



TUGAS AKHIR - TE141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *Z-SOURCE INVERTER*
(ZSI) DENGAN METODE *SIMPLE BOOST CONTROL*
SEBAGAI PENGATUR TEGANGAN DAN FREKUENSI
UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
MIKRO HIDRO SISTEM *STANDALONE***

Rizki Mendung Ariefianto
NRP 071113400097

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Suwito, ST., MT.

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



FINAL PROJECT - TE141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF Z-SOURCE
INVERTER (ZSI) WITH SIMPLE BOOST CONTROL
METHOD AS VOLTAGE AND FREQUENCY
CONTROLLER IN STAND ALONE MICRO HYDRO POWER
PLANT SYSTEM**

Rizki Mendung Ariefianto
NRP 071113400097

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

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

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

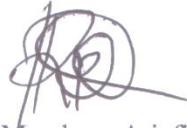
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Desain dan Implementasi Z-Source Inverter (ZSI) dengan Metode *Simple Boost Control* sebagai Pengatur Tegangan dan Frekuensi untuk Aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Sistem *Stand Alone*”** 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, 13 November 2017



Rizki Mendung Ariefianto

NRP. 071113400097

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI Z-SOURCE INVERTER (ZSI)
DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL SEBAGAI
PENGATUR TEGANGAN DAN FREKUENSI UNTUK APLIKASI
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO SISTEM
STANDALONE**

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui :

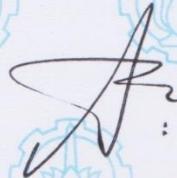
Dosen Pembimbing I



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

NIP. 198006032006041003

Dosen Pembimbing II



Suwito, ST., MT.

NIP. 198101052005011004



-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *Z-SOURCE* INVERTER (ZSI) DENGAN METODE *SIMPLE* *BOOST CONTROL* SEBAGAI PENGATUR TEGANGAN DAN FREKUENSI UNTUK APLIKASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO SISTEM *STANDALONE*

Rizki Mendung Ariefianto
0711134000097

Pembimbing I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Pembimbing II : Suwito, ST., MT

ABSTRAK

Implementasi pembangkit listrik tenaga mikro hidro *standalone* memiliki masalah adanya perubahan tegangan dan frekuensi output akibat perubahan putaran generator. Oleh karena itu, ditawarkan solusi penggunaan penggunaan *Z-Source Inverter (ZSI)* dengan metode *simple boost control* untuk mengatur tegangan dan frekuensi output. Penelitian ini bertujuan untuk pengaturan tegangan dan frekuensi pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro menggunakan rangkaian *Z-Source Inverter*. Pada penelitian ini *Z-Source Inverter* mampu menaikkan tegangan dari input 52 V menjadi 60 V AC dengan nilai *shoot through duty ratio* 17%. Karakteristik gelombang *Z-Source Inverter* telah sesuai dengan simulasi. Efisiensi *Z-Source Inverter* mencapai 80.2%. *Z-Source Inverter* mampu mengatur tegangan keluaran konstan 60 V pada *range shoot through duty ratio* 15-17% dengan perubahan input 52 sampai 46 V. Pengaturan secara *close loop* pada simulasi dilakukan dengan menginputkan parameter *gain* sebesar 0,0007 dan *time constant* 0,002 pada kontroler PI. Selain itu *Z-Source Inverter* mampu mengatur frekuensi sesuai dengan frekuensi fundamental yang disetting di inverter meskipun dilakukan perubahan kecepatan pada generator induksi. Tegangan output berupa gelombang AC sinusoidal dengan nilai *total harmonic distortion (THD)* sebesar 7.43%.

Kata Kunci: *Z-source inverter, Simple boost control, Shoot through duty ratio, Pembangkit listrik tenaga mikro hidro*

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF Z-SOURCE
INVERTER (ZSI) WITH SIMPLE BOOST CONTROL
METHOD AS VOLTAGE AND FREQUENCY
CONTROLLER IN STAND ALONE MICRO HYDRO
POWER PLANT SYSTEM**

Rizki Mendung Ariefianto

0711134000097

Advisor I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

Advisor II : Suwito, ST., MT

ABSTRACT

Implementation of standalone micro hydro power plant has some problems like changes in voltage and output frequency due to rotation of induction generator. Therefore, the solution offered is using of Z-Source Inverter (ZSI) with simple boost control method to control the voltage and output frequency. This study aims to regulate the voltage and frequency of micro hydro power plants using the Z-Source Inverter topology. In this study Z-Source Inverter able to raise the input voltage from 52 V to 60 V AC with shoot through duty ratio of 17%. The waveform characteristic of Z-Source Inverter has been correct with the simulation. The efficiency of Z-Source Inverter reaches 80.2%. Z-Source Inverter is able to set a constant output voltage of 60 V in the range of 15-17% shoot through duty ratio with input changes of 52 to 46 V. The close loop arrangement in the simulation is done by inputting a gain parameter of 0.0007 and time constant 0.002 on the controller PI. In addition, Z-Source Inverter is able to adjust the frequency according to the fundamental frequency set in the inverter even though the speed changes on the induction generator. The output voltage is a sinusoidal AC wave with a total value of harmonic distortion (THD) of 7.43%.

Keywords: Z-source inverter, Simple boost control, Shoot through duty ratio, Micro hydro power plant

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang atas berkat, rahmat dan karunia-Nya Tugas Akhir dengan **“Desain dan Implementasi Z-Source Inverter (ZSI) dengan Metode Simple Boost Control sebagai Pengatur Tegangan dan Frekuensi untuk Aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Sistem Stand Alone”** dapat diselesaikan dengan baik. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi orang lain terutama pembaca.

Alhamdulillah, penulisan Tugas Akhir ini dapat selesai tepat waktu berkat dorongan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang membantu dan membimbing dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini. Secara khusus penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Sucipto dan Ibu Arbaatun, beserta keluarga besar yang sangat berjasa untuk senantiasa memberikan semangat, dukungan dan doa yang sangat berarti.
2. Pondok Pesantren Muhyiddin beserta segenap keluarga Ndalem dan teman-teman pondok yang senantiasa mendoakan dan memberikan dorongan spiritual bagi penulis.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D, Bapak Suwito., ST.,MT, dan Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. serta dosen departemen Teknik Elektro yang telah membimbing dengan sabar dan memberikan banyak saran dan masukan yang sangat penting bagi penulis.
4. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D selaku kepala laboratorium konversi energi listrik yang telah membina dan memfasilitasi asisten laboratorium.
5. Rekan-rekan Asisten Lab Konversi Energi Listrik khususnya angkatan 2013; Jiwo, Rifki, Fahad, Indro, Irawan Osas, Bis, Alifi, Putri, Friska, Akbar, Syarif, Nafiar dan asisten 2014
6. Angkatan e53 *Unpredictable* yang menemani selama perjuangan di kampus ITS
7. Semua mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan semangat dan motivasi untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman trainer keilmiah Navigator sebagai kawan seperjuangan keilmiah

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih terdapat kekurangan, baik dari aspek materi, sistematika penulisan, maupun dari aspek bahasa yang digunakan. Oleh karena itu, besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat dikembangkan oleh mahasiswa selanjutnya. Semua saran perbaikan untuk penelitian ini penulis terima dengan senang hati.

Semoga penelitian ini bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi pembaca pada umumnya.

Surabaya, 13 November 2017

Penulis

DAFTAR ISI

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

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Laporan.....	6
1.7 Relevansi.....	7

BAB 2 Z-SOURCE INVERTER DENGAN METODE SIMPLE BOST CONTROL DAN GENERATOR INDUKSI TIGA FASA

2.1 <i>Z-Source Inverter (ZSI)</i>	9
2.1.1 Analisa Rangkaian <i>Z-Source Inverter</i>	11
2.1.2 Penurunan Persamaan Rasio Konversi Inverter.....	13
2.1.2.1 Persamaan pada Kondisi <i>Shoot Through Zero States</i> dan <i>Non Shoot Through Zero States</i>	13
2.1.2.2 Persamaan Alternatif <i>Z-Source Inverter</i>	16
2.1.2.3 Persamaan <i>Shoot Through Duty Ratio (D₀)</i>	17
2.1.3 Penurunan Persamaan Parameter Komponen.....	17
2.1.3.1 Induktor.....	17
2.1.3.2 Kapasitor.....	18
2.1.3.3 Stress Tegangan dan Arus pada Komponen.....	19
2.2 Generator Induksi Tiga Fasa.....	19
2.2.1 Kapasitor <i>Bank</i> untuk Eksitasi Generator Induksi.....	22
2.2.2 Perhitungan Nilai Parameter Generator Induksi.....	23

2.2.3 Pengaturan Tegangan dan Frekuensi pada PLTMH.....	25
2.3 <i>Rectifier</i> Tiga Fasa.....	25
2.4 <i>Low Pass Filter</i> (LPF).....	27
2.5 <i>Simple Boost Control</i>	27
2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro.....	29
2.6.1 Pemilihan Jenis Turbin.....	30

BAB 3 DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI Z-SOURCE INVERTER

3.1 Diagram Blok Sistem.....	33
3.2 Parameter untuk Model Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro.....	34
3.2.1 Generator Induksi.....	34
3.2.2 <i>Variable Frequency Drive</i>	35
3.2.3 Kapasitor <i>Bank</i> Tiga Fasa.....	36
3.2.4 <i>Rectifier</i> Tiga Fasa.....	37
3.2.5 <i>Low Pass Filter</i>	38
3.3 Desain Z-Source Inverter dengan Metode <i>Simple Boost Control</i>	38
3.3.1 Penentuan Rasio Konversi dan <i>Shoot Through Duty Ratio</i>	39
3.3.2 Penentuan Nilai Induktor.....	40
3.3.3 Penentuan Nilai Kapasitor.....	40
3.4 Simulasi pada Kondisi <i>Steady State</i>	40
3.4.1 Simulasi Sinyal <i>Simple Boost Control</i>	42
3.4.2 Simulasi Karakteristik Gelombang Tegangan Kapasitor, Tegangan Induktor, dan Arus Induktor.....	43
3.4.3 Simulasi Karakteristik Tegangan DC Bus.....	44
3.4.4 Simulasi Karakteristik Gelombang Tegangan dan Arus Output Inverter pada Beban Konstan.....	44
3.4.5 Simulasi Kontrol Tegangan.....	45
3.4.6 Simulasi Kontrol Frekuensi.....	46
3.5 Implementasi Z-Source Inverter.....	47
3.5.1 Induktor.....	47
3.5.2 Kapasitor.....	50
3.5.3 Penentuan Dioda.....	50
3.5.4 Penentuan MOSFET.....	51
3.5.5 Desain <i>Simple Boost Control</i>	52
3.5.6 Desain Driver MOSFET.....	53

3.5.7 Hasil Implementasi <i>Z-Source Inverter</i>	54
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	
4.1 Alat Pengujian.....	57
4.2 Penentuan Kecepatan Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro.....	57
4.3 Pengujian Generator Induksi.....	58
4.4 Pengujian Sinyal <i>Simple Boost Control</i>	60
4.5 Pengujian Rangkaian <i>Z-Source Inverter</i>	62
4.5.1 Pengujian Karakteristik Gelombang Induktor Dan Kapasitor pada <i>Z-Source Inverter</i>	62
4.5.2 Pengujian Karakteristik Tegangan DC Bus.....	64
4.5.3 Pengujian Karakteristik Gelombang Tegangan dan Arus Output Inverter.....	65
4.6 Kontrol Tegangan pada <i>Z-Source Inverter</i>	68
4.7 Kontrol Frekuensi.....	73
4.8 Pengujian Efisiensi <i>Z-Source Inverter</i>	75
4.9 Pengujian <i>Boosting Factor</i>	76
4.10 Pengujian <i>Z-Source Inverter</i> dengan Perubahan Kecepatan Generator Induksi.....	77
BAB 5 PENUTUP	
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	85
RIWAYAT HIDUP PENULIS	97

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram Alir Metode Penelitian.....	4
Gambar 2.1	Rangkaian dari <i>Z-Source Inverter</i>	9
Gambar 2.2	<i>Z-Source Inverter</i> dalam Kondisi Aktif.....	12
Gambar 2.3	<i>Z-Source Inverter</i> dalam Kondisi <i>Null</i>	12
Gambar 2.4	<i>Z-Source Inverter</i> dalam Kondisi <i>Shoot Through Zero States</i>	13
Gambar 2.5	Sinyal Penyaklaran Tegangan dan Arus Induktor pada <i>Z-Source Inverter</i>	14
Gambar 2.6	Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Mesin Induksi.....	20
Gambar 2.7	Rotor Tipe <i>Cage</i> (a) dan Rotor Tipe <i>Wound</i>	21
Gambar 2.8	Generator Induksi <i>Isolated</i> dengan <i>Bank Capacitor</i> untuk Menyuplai Daya Reaktif.....	21
Gambar 2.9	Grafik Karakteristik Eksitasi Generator.....	22
Gambar 2.10	<i>DC Test</i> pada Mesin Induksi.....	23
Gambar 2.11	<i>No Load Test</i> pada Mesin Induksi.....	24
Gambar 2.12	<i>Block Rotor Test</i> pada Mesin Induksi.....	24
Gambar 2.13	Pengaturan dengan Inverter Serial.....	25
Gambar 2.14	Rangkaian dan Bentuk Gelombang Output <i>Rectifier</i> Tiga Fasa Gelombang Penuh dan Setengah Gelombang.....	26
Gambar 2.15	<i>Low Pass Filter</i> (LPF) Konfigurasi LC.....	27
Gambar 2.16	Sinyal <i>Simple Boost Control</i>	28
Gambar 2.17	Skema Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro.....	29
Gambar 2.18	Kurva Pemilihan Jenis Turbin Berdasarkan <i>Head</i>	30
Gambar 2.19	Jenis-jenis Turbin (A) Turbin Pelton (B) Turbin Kaplan (C) Turbin Francis (D) Turbin Crossflow.....	32
Gambar 3.1	Diagram Blok Sistem.....	33
Gambar 3.2	Mesin Induksi yang Digunakan Pengujian.....	35
Gambar 3.3	<i>Variable Frequency Drive</i> untuk Pengujian.....	36
Gambar 3.4	Kapasitor <i>Bank</i> Tiga Fasa untuk Pengujian.....	37
Gambar 3.5	<i>Rectifier</i> Tiga Fasa untuk Pengujian.....	37
Gambar 3.6	Implementasi Filter LC.....	38
Gambar 3.7	Rangkaian <i>Z-Source Inverter</i> dan <i>Simple Boost Control</i>	41
Gambar 3.8	Karakteristik Sinyal <i>Simple Boost Control</i> pada tiap	

MOSFET.....	42
Gambar 3.9 Karakteristik Gelombang Tegangan Induktor, Tegangan Kapasitor dan Arus Induktor.....	43
Gambar 3.10 Karakteristik Gelombang Tegangan MOSFET.....	43
Gambar 3.11 Karakteristik Gelombang Tegangan DC Bus.....	44
Gambar 3.12 Karakteristik Gelombang Output Tegangan Tiga Fasa PWM.....	44
Gambar 3.13 Karakteristik Gelombang Output Tegangan Tiga Fasa Sinusoidal.....	45
Gambar 3.14 Karakteristik Gelombang Arus Output Sinusoidal.....	45
Gambar 3.15 Karakteristik Tegangan Output pada Perubahan Input.....	46
Gambar 3.16 Karakteristik Gelombang Frekuensi Output 50 Hz.....	47
Gambar 3.17 Kurva Magnetisasi Bahan Inti.....	48
Gambar 3.18 Bentuk Induktor untuk Implementasi.....	50
Gambar 3.19 Kapasitor Elco untuk Implementasi.....	50
Gambar 3.20 Dioda MUR 1560 untuk Implementasi.....	51
Gambar 3.21 MOSFET IRFP460 untuk Implementasi.....	52
Gambar 3.22 Diagram Blok <i>Simple Boost Control</i>	52
Gambar 3.23 Hasil Implementasi <i>Simple Boost Control</i>	53
Gambar 3.24 Rangkaian Driver MOSFET.....	53
Gambar 3.25 Implementasi Driver MOSFET.....	54
Gambar 3.26 Implementasi <i>Z-Source Inverter</i> dengan <i>Simple Boost Control</i>	55
Gambar 4.1 Alat Pengujian.....	57
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Tinggi Jatuh dan Debit Air.....	58
Gambar 4.3 Bentuk Gelombang AC Tiga Fasa Generator Induksi.....	59
Gambar 4.4 Bentuk Gelombang DC dari <i>Rectifier</i> Tiga Fasa Tanpa Kapasitor (a) dan dengan Kapasitor (b).....	60
Gambar 4.5 Karakteristik Sinyal Implementasi <i>Simple Boost Control</i>	61
Gambar 4.6 Karakteristik Sinyal Penyaklaran MOSFET V_{GS} dan V_{DS}	61
Gambar 4.7 Karakteristik Gelombang Induktor dan Kapasitor pada Fase <i>Charge-Discharge</i>	63
Gambar 4.8 Karakteristik Gelombang Tegangan DC Bus.....	64
Gambar 4.9 Karakteristik Gelombang Tegangan Output.....	65
Gambar 4.10 Karakteristik Gelombang Tegangan Output <i>Line to Line</i>	

	Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter LC.....	66
Gambar 4.11	Karakteristik Gelombang Arus Output <i>Line to Line</i> Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter LC.....	66
Gambar 4.12	Karakteristik Gelombang Tegangan Output <i>Line to Netral</i> Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter LC.....	66
Gambar 4.13	Karakteristik Gelombang Tegangan Output Tiga Fasa.....	67
Gambar 4.14	Spektrum Frekuensi Output Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter.....	67
Gambar 4.15	Grafik Nilai <i>Total Harmonic Distortion</i> Tegangan Output.....	68
Gambar 4.16	Grafik Pengaturan Tegangan Konstan.....	70
Gambar 4.17	Konfigurasi Rangkaian <i>Close Loop</i>	70
Gambar 4.18	Respon Sistem Dengan Kontroler.....	71
Gambar 4.19	Respon Sistem Menggunakan Kontroler dengan Banyak Perubahan Tegangan pada Sisi Output.....	72
Gambar 4.20	Respon Sistem Tanpa Kontroler.....	72
Gambar 4.21	Karakteristik Gelombang pada Frekuensi 30 Hz.....	74
Gambar 4.22	Karakteristik Gelombang pada Frekuensi 50 Hz.....	74
Gambar 4.23	Karakteristik Gelombang pada Frekuensi 70 Hz.....	75
Gambar 4.24	Kurva Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi Inverter.....	75
Gambar 4.23	Grafik Perbandingan antara <i>Shoot Through Duty Ratio</i> (D_0) dengan <i>Boosting Factor</i> (B).....	76

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kondisi Penyaklaran pada <i>Z-Source Inverter</i> 3 Fasa.....	10
Tabel 2.2 Persamaan N_s pada Tiap Jenis Turbin.....	31
Tabel 3.1 Spesifikasi Mesin Induksi.....	34
Tabel 3.2 Parameter Mesin Induksi.....	35
Tabel 3.3 Parameter Awal Desain <i>Z-Source Inverter</i>	39
Tabel 3.4 Parameter Rangkaian Simulasi.....	41
Tabel 3.5 Spesifikasi Inti EE55 EPCOS TDK.....	47
Tabel 3.6 Komponen untuk Driver MOSFET.....	53
Tabel 3.7 Perincian Komponen untuk <i>Z-Source Inverter</i>	54
Tabel 4.1 Kontrol Tegangan <i>Z-Source Inverter</i> dengan Perubahan Beban.....	69
Tabel 4.2 Kontrol Tegangan <i>Z-Source Inverter</i> dengan Perubahan Input.....	69
Tabel 4.3 Kontrol Tegangan <i>Z-Source Inverter</i> pada Simulasi.....	71
Tabel 4.4 Pengujian Pengaturan Frekuensi.....	73
Tabel 4.5 Tabel Pengujian Kecepatan Generator Induksi.....	77

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini energi listrik menjadi kebutuhan yang penting dipenuhi. Namun untuk memenuhi kebutuhan listrik tersebut, selama ini masih terkendala fasilitas pembangkit listrik [1]. Masalah ini umumnya terjadi di daerah yang sulit terjangkau akses listrik, seperti di kawasan pegunungan atau daerah terisolir lainnya. Untuk mengatasi hal tersebut, implementasi pembangkit listrik seperti pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH) menjadi solusi alternatif guna tercapainya akses listrik di daerah yang sulit terjangkau. Pembangkit listrik tenaga mikro hidro merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan aliran sungai kecil untuk menghasilkan listrik. Unsur utama pembangkit listrik ini adalah adanya potensi debit sungai dan tinggi jatuh air (*head*) [2]. Solusi implementasi PLTMH ini mengacu pada potensi sungai di wilayah pegunungan Indonesia yang potensial untuk dibangun PLTMH [3].

Implementasi PLTMH yang selama ini diterapkan menggunakan sistem *standalone*. Sistem PLTMH *standalone* merupakan sistem pembangkit listrik yang hanya menggunakan energi air sungai sebagai satu-satunya sumber untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan [4]. Pembangkit listrik *standalone* biasanya menggunakan generator induksi sebagai pengonversi energi gerak menjadi energi listrik. Penggunaan ini mengacu pada kelebihan generator induksi dibanding generator sinkron yaitu memiliki harga yang lebih murah, menggunakan sistem *brushless*, operasi yang sederhana, tidak membutuhkan eksitasi DC, dan konstruksi yang lebih kuat [5].

Dalam implementasinya, masalah yang muncul pada pengoperasian generator induksi untuk pembangkit listrik tenaga mikro hidro *standalone* ini adalah adanya variasi amplitudo dari tegangan output yang sensitif terhadap perubahan beban pada konsumen [6]. Selain akibat beban, perubahan input putaran turbin juga mengakibatkan perubahan tegangan dan frekuensi generator, sehingga masalah seperti ini perlu diatasi. Salah satu cara untuk mengatasi perubahan tegangan dan frekuensi adalah dengan penggunaan governor mekanik. Namun untuk implementasi pembangkit yang kecil, penggunaan governor mekanik kurang ekonomis. Selain itu, efek transien governor mekanik sangat lambat ketika terjadi perubahan beban secara mendadak [7]. Metode lain adalah dengan konversi sistem elektronika daya. Beberapa metode pengatur tegangan pada sistem konversi elektronika daya telah

ditawarkan seperti kombinasi *voltage source* (VSI) yang dipasang paralel. Rangkaian VSI berfungsi untuk mempertahankan tegangan generator induksi selalu berada pada kondisi konstan dengan cara mengatur besaran dari nilai arus reaktif yang masuk ke sistem generator induksi [8]. Namun kelemahan sistem VSI adalah memiliki *gate driver* yang harus didesain khusus untuk menghindari *electromagnetic interference* (EMI) dan adanya *dead time* yang jika tidak diperhatikan akan dapat merusak inverter. Selain itu, pada topologi VSI tidak dapat beroperasi dalam mode *buck-boost* namun hanya dapat beroperasi dalam salah satu mode *buck* atau mode *boost* saja [9]. Dengan dual sistem VSI dan ELC, tentunya kurang efektif karena terdapat dua *device* yang berpengaruh pada efisiensi dan harga.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka diusulkan topologi *Z-Source Inverter* (ZSI) dengan metode *simple boost control*. *Z-Source Inverter* merupakan salah satu topologi yang dapat mengatur tegangan hanya melalui satu rangkaian. Selain itu, adanya *dead time* yang berbahaya pada rangkaian VSI, bahkan dapat menjadi faktor peningkatan tegangan pada rangkaian *Z-Source Inverter* yaitu dengan pengaturan *shoot through duty ratio*. Pada rangkaian *Z-Source Inverter* dapat disetting frekuensi referensi, sehingga ketika terjadi perubahan putaran generator dengan berbagai kondisi, maka output frekuensi akan tetap sesuai frekuensi setting pada inverter. Dengan implementasi *Z-Source Inverter* ini, maka diharapkan dapat lebih mengefektifkan kinerja dari rangkaian pengatur tegangan dan frekuensi pada generator induksi untuk pembangkit listrik tenaga mikro hidro sistem *standalone*.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana pemilihan desain *Z-Source Inverter* pada aplikasi pembangkit listrik tenaga mikro hidro berdasarkan potensi tinggi jatuh dan debit tertentu
- b. Bagaimana mengoperasikan generator induksi sebagai model pembangkit listrik tenaga mikro hidro agar mampu menghasilkan tegangan output
- c. Bagaimana analisa perbandingan karakteristik gelombang antara hasil simulasi dan hasil implementasi rangkaian *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control*
- d. Bagaimana pengaturan tegangan konstan menggunakan *Z-Source Inverter* ketika terjadi perubahan pada tegangan output

- e. Bagaimana pengaturan frekuensi ketika terjadi perubahan putaran dari generator?
- f. Bagaimana nilai harmonisa yang dihasilkan oleh gelombang output *Z-Source Inverter*?
- g. Bagaimana efisiensi rangkaian *Z-Source Inverter*
- h. Bagaimana rasio konversi pada *Z-Source Inverter*

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

- a. Mengetahui pemilihan desain *Z-Source Inverter* pada aplikasi pembangkit listrik tenaga mikro hidro berdasarkan potensi tinggi jatuh dan debit tertentu
- b. Mengetahui cara pengoperasian generator induksi sebagai model pembangkit listrik tenaga mikro hidro agar mampu menghasilkan tegangan output
- c. Mengetahui analisa perbandingan karakteristik gelombang antara hasil simulasi dan hasil implementasi rangkaian *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control*
- d. Mengetahui pengaturan tegangan konstan menggunakan *Z-Source Inverter* ketika terjadi perubahan pada tegangan output
- e. Mengetahui pengaturan frekuensi ketika terjadi perubahan putaran dari generator
- f. Mengetahui nilai harmonisa yang dihasilkan oleh gelombang output *Z-Source Inverter*
- g. Mengetahui efisiensi rangkaian *Z-Source Inverter*
- h. Mengetahui rasio konversi pada *Z-Source Inverter*

1.4 Batasan Masalah

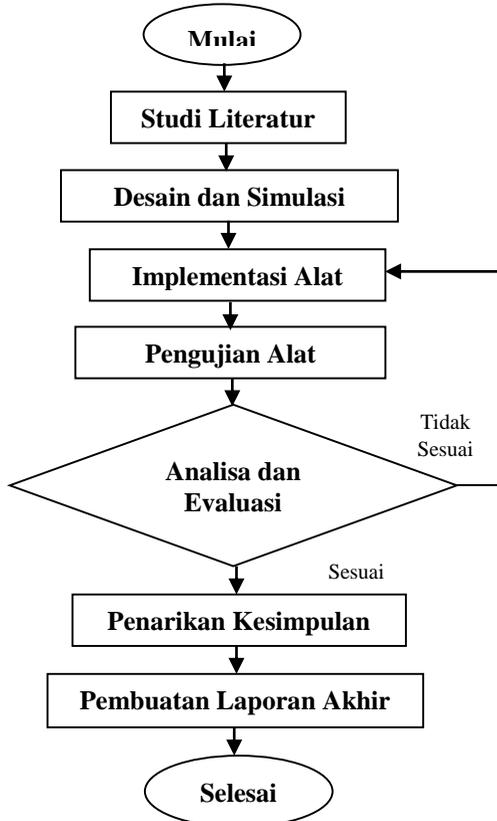
Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- a. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen yang ada di pasaran dengan harga terjangkau dan peralatan di Laboratorium Konversi Energi Listrik Teknik Elektro ITS
- b. Model pengaturan tegangan yang digunakan hanya dari rangkaian *Z-Source Inverter* dan tidak dibandingkan dengan model lain
- c. Model penyaklaran yang digunakan hanya *simple boost control* dan tidak dibandingkan dengan model penyaklaran yang lain
- d. Inverter tidak digunakan sebagai penyuplai daya reaktif pada generator induksi, sehingga hanya bekerja *one directional*
- e. Output tegangan didesain tidak 220 V karena menyesuaikan komponen di laboratorium dan di pasaran

- f. Semua analisa dan perhitungan dilakukan dalam kondisi *steady state* dan semua komponen dianggap ideal

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini adalah:



Gambar 1.1. Diagram Alir Metode Penelitian

a. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi literatur terkait pengaturan tegangan dan frekuensi output pada implementasi pembangkit listrik tenaga mikro hidro. Beberapa hal yang dipelajari yaitu cara kerja *Z-Source Inverter* konvensional, perhitungan komponen impedansi *Z-*

Source, metode penyaklaran *simple boost control*, *inverter*, pengoperasian generator induksi, koding Arduino Mega 2560, filter LPF, pengoperasian *software* PSIM dan EAGLE, pemilihan turbin mikro hidro dan aplikasi pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Literatur utama bersumber dari jurnal *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*.

b. Desain dan Simulasi Rangkaian

Pada tahap ini dilakukan desain alat dan simulasi rangkaian. Untuk desain sistem didasarkan pada perhitungan dari paper yang digunakan sebagai referensi. Perhitungan yang dilakukan meliputi perhitungan jaringan impedansi *Z-Source Inverter* dan perhitungan desain filter. Sedangkan simulasi rangkaian, dilakukan dengan menggunakan *software* PSIM. Tahap ini bertujuan agar didapatkan suatu parameter sebagai pembanding terhadap alat yang akan dibuat. Adapun rangkaian yang disimulasikan di PSIM adalah rangkaian *Z-Source Inverter* yang terhubung dengan sumber DC sebagai model generator induksi tiga fasa dan dibebani beban resistif tiga fasa.

c. Implementasi Alat

Pada tahap ini, dilakukan pembuatan inverter berdasarkan simulasi yang telah dilakukan. Pembelian komponen dan perangkaian komponen dilakukan pada tahap ini. Alat yang dibuat terdiri atas lima bagian, yaitu pembuatan *driver* MOSFET, pembuatan jaringan impedansi *Z-Source Inverter*, pembuatan saklar *simple boost control*, pembuatan filter LPF dan pembuatan konfigurasi sistem generator induksi tiga fasa.

d. Pengujian Alat

Pengujian dilakukan menggunakan sumber tegangan *DC variable* dengan beban resistif tiga fasa. Untuk sumber generator induksi menggunakan motor induksi dengan spesifikasi rating 50 Hz. Pengambilan data dilakukan menggunakan osiloskop dan peralatan pendukung lainnya. Alat yang digunakan pengujian disesuaikan dengan alat yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Listrik Teknik Elektro ITS. Beberapa parameter yang diuji adalah tegangan, arus dan frekuensi output generator induksi, sinyal SPWM MOSFET, sinyal *simple boost control*, dan gelombang pada *Z-Source Inverter*.

e. Analisa Data dan Evaluasi

Pada tahap ini dilakukan analisa data dan evaluasi dari pengujian alat yang telah dilakukan. Analisa ini dilakukan dengan cara membandingkan antara data yang diperoleh dari pengujian dengan data yang diperoleh dari simulasi. Analisa data meliputi studi potensi

mikro hidro sebagai parameter penentuan daya inverter, bentuk sinyal output tegangan generator induksi, bentuk sinyal penyaklaran *simple boost control*, bentuk sinyal pada rangkaian *Z-Source Inverter*, kontrol tegangan, kontrol frekuensi, nilai harmonisa, *boosting factor ratio*, efisiensi *Z-Source Inverter*. Harapannya, data secara pengujian memiliki selisih yang kecil jika dibandingkan data simulasi. Jika selisih terlalu jauh, maka perlu dilakukan peninjauan alat atau melakukan pengambilan data ulang.

f. Penarikan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan dari analisa data dan evaluasi yang telah dilakukan. Penarikan kesimpulan dilakukan secara bertahap berdasarkan sub eksperimen yang dilakukan. Output dari tahap ini adalah diperoleh data final dan siap disusun menjadi laporan akhir.

g. Pembuatan Buku Penelitian

Tahap ini merupakan tahap akhir sebagai *finishing* kegiatan penelitian yang telah dilakukan. Data-data yang telah diperoleh disusun secara rapi dalam bentuk buku. Harapannya, laporan ini dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terbagi atas lima bagian dan tiap bab akan terurai sebagai berikut:

a. BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi penelitian.

b. BAB 2 Dasar Teori

Bab ini berisi tentang teori dasar dari tentang rangkaian *Z-Source inverter*, generator induksi, *rectifier* tiga fasa, *simple boost control*, filter LPF, dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

c. BAB 3 Pemodelan, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini berisi tentang pemodelan sistem secara matematis, simulasi sistem di *software* PSIM, dan implementasi rangkaian *Z-Source Inverter*.

d. BAB 4 Pengujian Sistem dan Analisa Hasil Implementasi

Bab ini berisi hasil pengujian dan analisa data pada sistem rangkaian *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control* untuk suplai beban resistif tiga fasa. Suplai sistem berasal dari sumber

tegangan *DC variable* ketika diuji terpisah dan generator induksi tiga fasa ketika diuji keseluruhan.

e. BAB 5 Kesimpulan dan Saran

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

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

- a. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan inverter khususnya mengenai *Z-Source Inverter* tiga fasa dengan metode *simple boost control*
- b. Menjadi referensi model pengaturan tegangan pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro sistem *standalone*
- c. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil topik serupa pada Tugas Akhir

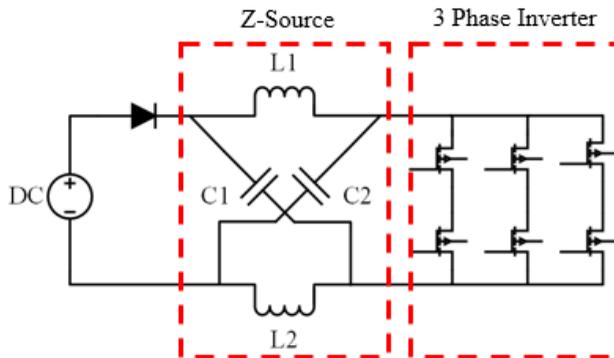
-- Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB II

Z-SOURCE INVERTER DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL DAN GENERATOR INDUKSI TIGA FASA

2.1 Z-Source Inverter (ZSI)

Z-Source Inverter adalah sebuah teknologi inverter yang mempunyai fungsi ganda baik sebagai *buck converter* (penurun tegangan) maupun *boost converter* (peningkat tegangan) sehingga memiliki keandalan yang lebih tinggi dalam pengaturan sinyal tak sebanding [10]. Rangkaian *Z-Source Inverter* hanya menggunakan dua buah induktor dan dua buah kapasitor yang dihubungkan menyilang untuk menghasilkan tegangan yang diinginkan [11]. *Z-Source Inverter* ini juga menggunakan *shoot through state* atau *null state* dalam operasinya, sehingga teknologi ini terkenal di setiap aplikasi [12]. Adapun rangkaian dari *Z-Source Inverter* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Rangkaian dari *Z-Source Inverter*

Z-Source Inverter memiliki kemampuan sebagai peningkat (*boost*) dan penurun (*buck*) tegangan tanpa memerlukan *switching* tambahan. Secara umum, *Z-Source Inverter* berfungsi sebagai filter orde dua, dikarenakan induktor pada *Z-Source Inverter* dapat mengecilkan arus *ripple* dan kapasitor dapat menjaga bentuk tegangan output tetap konstan [13] Rangkaian *Z-Source Inverter* memiliki persamaan simetris yang dituliskan $L_1 = L_2 = L$, dan $C_1 = C_2 = C$.

$$V_{L1} = V_{L2} = V_L \quad V_{C1} = V_{C2} = V_C \quad (2.1)$$

Total waktu *switching* pada *Z-Source Inverter* yaitu:

$$T = T_{sh} + T_{nsh} \quad (2.2)$$

Dimana, T_{sh} adalah *shoot through period* dan T_{nsh} adalah *non-shoot through period*.

