitu 0.76. Aplikasi dari *Z-Source Inverter* dengan menggunakan metode *simple boost control* yaitu digunakan untuk mengontrol motor induksi tersebut. Parameter rangkaian ekuivalen motor induksi 3 fasa pada tabel 3.2 digunakan sebagai parameter masukan untuk simulasi desain pembebanan *Z-Source inverter*.

Tabel 3.2 Parameter Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi 3 Fasa [13]

Parameter	Nilai
<i>Resistansi Stator, R_1</i>	1.0297 Ω
<i>Reaktansi Stator, X_1</i>	1.02 Ω
<i>Resistansi Rotor, R_2</i>	0.4973 Ω
<i>Reaktansi Rotor, X_2</i>	1.02 Ω
<i>Reaktansi Magnetisasi, X_M</i>	12.3771 Ω

3.3 Desain *Z-Source Inverter* dengan Metode *Simple Boost Control*

Desain *inverter* bertujuan untuk menentukan parameter awal dari *inverter* dengan mempertimbangkan kondisi peralatan yang ada dilaboratorium dan ketersediaan komponen yang ada di pasaran untuk mempermudah proses implementasi *inverter*. Menentukan parameter awal *inverter* berpengaruh terhadap nilai kapasitas komponen seperti kapasitor, induktor dan nilai *shoot through duty cycle* yang digunakan sebagai control *inverter*. Tabel 3.3 dibawah ini merupakan parameter awal untuk mendesain *inverter*. Tegangan *input* dan daya *inverter* ditentukan berdasarkan sumber DC yang tersedia pada laboratorium. Dengan adanya keterbatasan alat pembebanan motor induksi dan sumber DC di laboratorium konversi energi listrik maka desain *inverter* dibuat 250 W dengan tegangan masukan 48 V.

Tabel 3.3 Spesifikasi Awal Desain *Inverter*

Parameter	Nilai
Daya maksimum, P_{out_max}	250 Watt
Tegangan masukan, V_{in}	48 Volt
Tegangan Keluaran, V_{LLrms}	56 Volt
Frekuensi output, f_o	50 Hz
Indeks modulasi, M	0.8

Parameter	Nilai
Frekuensi Pensaklaran, f_s	7.842 kHz
Ripple tegangan kapasitor, $V_{\text{kapasitor}} (\Delta V_C)$	0,5%
Ripple arus induktor, I_L peak to peak	20%

3.3.1 Penentuan Rasio Konversi dan Shoot Through Duty Ratio

Berdasarkan persamaan 2.17 yang didapatkan melalui analisis rangkaian ekuivalen pada Bab 2 maka rasio konversi pada *inverter* bergantung pada nilai *shoot through duty ratio*. Faktor peningkatan tegangan (B) yang dibutuhkan untuk mendapatkan tegangan keluaran *line to line* sebesar 56 Vrms dan dengan menggunakan nilai indeks modulasi 0.8 maka faktor peningkatan tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.18

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot 56}{\sqrt{3}} \times \frac{2}{0.8 \cdot 48}$$

$$B = 2.4$$

maka nilai *shoot through duty ratio* dapat didapatkan menggunakan persamaan 2.17

$$B = \frac{1}{1-2D_o}$$

$$D_o = \frac{B-1}{2B}$$

$$D_o = \frac{2.4-1}{2 \cdot 2.4}$$

$$D_o = 0.291$$

Degan menggunakan frekuensi pensaklaran 7.842 KHz maka periode *shoot through* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.13

$$D_o = T_o \cdot f_s$$

$$T_o = D_o / f_s$$

$$T_o = \frac{0.291}{7.842 \cdot 10^3} = 37.1 \mu s$$

3.3.2 Penentuan Nilai Induktor

Nilai induktor minimum untuk memperoleh nilai *ripple* pada arus induktor sebesar 10% dapat digunakan menggunakan persamaan 2.20 dan 2.21. Pertama arus rata – rata pada induktor dapat dihitung menggunakan persamaan 2.21

$$\bar{I}_L = \frac{P}{V_{in}}$$

$$\bar{I}_L = \frac{250}{48} = 5.21 A$$

dengan menentukan *ripple* 20 % (*peak to peak*) maka arus induktor yaitu:

$$\overline{I_{Lmax}} = 5.21 + 10\% = 5.731 \text{ A}$$

$$\overline{I_{Lmin}} = 5.21 - 10\% = 4.689 \text{ A}$$

$$\Delta I_L = 5.731 - 4.689 = 2.042 \text{ A}$$

Tegangan pada komponen induktor pada saat *shoot through* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.24

$$V_L = \left(\frac{1-D_o}{1-2D_o} \right) V_{in}$$

$$V_L = \left(\frac{1-0.291}{1-2*0.291} \right) 48$$

$$V_L = 81.5 \text{ V}$$

maka dengan menggunakan persamaan 2.20 didapatkan nilai induktor sebesar

$$L = \frac{81.5 * 371 * 10^{-6}}{2.4} = 1.45 \text{ mH}$$

3.3.3 Penentuan Nilai Kapasitor

Nilai kapasitor minimum dapat ditentukan dengan menentukan besar *ripple* tegangan pada kapasitor. Pada saat *shoot through* maka nilai dari $I_L = I_C$ dan dipilih *ripple* sebesar 0.5% . Sehingga dengan persamaan 2.25 maka nilai kapasitor yang dibutuhkan sebesar

$$C = \frac{\Delta I_L * T_o}{\Delta V_C}$$

$$C = \frac{5.21 * 371 * 10^{-6}}{81.5 * 0.5\%}$$

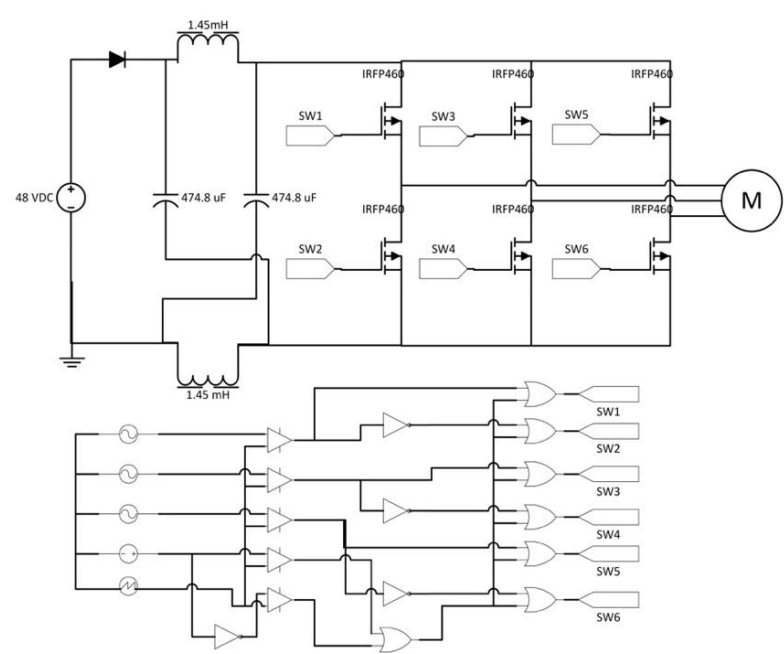
$$C = 474.8 \text{ } \mu F$$

3.4 Simulasi pada Kondisi *Steady State*

Simulasi dilakukan pada kondisi *steady state* dengan tujuan memastikan bahwa *inverter* dapat bekerja sesuai dengan desain. Simulasi rangkaian *Z-Source inverter* dilakukan menggunakan *software* PSIM untuk memastikan hasil desain. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada gambar 3.2. Parameter yang digunakan dalam simulasi *Z-Source inverter* dengan metode simple boost control dapat dilihat pada tabel 3.4.

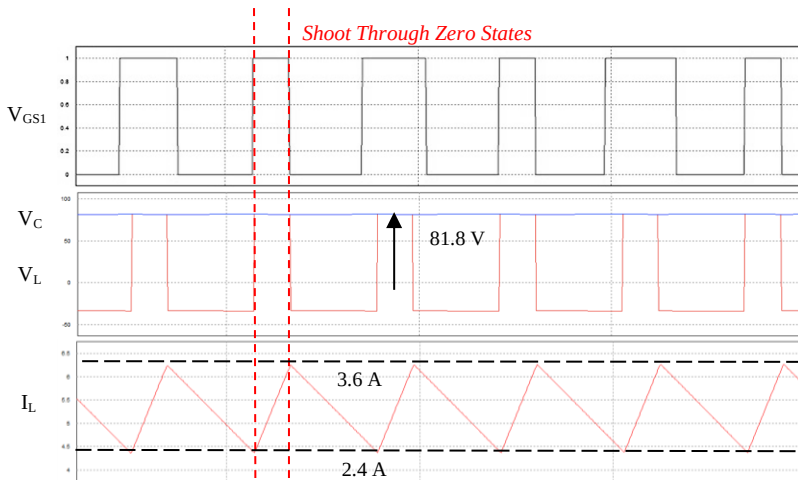
Tabel 3.4 Parameter Rangkaian Simulasi Z-Source Inverter dengan Metode Simple Boost Control

Parameter	Nilai
Tegangan masukan, V_{in}	48 V
Induktor L_1, L_2	1.45 mH
Kapasitor C_1, C_2	474.8 μF
Ripple tegangan kapasitor, $V_{kapasitor} (\Delta V_C)$	0,5%
Ripple Arus induktor, $I_{L, peak\ to\ peak}$	20%
Indeks modulasi, M	0.8
Shoot through duty ratio, D_o	0.291
Frekuensi output, f_o	50 Hz
Frekuensi pensaklaran, f_s	7.842 kHz



Gambar 3.2 Rangkaian Simulasi ZSI pada kondisi *Steady State*

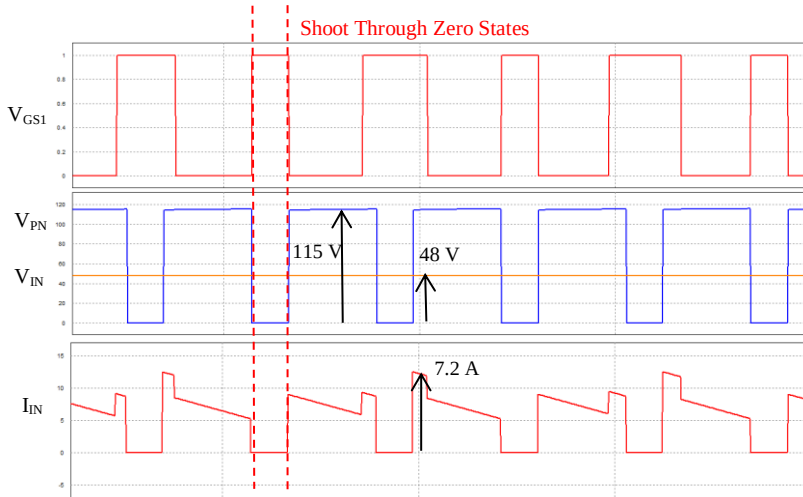
Pada saat *inverter* berada dalam mode *shoot through zero state* maka kapasitor akan mengalami *discharging* dan induktor akan mengalami *charging* sehingga akan terlihat arus induktor mengalami peningkatan seperti pada gambar 3.3. Pada saat *inverter* tidak dalam kondisi *shoot through zero state* maka kapasitor akan mengalami *charging* dan arus induktor akan mengalami *discharging*. Nilai tegangan pada induktor dan kapasitor adalah sama yaitu sebesar 81.6 V. *Ripple* tegangan pada kapasitor yaitu sebesar 0.5% dengan nilai tegangan puncak sebesar 81.8 V sedangkan tegangan minimum sebesar 81.4 V. Sedangkan *ripple* pada arus induktor yaitu sebesar 20% dengan nilai arus puncak sebesar 5.73 A dan arus minimum sebesar 4.69 A.