Topologi *Z-Source Inverter* mampu mengatasi permasalahan pada inverter tradisional seperti VSI dan CSI. 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 agar terhindar 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* tidak menyebabkan inverter rusak [14].

Dalam mekanismenya *Z-Source Inverter* memiliki sembilan kondisi ketika terjadi penyaklaran. Adapun kondisi penyaklaran pada *Z-Source Inverter* ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kondisi Penyaklaran pada *Z-Source Inverter* 3 Fasa

No	Kondisi	Komponen Pensaklaran					Tegangan Output			
		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	<i>Shoot Through Zero States</i>	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

(!Sx menyatakan komplemen dari Sx, dimana x = 1,3,5)

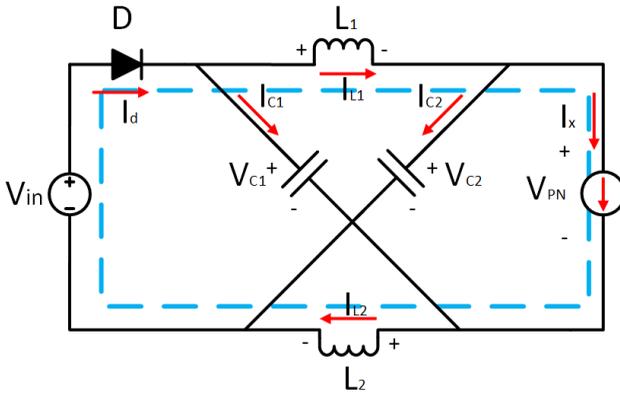
Ketika sumber DC disuplai, *Z-Source Inverter* memiliki enam kondisi aktif, dua kondisi null dan tujuh kondisi *shoot through zero state*. Pada kondisi aktif (1 sampai 6), inverter menghasilkan tegangan keluaran AC. Untuk menghasilkan gelombang tegangan yang diinginkan, inverter beralih dari kondisi satu ke kondisi lainnya. Hal ini menyebabkan nilai tegangan AC yang terbentuk bernilai diskrit yaitu V_i , 0 dan $-V_i$. Pada kondisi *null* (7 sampai 8), komponen penyaklaran bagian atas atau bawah mengalami kondisi hubung singkat. Sedangkan pada kondisi *shoot through zero states* (9 sampai 15), komponen pensaklaran bagian atas dan bawah juga mengalami hubung singkat. Namun, pada kondisi ini merupakan hal yang harus dihindari pada *voltage source inverter* (VSI) karena 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* [9] [15] [16]

2.1.1 Analisa Rangkaian Z-Source Inverter

Pada rangkaian *Z-Source Inverter* terdapat tiga kondisi kerja seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Kondisi 1 sampai 6 merupakan kondisi aktif, 7 sampai 8 merupakan kondisi *null* dan 9 sampai 15 merupakan kondisi *shoot through zero states*.

Kondisi Aktif

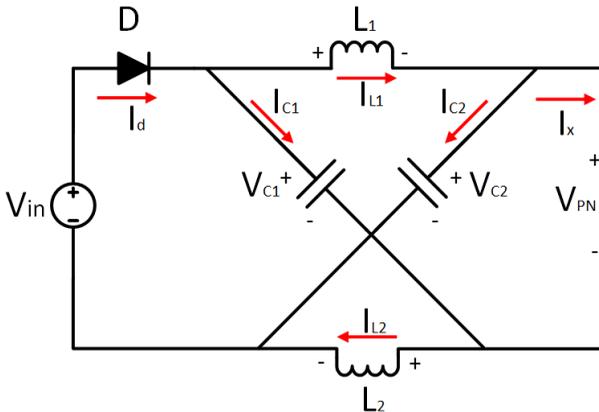
Pada kondisi ini, *Z-Source Inverter* beroperasi dalam mode aktif. Selama dalam kondisi ini, sumber DC mengalir ke rangkaian impedansi yang terdiri dari induktor dan kapasitor. Induktor mengalami fase *discharge* dan kapasitor akan mengalami *charge* hingga kondisi *steady state* dan energi akan mengalir ke beban melalui induktor. Adapun rangkaian ekuivalen *Z-Source Inverter* pada saat kondisi aktif ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. *Z-Source Inverter* dalam Kondisi Aktif

Kondisi Null

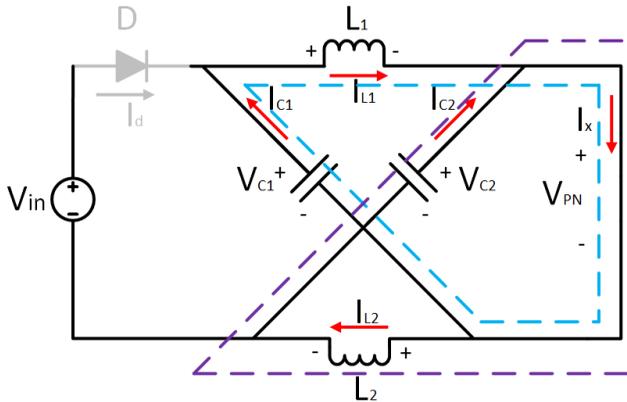
Pada kondisi ini, *Z-Source Inverter* beroperasi hanya pada salah satu dari dua keadaan *null*. Tegangan pada sumber DC akan menuju induktor dan kapasitor. Fenomena yang terjadi yaitu komponen penyaklaran mengalami hubung singkat (*short circuit*) pada bagian atas atau bawah. Selama mode ini, rangkaian dapat diasumsikan sebagai *open circuit*. Rangkaian ekuivalen *Z-Source Inverter* pada saat kondisi aktif ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. *Z-Source Inverter* dalam Kondisi Null

Kondisi Shoot Through Zero States

Pada kondisi ini, *Z-Source Inverter* beroperasi dalam salah satu dari tujuh keadaan *shoot through zero states*. Rangkaian dapat diasumsikan sebagai *short circuit*. Fenomena yang terjadi adalah tidak terdapat tegangan keluaran pada inverter sama seperti dengan kondisi *null*. Tegangan DC kapasitor akan meningkat sesuai dengan besarnya rasio *shoot through duty ratio*. Adapun rangkaian ekuivalen *Z-Source Inverter* pada saat kondisi aktif ditunjukkan pada Gambar 2.4



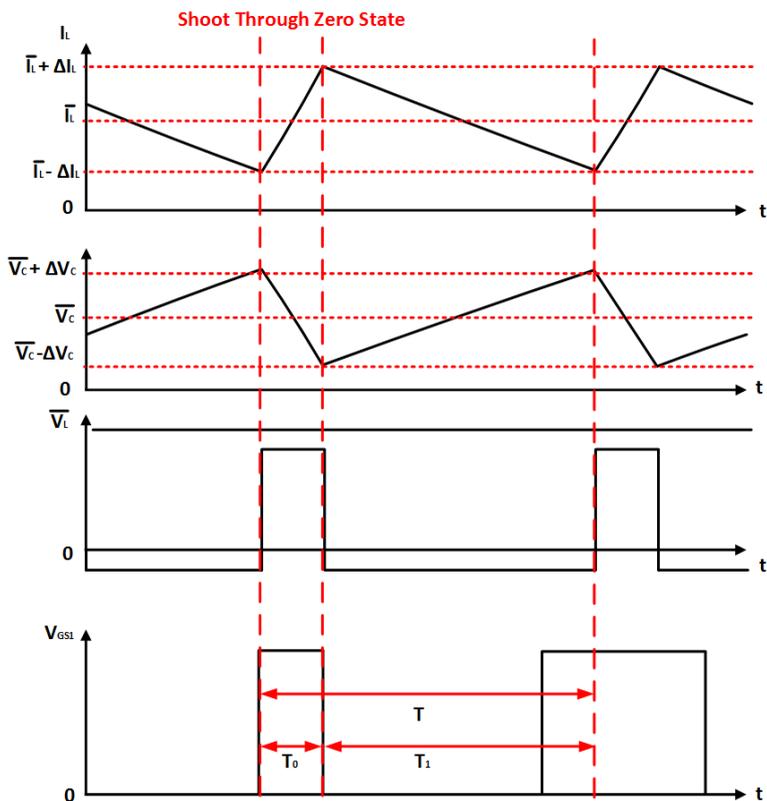
Gambar 2.4. *Z-Source Inverter* dalam Kondisi *Shoot Through Zero States*

2.1.2. Analisis Penurunan Persamaan Rasio Konversi Inverter

2.1.2.1 Persamaan pada Kondisi *Shoot Through Zero States* dan *Non Shoot Through Zero States*

Penurunan persamaan *Z-Source Inverter* dilakukan dengan asumsi nilai induktor L_1 , L_2 dan kapasitor C_1 , C_2 memiliki nilai yang sama (L_1 , $L_2 = L$) dan (C_1 , $C_2 = C$). Pada saat kondisi *shoot through zero states* atau pada saat periode T_0 , maka arus induktor akan mengalami peningkatan dan tegangan pada induktor akan muncul. Sedangkan ketika kondisi *non-shoot through zero states* atau pada saat periode T_1 , maka arus induktor akan menurun dan tegangan induktor bernilai nol.

Satu periode penuh (T) adalah gabungan antara periode *shoot through zero states* (T_0) dan periode *non shoot through zero states* (T_1). Adapun bentuk sinyal penyaklaran pada induktor dan kapasitor pada *Z-Source Inverter* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Sinyal Penyaklaran Tegangan dan Arus Induktor pada *Z-Source Inverter*

Pada saat kondisi *shoot through zero states* dengan interval waktu T_0 . Berdasarkan hukum Kirchoff maka persamaan tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{cases} V_L = V_C \\ V_d = 2V_C \\ V_{PN} = 0 \text{ (ST)} \end{cases} \quad (2.3)$$

Pada saat kondisi aktif dan *null* dengan periode T_1 (*non shoot through zero states*), persamaan tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} V_L &\neq V_C & V_d &= V_{MH} = V_L + V_C \\ V_L &= V_{MH} - V_C = V_C - V_{PN} \\ V_{PN} &= V_C - V_L = 2V_C - V_{MH} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

V_{MH} merupakan output dari mikro hidro atau input dari *Z-Source Inverter* dan V_{PN} adalah tegangan DC bus.

Pada saat kondisi *steady state*, tegangan rata-rata induktor sama dengan nol ($\overline{V_L} = 0$) selama satu periode penyaklaran (T), sehingga persamaan tegangan dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \overline{V_L} &= V_C T_0 + (V_{MH} - V_C) T_1 = 0 \\ \frac{V_C}{V_{MH}} &= \frac{T_1}{T_1 - T_0} \end{aligned} \quad (2.5)$$

dimana T_1 merupakan periode *non shoot through* dan T_0 adalah periode *shoot through*. Tegangan DC link rata-rata dari inverter adalah:

$$\begin{aligned} \overline{V_{PN}} &= \frac{T_0 \cdot 0 + T_1 (2V_C - V_{MH})}{T} \\ &= \frac{T_1 (2V_C - V_{MH})}{T} \\ &= \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{MH} \end{aligned}$$

dari persamaan (2.5), maka

$$\overline{V_{PN}} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{MH} = V_C \quad (2.6)$$

Tegangan puncak dari DC link pada saat *non shoot through*

$$\hat{V}_{PN} = V_C - V_L = 2V_C - V_{MH} \quad (2.7)$$

Dengan mensubstitusi nilai V_C dari persamaan (2.5) ke persamaan (2.7), maka

$$\hat{V}_{PN} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{MH} = B \cdot V_{MH} \quad (2.8)$$

dimana B merupakan *boosting factor*

$$B = \frac{T}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1 - (2T_0/T)} \geq 1, (T_0 + T_1 = T) \quad (2.9)$$

Sehingga tegangan puncak tiap fasa dari inverter adalah:

$$\hat{V}_{AC} = \frac{M \cdot \hat{V}_{PN} T_1}{2} = \frac{M \cdot B \cdot V_{MH}}{2} \quad (2.10)$$

Untuk tegangan output tiga fasa rms maka dapat dituliskan:

$$V_{AC(rms)} = \frac{\sqrt{3} M \cdot B \cdot V_{MH}}{2\sqrt{2}} \quad (2.11)$$

M merupakan indeks modulasi dengan nilai $M \leq 1$.

Dengan memilih secara tepat nilai *buck – boost factor* $B_B = M \cdot B$ (0 sampai tak hingga), maka nilai tegangan output dapat dinaikkan atau diturunkan. Adapun tegangan kapasitor dapat dijelaskan sebagai berikut: Dari persamaan (2.5) telah diperoleh:

$$\begin{aligned} V_C &= \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{MH} = \frac{T_1}{T} \frac{T}{T_1 - T_0} V_{MH} \\ &= \frac{1 - (T_0/T)}{1 - (2T_0/T)} V_{MH} \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.1.2.2 Persamaan Alternatif dari Z-Source Inverter

Dari persamaan (2.9) telah diperoleh

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{1 - (2 \cdot T_0/T)} \\ B - \frac{2 \cdot B \cdot T_0}{T} &= 1 \\ B \cdot T - 2 \cdot B \cdot T_0 &= T \\ \frac{T_0}{T} &= \frac{B-1}{2B} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Kemudian persamaan (2.13) dapat diubah yaitu:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{T_0}{T} &= 1 - \frac{B-1}{2B} \\ 1 - \frac{T_0}{T} &= \frac{2B - B + 1}{2B} \\ 1 - \frac{T_0}{T} &= \frac{B+1}{2B} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.9) dan (2.14) ke persamaan (2.12) maka tegangan kapasitor yaitu:

$$\begin{aligned}
V_C &= \frac{1-(T_0/T)}{1-(2T_0/T)} V_{MH} = \frac{B+1}{2B} \cdot B \cdot V_{MH} \\
&= \frac{B+1}{2} V_{MH}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.15) ke persamaan (2.8) maka diperoleh tegangan puncak *DC bus* pada saat kondisi *non shoot through* yaitu

$$\hat{V}_{PN} = B \cdot V_{MH} = B \times \frac{2V_C}{B+1} = \frac{2B}{B+1} V_C \tag{2.16}$$

2.1.2.3 Persamaan *Shoot Through Duty Ratio* (D_0)

Pada saat kondisi *shoot through* dengan periode T_0 , maka dapat dicari nilai *shoot through duty ratio* dari persamaan (2.13) yaitu:

$$\frac{T_0}{T} = \frac{B-1}{2B} = D_0 \tag{2.17}$$

Dengan T merupakan periode penyaklaran, maka frekuensi penyaklaran (f_s) selama T adalah $1/T$, sehingga nilai D_0 juga dapat dituliskan yaitu:

$$D_0 = T_0 \cdot f_s = \frac{B-1}{2B} \tag{2.18}$$

Nilai periode *shoot through* yaitu

$$T_0 = \frac{D_0}{f_s} \tag{2.19}$$

2.1.3 Penurunan Persamaan Parameter Komponen

Pada *Z-Source Inverter* parameter utama yang ditentukan adalah nilai dari jaringan impedansi yang terdiri dari induktor (L_1, L_2) dan kapasitor (C_1, C_2). Nilai-nilai tersebut harus memiliki nilai yang identik.

2.1.3.1 Induktor

Pada saat *Z-Source Inverter* dioperasikan pada *non-shoot through zero state*, maka akan terdapat tegangan pada kapasitor sedangkan pada induktor tidak terdapat tegangan dikarenakan arus yang mengalir pada rangkaian adalah DC murni. Seiring berjalannya waktu, arus induktor akan berkurang secara linier dan nilai tegangan induktor menjadi tidak sama dengan tegangan input dan tegangan kapasitor.

Pada saat *Z-Source Inverter* pada fase *shoot through zero state* maka induktor berfungsi untuk membatasi arus *ripple* selama mode *boost*. Selain itu arus induktor juga bertambah secara linier dan tegangan pada induktor sama dengan tegangan kapasitor. Nilai arus rata-rata pada induktor yaitu:

$$\overline{I_L} = \frac{P}{V_{in}} \quad (2.20)$$

Dimana P merupakan daya aktif dan V_{in} merupakan tegangan input.