Gambar 3.3 Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} , V_C , V_L , dan Arus I_L

Pada tegangan DC bus (V_{PN}) akan terjadi peningkatan tegangan sehingga memiliki perbedaan dengan tegangan DC masukan (V_{in}). Pada saat *inverter* dalam mode *shoot through zero states* maka nilai di tegangan DC bus akan bernilai nol sehingga menyebabkan bentuk gelombang tegangan DC bus berbeda dengan tegangan DC masukan. Pada hasil simulasi didapatkan tegangan DC bus sebesar 115 V sedangkan tegangan DC masukan sebesar 48 V. Apabila dibandingkan nilai tegangan DC bus dengan DC masukan maka akan didapatkan nilai faktor peningkatan

tegangan sebesar 2.4. Bentuk gelombang arus yang masuk pada *inverter* tidak kontinu karena pada saat *inverter* dalam mode *shoot through zero states* maka sumber DC masukan akan mati seperti pada gambar 3.4. Nilai nilai arus rata – ratanya yaitu 5.71 A sedangkan nilai arus puncak masukan yaitu sebesar 11.5 A atau dua kali lipat dari arus puncak induktor.

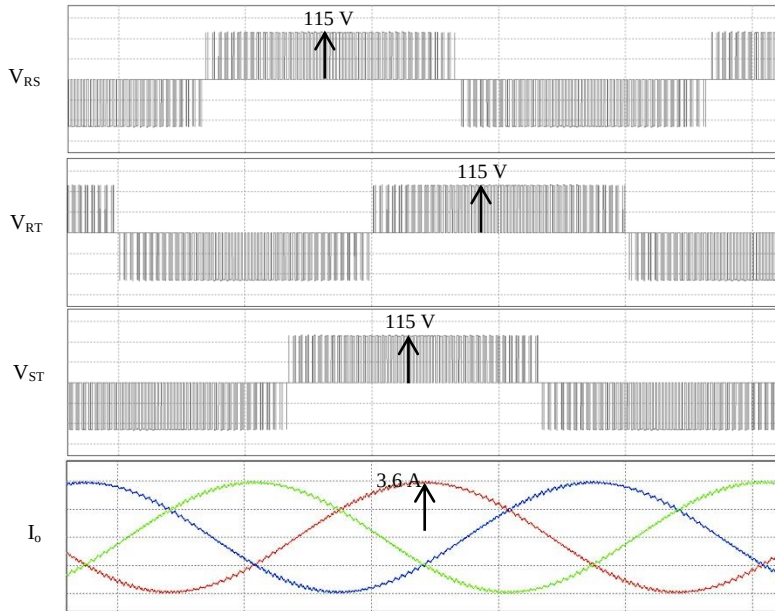


Gambar 3.4 Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} , V_{PN} , V_{IN} , dan Arus I_{IN}

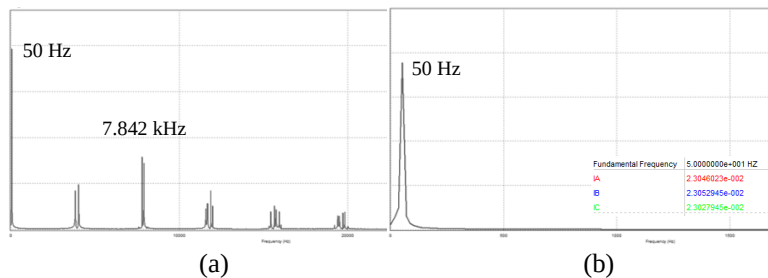
Pada hasil simulasi tegangan keluaran *inverter* memiliki bentuk gelombang berupa SPWM dengan nilai puncak 115 V sama dengan nilai tegangan pada DC bus (V_{PN}). Pada tegangan setiap fasanya memiliki perbedaan sudut fasa sebesar 120° seperti pada gambar 3.5. Bentuk arus keluaran dari *inverter* berupa gelombang sinus dengan arus puncak 3.6 A.

Tegangan keluaran *inverter* memiliki frekuensi *fundamental* 50 Hz serta mengandung frekuensi pensaklaran sebesar 7.842 Hz seperti yang terlihat pada gambar 3.6(a). Tegangan keluaran *inverter* mengandung harmonisa sebesar 90% sedangkan pada arus keluaran *inverter* hanya mengandung harmonisa yang kecil yaitu 2% seperti pada gambar 3.6(b). Harmonisa pada tegangan keluaran *inverter* cukup tinggi karena pada sisi keluaran *inverter* tidak menggunakan filter harmonisa. Namun, pada arus

keluaran hanya terdapat sedikit harmonisa karena beban yang disuplai *inverter* yaitu berupa motor induksi.



Gambar 3.5 Bentuk Gelombang Tegangan V_{RS} , V_{RT} , V_{ST} , dan Arus I_o



Gambar 3.6(a) Spektrum Frekuensi Tegangan Keluaran Inverter

Gambar 3.6(b) Spektrum Frekuensi Arus Keluaran Inverter

3.5 Implementasi Z-Source Inverter

Implementasi merupakan tahap pembuatan alat sesuai desain yang telah ditentukan. Implementasi dilakukan untuk mengetahui kinerja Z-Source inverter 3 fasa dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi.

3.5.1 Kapasitor

Kapasitor yang mendekati dari hasil desain sebesar $474.8 \mu F$ dan tersedia dalam pasaran yaitu senilai $470 \mu F$ sehingga dipilih kapasitor dengan nilai tersebut namun setelah dilakukan pengukuran menggunakan LCR meter didapatkan hanya $416 \mu F$.

Tegangan rating minimum dari kapasitor yang harus dipenuhi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.24

$$V_C = \left(\frac{1-D_o}{1-2D_o} \right) V_{in}$$
$$V_C = \left(\frac{1-0.291}{1-2 \times 0.291} \right) 48$$
$$V_C = 81.5 V$$

Sehingga kapasitor harus mampu menahan tegangan minimum sebesar 81.5V. Kapasitor yang digunakan pada implementasi yaitu jenis *aluminium elektrolite* dengan *rating* tegangan kapasitor yaitu sebesar $470 \mu F/400 V$.

3.5.2 Induktor

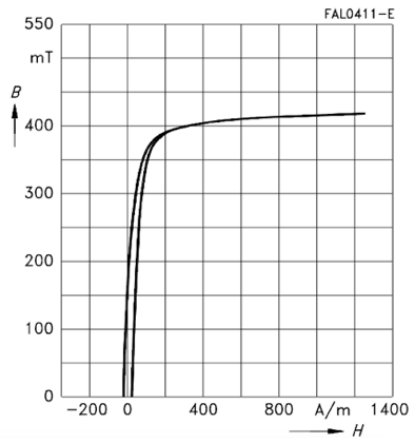
Pemilihan kawat untuk membelit induktor sangat penting untuk mereduksi rugi – rugi tembaga dan menghindari *skin effect*. Pada desain induktor digunakan kawat email ukuran 0.5mm yang dipilin sebanyak 6 kali sehingga menghasilkan diameter 3mm agar mampu dilalui arus sebesar 5.73 A pada saat beban maksimum.

Inti induktor yang digunakan adalah tipe EE65 N27 EPCOS TDK yang memiliki spesifikasi seperti pada tabel 3.5

Tabel 3.5 Spesifikasi Inti EE65 EPCOS TDK [15]

Nama	Nilai
Effective magnetic path length, l_e	147 mm
Effective magnetic cross section, A_e	535 mm^2
Minimum Core cross section, $A_{\min}$	529 mm^2
Relative effective permeability, μ_e	1570

Nama	Nilai
Effective magnetic volume , V_e	78650 mm ³
Bahan	N27
Inductance Factor, A_L	7200 nH
Saturation magnetization, B_s	410 mT
Gap	0 mm



Gambar 3.7 Kurva Magnetisasi Bahan Inti N27 [16]

Dengan nilai induktansi sebesar 1.6 mH maka jumlah belitan yang diperlukan dalam pembuatan induktor dapat dihitung menggunakan rumus:

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

$$N = \sqrt{\frac{1.6 \times 10^{-3}}{7200 \times 10^{-9}}} = 14$$

maka fluks yang mengalir pada inti dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\beta_{\max} = \frac{L \times I_{L\max}}{A_e \times N} \times 10^5$$

$$\beta_{\max} = \frac{1.6 \times 10^{-3} \times 5.73}{5.35 \times 14} \times 10^7$$

$$\beta_{\max} = 1096 \text{ mT}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut maka nilai fluks melebihi spesifikasi nilai maksimum fluks yaitu 410mT seperti pada gambar 3.7 sehingga inti harus diberi gap agar tidak terjadi saturasi.

Inti induktor diberi celah udara sebesar 1.5mm sehingga nilai relative effective permeability (μ_e) setelah diberi celah udara dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\mu_{e(gap)} = \frac{\mu_e}{1 + \frac{\mu_e \times gap}{l_e}}$$

$$\mu_{e(gap)} = \frac{1570}{1 + \frac{1570 \times 1.5}{147}} = 93.4$$

Sehingga jumlah belitan yang diperlukan untuk mendapatkan nilai induktansi 1.6 mH dengan celah udara 1.5mm dapat dihitung menggunakan rumus:

$$N = \sqrt{\frac{L * (gap + \frac{l_e}{\mu_{e(gap)}})}{0.4 * \pi * A_e * 10^{-9}}}$$

$$N = \sqrt{\frac{1.6 * 10^{-3} * (1.5 + \frac{147}{93.4})}{0.4 * \pi * 5.35 * 10^{-9}}} = 84$$

Jumlah belitan yang diperlukan yaitu sebanyak 84 belitan dan nilai fluks yang mengalir pada inti yaitu:

$$\beta_{max} = \frac{1.6 * 10^{-3} \times 5.73}{5.35 \times 84} \times 10^7$$

$$\beta_{max} = 214 \text{ mT}$$

Dengan nilai fluks 214 mT pada inti besi maka inti tidak akan mengalami saturasi pada saat dibebani penuh karena kurang dari 410mT.

3.5.3 Penentuan Dioda

Z - Source Inverter bekerja pada frekuensi 7.842 KHz dan memiliki satu buah dioda pada sisi input. Pemilihan dioda harus memiliki spesifikasi yang baik dari segi arus, tegangan, dan waktu *reverse recovery* yang cepat. Penentuan tegangan dan arus pada dioda dapat diperoleh berdasarkan rumus:

$$I_d = I_{in} = \frac{P}{V_{in}}$$

$$I_d = \frac{250}{48} = 5.21 \text{ A}$$

Dari pertimbangan tersebut dipilih dioda jenis MUR 1560. Dioda ini adalah jenis dioda *ultrafast switching* dengan rugi pensaklaran yang rendah. Dioda ini memiliki tegangan breakdown (V_R) 600V dengan arus maksimum yang dapat dilewatkan (I_F) sampai 15A. Dioda MUR 1560 juga memiliki reverse recovery time (t_{rr}) yang cepat yaitu 60 ns.