Nilai arus induktor maksimum terjadi ketika mode *shoot through zero states*. Untuk menentukan nilai induktor maka perlu ditentukan nilai *peak to peak* arus *ripple* (ΔI_L).

$$\text{Nilai maksimum arus induktor} \quad : I_{rmax} = \overline{I_L} + (0.5 \times I_{ripple} \times \overline{I_L})$$

$$\text{Nilai minimum arus induktor} \quad : I_{rmin} = \overline{I_L} - (0.5 \times I_{ripple} \times \overline{I_L})$$

Selisih arus maksimum dan minimum induktor, yaitu:

$$\Delta I_L = 2 (I_{rmax} - I_{rmin}) \quad (2.21)$$

Selama mode *shoot through zero states* maka nilai $V_L = V_C = V$

$$V = \frac{V_{in}(B+1)}{2} \quad (2.22)$$

Sehingga nilai induktor dapat ditentukan menggunakan rumus

$$L = \frac{V \cdot T_0}{\Delta I_L} \quad (2.23)$$

T_0 adalah periode *shoot through zero states* per *switching cycle* dan dihitung menggunakan persamaan (2.19).

2.1.3.2 Kapasitor

Kapasitor pada *Z-Source Inverter* berfungsi untuk menyerap arus *ripple* dan menjaga agar tegangan konstan. Pada saat *shoot through zero states*, induktor akan diisi oleh kapasitor sehingga arus induktor sama dengan arus kapasitor $I_L = I_C$.

Nilai kapasitor dapat dihitung dengan menentukan *ripple* tegangan *peak to peak* pada kapasitor (ΔV_C), sehingga nilai kapasitor dapat dihitung menggunakan rumus

$$C = \frac{\overline{I_L} \times T_0}{\Delta V_C} \quad (2.24)$$

2.1.3.3 Stress Tegangan dan Arus pada Komponen

Stress tegangan dan arus dapat dihitung ketika kondisi *shoot through zero states* menggunakan persamaan berikut:

$$V_L = V_C = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{in}$$
$$V_L = V_C = \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} V_{in} \quad (2.25)$$

Sedangkan nilai arus maksimum pada induktor dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$\overline{I_{L-MAX}} = \overline{I_L} + \hat{I}_L \quad (2.26)$$

Stress tegangan pada komponen semikonduktor dioda dan MOSFET dapat dihitung dengan rumus:

$$V_d = V_{DS} = V_{PN} = B \cdot V_{in} \quad (2.27)$$

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

$$I_i = 2I_1 \quad (2.28)$$

Maka arus yang mengalir di tiap MOSFET yaitu

$$I_{mosfet} = \frac{3 \times \overline{V_{AC}} \times \overline{I_{AC}} \times \cos \varphi}{V_{in}} + \frac{V_C \times D_0}{6Lf_s} \quad (2.29)$$

2.2 Generator Induksi Tiga Fasa

Secara umum, generator merupakan alat yang mengubah energi gerak mekanik menjadi energi listrik. Beberapa model generator banyak diterapkan dalam sebuah pembangkit listrik. Salah satu model dari generator dapat dikembangkan dari mesin induksi. Penerapan mesin induksi menjadi generator biasanya digunakan pada pembangkit listrik skala kecil yang menekankan aspek ekonomis dan praktis. Dalam pengoperasiannya, mesin induksi akan memiliki kecepatan medan putar stator (N_S) dan kecepatan medan putar rotor (N_R), adanya perbedaan nilai antara N_S dan N_R akan menimbulkan *slip* (S). Persamaan slip dinyatakan dengan:

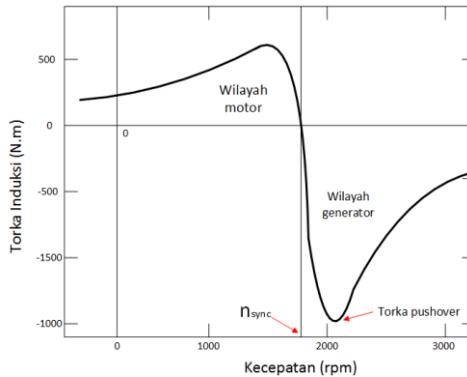
$$S = \frac{N_S - N_R}{N_S} \times 100\% \quad (2.30)$$

Apabila N_S lebih besar dari N_R maka slip mesin induksi akan bernilai positif, dan mesin beroperasi sebagai motor induksi. Sebaliknya, jika N_R lebih besar dari N_S maka slip bernilai negatif dan mesin induksi beroperasi sebagai generator induksi [8]. Pada mesin induksi, agar dapat

beroperasi sebagai generator, maka mesin induksi tersebut harus diputar melebihi kecepatan sinkronnya. Persamaan kecepatan sinkron dinyatakan dengan:

$$n_{\text{syn}} = \frac{120 \cdot f}{\text{Pole}} \quad (2.31)$$

Dimana f merupakan frekuensi sistem dan pole merupakan jumlah pole yang dimiliki oleh suatu mesin induksi tertentu. Adapun karakteristik torsi-kecepatan mesin induksi seperti kurva pada Gambar 2.6



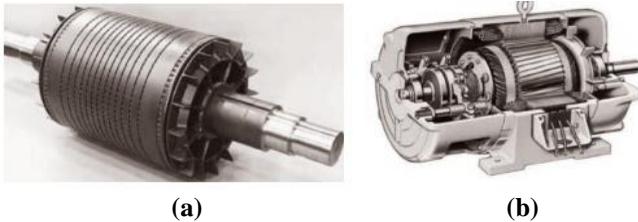
Gambar 2.6. Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Mesin Induksi

Pada Gambar 2.6 memperlihatkan bahwa jika motor induksi diputar pada kecepatan yang lebih tinggi daripada n_{syn} oleh sebuah *prime mover* eksternal, maka arah torsi induksinya akan berbalik dan motor akan berlaku sebagai generator. Dengan bertambahnya torsi pada poros, besar daya yang dihasilkan oleh generator induksi ikut bertambah. Pada mode operasi generator, terdapat nilai torsi induksi maksimum. Torsi ini disebut dengan torsi *pushover*. Jika torsi yang diberikan penggerak mula kepada poros melebihi torsi *pushover*, generator akan *overspeed*.

Generator induksi sangat cocok digunakan pada pembangkit listrik tenaga air karena tidak harus bekerja pada putaran yang sinkron, mengingat debit air yang selalu berubah-ubah. Jika dibandingkan dengan generator lainnya, generator induksi memiliki beberapa kelebihan, meliputi harga yang lebih murah, menggunakan sistem *brushless*, operasi yang sederhana, tidak membutuhkan eksitasi DC, dan konstruksi yang lebih kuat [6]. Generator induksi juga memiliki beberapa kelemahan, salah satunya adalah setiap perubahan pembebanan akan berpengaruh terhadap keluaran generator induksi tersebut. Untuk mengatasi

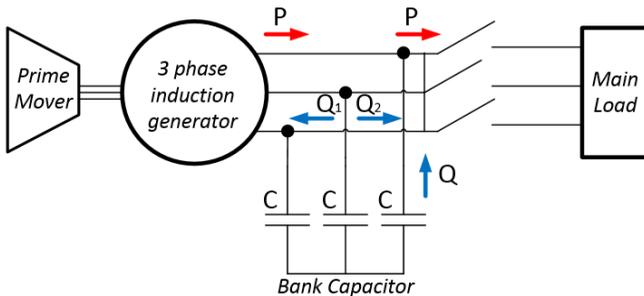
permasalahan itu maka diperlukan adanya sebuah sistem kontrol yang bertujuan untuk mengatur tegangan hasil keluaran dari generator induksi [8].

Berdasarkan jenis rotornya, generator induksi terbagi dalam dua yaitu *cage* (sangkar) dan *wound* (gelung) seperti pada gambar 2.7a dan 2.7b. 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 [17].



Gambar 2.7. Rotor Tipe *Cage* (a) dan Rotor tipe *Wound* (b)

Agar dapat berfungsi sebagai generator *isolated* yang cocok untuk implementasi pembangkit *standalone*, maka dalam operasinya generator induksi dihubungkan dengan kapasitor *bank* yang berfungsi menyuplai daya reaktif untuk membangkitkan medan pada generator. Generator *isolated* seperti ini diperlihatkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Generator Induksi *Isolated* dengan Kapasitor *Bank* untuk Menyuplai Daya Reaktif

Tegangan yang terbangkit pada generator induksi bergantung pada besar dan kecepatan medan magnet. Tegangan yang terinduksi pada generator dapat dirumuskan dengan persamaan di bawah ini:

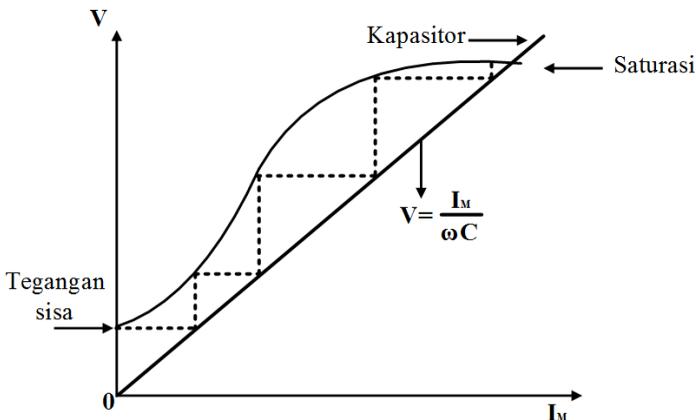
$$e_{\text{ind}} = (v \times B) \bullet l \quad (2.32)$$

- e_{ind} = Tegangan terinduksi (Volt)
- v = Kecepatan relatif magnet
- B = Kuat medan magnet (Tesla)
- l = Panjang konduktor (meter)

Kuat medan magnet akan menimbulkan fluks magnet jika memotong area konduktor. Fluks magnet pada generator induksi semakin kuat dengan adanya suplai medan dari kapasitor eksitasi.

2.2.1. Kapasitor *Bank* untuk Eksitasi Generator Induksi

Pada generator induksi *isolated* diperlukan kapasitor *bank* agar dapat menyuplai daya reaktif untuk membangkitkan medan generator. Ketika generator diputar oleh *prime mover*, maka akan menghasilkan tegangan karena memiliki magnet sisa pada rotornya. Tegangan tersebut akan mengisi kapasitor yang terpasang paralel pada sisi statornya. Ketika kapasitor tersebut *charging* maka dihasilkan arus kapasitor yang akan menginduksi rotor sehingga dihasilkan tegangan yang lebih besar pada generator. Proses tersebut terjadi hingga nilai eksitasi generator mencapai nilai *steady state* atau telah berada pada kondisi saturasi mesin induksi tersebut [8]. Hubungan antara tegangan generator dan kapasitor eksitasi ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Grafik Karakteristik Eksitasi Generator

Daya reaktif yang disuplai dari kapasitor *bank* harus sama dengan daya reaktif yang dihasilkan generator ketika beroperasi sebagai motor. Oleh karena itu nilai daya reaktif tersebut dapat dicari melalui nilai reaktansi magnetisasi motor yaitu X_M . Adapun nilai parameter tersebut dapat dicari melalui persamaan:

$$X_M = X_C \quad (2.33)$$

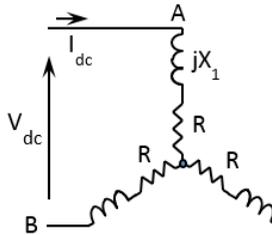
$$C = \frac{1}{\omega X_C} \quad (2.34)$$

X_M = Reaktansi magnetisasi (Ohm) C = Kapasitansi (Farad)
 X_C = Reaktansi kapasitif (Ohm) ω = Omega ($2\pi f$)

2.2.2 Perhitungan Nilai Parameter Generator Induksi

Parameter dalam sebuah mesin induksi dapat ditentukan melalui serangkaian tes. Terdapat tiga macam tes untuk mengetahui nilai parameter dari sebuah mesin induksi. Pertama adalah *DC test* yang bertujuan untuk memperoleh nilai resistansi stator (R_s). Jika belitan stator dirangkai Y (WYE) seperti pada Gambar 2.10, maka nilai resistansi stator dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_s = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad (2.35)$$



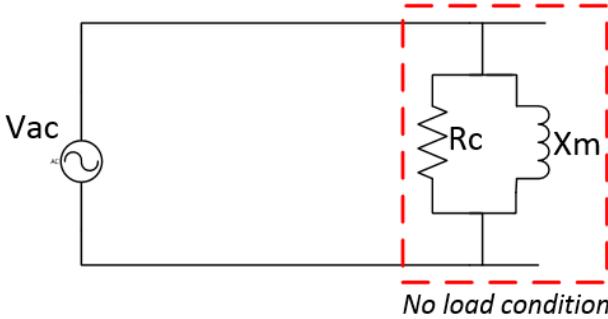
Gambar 2.10. *DC Test* pada Mesin Induksi

Tes kedua adalah *no load test* yang bertujuan untuk mendapatkan nilai resistansi inti (R_c) dan reaktansi magnetisasi mesin (X_M). *No load test* ini dilakukan dengan cara motor dioperasikan tanpa beban sehingga menyebabkan rangkaian pada sisi rotor menjadi *open circuit* (Gambar 2.11). Adapun perhitungan parameter pada *no load test* adalah:

$$Y = \frac{I_{nl}}{V_{nl}} \angle -\cos^{-1}(\text{PF}) \quad (2.36)$$

$$Y = G + jB \quad (2.37)$$

$$R_C = 1/G \text{ dan } X_M = 1/B \quad (2.38)$$



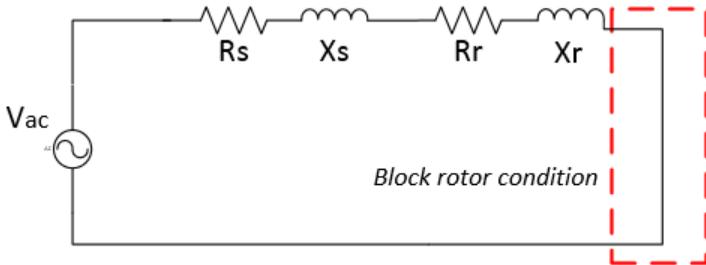
Gambar 2.11. *No Load Test* pada Mesin Induksi

Tes ketiga adalah *block rotor test* yang bertujuan untuk mendapatkan nilai reaktansi stator (X_S), reaktansi rotor (X_R) dan resistansi rotor (R_S). Pada *block rotor test*, motor diberi beban besar sehingga motor tidak dapat berputar dan menyebabkan rangkaian pada sisi rotor menjadi *short circuit* (Gambar 2.12). Adapun perhitungan parameter *block rotor test* adalah:

$$|Z_{BR}| = \frac{V_{BR}}{\sqrt{3} I_{BR}} \quad (2.39)$$

$$R_{BR} = |Z_{BR}| \cos \varphi \text{ sehingga nilai } R_R = R_{BR} - R_S \quad (2.40)$$

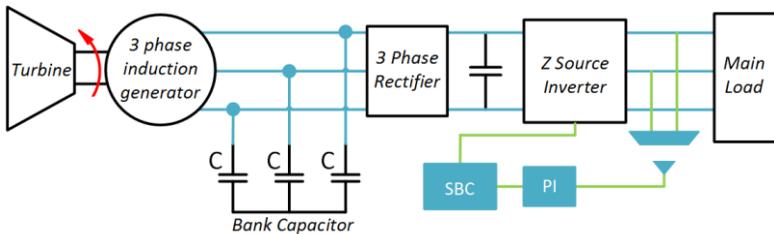
$$X_{BR} = |Z_{BR}| \sin \varphi \quad (2.41)$$



Gambar 2.12. *Block Rotor Test* pada Mesin Induksi

2.2.3 Pengaturan Tegangan dan Frekuensi pada PLTMH

Perubahan dari input maupun output mengakibatkan tegangan dan frekuensi pada generator tidak konstan, sehingga jika langsung dihubungkan ke beban maka dapat merusak peralatan konsumen. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu dilakukan pengaturan pada generator induksi. Adapun metode pengaturannya dapat dilakukan dengan beberapa metode, salah satunya dengan menggunakan inverter yang dirangkai secara serial (Gambar 2.13). Awalnya turbin memutar generator induksi hingga mencapai kecepatan sinkronnya. Selain itu mesin induksi juga harus dieksitasi oleh kapasitor *bank* untuk membangkitkan medan pada statornya sehingga generator induksi dapat menghasilkan tegangan AC. Tegangan ini kemudian disearahkan menjadi tegangan DC oleh *rectifier* tiga fasa. Agar tegangan DC yang dihasilkan menjadi *smooth* maka dipasang kapasitor perata. Tegangan DC yang telah rata kemudian dijadikan input rangkaian *Z-Source Inverter* untuk menjadi tegangan AC kembali. Ketika terjadi perubahan input atau perubahan beban, maka tegangan akan disensing yang hasilnya akan diproses oleh kontroler PI. Hasil proses tersebut kemudian masuk ke rangkaian *simple boost control* menjadi sebuah nilai *shoot through duty ratio* yang berubah mengikuti perubahan tegangan yang terjadi sehingga tegangan menjadi konstan. Adapun pengaturan frekuensi diatur melalui *switching* inverter.



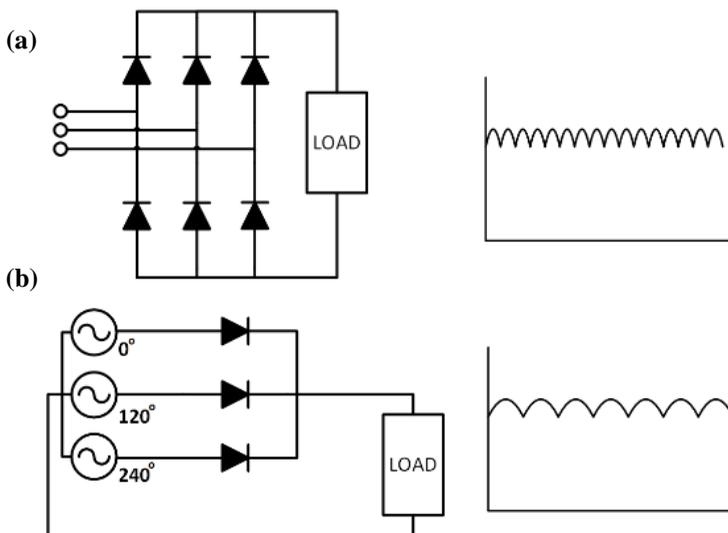
Gambar 2.13. Pengaturan dengan Inverter Serial

2.3 Rectifier Tiga Fasa

Rectifier tiga fasa merupakan komponen penyearah tegangan AC ke DC. *Rectifier* tiga fasa sendiri juga dibagi menjadi *rectifier* tiga fasa gelombang penuh dan *rectifier* tiga fasa setengah gelombang. Untuk *rectifier* tiga fasa gelombang penuh, prinsip kerjanya adalah ketika sumber tegangan AC yang terdiri dari polaritas positif dan polaritas negatif memasuki *rectifier*, maka polaritas positif fasa R akan masuk ke D_1 , polaritas positif fasa S akan masuk ke D_3 , dan polaritas positif fasa T

akan masuk ke D_5 , sehingga dioda pada masing-masing fasa tersebut berada pada kondisi *forward bias*. Kondisi ini menyebabkan muncul nilai tegangan dari output dioda 1,3,5. Ketika polaritas negatif masuk ke *rectifier*, maka polaritas negatif fasa R akan masuk ke D_2 , polaritas negatif fasa S akan masuk ke D_4 , dan polaritas negatif fasa T akan masuk ke D_6 , sehingga dioda pada masing-masing fasa tersebut berada pada kondisi *forward bias* pula. Kondisi ini menyebabkan muncul nilai tegangan dari output dioda 2,4,6 [18].

Rentang waktu gelombang pada mekanisme ini adalah selama 120° , sehingga nilai batas integral untuk mendapatkan nilai tegangan tersebut adalah dimulai dari $t = 30$ hingga $t = 150$. Untuk *rectifier* tiga fasa setengah gelombang, prinsip kerjanya adalah sama dengan *rectifier* gelombang penuh hanya saja kondisi yang berlaku adalah pada dioda 1,3 dan 5 yang menghasilkan tegangan. Adapun rangkaian *rectifier* tiga fasa dan bentuk gelombang outputnya ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Rangkaian dan Bentuk Gelombang Output *Rectifier* Tiga Fasa Gelombang Penuh (a) dan Setengah Gelombang (b)

Nilai tegangan output DC dari *rectifier* tiga fasa dirumuskan yaitu:

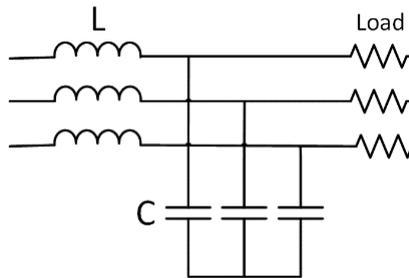
$$V_{\text{full-wave}} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{\text{in}} \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{3V_m}{\pi} = 0.955V_m \quad (2.42)$$

$$V_{\text{half-wave}} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_{\text{in}} \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{3V_m}{\pi} = 0.827V_m \quad (2.43)$$

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V_{\text{AC}} \quad (2.44)$$

2.4 Low Pass Filter (LPF)

Low pass filter merupakan filter yang digunakan untuk mengurangi frekuensi yang tinggi atau meloloskan gelombang dengan frekuensi rendah. Konfigurasi *low pass filter* paling sering digunakan adalah terdiri dari rangkaian LC atau LCL [19]. Gelombang dengan frekuensi tinggi salah satunya dihasilkan oleh *switching* inverter sehingga menghasilkan PWM (*pulse width modulation*). Output gelombang PWM jika telah melewati *low pass filter* maka akan menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal. Bentuk rangkaian LPF secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.15.



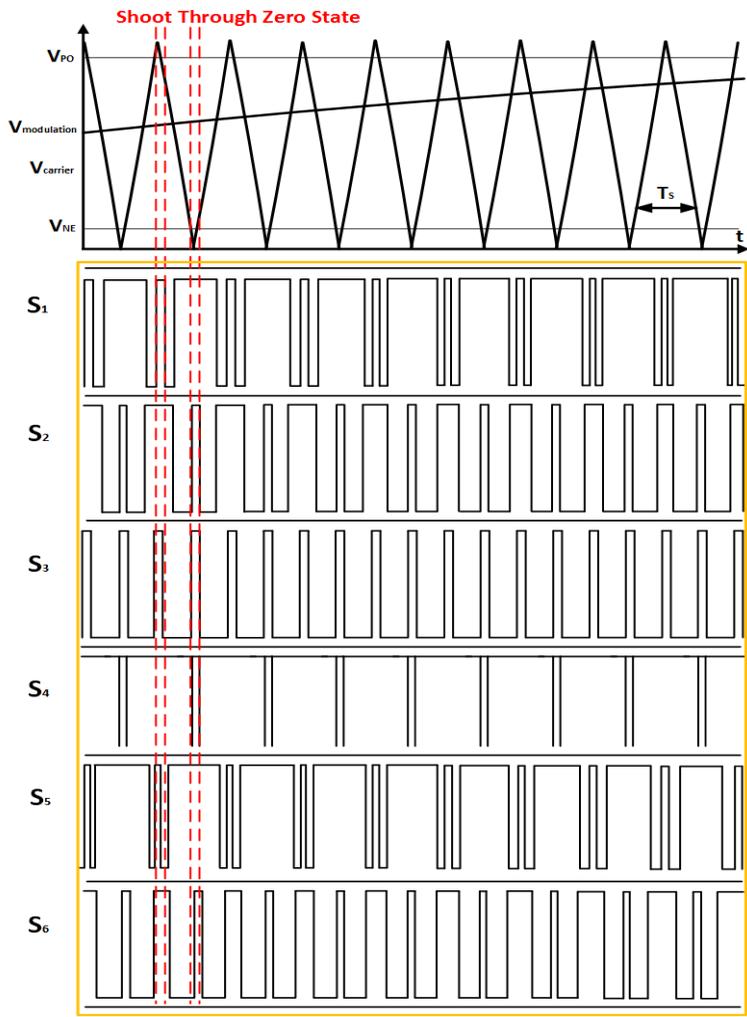
Gambar 2.15. *Low Pass Filter* (LPF) Konfigurasi LC

Low pass filter didesain untuk menghasilkan frekuensi *cut off* yang digunakan untuk menghilangkan frekuensi diatas batas frekuensi *cut off* tersebut. Penentuan desain frekuensi *cut off* dirumuskan yaitu:

$$f_{\text{cut off}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.45)$$

2.5 Simple Boost Control

Simple boost control merupakan sinusoida PWM yang dimodifikasi dengan cara menambahkan *shoot through zero state* dalam satu periode *switching*. *Simple boost control* PWM dapat diilustrasikan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Sinyal *Simple Boost Control*

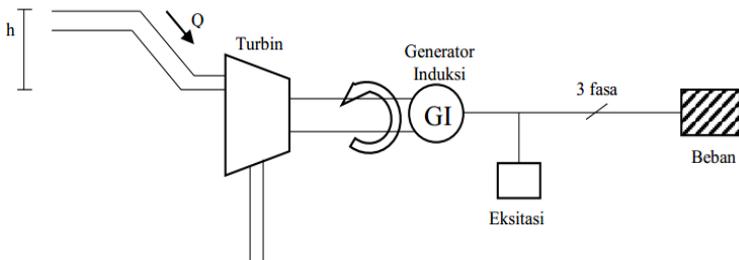
Dua buah sinyal DC digunakan untuk membuat *shoot through duty ratio* (D_0). Sinyal DC yang positif sama dengan nilai puncak sinyal referensi tiga fasa, sedangkan sinyal DC yang negatif sama dengan nilai lembah sinyal referensi tiga fasa. Ketika sinyal pembawa segitiga lebih besar daripada sinyal DC positif (V_{PO}) atau lebih kecil daripada sinyal DC

negatif (V_{NE}) maka rangkaian akan berada dalam keadaan *shoot through* [20]. Selama nilai sinyal DC positif dan negatif sama dengan nilai maksimum dan minimum dari sinyal referensi gelombang tiga fasa maka nilai indeks modulasi (M) dan *shoot through duty ratio* (D_0) saling berkaitan [21]. Hubungan antara indeks modulasi dan *shoot through duty ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$D_0 = 1 - M \quad (2.46)$$

2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah pembangkit listrik tenaga air skala kecil yang mengubah potensi air dengan ketinggian (*head*) dan debit tertentu menjadi tenaga listrik [2]. Skema sederhana pembangkit listrik tenaga mikro hidro disajikan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

Sistem PLTMH secara umum sama persis dengan PLTA pada umumnya. Namun, yang membedakan adalah daerah kerja sistem pembangkit listrik tersebut. PLTMH dapat memanfaatkan sumber air yang tidak terlalu besar. Tidak seperti PLTA, dengan atau tanpa *reservoir*, PLTMH dapat beroperasi. Hal ini dikarenakan PLTMH dapat memanfaatkan potensi air yang kecil. Daya (*power*) yang dihasilkan dapat dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$P = \rho \times g \times H_{\text{eff}} \times Q \quad (2.47)$$

Dimana:

- P = Daya mekanik (Watt)
- ρ = massa jenis air (kg/m^3)
- Q = debit air (m^3/s)
- H_{eff} = tinggi jatuh efektif (m)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)

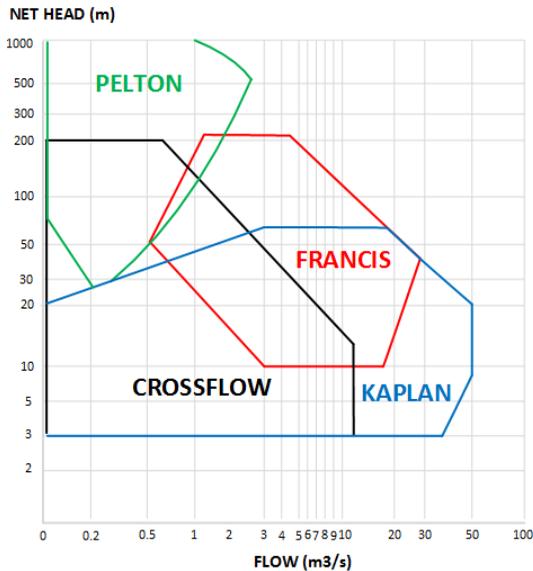
2.6.1 Pemilihan Jenis Turbin

Turbin air adalah turbin dengan air sebagai fluida kerja. Air yang mengalir dari tempat yang lebih tinggi menuju tempat yang lebih rendah, hal ini air memiliki energi potensial. Dalam proses aliran di dalam pipa, energi potensial tersebut berangsur-angsur berubah menjadi energi mekanis, dimana air memutar roda turbin. Roda turbin dihubungkan dengan generator yang mengubah energi mekanis (gerak) menjadi energi listrik. Terdapat dua jenis turbin, yaitu turbin impuls dan turbin reaksi. Contoh turbin impuls yaitu Crossflow (Banki), Pelton, dan Turgo. Sedangkan contoh turbin reaksi yaitu Kaplan, Francis, propeller [22].

Adapun tipe penggunaan *head* yang berlaku pada beberapa macam turbin diantaranya:

- Kaplan : $2 < H < 40$
- Francis : $10 < H < 350$
- Pelton : $50 < H < 1300$
- Crossflow : $6 < H < 100$
- Turgo : $50 < H < 250$

Nilai head dapat digunakan sebagai acuan untuk memilih jenis turbin yang ditunjukkan oleh kurva pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Kurva Pemilihan Jenis Turbin Berdasarkan *Head* [22]

Setiap jenis turbin pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro memiliki kisaran kecepatan spesifik, antara lain sebagai berikut:

- Turbin Pelton $12 < N_s < 25$
- Turbin Francis $60 < N_s < 300$
- Turbin Crossflow $40 < N_s < 200$
- Turbin Propeller $250 < N_s < 1000$

Nilai N_s tiap turbin dapat diketahui dari persamaan yang terdapat pada Tabel 2.2.

Tabel. 2.2. Persamaan N_s pada Tiap Jenis Turbin

Jenis Turbin	Persamaan N_s	Sumber Pustaka
Pelton (1 jet)	$N_s = \frac{85.49}{H^{0.243}}$	[23]
Francis	$N_s = \frac{3763}{H^{0.854}}$	[24]
Kaplan	$N_s = \frac{2283}{H^{0.486}}$	[24]
Crossflow	$N_s = \frac{513.25}{H^{0.505}}$	[25]
Propeller	$N_s = \frac{2702}{H^{0.5}}$	[26]

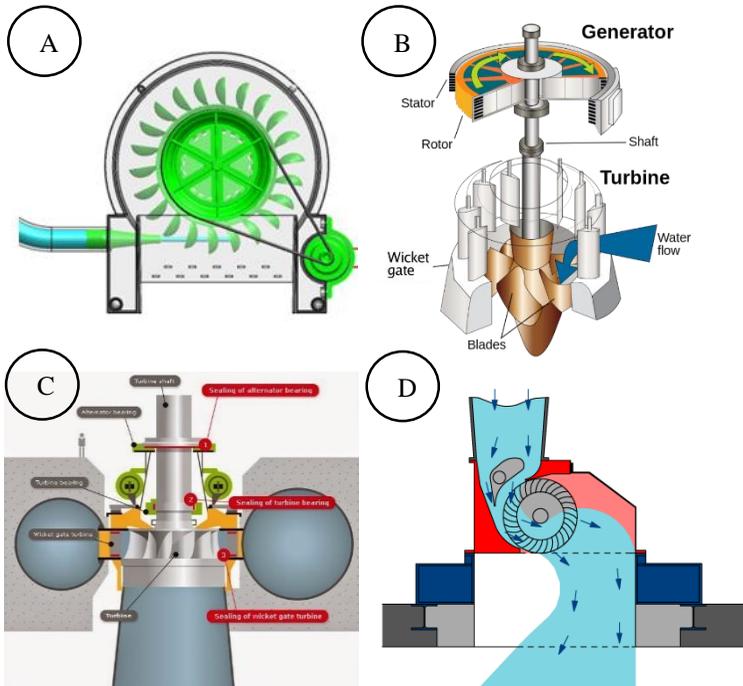
Dengan mengetahui nilai N_s dari turbin, maka dapat digunakan untuk mencari nilai kecepatan putar turbin. Adapun persamaan kecepatan turbin yaitu:

$$N = \frac{N_s \cdot H^{5/4}}{\sqrt{P}} \quad (2.48)$$

Dimana:

- N = Kecepatan Putar Turbin (rpm)
- N_s = Kecepatan Spesifik Turbin (rpm)
- H = Head atau Tinggi Jatuh (meter)
- P = Daya Input Potensi Air (HP)

Adapun jenis-jenis bentuk turbin ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19. Jenis-jenis Turbin (A) Turbin Pelton (B) Turbin Kaplan (C) Turbin Francis (D) Turbin Crossflow

Gambar A-C = sumber: www.satuenergi.com

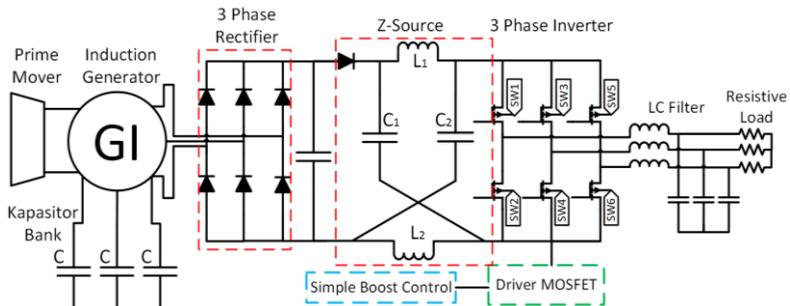
Gambar D = sumber: cink-hydro-energy.com

BAB III DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI Z-SOURCE INVERTER

Pada bab ini dibahas tentang desain, simulasi dan implementasi *Z-Source Inverter*. Pada tahap pendesainan, dilakukan perhitungan parameter yang berkaitan dengan pemilihan komponen di pasaran. Untuk tahap simulasi dilakukan simulasi menggunakan *software* PSIM yang digunakan sebagai data acuan implementasi. Tahap terakhir adalah implementasi alat yang diwujudkan dalam *device Z-Source Inverter* dalam bentuk fisik.