3.5.4 Penentuan MOSFET

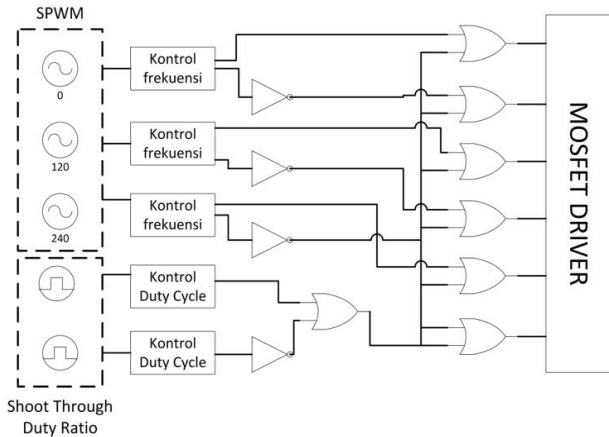
Rangkaian *Z-Source Inverter* menggunakan enam buah komponen pensaklaran. Saklar elektronik tersebut menggunakan mosfet. Penentuan tegangan dan arus pada dioda dapat diperoleh dengan menggunakan rumus *voltage stress* dan *current stress* pada MOSFET [8].

$$V_{DS} = V_{PN} = \frac{1}{1 - 2D} V_{in}$$
$$V_{DS} = \frac{1}{1 - 2 * 0.291} 48$$
$$V_{DS} = 115 \text{ V}$$

MOSFET yang digunakan adalah tipe IRFP460. Mosfet ini memiliki kemampuan menahan beda tegangan antara drain dan source-nya (V_{DS}) maksimumnya 500 V dengan arus drain maksimum sebesar 20A. Tegangan yang diberikan pada *gate* dan *source*-nya V_{GS} maksimum sebesar 20 V. Ketika pada kondisi aktif, besar hambatan $R_{DS(ON)}$ sebesar 0,27 Ω . Besar tegangan dan arus yang melewati mosfet masih di bawah nilai spesifikasi yang diberikan oleh mosfet IRFP460LC dengan begitu penggunaan mosfet masih bisa digunakan pada rangkaian konverter ini.

3.5.5 Desain *Simpe Boost Control*

Z-Source Inverter menggunakan metode pensaklaran *simple boost control*. *Simple boost control* diprogram pada Arduino Mega yang terdiri dari satu buah sinyal PWM dengan frekuensi 7.842 kHz dan tiga buah spwm 3 fasa yang memiliki perbedaan fasa sebesar 120°. Parameter yang dapat dikontrol yaitu frekuensi keluaran dan nilai *shoot through duty ratio* sehingga tegangan serta frekuensi keluaran *Z-Source inverter* dapat dikontrol. Sinyal PWM dan SPWM masuk pada IC logika OR untuk dilakukan komparasi agar dapat dihasilkan *simple boost control* seperti pada blok diagram gambar 3.8.



Gambar 3.8 Diagram Blok *Simple Boost Control*

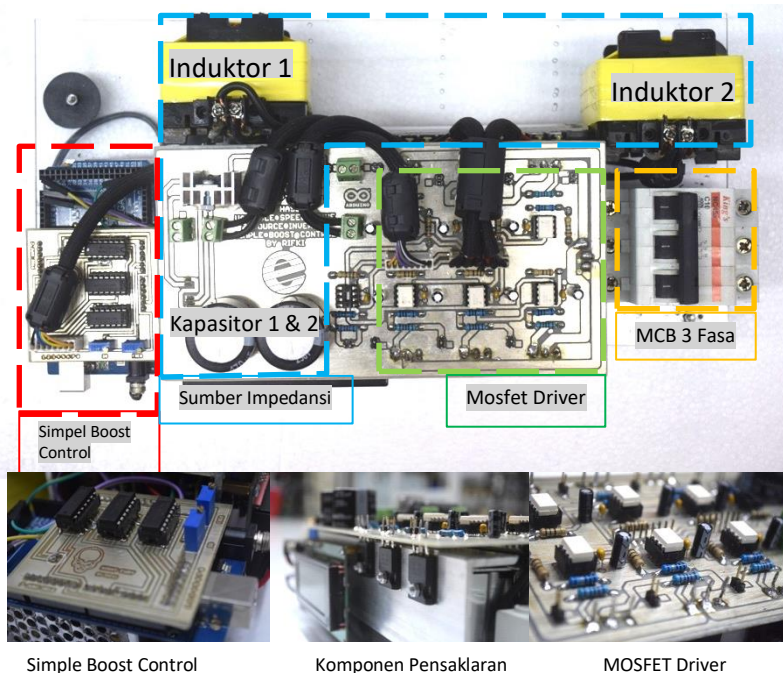
3.5.6 Hasil Implementasi Z-Source Inverter

Berdasarkan perhitungan hasil desain, maka komponen-komponen yang diperlukan dapat dilihat pada tabel 3.6

Tabel 3.6 Parameter Komponen Inverter Implementasi

Komponen Z-Source Inverter	Nilai
Induktor L_1 dan L_2	1.6 mH
Kapasitor C_1 dan C_2	416 μ F/400V
Dioda	MUR1560
Mosfet (S1 – S6)	IRFP460LC
Simple Boost Control dan Gate Driver	Nilai
Micro Controller	Arduino Mega
IC or Logic	74HCT04
IC not Logic	74HCT32
Gate Driver	FOD3182V
Gate Supply	12 Vdc

Nilai implementasi komponen disesuaikan dengan ketersediaan komponen yang ada di pasaran. Nilai pada komponen implementasi merupakan nilai yang lebih besar dari nilai komponen yang telah didesain. Hal tersebut bertujuan untuk mengantisipasi *voltage spike* pada *inverter*.



Gambar 3.9 Hasil Implementasi Alat Z-Source Inverter

Hasil implementasi *Z-Source inverter* dengan metode *simple boost control* yang sudah dirangkai dapat dilihat pada gambar 3.9. Pada gambar diatas *inverter* dibagi menjadi 4 rangkain utama. Bagian pertama yaitu *power supply* sebagai penyuplai tegangan pada *driver* MOSFET. Bagian kedua yaitu MOSFET dan arduino mega 2560 sebagai sistem pensaklaran utama konverter. Bagian keempat yaitu sumber impedansi yang terdiri dari induktor dan kapasitor sebagai sistem peningkat rasio konversi.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai analisis data hasil pengujian dari *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control*. Pengujian yang telah dilakukan meliputi pengujian sinyal *simple boost control*, tegangan kapasitor dan induktor, spektrum frekuensi dan bentuk tegangan serta arus keluaran *Z-Source inverter*, rasio konversi tegangan dan aplikasi *Z-Source inverter* sebagai pengaturan kecepatan motor induksi.

4.1 Alat Pengujian

Pengujian *Z-Source inverter* dengan metode *simple boost control* menggunakan peralatan yang terdapat pada laboratorium. Sumber tegangan DC yang digunakan yaitu sumber DC variabel. Sumber tegangan dioperasikan seri sehingga sumber DC memiliki spesifikasi tegangan maksimal 60 V dan arus maksimal 5 A. Tegangan masukan *Z-Source inverter* yang digunakan yaitu 48 V dan diberi beban berupa motor induksi 3 fasa dengan rating 56 V, 50 Hz dan daya 1 HP. Data pengujian karakteristik *Z-Source inverter* diambil menggunakan osiloskop dan *power quality analyzer*. Gambar 4.1 menunjukkan alat pengujian.

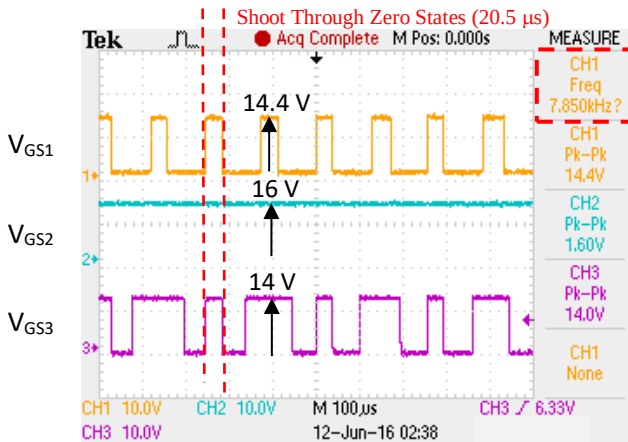


Gambar 4.1 Alat Pengujian *Z-Source Inverter* 3 Fasa

4.2 Pengujian Sinyal *Simple Boost Control*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang dari sinyal *simple boost control* yang diaplikasikan ke *Z-Source inverter* telah sesuai dengan hasil simulasi. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan *inverter* sebesar 48 V, Frekuensi pensaklaran yang digunakan yaitu 7.842 KHz, frekuensi *fundamental* sebesar 50 Hz, indeks modulasi sebesar 0.8, *shoot through duty ratio* sebesar 16.11% dan motor induksi diberi beban sebesar 0.6 N.m.

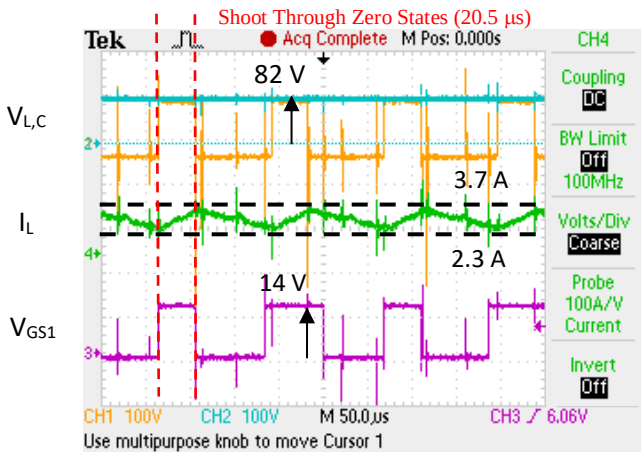
Hasil implementasi frekuensi dari sinyal V_{GS} yaitu sebesar 7.85 kHz. Nilai tersebut mendekati dengan hasil desain dan simulasi yaitu 7.842 kHz atau sebanding dengan periode 127.5 μs . *Shoot through duty ratio* diatur pada nilai 16.11% atau pada periode 20.5 μs . Pada periode tersebut *Z-Source inverter* akan mengalami hubung singkat dan inverter dalam mode II seperti yang telah dijelaskan pada bab 2. Besarnya amplitudo dari V_{GS} akan bergantung pada besarnya suplai pada MOSFET *driver*. Pada implementasi digunakan suplai sumber DC sebesar 12 V namun pada hasil pengukuran dengan osiloskop didapatkan nilai amplitudo V_{GS} bernilai 14 V seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian Sinyal *Simple Boost Control*

Gambar 4.3 menunjukkan hasil pengujian penggunaan *simple boost control* pada *Z-Source inverter* yang dilihat dari sisi tegangan pada bagian *gate-source* (V_{GS}) dan *drain-source* (V_{DS}). Bentuk gelombang hasil

MOSFET V_{GS} . Pada saat inverter dalam kondisi *non shoot through zero states* maka kapasitor C_1 dan C_2 maka akan mengalami *charging* dan tegangan pada induktor bernilai nol. Pada saat saklar dalam kondisi *shoot through zero states* maka kapasitor C_1 dan C_2 akan mengalami *discharge* dan arus mengisi induktor sehingga akan muncul tegangan pada induktor. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan nilai amplitudo tegangan dari kapasitor dan induktor adalah sama yaitu sebesar 81.5V. Pada hasil implemetansi didapatkan tegangan induktor dan kapasitor sebesar 82 V. Hal ini dapat disimpulkan bahwa hasil implementasi telah mendekati dari hasil desain dan simulasi



Gambar 4.4 Bentuk Sinyal Pensaklaran pada Induktor dan Kapasitor

Nilai arus rata – rata yang mengalir pada induktor yaitu sebesar 3 A. Pada implementasi nilai arus puncak induktor yaitu sebesar 3.7 A dan arus minimum sebesar 2.3 A. Sehingga didapatkan *ripple* induktor sebesar 45 %. Apabila dibandingkan dengan hasil implementasi maka arus *ripple* induktor pada saat inverter diberi beban 125 Watt yaitu sebesar 40 % A. Hal ini terdapat perbedaan dengan hasil simulasi dikarenakan komponen induktor yang tidak ideal. Induktor ketika dilewati arus yang semakin besar maka inti akan semakin panas sehingga menyebabkan perubahnya nilai permeabilitas inti berubah. Apabila nilai permeabilitas inti berubah maka nilai induktansi juga berubah. Selain itu rugi – rugi pada inti besi, fluks bocor akibat pengaruh celah udara dan rugi – rugi tembaga pada belitan

induktor juga mempengaruhi hasil *ripple* arus induktor. Perubahan nilai induktansi yang bergantung pada suhu dan adanya rugi - rugi tersebut yang membuat nilai arus *ripple* berbeda dengan hasil desain dan simulasi.