3.1 Diagram Blok Sistem

Implementasi *Z-Source Inverter* ini dihubungkan dengan generator induksi. Hal ini bertujuan agar tegangan dan frekuensi yang dihasilkan generator induksi dapat diatur. Dalam teknisnya, mode penyaklaran pada *Z-Source Inverter* ini menggunakan *simple boost control* yang didukung oleh *driver* MOSFET agar inverter dapat bekerja. Kapasitor *bank* berfungsi sebagai penyuplai daya reaktif agar mesin induksi dapat difungsikan sebagai generator induksi. Secara lengkap diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1, generator induksi diputar diatas kecepatan sinkronnya oleh *prime mover* (mesin induksi 2) yang dihubungkan dengan *variable frequency driver* (VFD). Kemudian kapasitor *bank* membantu menyuplai daya reaktif sehingga medan magnet pada rotor generator induksi dapat terbangkit. Setelah terbangkit medan magnet, mekanisme berikutnya akan muncul tegangan tiga fasa sebagai output generator induksi. Tegangan ini kemudian disearahkan

oleh *rectifier* tiga fasa agar dihasilkan tegangan DC. Tegangan yang dihasilkan diratakan oleh kapasitor kemudian masuk ke rangkaian *Z-Source Inverter*. Output dari *Z-Source Inverter* ini adalah tegangan AC yang dapat diatur sesuai kebutuhan dengan mengatur *shoot through duty ratio* pada *simple boost control*. Pembangkitan sinyal *simple boost control* menggunakan Arduino Mega 2560. Output sinyal Arduino Mega 2560 adalah sinyal tiga buah sinyal SPWM dan dua buah sinyal PWM. Frekuensi output generator induksi akan mengikuti frekuensi fundamental inverter yang diatur konstan 50 Hz. Beban yang digunakan adalah beban resistif tiga fasa. Pada bagian output juga dipasang LC filter agar tegangan yang dihasilkan menjadi sinudoidal.

3.2 Parameter untuk Model Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

Sistem pembangkit tenaga mikro hidro selalu dikondisikan pada putaran turbin yang konstan, sehingga pada pengujian ini digunakan beberapa alat untuk memodelkan sistem tersebut. Beberapa parameter yang digunakan adalah generator induksi, *variable frequency drive*, kapasitor *bank*, dan *rectifier* tiga fasa.

3.2.1 Generator Induksi

Mesin induksi yang digunakan dalam penelitian ini adalah mesin induksi yang menjadi inventaris Laboratorium Konversi Energi Listrik Teknik Elektro ITS. Adapun spesifikasi mesin induksi yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Spesifikasi Mesin Induksi

Parameter	Nilai
Type Mesin	EM802-4 (<i>Rewinding</i>)
Seri No	001321
Jenis Rotor	<i>Squirrel cage</i>
Daya Output (P_o)	1 HP
Tegangan fasa rating (V_{rat})	56 V
Frekuensi (f)	50 Hz
Jumlah pole (p)	4 pole
Kecepatan rating (n)	1390 rpm
Efisiensi mesin (η)	73%
Faktor daya (PF)	0,76
Inersia rotor	0.0021 kg.m ²
<i>Insulation class</i> (I_s)	F
<i>Index Protection</i> (IP)	55

Untuk mengisi parameter pada simulasi, maka parameter dalam mesin induksi harus diketahui terlebih dahulu. Untuk mengetahui parameter tersebut maka dilakukan tes parameter seperti yang dijelaskan pada sub bab 2.2.2. Berdasarkan tes yang telah dilakukan maka didapatkan parameter mesin induksi yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Parameter Mesin Induksi [27]

Parameter	Nilai
R_1	1,0297 Ω
X_1	1,02 Ω
R_2	0,4973 Ω
X_2	1,02 Ω
X_M	12,3771 Ω
V_{TH}	51,584 Ω
R_{TH}	0,879 Ω
X_{TH}	1,02 Ω
S_{max}	22,39%
τ_{max}	8,19257 N.m
τ_{ind}	5,46542 N.m
τ_{start}	4,1716 N.m

Mesin induksi yang digunakan dalam pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Mesin Induksi yang Digunakan untuk Pengujian

3.2.2 Variable Frequency Drive

Variable frequency drive berfungsi untuk mengatur kecepatan mesin induksi agar dapat beroperasi sebagai generator induksi. Selain itu

juga dapat mengatur putaran mesin induksi tetap konstan. Alat *variable frequency drive* yang digunakan adalah inventaris di Laboratorium Konversi Energi Listrik Teknik Elektro ITS. Spesifikasi *variable frequency drive* yang digunakan adalah produksi ABB dengan tipe ACS 600. Adapun bentuk *variable frequency drive* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Variable Frequency Drive* untuk Pengujian

3.2.3 Kapasitor *Bank* Tiga Fasa

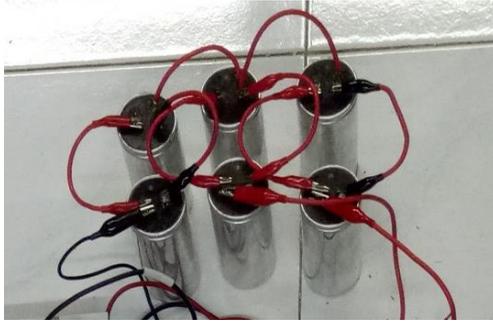
Agar dapat beroperasi sebagai generator induksi maka mesin induksi perlu suplai daya reaktif tetap dari sebuah kapasitor *bank* tiga fasa. Kapasitor ini akan menjaga mesin induksi dapat menghasilkan arus medan sehingga dapat beroperasi sebagai generator induksi. Perhitungan nilai kapasitansi untuk kapasitor menggunakan persamaan 2.33 dan 2.34, sedangkan parameternya diperoleh pada data parameter mesin induksi pada Tabel 3.2.

$$X_M = X_C = 12,3771 \ \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 12,3771} = 2,57 \times 10^{-4} = 257 \ \mu\text{F}$$

Pada pengujian ini digunakan nilai kapasitansi sebesar yang memiliki nilai mendekati 257 μF . Kapasitor *bank* tiga fasa yang digunakan pada pengujian ini memiliki spesifikasi sekitar 130 μF dengan tegangan maksimum sebesar 1000 V. Oleh karena itu digunakanlah enam kapasitor yang tiap dua kapasitor disusun paralel untuk mendapatkan nilai kapasitansi sebesar 257 μF . Kemudian kapasitor tersebut

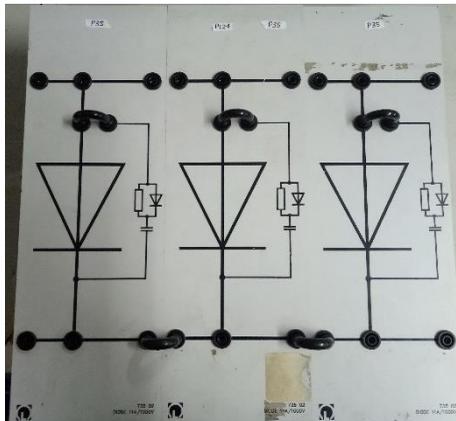
dikonfigurasi WYE. Adapun bentuk kapasitor *bank* tiga fasa yang digunakan untuk pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Kapasitor *Bank* Tiga Fasa untuk Pengujian

3.2.4 *Rectifier* Tiga Fasa

Output tegangan dari generator induksi berupa tegangan AC tiga fasa. Tegangan ini harus disearahkan terlebih dahulu oleh *rectifier* tiga fasa agar dihasilkan tegangan DC sebagai input *Z-Source Inverter*. Pada penelitian ini digunakan *rectifier* tiga fasa setengah gelombang dikarenakan ketersediaan dioda di laboratorium yang terbatas. Spesifikasi *rectifier* tiga fasa yang digunakan memiliki kapasitas tegangan 1000 V dan mampu menahan arus sebesar 11 A. Adapun *rectifier* tiga fasa yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.5.



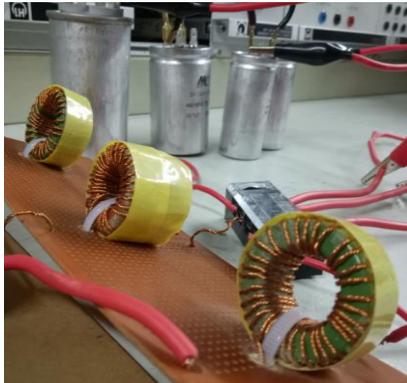
Gambar 3.5. *Rectifier* Tiga Fasa untuk Pengujian

3.2.5 Low Pass Filter

Pada bagian output dipasang *low pass filter* yang bertujuan untuk menghasilkan gelombang tegangan output yang sinusoidal. Adapun desain *low pass filter* adalah menggunakan komponen induktor dan kapasitor sehingga disebut juga filter LC. Filter ini didesain untuk menghilangkan gelombang dengan frekuensi diatas 50 Hz. Untuk LPF frekuensi *cut off* didesain pada frekuensi lebih tinggi yaitu 650 Hz yang bertujuan agar frekuensi yang dihilangkan sebesar 650 Hz atau lebih sedikit. Dengan konfigurasi tersebut, dengan nilai kapasitor 6 μF , maka spesifikasi induktor yang digunakan yaitu:

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot f_{\text{cut off}})^2 \cdot C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 650)^2 \cdot 6 \times 10^{-6}} = 10 \text{ mH}$$

Adapun implementasi filter LC ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Implementasi Filter LC

3.3 Desain Z-Source Inverter dengan Metode Simple Boost Control

Dalam mendesain sebuah inverter perlu dipertimbangkan kondisi peralatan pendukung yang ada di laboratorium dan komponen yang berada di pasaran. Pemilihan komponen ini juga didasarkan pada harga di pasaran yang dalam penelitian ini didesain sebuah inverter yang biaya pembuatannya terjangkau. Pada *Z-Source Inverter*, parameter utama yang ditentukan adalah nilai induktor dan kapasitor. Oleh karena itu, penentuan spesifikasi kapasitas inverter disesuaikan dengan variabel tegangan input DC yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Listrik Teknik Elektro ITS. Adapun parameter-parameter awal yang ditentukan dalam mendesain *Z-Source Inverter* ini disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Parameter Awal Desain *Z-Source Inverter*

Parameter	Nilai
Daya maksimum (P_{outmax})	104 W
Tegangan input DC (V_{in})	52 V
Tegangan output (V_{ll_rms})	60 V
Frekuensi output (f_o)	50 Hz
Indeks modulasi	0.92
Beban	120 ohm
Frekuensi pensaklaran (f_s)	7.842 kHz
Ripple Arus	8.2%
Ripple Tegangan	0.17%

3.3.1 Penentuan Rasio Konversi dan *Shoot Through Duty Ratio*

Berdasarkan persamaan rasio konversi pada inverter bergantung pada nilai *shoot through duty ratio*. Faktor peningkatan (B) yang dibutuhkan untuk mendapatkan tegangan output *line to line* sebesar 60 V dan menggunakan nilai indeks modulasi 0.92. Adapun nilai peningkatan tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.11.

$$B = \frac{\sqrt{2} \times V_{out_ll}}{\sqrt{3}} \times \frac{2}{M \times V_{DC}}$$

$$B = \frac{\sqrt{2} \times 60}{\sqrt{3}} \times \frac{2}{0.92 \times 52} = 2.05$$

Sehingga nilai *shoot through duty ratio* didapatkan menggunakan persamaan 2.18

$$B = \frac{1}{1 - 2D_0}$$

$$D_0 = \frac{B-1}{2B} = \frac{2.05-1}{2 \times 2.05} = 0.256$$

Dengan menggunakan frekuensi penyaklaran 7.842 kHz maka periode *shoot through* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.19

$$D_0 = T_0 f_s$$

$$T_0 = \frac{D_0}{f_s} = \frac{0.256}{7.842 \times 10^3} = 32.64 \mu s$$

3.3.2 Penentuan Nilai Induktor

Penentuan *ripple* arus digunakan untuk memperoleh nilai induktor minimum. Pada penelitian akhir ini didesain nilai *ripple* arus induktor sebesar 8.2%. Untuk mencari nilai induktor diawali dengan menghitung nilai arus rata-rata yang masuk ke induktor menggunakan persamaan 2.20.

$$\bar{I}_L = \frac{P}{V_{in}} = \frac{100}{52} = 1.92 \text{ A}$$

Dengan *ripple* arus 8.2% maka *ripple* arus *peak to peak* sebesar 16.4%. Nilai ini digunakan untuk memperoleh arus induktor yang dihitung menggunakan persamaan 2.21 sebagai berikut:

$$\text{Nilai maks arus induktor: } I_{r_{max}} = 1.92 + \left(8.2\% \times \frac{1.92}{2} \right) = 1.99 \text{ A}$$

$$\text{Nilai min arus induktor: } I_{r_{min}} = 1.92 - \left(8.2\% \times \frac{1.92}{2} \right) = 1.84 \text{ A}$$

$$\text{Selisih arus} = 2 (I_{r_{max}} - I_{r_{min}}) = 2 (1.99 - 1.84) = 0.3 \text{ A}$$

Tegangan pada komponen induktor pada saat *shoot through* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.27.

$$V_L = \frac{1 - 0.256}{1 - 2 \times (0.256)} \times 52 = 79.29 \text{ V}$$

Sehingga nilai induktor dapat ditentukan menggunakan rumus:

$$L = \frac{V \cdot T_0}{\Delta I_L} = \frac{79.29 \times 32.64 \times 10^{-6}}{0.3} = 8.25 \text{ mH}$$

3.3.2 Penentuan Nilai Kapasitor

Nilai kapasitor minimum dapat ditentukan dari besar *ripple* tegangan *peak to peak* pada kapasitor (ΔV_C) pada kapasitor. Pada saat kondisi *shoot through* maka nilai $I_L = I_C$ dan dipilih *ripple* sebesar 0.17%, sehingga nilai kapasitor dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.24)

$$C = \frac{\bar{I}_L \times T_0}{V \cdot \Delta V_C} = \frac{1.92 \times 32.64 \times 10^{-6}}{79.29 \times 0.17\%} = 464.93 \text{ } \mu\text{F}$$

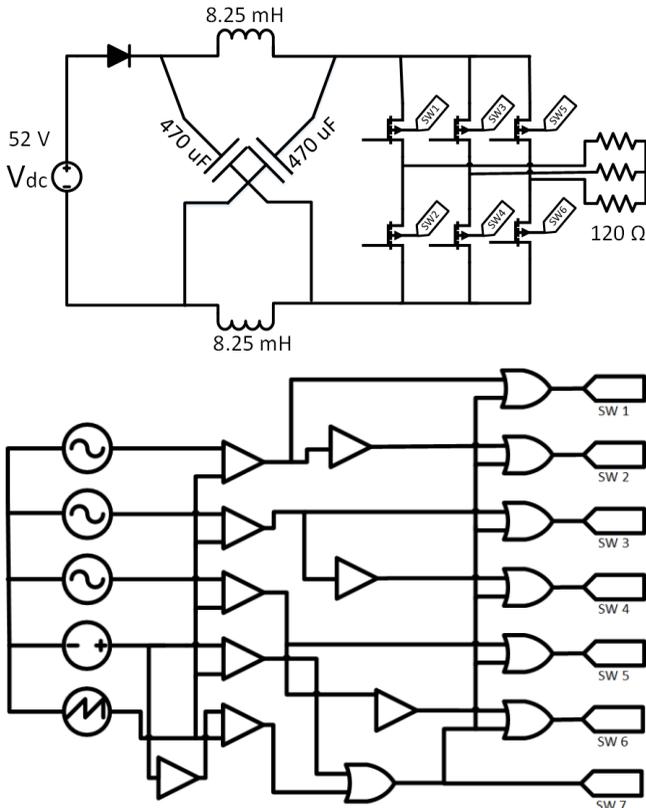
3.4 Simulasi pada Kondisi *Steady State*

Tahap simulasi dilakukan pada kondisi *steady state*. Hal ini bertujuan agar inverter dapat bekerja sesuai desain. Tahap simulasi dilakukan menggunakan *software* Power Simulator. Adapun rangkaian

simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.7. Sedangkan nilai-nilai parameter yang diinputkan pada rangkaian simulasi dapat dilihat pada Tabel 3.4

Tabel 3.4. Parameter Rangkaian Simulasi

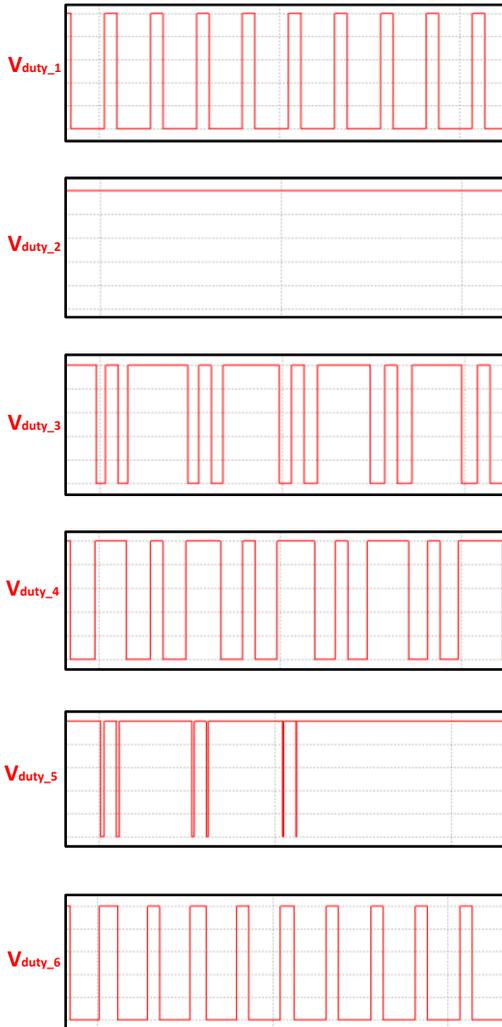
Parameter	Nilai
Tegangan input DC (V_{in})	52 V
Induktor ($L_1 = L_2$)	8.25 mH
Kapasitor ($C_1 = C_2$)	470 μ F
Indeks Modulasi (M)	0.92
Shoot Through Duty Ratio (D_o)	0 – 0.2
Frekuensi output (f_o)	50 Hz
Frekuensi Penyaklaran (f_s)	7.842 kHz



Gambar 3.7 Rangkaian Z-Source Inverter dan Simple Boost Control

3.4.1. Simulasi Sinyal *Simple Boost Control*

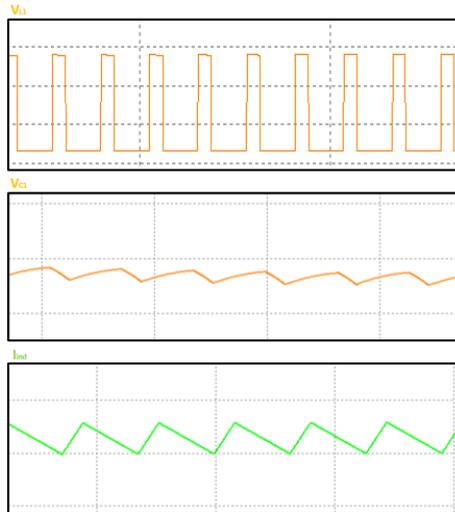
Berdasarkan hasil simulasi, karakteristik sinyal *simple boost control* pada tiap MOSFET memiliki bentuk yang berbeda-beda. Adapun karakteristik sinyal *simple boost control* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Karakteristik Sinyal *Simple Boost Control* pada Tiap MOSFET

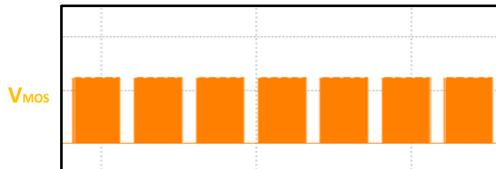
3.4.2 Simulasi Karakteristik Gelombang Tegangan Kapasitor, Tegangan Induktor dan Arus Induktor

Pada saat inverter pada kondisi *shoot through zero state*, maka kapasitor akan mengalami *discharging* dan induktor akan mengalami *charging*. Kondisi *charging* pada induktor dapat dilihat pada kenaikan arus induktor dan kenaikan tegangan induktor. Sedangkan fase *discharging* kapasitor tidak terlalu terlihat pada grafik dikarenakan *ripple* tegangan kapasitor yang sangat kecil yaitu sebesar 0.17%. Sedangkan untuk *ripple* arus induktor sebesar 8.2%. Berdasarkan hasil simulasi, karakteristik gelombang tegangan kapasitor, tegangan induktor dan arus induktor dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Karakteristik Gelombang Tegangan Induktor, Tegangan Kapasitor dan Arus Induktor

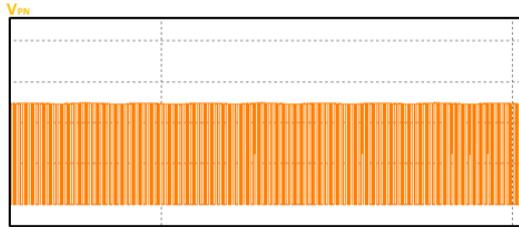
Sedangkan bentuk tegangan MOSFET dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Karakteristik Gelombang Tegangan MOSFET

3.4.3 Simulasi Karakteristik Tegangan DC Bus

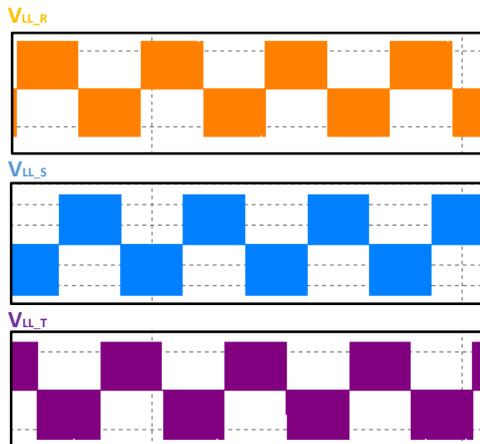
Pada saat inverter pada kondisi *shoot through zero state*, maka kapasitor akan mengalami *discharging*. Sedangkan tegangan DC bus menjadi nol. Berdasarkan hasil simulasi, karakteristik gelombang tegangan DC bus dapat dilihat pada Gambar 3.11.



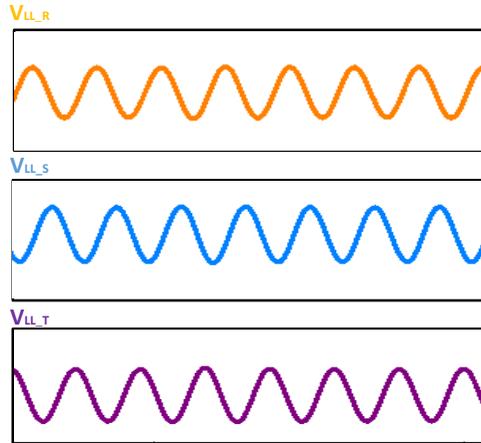
Gambar 3.11. Karakteristik Gelombang Tegangan DC Bus

3.4.4 Simulasi Karakteristik Gelombang Tegangan dan Arus Output Inverter pada Beban Konstan

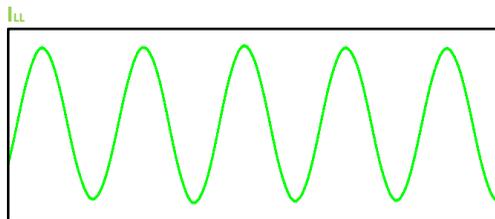
Gelombang output pada inverter dapat diketahui pada karakteristik gelombang tegangan dan arus yang terdapat pada beban. Pada simulasi ini sistem dibebani dengan beban resistif tiga fasa sebesar 120 ohm. Berdasarkan hasil simulasi, pada sisi output memiliki karakteristik gelombang yang sefasa antara tegangan dan arus. Adapun karakteristik output gelombang tegangan tiga fasa dan arus pada beban ditunjukkan pada Gambar 3.12, Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.



Gambar 3.12. Karakteristik Gelombang Output Tegangan Tiga Fasa PWM



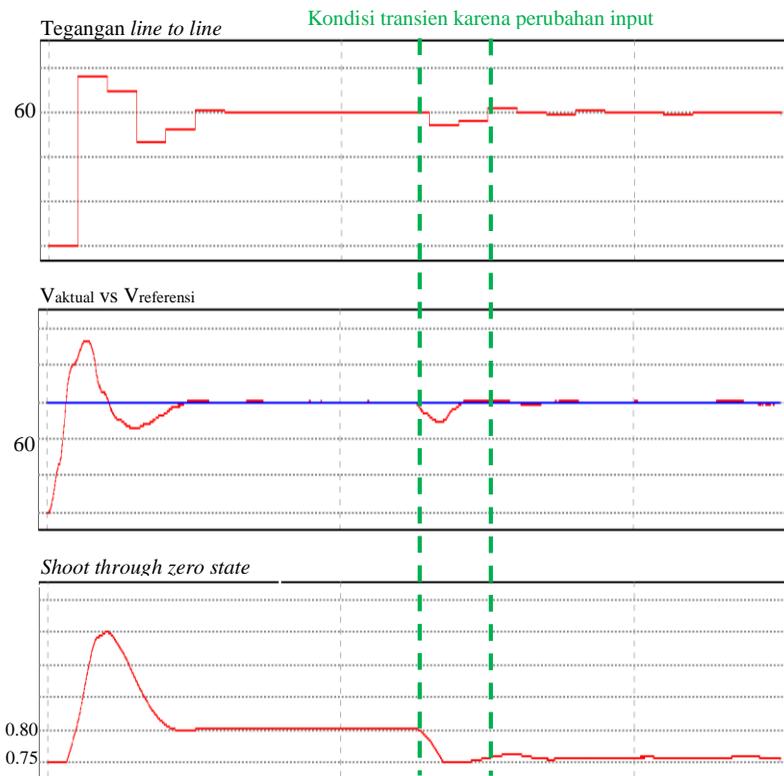
Gambar 3.13. Karakteristik Gelombang Output Tegangan Tiga Fasa Sinusoidal



Gambar 3.14. Karakteristik Gelombang Arus Output Sinusoidal

3.4.5 Simulasi Kontrol Tegangan

Gelombang output pada inverter dapat diketahui pada karakteristik gelombang tegangan dan arus yang terdapat pada beban. Pada simulasi ini sistem dibebani dengan beban resistif tiga fasa yang berubah-ubah. Tegangan pada sistem dijaga konstan dan arus output inverter akan mengalami perubahan. Sistem secara *close loop* akan membandingkan antara tegangan aktual dengan tegangan referensi. Dengan menentukan parameter PI yang tepat, maka sistem akan merespon perubahan beban untuk menyesuaikan dengan tegangan referensi yang diberikan. Adapun gelombang kontrol tegangan ditunjukkan pada Gambar 3.15.

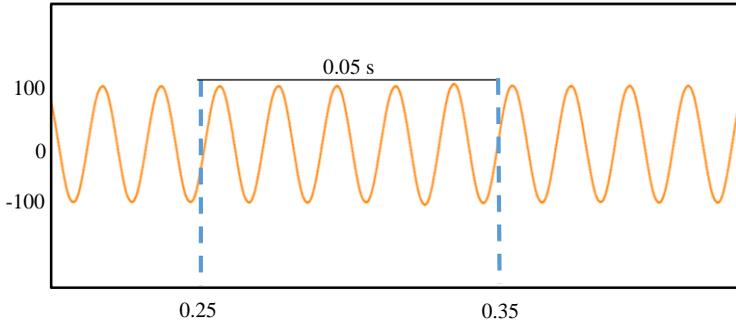


Gambar 3.15. Karakteristik Tegangan Output dengan Perubahan Input

3.4.6 Simulasi Kontrol Frekuensi

Gelombang output pada inverter juga dapat diketahui pada karakteristik gelombang frekuensi yang ada pada beban. Pada sistem mikro hidro, ketika beban berubah-ubah, frekuensi cenderung konstan. Hal ini karena frekuensi dipengaruhi oleh putaran generator dan jumlah pole generator. Pada sistem mikro hidro putaran generator disetting konstan, sedangkan pole tetap, sehingga frekuensi output generator konstan. Frekuensi konstan ini dapat berubah jika tegangan sinusoidal diubah menjadi DC (frekuensi nol), kemudian masuk ke inverter untuk menjadi tegangan sinusoidal kembali yang telah disetting dengan frekuensi output konstan 50 Hz. Dapat disimpulkan bahwa perubahan frekuensi hanya dipengaruhi oleh berubahnya putaran generator, dan jika

hendak disesuaikan dengan frekuensi yang diinginkan maka dapat disetting frekuensi tertentu pada inverter. Bentuk gelombang frekuensi output disimulasikan pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16. Karakteristik Gelombang Frekuensi Output 50 Hz

Dapat dilihat bahwa terdapat lima gelombang dalam periode 0.1 s, sehingga gelombang output memiliki frekuensi sebesar 50 Hz.

3.5 Implementasi Z-Source Inverter

Pada tahap implementasi adalah tahap pembuatan alat berdasarkan desain yang telah dihitung sebelumnya. Perhitungan ini digunakan sebagai acuan penentuan tiap komponen rangkaian sehingga dapat diketahui spesifikasi komponen yang dibutuhkan dan disesuaikan dengan yang tersedia di pasaran. Adapun beberapa komponen yang ditentukan antara lain:

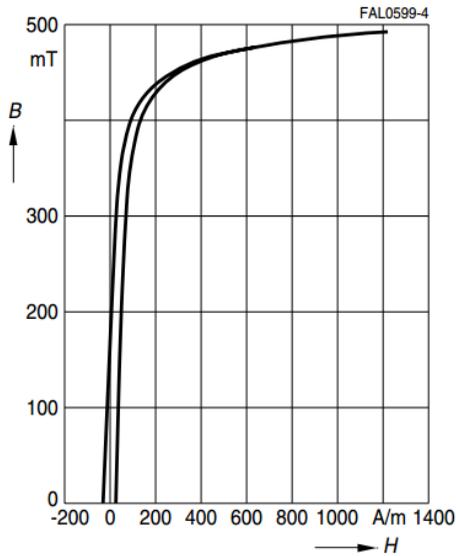
3.5.1 Induktor

Pemilihan kawat untuk membelit induktor sangat penting untuk mereduksi rugi – rugi tembaga dan menghindari *skin effect*. Pada desain induktor digunakan kawat email ukuran 0.3 mm yang dipilin sebanyak 7 kali sehingga menghasilkan diameter 1.5 mm agar mampu dilalui arus sebesar 1.92 A pada saat beban maksimum. Inti induktor yang digunakan adalah tipe EE65 N87 EPCOS TDK yang memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 3.5

Tabel 3.5. Spesifikasi Inti EE55 EPCOS TDK [28]

Parameter	Nilai
<i>Effective magnetic path length, l_e</i>	147 mm

<i>Effective magnetic cross section, A_e</i>	535 mm ²
<i>Minimum core cross section, A_{min}</i>	529 mm ²
<i>Relative effective permeability, μ_e</i>	1570
<i>Effective magnetic volume, V_e</i>	78650 mm ³
Bahan	N27
<i>Inductance Factor, A_L</i>	7200 nH
<i>Saturation magnetization, B_s</i>	410 mT



Gambar 3.17. Kurva Magnetisasi Bahan Inti N27 [29]

Dengan nilai induktansi sebesar 8.25 mH, maka jumlah belitan yang diperlukan untuk mendesain induktor adalah:

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

$$N = \sqrt{\frac{8.25 \times 10^{-3}}{7200 \times 10^{-9}}} = 33.85$$

maka fluks yang mengalir pada inti dapat dihitung menggunakan rumus:

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

$$\beta_{\max} = \frac{8.25 \cdot 10^{-3} \times 1.92}{5.35 \times 33.85} \times 10^7$$

$$\beta_{\max} = 874.67 \text{ mT}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut maka nilai fluks melebihi spesifikasi nilai maksimum fluks yaitu 410mT seperti pada Gambar 3.17 sehingga inti harus diberi gap agar tidak terjadi saturasi. Inti induktor diberi celah udara sebesar 2 mm sehingga nilai *relative effective permeability* (μ_e) setelah diberi celah udara dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\mu_e(\text{gap}) = \frac{\mu_e}{1 + \frac{\mu_e \cdot \text{gap}}{I_e}}$$

$$\mu_e(\text{gap}) = \frac{1570}{1 + \frac{1570 \times 2}{147}} = 70.21$$

Sehingga jumlah belitan yang diperlukan untuk mendapatkan nilai induktansi 8.25 mH dengan celah udara 2 mm dapat dihitung menggunakan rumus:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot \left(\text{gap} + \frac{I_e}{\mu_e(\text{gap})} \right)}{0.4 \cdot \pi \cdot A_e \times 10^{-9}}}$$

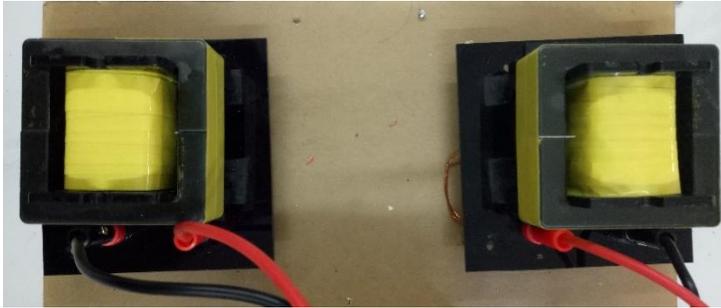
$$N = \sqrt{\frac{8.25 \times 10^{-3} \cdot \left(2 + \frac{147}{70.21} \right)}{0.4 \times \pi \times 535 \times 10^{-9}}} = 224$$

Jumlah belitan yang diperlukan yaitu sebanyak 249 belitan dan nilai fluks yang mengalir pada inti yaitu:

$$\beta_{\max} = \frac{8.25 \times 10^{-3} \times 1.92}{5.35 \times 224} \times 10^7$$

$$\beta_{\max} = 132.18$$

Dengan nilai fluks 132.18 mT pada inti besi maka inti tidak akan mengalami saturasi pada saat dibebani penuh. Bentuk induktor untuk implementasi ditunjukkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.18. Bentuk Induktor untuk Implementasi

3.5.2 Kapasitor

Berdasarkan perhitungan, nilai kapasitor yang didesain adalah sebesar $464.93 \mu\text{F}$. Namun, yang tersedia di pasaran yaitu senilai $470 \mu\text{F}$, sehingga yang digunakan adalah kapasitor yang tersedia di pasaran. Sedangkan tegangan rating minimum dari kapasitor yang harus dipenuhi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.22.

$$V_C = \frac{(B+1) \cdot V_{in}}{2} = \frac{(2.05+1) \cdot 52}{2} = 79.29 \text{ V}$$

Sehingga kapasitor harus mampu menahan tegangan minimum sebesar 79.29 V . Kapasitor yang digunakan pada implementasi yaitu jenis *aluminium elektrolite* dengan *rating* tegangan kapasitor yaitu sebesar $470 \mu\text{F}/250 \text{ V}$. Adapun kapasitor yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19. Kapasitor Elco untuk Implementasi