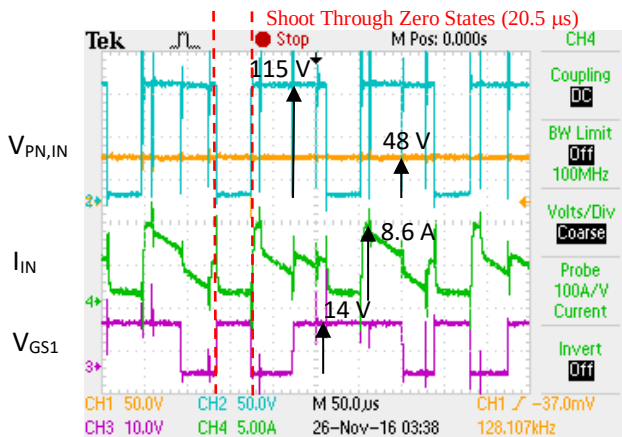
Berdasarkan hasil pengujian implementasi hasil gelombang tegangan pada kapasitor dan induktor telah sesuai dengan karakteristik tegangan *inverter* di simulasi. Namun, terdapat perbedaan nilai tegangan pada komponen dikarenakan kapasitor dan induktor pada implementasi merupakan komponen yang tidak ideal.

4.4 Tegangan DC Bus

Pengujian hasil sinyal DC bus dan rasio konversi tegangan pada inverter dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang karakteristik serta perbandingan tegangan input dengan tegangan DC bus. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan *inverter* sebesar 48 V, frekuensi *fundamental* sebesar 50 Hz, indeks modulasi sebesar 0.8, *shoot through duty ratio* sebesar 16.11% dan motor induksi diberi beban sebesar 0.6 N.m.

Pada gambar 4.5 menunjukkan gelombang dari DC bus (V_{PN}), tegangan masukan *inverter* (V_{IN}), arus induktor (I_{IN}) dan tegangan MOSFET gate – source (V_{GS}) pada saat tegangan input sebesar 48 V dan *shoot through duty ratio* sebesar 16.11%. Berdasarkan hasil pengujian dapat dianalisis bahwa pada saat saklar dalam kondisi *shoot through zero states*, tegangan pada DC bus (V_{PN}) bernilai nol dan arus input akan bernilai nol. Hal ini dikarenakan pada saat *shoot through zero states* maka sumber DC akan putus. Pada saat *inverter* berada dalam mode aktif maka tegangan DC bus (V_{PN}) akan muncul dan arus input akan mengalir ke rangkaian. *Spikes* tegangan pada DC bus akan muncul pada saat arus input mengalami pergantian nilai seperti yang terlihat pada gambar 4.5. Berdasarkan hasil perhitungan desain maka nilai tegangan puncak dari V_{PN} yaitu sebesar 115 V dan pada hasil implementasi didapatkan nilai sebesar 115 V.

Bentuk arus input dari hasil pensaklaran dengan *simple boost control* dapat dilihat seperti pada gambar 4.5. Pada hasil simulasi nilai arus input puncak bernilai dua kali lipat dari arus maksimum induktor. Sehingga dalam hasil perhitungan desain didapatkan arus puncak sebesar 7.28 A namun pada hasil implementasi didapatkan sebesar 8.6 A. Hal ini diakibatkan inverter terjadi fenomena *self boost* yang menyebabkan nilai arus lebih dari dua kali arus induktor.



Gambar 4.5 Hasil Pengujian Sinyal Tegangan V_{PN} , V_{IN} , V_{GS} dan Arus Input (I_{IN})

Berdasarkan hasil pengujian implementasi hasil gelombang tegangan DC bus dan arus input telah sesuai dengan karakteristik *inverter* di simulasi. Namun, terdapat perbedaan nilai tegangan pada komponen dikarenakan pada implementasi merupakan komponen yang tidak ideal.

4.5 Pengujian Pada Motor Induksi 3 Fasa

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa dari hasil implementasi *Z-Source Inverter* ke motor induksi 3 fasa. Pengujian pembebanan motor induksi dilakukan dengan cara memberikan tegangan input konstan sebesar 48 V, indeks modulasi sebesar 0.8, frekuensi output sebesar 50 Hz dan *shoot through duty ratio* dinaikan secara bertahap untuk menjaga tegangan output tetap konstan. Dengan keterbatasan alat pengeraman di laboratorium maka pembebanan motor induksi dinaikan secara bertahap dari 0 N.m hingga 0.6 N.m.

Berdasarkan hasil pengujian *Z-Source inverter* dengan motor induksi didapatkan data seperti pada tabel 4.1. Pada saat motor induksi tidak diberi beban maka inverter membutuhkan nilai *shoot through duty ratio* sebesar 0.12 dan apabila beban semakin naik untuk mendapatkan tegangan output konstan sebesar 56 V maka nilai *shoot through duty ratio* juga naik. Apabila hasil implementasi dibandingkan dengan hasil desain dan simulasi maka terdapat ketidak sesuaian. Pada desain dan simulasi untuk mendapatkan tegangan konstan 56 V dibutuhkan nilai *shoot through*

duty ratio sebesar 0.291. Namun, pada implementasi hanya dibutuhkan nilai *shoot through duty ratio* yang lebih rendah daripada hasil desain. Perbedaan pada saat implementasi dan simulasi diakibatkan oleh adanya fenomena *self boost*. Fenomena *self boost* muncul pada *Z-Source inverter* diakibatkan memenuhi persamaan dibawah ini.

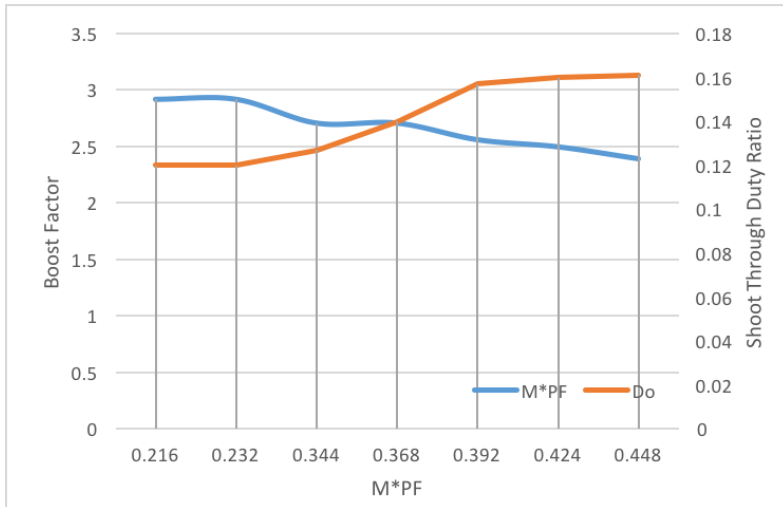
$$M \cos \phi < \frac{2}{3}$$

Selama pada nilai perkalian antara indeks modulasi dengan faktor daya kurang dari 2/3 maka akan kondisi *shoot through zero states* yang tidak diharapkan. Pada implementasi adanya pengaruh *self boost* secara grafik dapat dilihat pada gambar 4.6

Tabel 4.1 Hasil pengujian Z-Source Inveter pada pembebanan motor induksi 3 fasa dengan $V_{IN} = 48$ V, $M = 0.8$, $f = 50$ Hz

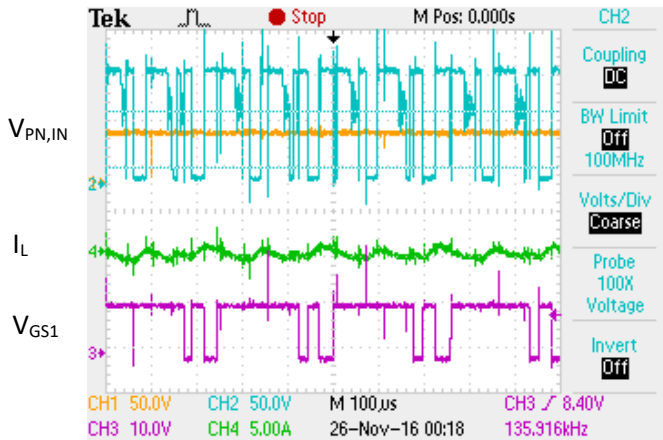
V_{IN}	I_{IN}	D_O	RPM	τ	PF	V_{PN}	V_O	I_O	THD	P_{IN}	P_O
48	0.9	0.12	1480	0.0	0.27	140	56	1.5	2.1	43	38
48	1.1	0.12	1475	0.1	0.29	140	56	1.5	2.1	53	47
48	1.4	0.13	1465	0.2	0.43	130	56	1.5	2.2	66	58
48	1.7	0.14	1457	0.3	0.46	130	56	1.6	2.3	84	74
48	2.1	0.16	1445	0.4	0.49	123	56	1.8	2.0	102	90
48	2.5	0.16	1436	0.5	0.53	120	56	2.0	2.0	120	106
48	3.0	0.16	1423	0.6	0.56	115	56	2.2	2.0	144	125

Pada kurva gambar 4.6 menunjukkan bahwa nilai perkalian antara indeks modulasi dengan faktor daya semakin mendekati 2/3 maka nilai peningkatan tegangan akan mendekati nilai pada hasil desain dan simulasi. Hal ini membuktikan bahwa fenomena *self boost* dapat dikurangi dengan menaikkan faktor daya beban. [17]



Gambar 4.6 Kurva Pengaruh *Self Boost* pada Z-Source Inverter

Pada saat Z-Source inverter diaplikasikan ke motor induksi 3 fasa yang berada dalam keadaan tanpa diberi beban atau saat inverter diberi beban kurang dari 20 % desain maka inverter akan masuk ke dalam *discontinuous conduction mode (DCM)*. Pada kondisi DCM maka bentuk tegangan DC bus akan berbeda dengan kondisi pada saat *continuous conduction mode (CCM)* seperti pada gambar 4.7. Kondisi DCM muncul akibat arus *ripple* induktor menyentuh nol. Hal ini disebabkan karena pada saat inverter diberi beban rendah maka arus yang mengalir sangat kecil sehingga diperlukan nilai induktansi yang lebih besar daripada saat inverter diberi beban sesuai atau mendekati desain ratingnya.

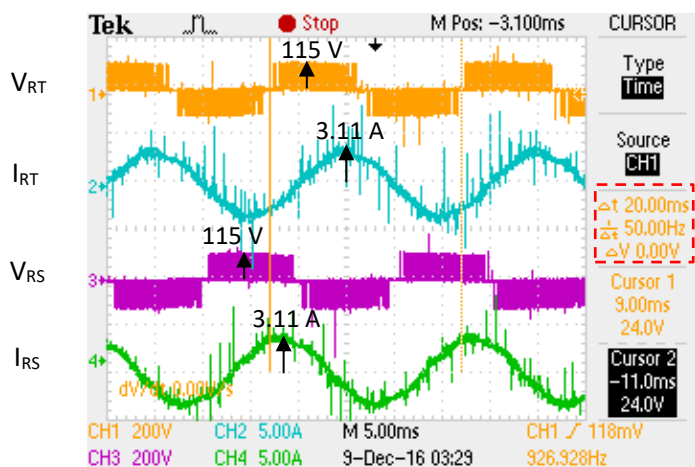


Gambar 4.7 Z-Source Inverter dalam Mode DCM

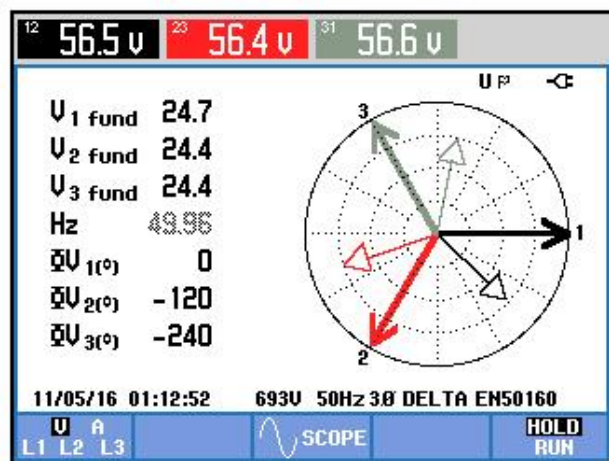
4.6 Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus Output Inverter

Pengujian arus dan tegangan output pada *inverter* dilakukan untuk membuktikan bahwa hasil implementasi telah sesuai dengan desain dan simulasi. Analisa pengujian gelombang tegangan dan arus meliputi bentuk gelombang, spektrum frekuensi dan harmonisa gelombang. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan *inverter* sebesar 48 V, frekuensi *fundamental* sebesar 50 Hz, indeks modulasi sebesar 0.8, *shoot through duty ratio* sebesar 16.11% dan motor induksi diberi beban sebesar 0.6 N.m.

Hasil tegangan dan arus output pada *inverter* dapat dilihat pada gambar 4.8. Bentuk tegangan *output inverter* berupa pulsa SPWM yang memiliki perbedaan sudut sebesar 120° antar fasanya sedangkan bentuk gelombang arus *output inverter* berupa gelombang sinus. Perbedaan sudut antara arus dan tegangan dapat dilihat pada gambar 4.9. Nilai rms tegangan *output* yaitu sebesar 56 V sedangkan nilai puncak yaitu sebesar 115 V atau sama dengan tegangan DC bus dan nilai arus *output rms* yaitu sebesar 2.2 A atau arus puncak sebesar 3.11 A. Berdasarkan hasil implementasi mengenai bentuk dan nilai arus dan tegangan output telah mendekati dari hasil desain dan simulasi.



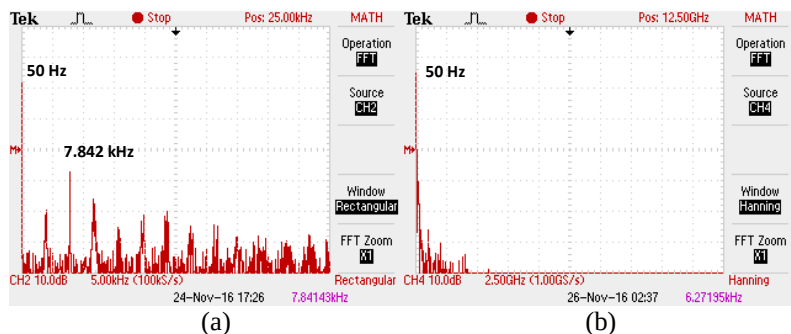
Gambar 4.8 Bentuk Sinyal Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus Output Inverter



Gambar 4.9 Diagram Fasor Arus dan Tegangan Output Z-Source Inverter

Pada hasil implementasi didapatkan spektrum frekuensi pada tegangan *output inverter* yang mengandung frekuensi pensaklaran dan frekuensi *fundamental* seperti yang terlihat pada gambar 4.10 (a).

Sedangkan pada hasil pengujian spektrum frekuensi arus *inverter* hanya mengandung frekuensi *fundamental* yaitu 50 Hz seperti yang terlihat pada gambar 4.10 (b). Nilai harmonisa pada arus keluaran *inverter* pada saat pembebanan 0.6 N.m bernilai 2%.



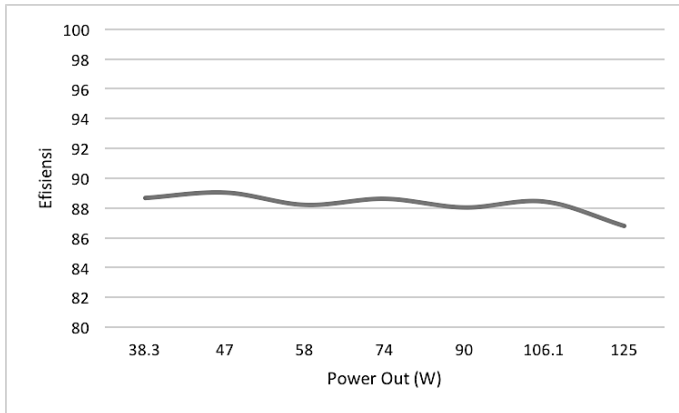
Gambar 4.10(a). Spektrum Frekuensi Tegangan Output Inverter

Gambar 4.10(b). Spektrum Frekuensi Arus Output Inverter

4.7 Pengujian Efisiensi Z-Source Inverter

Pengujian efiseinsi dilakukan untuk mengetahui pengaruh performa inverter terhadap pembebanan yang berubah – ubah. Pada hasil implementasi pembebanan motor induksi dapat diukur efisiensi *inverter* dengan cara membandingkan daya input dengan daya output *inverter*. Pengujian efisiensi inverter dilakukan dengan cara menaikkan beban motor induksi dari 0 N.m hingga 0.6 N.m.

Inverter memiliki efisiensi rata – rata sebesar 88% dan grafik pengaruh pembebanan terhadap efisiensi *inverter* dapat dilihat pada gambar 4.11. Semakin besar pembebanan maka efisiensi *inverter* akan menurun. Hal ini disebabkan adanya rugi – rugi yang semakin besar karena arus yang mengalir ke rangkaian akan meningkat seiring dengan naiknya beban. Rugi –rugi yang terjadi pada inverter antara lain *switching loss*, rugi pada inti induktor, rugi pada dioda *fast switching* dan *charge-dischage* kapasitor.

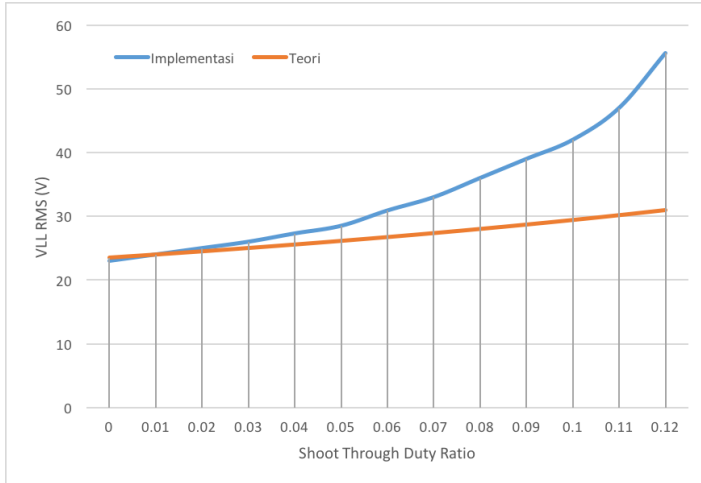


Gambar 4.11 Kurva Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi *Inverter*

4.8 Pengujian Faktor Peningkatan Tegangan

Pengujian rasio konversi bertujuan untuk mengetahui faktor peningkatan tegangan pada *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control*. Faktor peningkatan tegangan (B) merupakan perbandingan antara tegangan dc bus dengan tegangan *input*. Secara teori semakin besar nilai shoot through duty ratio, maka semakin besar rasio konversi sehingga tegangan output yang dihasilkan oleh *inverter* semakin tinggi. Pengujian rasio konversi dengan cara memberikan tegangan *input* konstan sebesar $V_{in} = 48 \text{ V}$ dan shoot through duty ratio dinaikkan secara bertahap. *Z-Source inverter* dibebani dengan motor induksi 3 fasa dan torsi pembebanan 0 N.m.

Gambar 4.12 menunjukkan grafik antara tegangan *output line to line rms* dengan shoot through duty ratio. Berdasarkan hasil implementasi didapatkan semakin besar nilai shoot through duty ratio maka faktor peningkatan tegangan semakin meningkat. Namun, apabila dibandingkan hasil implementasi dan teori maka terdapat perbedaan. Perbedaan hasil tersebut diakibatkan nilai faktor daya yang sangat rendah yaitu sebesar 0.27. Selain itu, pada setiap komponen seperti kapasitor, induktor, dioda dan MOSFET memiliki hambatan dalam. Resistansi pada tiap komponen mengakibatkan drop tegangan. Semakin besar nilai shoot through duty cycle maka semakin besar pula nilai arus yang mengalir sehingga drop tegangan akan semakin besar pula.



Gambar 4.12 Grafik Pengujian Rasio Peningkatan Tegangan

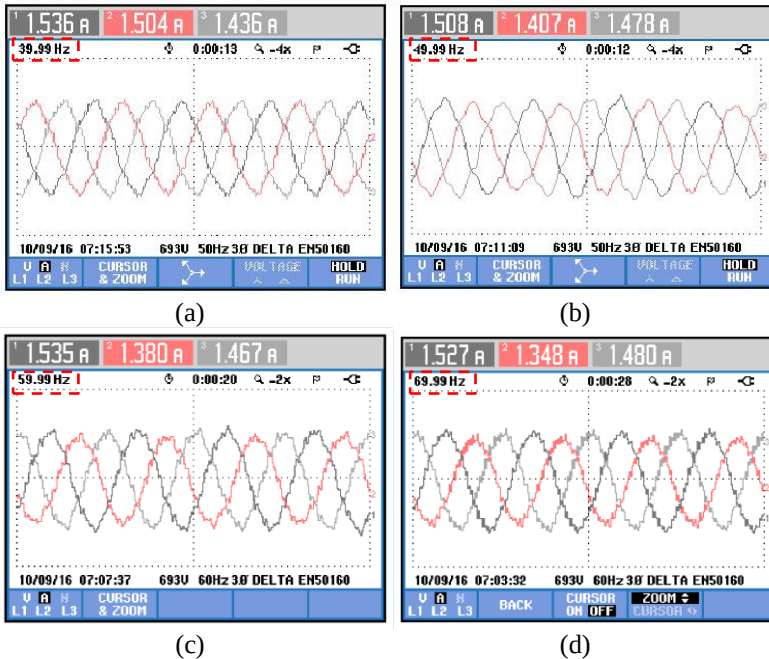
4.9 Pengujian Kontrol Kecepatan Motor Induksi

Pengujian *Z-Source Inverter* sebagai kontrol kecepatan motor induksi dilakukan dengan cara memberi tegangan masukan sebesar 48 V dan nilai indeks modulasi 0.8 sedangkan nilai *shoot through duty ratio* dan frekuensi *fundamental* dibuat berubah – ubah sesuai dengan aturan V/f konstan. Pengujian kontrol kecepatan dilakukan dengan motor induksi dalam keadaan tanpa beban.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian *Z-Source Inverter* sebagai Kontrol Kecepatan Motor Induksi untuk $V_{in} = 48$ V, $M = 0.8$ dan $\tau = 0$ N.m

In	Do	f	RPM	PF	V _{pn}	B	V _{rms}	I _{rms}	THD	Po
0.49	0.032	25	731	0.27	80	1.6	28.0	1.5	2.1	20.8
0.57	0.056	30	882	0.28	98	2.0	34.7	1.5	2.1	24.2
0.74	0.095	40	1182	0.27	112	2.3	44.5	1.5	2.2	31.4
0.9	0.121	50	1480	0.27	140	2.9	55.6	1.5	2.3	38.3
1.12	0.139	60	1778	0.27	165	3.4	68.9	1.5	2.1	46.3
1.3	0.150	70	2082	0.25	190	4.0	78.2	1.5	2.2	54.0

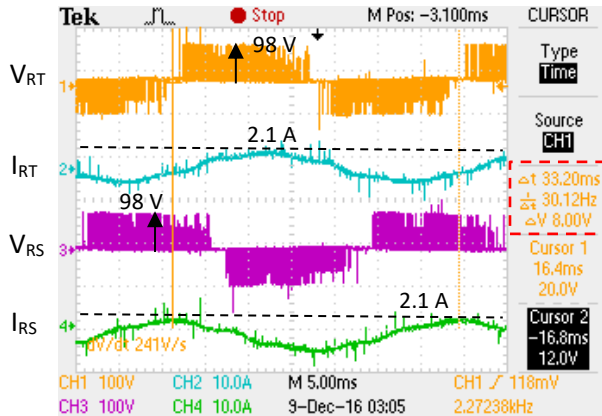
Pada hasil percobaan seperti pada tabel 4.2 didapatkan bahwa pada saat motor induksi dioperasikan dengan tegangan dan kecepatan yang berubah – ubah sesuai dengan V/f konstan maka nilai dari arus *output rms inverter* tetap sama yaitu sebesar 1.5 A. Perbandingan hasil pengujian arus *output rms* dapat dilihat pada gambar 4.13a hingga 4.13d. Arus yang diserap inverter akan semakin meningkat seiring dengan bertambah cepatnya kecepatan motor induksi sehingga daya pada *inverter* semakin besar ketika motor induksi dioperasikan semakin cepat.



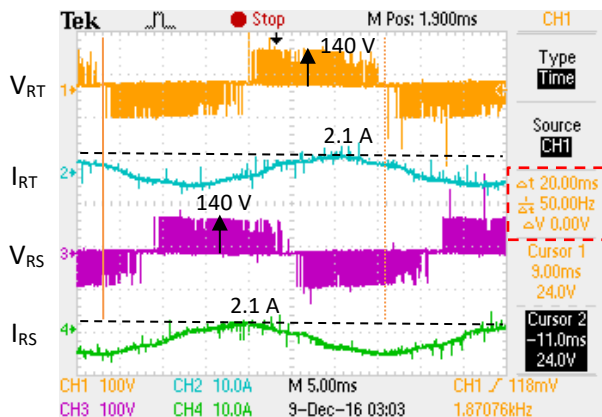
Gambar 4.13(a) Gelombang Arus Output pada Frekuensi 40 Hz, **Gambar 4.13(b)** Gelombang Arus Output pada Frekuensi 50 Hz, **Gambar 4.13(c)** Gelombang Arus Output pada Frekuensi 60 Hz, **Gambar 4.13(d)** Gelombang Arus Output pada Frekuensi 70 Hz

Periode arus dan tegangan inverter berubah – ubah sesuai dengan pengaturan frekuensi *fundamental* dan nilai *shoot through duty ratio*. Pada saat frekuensi *fundamental simple boost control* diatur 30 Hz maka tegangan dan arus akan memiliki periode sebesar 33 ms seperti yang

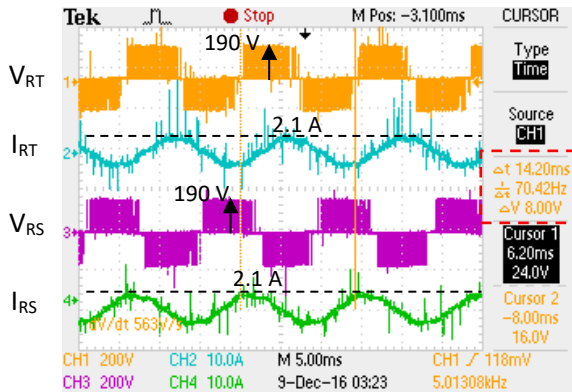
terlihat pada gambar 4.14. Pada saat frekuensi *fundamental simple boost control* diatur 50 Hz maka tegangan dan arus akan memiliki periode sebesar 20 ms seperti yang terlihat pada gambar 4.15 dan saat frekuensi *fundamental simple boost control* diatur 70 Hz maka tegangan dan arus akan memiliki periode sebesar 70.42 ms seperti yang terlihat pada gambar 4.16.



Gambar 4.14 Bentuk Sinyal Pengujian Tegangan dan Arus *Output* pada Frekuensi 30 Hz



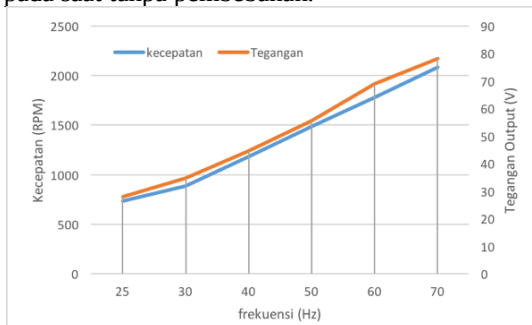
Gambar 4.15 Bentuk Sinyal Pengujian Tegangan dan Arus *Output* pada Frekuensi 50 Hz



Gambar 4.16 Bentuk Sinyal Pengujian Tegangan dan Arus *Output* pada Frekuensi 70 Hz

Nilai *shoot through duty ratio* yang dibutuhkan semakin naik seiring dengan naiknya frekuensi *fundamental*. Hal ini untuk mendapatkan tegangan output sesuai perbandingan V/f konstan seperti pada gambar 4.17. Namun, nilai *shoot through duty ratio* yang dibutuhkan pada saat implementasi tidak sesuai dengan hasil teori perhitungan. Hal ini dikarenakan adanya fenomena *self boost* pada *Z-Source Inverter*.

Kecepatan motor induksi pada saat frekuensi fundamental diubah – ubah maka akan mengikuti persamaan 2.29 pada bab 2. Pada hasil implementasi besar kecepatan motor induksi telah sesuai dengan teori yang ada dimana kecepatan motor induksi akan mendekati kecepatan sinkronnya pada saat tanpa pembebanan.



Gambar 4.17 Karakteristik V/f Konstan pada *Z-Source Inverter* sebagai Kontrol Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa

BAB 5

PENUTUP

Pada bab ini akan disampaikan beberapa kesimpulan dan saran dari Tugas Akhir yang disusun.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap simulasi dan implementasi *Z-Source inverter* dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi 3 fasa dapat disimpulkan menjadi beberapa hal sebagai berikut:

1. Topologi *Z-Source inverter* dengan metode *simple boost control* dapat menaikan tegangan dengan tanpa adanya penambahan topologi lain.
2. Pada implementasi tegangan keluaran *Z-Source inverter* mengandung frekuensi *fundamental* dan frekuensi pensaklaran sedangkan arus keluaran hanya mengandung frekuensi *fundamental*
3. Arus keluaran *Z-Source inverter* pada saat diaplikasikan ke motor induksi 3 fasa memiliki harmonisa yang sangat kecil yaitu sebesar 2%.
4. Pada implementasi *Z-Source inverter* akan menjadi mode DCM apabila diaplikasikan ke beban yang kurang dari 20% rating *inverter*.
5. Efisiensi rata – rata *Z-Source inverter* yaitu sebesar 88 %.
6. *Z-Source inverter* mampu menjadi kontrol kecepatan motor induksi 3 fasa (V/f konstan) dengan cara mengubah parameter *shoot through duty ratio* dan frekuensi *fundamental*.
7. Fenomena *self boost* muncul pada saat *Z-Source inverter* diberi beban yang memiliki faktor daya sangat rendah.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk perkembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. *Z-Source inverter* sebaiknya diaplikasikan untuk beban yang memiliki faktor daya yang diatas 0.8 agar fenomena *self boost* dapat dihindari. [6,17]
2. *Z-Source inverter* sebaiknya diaplikasikan diatas 50% dari ratingnya agar terhindar dari mode DCM.

3. *Z-Source inverter* sebaiknya diberi tambahan filter pada sisi keluaran sehingga bentuk tegangan dapat berupa sinusoidal.
4. Kontrol penyalan *Z-Source inverter* dapat menggunakan metode lainnya seperti *maximum boost control* maupun *constant maximum boost control with third harmonic injection* untuk mereduksi stress tegangan pada setiap komponen. [8,9,10]
5. Penambahan *snubber* pasif atau aktif pada *Z-Source inverter* dapat dilakukan untuk mengurangi *spikes* tegangan pada MOSFET. [11,18]
6. Komponen induktor pada *Z-Source inverter* dapat diganti dengan induktor terkopel untuk memperringkas dan menghemat biaya pembuatan. [17]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gajanayake, C.J., Vilathgamuwa, D.M., et al: 'Z-Source Inverter Based Flexible Distributed Generation System Solution for Grid Power Quality Improvement'. IEEE Trans on Energy Conv., Vol. 24, No.3, pp. 695-703, September 2009.
- [2] Peng, F.Z. Shen, M., Holland K., 'Application of Z-Source Inverter for Traction Drive of Fuel Cell-Battery Hybrid Electric Vehicles'. IEEE Trans Power Electron, Vol. 22, No.3, pp. 1054-1061. May 2007.
- [3] Peng, F.Z. 'Z-Source Inverter'. IEEE Trans. Ind. Appl., 2003. Vol. 39, pp.504-510
- [4] Rashid, M.H. 'Power electronics: circuit devices and applications'. (Prentice Hall), 1993
- [5] Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P. 'Power Electronics: Converters, Applications, and Design'. Canada. 1995. John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Hanif, M., Basu, M., Gaughan, K. 'Understanding the Operation of a Z-Source Inverter for Photovoltaic Application with a Design Example'. IET Power Electron. 2011. Vol. 4. Iss. 3. Pp. 278- 287
- [7] Loh, P.C., Vilathgamuwa, D.M., Lai, Y.S., Chua, G.T., et al.: 'Pulse- width modulation of Z-source inverters'. Industry Applications Conf., 39th IAS Annual Meeting, 3 – 7 October 2004, pp. 148 – 155
- [8] Peng, F.Z., Shen, M., Qian, Z.: 'Maximum boost control of the Z-source inverter', IEEE Trans. Power Electron., 2005, 20, (4), pp. 833 – 838
- [9] Shen, M., Wang, J., Joseph, A., Peng, F.Z., Tolbert, L.M., Adams, D.J.: 'Maximum constant boost control of the Z source inverter'. Proc. IEEE IAS '04, 2004, p. 147
- [10] Pham C.T, Shen A, Dzung P.Q, Anh N.B, and Phu N.X., "A Comparison of COnrol Methods for Z-Source Inverter". Scientific Research., Energy adn Power Engineering., no. 4, pp. 187-195, June 2012.
- [11] Haiping, X., Peng, F.Z., Lihua, C., et al: 'Analysis and Design of Bi-Directional Z-Source Inverter for Electrical Vehicles'. 23rd Annual Applied Power Electronics Conf. and Exposition, 2008. APEC 2008, 2008, pp. 1252-1257

- [12] Chapman, S. J.: 'Electric Machinery Fundamentals 4th ed'. New York. 2005. The McGraw-Hill Companies.
- [13] Qahhar, M., Riawan, D.C., Asfani, D.A., 'Penurunan Rating Tegangan pada Belitan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Rewinding Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik'. Tugas Akhir., Institut Teknologi Sepuluh Nopember., Juli 2013.
- [14] Diana L.R., "Practical Magnetic Design: Inductors and Coupled Inductors"., IEEE., pp 1-20.
- [15] TDK., "Ferrites and Accessories E65/32/27"., EPCOS AG, June 2013.
- [16] TDK., "Ferrites and Accessories SIFERRIT material N27"., EPCOS AG, September 2006
- [17] 'Z-Source inverter for fuel cell vehicles', prepared by Oak Ridge National Laboratory, Mitch Olszewski, Program Manager, for Energy Efficiency and Renewable Energy, FreedomCAR and Vehicle Technologies, Vehicle Systems Team, Susan A. Rogers, Technology Department Manager, September 2005
- [18] Shuai, D., Qianfan, Z., Chaowei, Z.: 'Analysis and Design of Snubber Circuit for Z-Source Inverter Applications'. IET Power Electron. vol. 9, iss. 5, pp. 1083-1091. December 2015.

LAMPIRAN

Coding Simple Boost Control 3 Fasa

```
/******DDS-sinewave - 3phase*****//  
//BY RIFKI DWISETYO WICAKSONO - 2213100089 - TEKNIK  
ELEKTRO ITS - COPYRIGHT PROTECTED - MODIFIED  
SPWM 3 PHASE WITH SHOOT THROUGH ZERO STATE AND  
VARIABLE FREQUENCY OUTPUT//  
  
// library used in this program  
#include "avr/pgmspace.h"  
#include "avr/io.h"  
#include <LCD.h>  
#include <LiquidCrystal_I2C.h>  
#include <Wire.h>  
#include <DallasTemperature.h>  
#include <OneWire.h>  
#include <PID_v1.h>  
#include <Encoder.h>  
  
// Useful AVR macros for setting and resetting bits  
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))  
        // clear a bit for disabling a function  
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))  
        // set a bit for enabling a function  
  
// Output pin  
#define PWM_OUT_1 12  
        // PWM output on pin 12 (1B) 240 degree  
#define PWM_OUT_2 11  
        // PWM output on pin 11 (1A) 120 degree  
#define PWM_OUT_3 10  
        // PWM output on pin 10 (2A) 0 degree  
#define PWM_OUT_7 6  
        // PWM output on pin 2 (4A) for shoot through  
#define PWM_OUT_8 7  
        // PWM output on pin 3 (4B) for shoot through
```

```

#define LED_PIN 13
    // LED status on pin 13
#define TEST_PIN 8
    // Scope trigger on pin 8
#define POTEN_IN0
    // Potentiometer on pin A0
#define OFFSET_1 85
    // Offset for second-phase 120 degree on pin11
#define OFFSET_2 170
    // Offset for third-phase 240 degree on pin12
#define FAN 2
    // Output pin for fan
#define ONE_WIRE_BUS 22
    // Temperature Input is on Pin 22
#define click 3
    // Rotary Encoder Click 3 int1
#define encoder0PinA 18
    // Rotary Encoder Pin 3 2 int5
#define encoder0PinB 17
    // Rotary Encoder Pin B 47 T5
#define CRITICAL 40.00
    // Critical temperature to ignore PID and turn on fans

// variables used inside interrupt service declared as volatile
volatile uint8_t icnt;
    // var inside interrupt
volatile uint8_t icnt1;
    // var inside interrupt
volatile uint8_t c4ms;
    // counter incremented every 4ms
volatile uint32_t phase_accum;
    // phase accumulator
volatile uint32_t tword_m;
    // dds tuning word m
volatile unsigned int encoder0Pos = 0;
    // Encoder value for ISR

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);

```

```

int POTEN_IN_1 = A0;
    // frequency control
int POTEN_IN_2 = A1;
    // Shoot Through Duty Ratio Control
int Val = 0;
    // initialization value for shoot through duty cycle
int timeCounter;
    // variable for timer counter

// 8bit table of 256 sine values / one sine period / stored in flash
memory
//index modultaion = 0.8
PROGMEM const unsigned char sine256[] =
{
128, 130, 132, 134, 135, 137, 139, 141, 143, 145, 146, 148, 150, 152,
154, 155, 157, 159, 160, 162, 164, 165, 167, 169, 170, 172, 173, 175,
176, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192,
193, 194, 195, 196, 197, 197, 198, 199, 200, 200, 201, 201, 202, 202,
203, 203, 203, 203, 204, 204, 204, 204, 204, 204, 204, 204, 203,
203, 203, 203, 202, 202, 201, 201, 200, 200, 199, 198, 197, 197, 196,
195, 194, 193, 192, 191, 190, 189, 188, 187, 186, 184, 183, 182, 180,
179, 178, 176, 175, 173, 172, 170, 169, 167, 165, 164, 162, 160, 159,
157, 155, 154, 152, 150, 148, 146, 145, 143, 141, 139, 137, 135, 134,
132, 130, 128, 126, 124, 122, 121, 119, 117, 115, 113, 111, 110, 108,
106, 104, 102, 101, 99, 97, 96, 94, 92, 91, 89, 87, 86, 84, 83, 81, 80,
78, 77, 76, 74, 73, 72, 70, 69, 68, 67, 66, 65, 64, 63, 62, 61, 60, 59,
59, 58, 57, 56, 56, 55, 55, 54, 54, 53, 53, 53, 53, 52, 52, 52, 52, 52,
52, 52, 52, 52, 53, 53, 53, 53, 54, 54, 55, 55, 56, 56, 57, 58, 59, 59,
60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 76, 77, 78, 80,
81, 83, 84, 86, 87, 89, 91, 92, 94, 96, 97, 99, 101, 102, 104, 106, 108,
110, 111, 113, 115, 117, 119, 121, 122, 124, 126
};

byte l1[8] =
{
    B10000,
    B10000,
    B10000,
    B10000,

```

```
B10000,  
B10000,  
B10000,  
};
```

```
byte l2[8] =  
{  
    B11000,  
    B11000,  
    B11000,  
    B11000,  
    B11000,  
    B11000,  
    B11000,  
};
```

```
byte l3[8] =  
{  
    B11100,  
    B11100,  
    B11100,  
    B11100,  
    B11100,  
    B11100,  
    B11100,  
};
```

```
byte l4[8] =  
{  
    B11110,  
    B11110,  
    B11110,  
    B11110,  
    B11110,  
    B11110,  
    B11110,  
};
```

```

byte l5[8] =
{
    B11111,
    B11111,
    B11111,
    B11111,
    B11111,
    B11111,
    B11111,
    B11111,
};

double dfreq;

//choose one switching frequency
//const double refclk = 62500;
//    measured fs = 62.5 KHz for FAST PWM
//const double refclk = 31372.55;
//    measured fs = 31.25 KHz for PHASE CORRECT PWM
const double refclk = 3921.16;
//    measured fs = 3.92 KHz for PHASE CORRECT PWM

const uint64_t twoTo32 = pow(2, 32 );
//    compute value at startup and use as constant
//    2^32 for high resolution

//Setup Temperature Sensor
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

//Setup PID
double Setpoint, Input, Output;
//    I/O for PID
double aggKp=40, aggKi=2, aggKd=10;
//    original: aggKp=4, aggKi=0.2, aggKd=1, Aggressive
//    Turning,50,20,20
double consKp=20, consKi=1, consKd=5;
//    original: consKp=1, consKi=0.05, consKd=0.25,
//    Conservative Turning,20,10,10

```

```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, consKp, consKi, consKd,
REVERSE);
```

```
    // Initialize PID
```

```
    /*******
```

```
    *****/
```

```
void setup()
```

```
{
```

```
    // LCD setting coloumn, row
```

```
    lcd.begin(20, 4);
```

```
    lcd.backlight();
```

```
    lcd.clear();
```

```
    lcd.setCursor(0, 0);
```

```
    lcd.print("RIFKI  TUGAS AKHIR");
```

```
    lcd.setCursor(0, 1);
```

```
    lcd.print("3-PHASE ZSI INVERTER");
```

```
    lcd.setCursor(0, 2);
```

```
    lcd.print("SIMPLE BOOST CONTROL");
```

```
    // LCD progress bar
```

```
    lcd.createChar(0, l1);
```

```
    lcd.createChar(1, l2);
```

```
    lcd.createChar(2, l3);
```

```
    lcd.createChar(3, l4);
```

```
    lcd.createChar(4, l5);
```

```
    lcd.setCursor(0, 3);
```

```
    lcd.print("      ");
```

```
    for (int i = 0; i < 20; i++)
```

```
    {
```

```
        for (int j = 0; j < 5; j++)
```

```
        {
```

```
            lcd.setCursor(i, 3);
```

```
            lcd.write(j);
```

```
            delay(40);
```

```
        }
```

```
    }
```

```
    delay(400);
```

```
    lcd.clear();
```

```

pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    // sets the digital pin as output
pinMode(TEST_PIN, OUTPUT);
    // sets the digital pin as output
pinMode(PWM_OUT_1, OUTPUT);
    // PWM output / frequency output
pinMode(PWM_OUT_2, OUTPUT);
    // PWM output / frequency output
pinMode(PWM_OUT_3, OUTPUT);
    // PWM output / frequency output
pinMode(FAN, OUTPUT);
    // Output for fan speed, 0 to 255
pinMode(click, INPUT);
    // Click button is an input
pinMode(encoder0PinA, INPUT);
digitalWrite(encoder0PinA, HIGH);
    // Turn on pullup resistor
pinMode(encoder0PinB, INPUT);
digitalWrite(encoder0PinB, HIGH);
    // Turn on pullup resistor

//Set up Interrupts
attachInterrupt(1, clicked, RISING);
    // Click button on interrupt 1 - pin 3
attachInterrupt(5, doEncoder, CHANGE);
    // Encoder pin on interrupt 5 - pin 18

// Setting for shoot through
TCCR4A = _BV(WGM40) | _BV(COM4B1) | _BV(COM4A1);
    // set to 8 bit phase correct
TCCR4B = _BV(CS41);
    // set prescaler 8

// Setup the timers
setup_timer1();
setup_timer2();

// disable interrupts to avoid timing distortion
// sbi (TIMSK0, TOIE0);

```

```

// disable Timer0 | delay() is now not available | this is for SPWM
stability purpose
  sbi (TIMSK2, TOIE2);
    // enable Timer2 Interrupt

dfreq = 50;
    // initial output frequency = 50 Hz
tword_m = twoTo32 * dfreq / refclk;
    // calulate DDS new tuning word

//Temperature Setup
sensors.begin();
    // Start Library
sensors.requestTemperatures();
    // Send the command to get temperatures
Input = sensors.getTempCByIndex(0);
    // Set Input to Current Temperature
Setpoint = 28;
    // Initialize desired Temperature in Deg C
encoder0Pos = 28;
    // Initialize value of encoder position

//PID Setup
myPID.SetMode(AUTOMATIC);

//interface
timeCounter=0;
}

//*****
*****

void loop()
{
  // VARYING FREQUENCY OUTPUT OF SPWM
  if (c4ms > 250)
    // timer | change frequency until full of second | for stability
  purpose
  {
    c4ms = 0;

```



```

        // reset c4ms value to zero
        dfreq = analogRead(POTEN_IN_1);
        // read Potentiometer on analog pin 0 to adjust output
        frequency from 0-1023 Hz
        cbi (TIMSK2, TOIE2);
        // disble Timer2 Interrupt
        tword_m = twoTo32 * dfreq / refclk;
        // calculate DDS new tuning word | change frequency
        modulation index in SPWM
        sbi (TIMSK2, TOIE2);
        // enable Timer2 Interrupt
    }

    // SHOOT-THROUGH ZERO STATES
    float Val = analogRead(POTEN_IN_2);
    // Read value of potensiometer
    analogWrite(PWM_OUT_7, 255-Val / 4);
    // Set a teverse duty cycle ratio with PWM_OUT_7
    analogWrite(PWM_OUT_8, Val / 4);
    // Set duty cycle ratio
    //delay(100);
    // delay 100 ms for stability purpose

    timeCounter++;

    //Get temperature and give it to the PID input
    sensors.requestTemperatures();
    // Request in dallas temperature sensor
    Input=sensors.getTempCByIndex(0);
    // Get temperature data in celcius

    //Compute PID value
    double gap = abs(Setpoint-Input);
    // distance away from setpoint
    if(gap<1)
    {
        //Close to Setpoint, be conservative
        myPID.SetTunings(consKp, consKi, consKd);
    }

```

```

else
{
    //Far from Setpoint, be aggressive
    myPID.SetTunings(aggKp, aggKi, aggKd);
}
myPID.Compute();
analogWrite(FAN,255);

//Write PID output to fan if not critical
if (Input<CRITICAL)
    analogWrite(FAN,Output);
else
    analogWrite(FAN,255);

//print out info to LCD
// LCD print parameter row 1
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("T:");
lcd.print(int(Input));
lcd.print("C ");
lcd.print(" U:");
lcd.print("V");
lcd.print(" I:");
lcd.print("A");

// LCD print parameter row 2
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("SET:");
lcd.print(int(Setpoint));
lcd.print(" FAN:");
lcd.print(int(Output*22.353));
lcd.print("RPM ");

// LCD print parameter row 3
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("M=92% ");
lcd.print(" Do=");
lcd.print(int((100 * (Val / 4)) / 256));
lcd.print("%");

```

```

// LCD print parameter row 4
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Fo=");
lcd.print(int(dfreq));
lcd.print("Hz ");
lcd.print("Fs=");
lcd.print(float(2*refclk/1000));
lcd.print("KHz");
}

/*****
*****

// timer1 setup
// prescaler = 2, select PWM mode = fast pwm or phase correct

void setup_timer1(void)
{
    // Timer1 Clock Prescaler to : 2
    cbi (TCCR1B, CS10);
        // 010 = prescaler 8
    sbi (TCCR1B, CS11);
        // select timer interrupt
    cbi (TCCR1B, CS12);

    // Settinf for Timer1
    cbi (TCCR1A, COM1A0);
        // clear Compare Match
    sbi (TCCR1A, COM1A1);
        // 10 = clear OC1A compare match
    cbi (TCCR1A, COM1B0);
        // clear Compare Match
    sbi (TCCR1A, COM1B1);
        // 10 = clear OC1B compare match

    // Choose Fast PWM or Phase Correct
    // Waveform Generation Mode bits
    sbi (TCCR1A, WGM10);
        // Mode 1 / Phase Correct PWM

```

```

cbi (TCCR1A, WGM11);
    // 0001 is phase correct 8-bit
cbi (TCCR1B, WGM12);
cbi (TCCR1B, WGM13);

// Waveform Generation Mode bits
//sbi (TCCR1A, WGM10);
    // Mode 2 / Fast PWM
//cbi (TCCR1A, WGM11);
    // 0101 is Fast PWM 8-bit
//sbi (TCCR1B, WGM12);
//cbi (TCCR1B, WGM13);
}

//*****
*****

// timer2 setup
// prescaler = 2, select PWM mode = fast pwm or phase correct

void setup_timer2(void)
{
    // Timer2 Clock Prescaler to : 2
    cbi (TCCR2B, CS20);
        // 010 = prescaler 8
    sbi (TCCR2B, CS21);
        // select timer interrupt
    cbi (TCCR2B, CS22);

    // Setting for Timer2
    cbi (TCCR2A, COM2A0);
        // clear Compare Match
    sbi (TCCR2A, COM2A1);
        // 10 = clear OC2A compare match

    // Choose Fast PWM or Phase Correct
    // Waveform Generation Mode bits
    sbi (TCCR2A, WGM20);
        // Mode 1 / Phase Correct PWM
    cbi (TCCR2A, WGM21);

```

```

        // 001 is phase correct 8-bit
//cbi (TCCR2B, WGM22);

// Waveform Generation Mode bits
//sbi (TCCR2A, WGM20);
        // Mode 1 / Fast PWM mode
//sbi (TCCR2A, WGM21);
        // 011 is Fast PWM 8-bit
//cbi (TCCR2B, WGM22);
}

/*****
*****
// Timer2 Interrupt Service at 3.921 KHz
// this is the timebase REFCLOCK for the DDS generator
// FOUT = (M (REFCLK)) / (2 exp 32)
// This version uses quarter wave symmetry to shrink table size by 4
// runtime : timerclk/4 microseconds (inclusive push and pop)
ISR(TIMER2_OVF_vect)
{
sbi(PORTD, TEST_PIN);
        // Test / set PORTD,8 high to observe timing with a
        oscilloscope
phase_accum += tword_m;
        // soft DDS, phase accumulator with 32 bits
icnt = phase_accum >> 24;
        // use upper 8 bits for phase accumulator as frequency
        information

// read value from ROM sine table and send to PWM DAC
OCR2A = pgm_read_byte_near(sine256 + (uint8_t)(icnt +
OFFSET_1));
        // pin10
OCR1A = pgm_read_byte_near(sine256 + icnt);
        // pin11
OCR1B = pgm_read_byte_near(sine256 + (uint8_t)(icnt +
OFFSET_2));
        // pin12

```

```

    if (icnt1++ == 125)
        // increment variable c4ms every 4 milliseconds
    {
        c4ms++;
        icnt1 = 0;
    }
    cbi(PORTD, TEST_PIN);
        // reset PORTD,TEST_PIN
}

void doEncoder()
{
    //pinA and pinB are both high or both low, spinning forward,
    otherwise it's spinning backwards
    if (digitalRead(encoder0PinA) == digitalRead(encoder0PinB))
    {
        encoder0Pos--;
    }
    else
    {
        encoder0Pos++;
    }
    Setpoint=encoder0Pos;
}

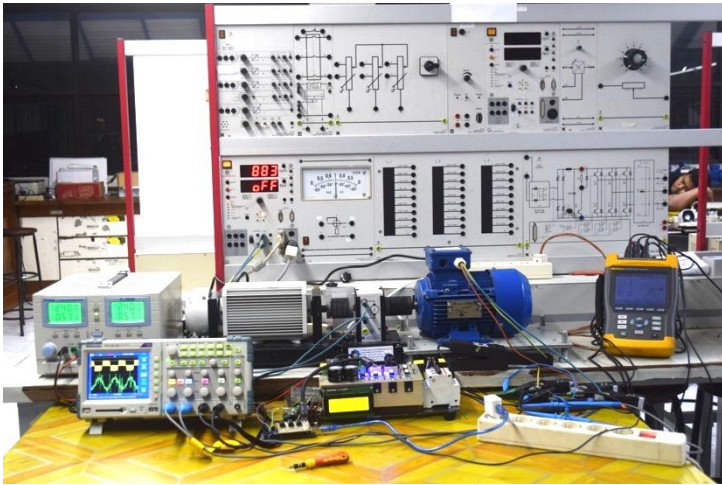
void clicked()
{
    //For interface
    lcd.clear();
    lcd.print("clicked!");
        //This is unused, but feel free to use the click for something
        using this interrupt
    delay(1000);
}

```

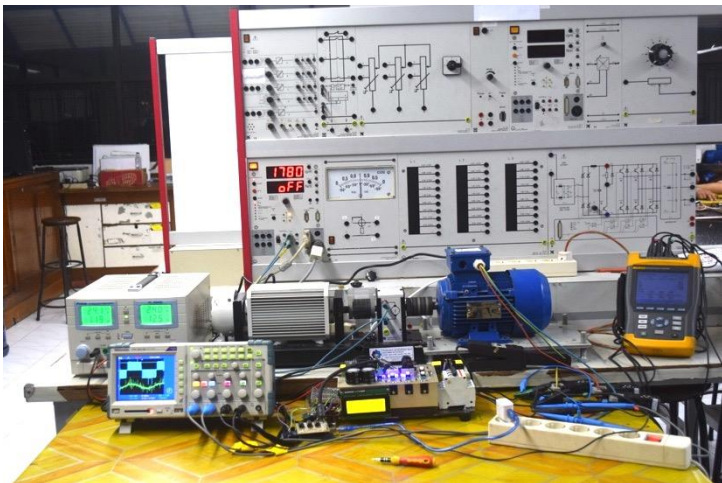
Tabel Kawat Tembaga AWG

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [A]	Max Frequency for 100% skin depth
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	0.0404	130.1	426.728	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091	430 kHz
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	0.016	329	1079.12	0.044	870 kHz
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.035	1100 kHz
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289	1350 kHz
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137	2900 kHz

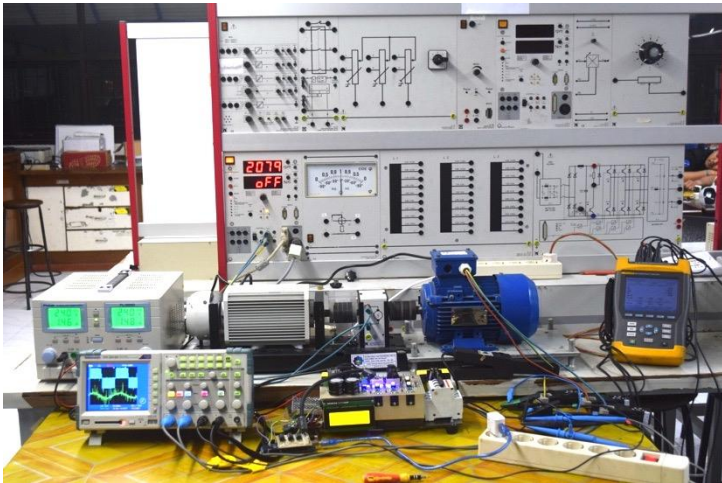
Pengujian Kontrol Kecepatan Motor Induksi pada 30 Hz



Pengujian Kontrol Kecepatan Motor Induksi pada 60 Hz



Pengujian Kontrol Kecepatan Motor Induksi pada 70 Hz



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Rifki Dwisettyo Wicaksono atau biasa dipanggil Rifki. Penulis lahir pada tanggal 28 Agustus 1994 di kota Tuban, Jawa Timur. Penulis menempuh sekolah dasar di SDN Latsari II Tuban selama tiga tahun kemudian melanjutkan studi di SDN Unggulan Tuban. Setelah lulus SD, penulis melanjutkan sekolah di SMPN 1 Tuban. Setelah tiga taun menempuh pendidikan kemudian melanjutkan studi di luar kota yaitu SMAN 3 Malang dan akhirnya melanjutkan studi sarjana di Teknik Elektro ITS. Selama karir, penulis aktif di bidang penelitian, lomba karya tulis ilmiah, aktif di beberapa organisasi maupun ekstrakurikuler dan sebagai koordinator asisten laboratorium konversi energi di ITS. Penulis memiliki hobi yaitu meneliti dibidang elektronika terutama yang berhubungan dengan proses switching, programming java untuk handphone, overclocking pada komputer, menggambar, melukis, audiophile, dan olahraga. Beberapa penelitian yang pernah penulis kerjakan yaitu diantaranya wireless power transfer dengan metode resonansi magnetik pada frekuensi medium, DC to DC step up konverter, Medium frekuensi inverter untuk aplikasi wireless transmitter dan z-source inverter dengan metode simple boost control. Penulis mempunyai motto hidup yaitu “All in or Nothing”.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--