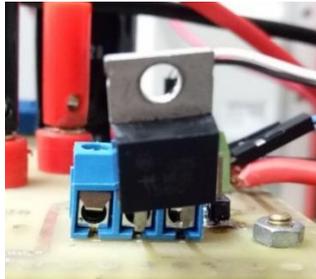
3.5.3 Penentuan Dioda

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 *reverse recovery time*

yang cepat. Penentuan tegangan dan arus pada dioda dapat diperoleh berdasarkan rumus:

$$I_d = I_{in} = \frac{P}{V_{in}} = \frac{100}{52} = 1.92 \text{ A}$$

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* (VR) 600V dengan arus maksimum yang dapat dilewatkan (IF) sampai 15 A. Dioda MUR 1560 juga memiliki *reverse recovery time* (trr) yang cepat yaitu 60 ns. Adapun dioda MUR 1560 yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20. Dioda MUR 1560 untuk Implementasi

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].

$$V_{DS} = V_{PN} = \frac{1}{1-2D} V_{in}$$

$$V_{DS} = V_{PN} = \frac{1}{1-2 \times 0.256} \cdot 52 = 106.56 \text{ V}$$

MOSFET yang digunakan adalah tipe IRFP460. MOSFET ini memiliki kemampuan menahan beda tegangan antara *drain* dan *source* (V_{DS}) maksimum sebesar 500 V dan arus drain sebesar 20 A. 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 pada MOSFET masih di bawah nilai spesifikasi yang diberikan oleh MOSFET IRFP460, sehingga penggunaan MOSFET

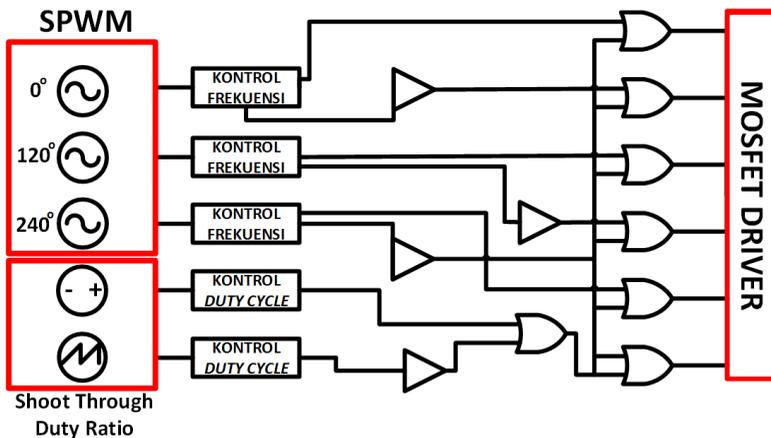
masih bisa digunakan pada rangkaian inverter ini. Adapun MOSFET IRFP460 yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 3.21. MOSFET IRFP460 untuk Implementasi

3.5.5 Desain *Simple 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 3.22. Adapun hasil implementasi *simple boost control* ditunjukkan pada Gambar 3.23.



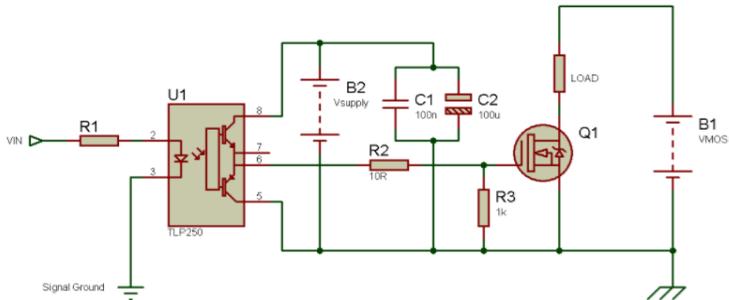
Gambar 3.22. Diagram Blok *Simple Boost Control*



Gambar 3.23. Hasil Implementasi *Simple Boost Control*

3.5.6 Desain Driver MOSFET

Pada setiap pembuatan rangkaian yang memerlukan *switching* dari PWM melalui MOSFET harus disertai rangkaian *driver* untuk mengaturnya. Pada desain *Z-Source Inverter* ini, diperlukan enam MOSFET untuk menghasilkan tegangan tiga fasa. MOSFET ini diatur oleh rangkaian *driver* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.24.



Gambar 3.24. Rangkaian Driver MOSFET [30]

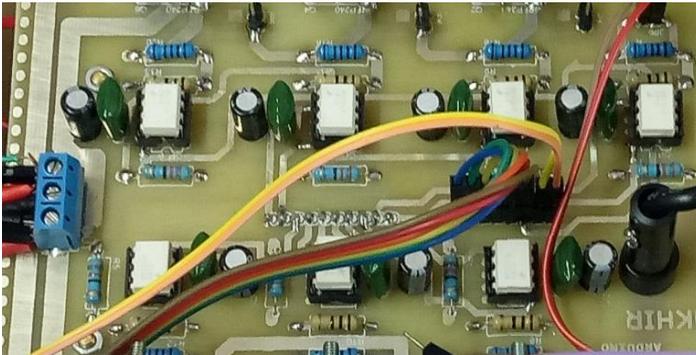
Adapun detail komponen untuk rangkaian *driver*, ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Komponen untuk Driver MOSFET

No	Komponen
1.	Optocoupler FOD
2.	Resistor 10 Ω

3.	Resistor 1k Ω
4.	Resistor 330 Ω
5.	Kapasitor Milar
6.	Kapasitor Elco
7.	Power Supply 12 V

Sedangkan implementasi driver MOSFET ditunjukkan pada Gambar 3.25.



Gambar 3.25. Implementasi Driver MOSFET

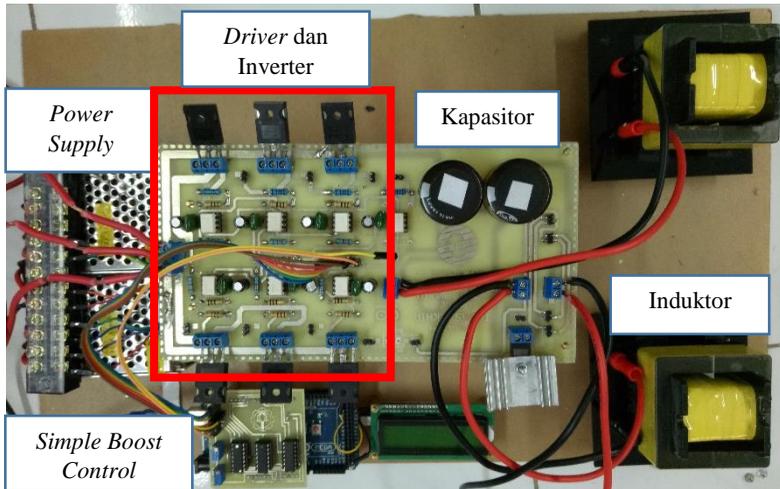
3.5.7. Hasil Implementasi *Z-Source Inverter*

Hasil desain tiap parameter yang diwujudkan dalam tiap-tiap komponen, kemudian dirangkai menjadi rangkaian *Z-Source Inverter* dengan metode *switching* berupa *simple boost control*. Adapun parameter-parameter implementasi rangkaian, secara rinci ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7. Perincian Komponen untuk *Z-Source Inverter*

Komponen <i>Z-Source Inverter</i>	Nilai / Jenis
Induktor L_1 & L_2	8.25 mH
Kapasitor C_1 & C_2	470 μ F
Dioda	MUR 1560
MOSFET (S1 – S6)	IRFP460
Komponen <i>Simple Boost Control & Driver</i>	Nilai / Jenis
<i>Microcontroller</i>	Arduino Mega

<i>IC Logic</i>	HD74HC04P
<i>IC not Logic</i>	SN74LS32N
<i>Gate Driver</i>	FOD3182V
<i>Gate Supply</i>	Power Supply 12 V



Gambar 3.26. Implementasi Z-Source Inverter dengan Simple Boost Control

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Pada bab ini dilakukan analisa data terkait pengujian implementasi *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control* pada aplikasi generator induksi tiga fasa. Implementasi ini bertujuan untuk mengatur tegangan dan frekuensi output generator yang berubah karena perubahan input dan efek pembebanan. Adapun pengujian yang dilakukan meliputi pengujian generator induksi, sinyal *simple boost control*, pengujian karakteristik gelombang *Z-Source Inverter*, kontrol tegangan dan frekuensi pada *Z-Source Inverter*, pengujian harmonisa, efisiensi *Z-Source Inverter*, pengujian rasio konversi, dan pengujian *Z-Source Inverter* dengan perubahan kecepatan generator induksi.

4.1 Alat Pengujian

Pengujian *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control* menggunakan peralatan yang tersedia di laboratorium. Adapun peralatan yang digunakan antara lain: sumber DC variabel, osiloskop, motor induksi tiga fasa, *variable frequency drive*, multimeter, rangkaian *Z-Source Inverter*, beban resistif tiga fasa, kapasitor bank, *power analyzer*. Peralatan yang digunakan untuk pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.1.



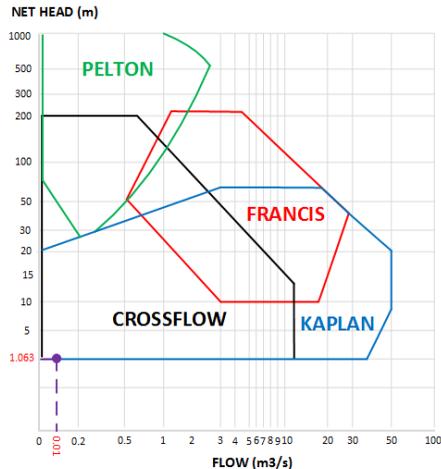
Gambar 4.1. Alat Pengujian *Z-Source Inverter*

4.2 Penentuan Kecepatan Turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro

Pada penelitian ini diasumsikan suatu sungai memiliki potensi tinggi jatuh 1.063 m dan debit 10 l/s. Potensi tersebut menghasilkan daya mekanik turbin (P) yang dihitung menggunakan persamaan 2.47, sebesar:

$$\begin{aligned}
 P &= \rho \times g \times H_{\text{eff}} \times Q \\
 &= 1000 \times 9.81 \times 1.063 \times 0.01 \\
 &\approx 100 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Mengacu pada grafik pemilihan turbin, dengan nilai tinggi jatuh sebesar 1.063 m dan debit sebesar 10 l/s, dapat ditarik hubungan antara tinggi jatuh dan debit yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Grafik Hubungan Tinggi Jatuh dan Debit Air

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.2 didapatkan hasil bahwa jenis turbin yang sesuai digunakan adalah turbin Banki (*Crossflow*).

Dengan tinggi jatuh Turbin *Crossflow* sebesar 1.063 m, maka dengan menggunakan persamaan 2.48, didapat kecepatan turbin sebesar:

$$N = \frac{N_s \cdot H^{5/4}}{\sqrt{P}} = \frac{513.25 H^{5/4}}{H^{0.505} \sqrt{P}} = \frac{513.25}{1.063^{0.505}} \times \frac{1.063^{5/4}}{\sqrt{100}} = 1492.2 \text{ rpm}$$

Secara perhitungan, pada kecepatan 1492.2 rpm generator mampu mengonversi potensi daya sebesar 100 W, sehingga dalam *range* kecepatan tersebut generator induksi akan dioperasikan.

4.3 Pengujian Generator Induksi

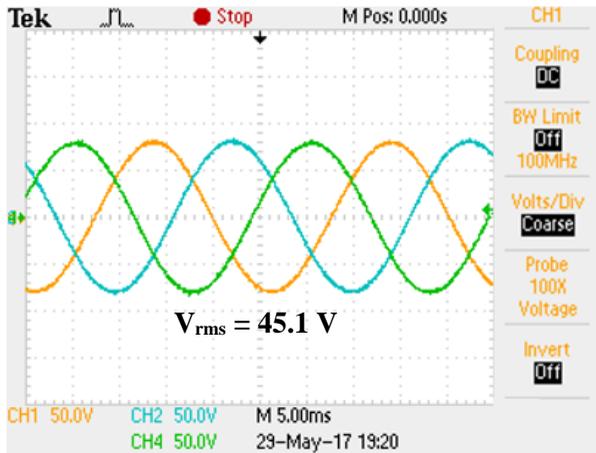
Pada pengujian ini dilakukan pengujian generator induksi yang kecepatannya dapat diatur melalui *variable frequency drive* (VFD). Pengujian generator induksi bertujuan untuk mengetahui tegangan output

yang dihasilkan motor induksi ketika dioperasikan menjadi generator. Agar dapat dioperasikan sebagai generator, maka motor induksi harus diputar melebihi kecepatan sinkronnya. Selain itu, pada generator induksi juga dipasang kapasitor *bank* yang bertujuan sebagai sumber penyuplai daya reaktif tetap ke generator induksi. Adapun nilai kecepatan sinkron nominal motor induksi dapat dihitung yaitu:

$$n_{\text{syn}} = \frac{120 \cdot f}{\text{Pole}} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1500 \text{ rpm}$$

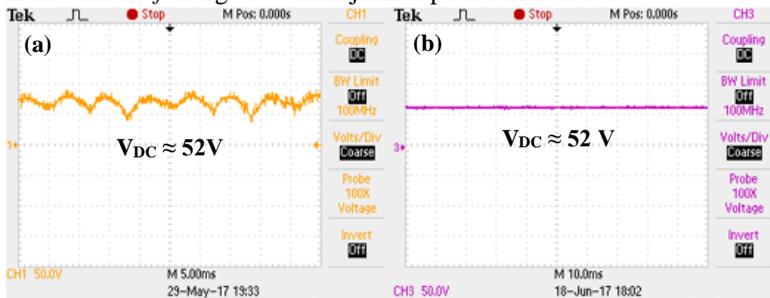
Secara matematis, motor induksi harus dioperasikan diatas 1500 rpm. Namun berdasarkan pengujian yang dilakukan, mesin induksi sudah dapat menghasilkan tegangan ketika diputar dengan kecepatan sekitar 1400 rpm. Hal ini dikarenakan komponen real motor hanya membutuhkan kecepatan sekitar 1400 rpm agar dapat menghasilkan tegangan. Pada pengujian ini, dilakukan pengambilan data berupa frekuensi yang diinputkan dari *variable frequency drive* untuk mengetahui nilai putaran generator dan tegangan output.

Berdasarkan pengujian didapatkan nilai tegangan generator induksi sebesar 45,1 V pada kecepatan 1492.2 rpm. Bentuk gelombang tegangan output generator induksi ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Bentuk Gelombang AC Tiga Fasa Generator Induksi
Tegangan generator kemudian disearahkan oleh *rectifier* tiga fasa menjadi tegangan DC. *Rectifier* tiga fasa yang digunakan hanya mengonversi setengah gelombang saja dikarenakan komponen dioda di laboratorium yang terbatas jumlahnya. Nilai tegangan hasil penyearahan

sebesar 52 V. Tegangan ini kemudian dilewatkan pada kapasitor 850 μF agar bentuk gelombang tegangan DC yang dihasilkan rata. Berdasarkan output tegangan DC yang dihasilkan, maka dipilihlah desain tegangan input inverter sebesar 52 V. Bentuk gelombang tegangan DC setelah melewati *rectifier* tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 4.4.

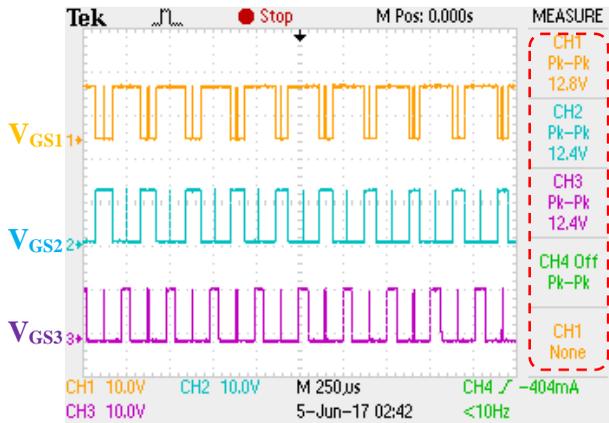


Gambar 4.4. Bentuk Gelombang DC dari *Rectifier* Tiga Fasa Tanpa Kapasitor (a) dan dengan Kapasitor (b)

4.4 Pengujian Sinyal *Simple Boost Control*

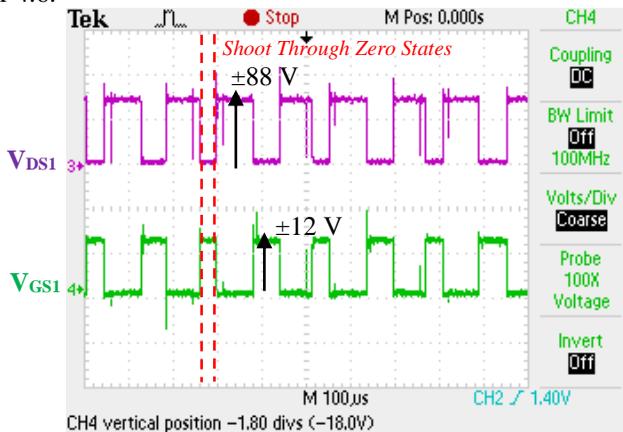
Pada pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik gelombang sinyal yang dikeluarkan oleh *simple boost control* dan membandingkannya dengan hasil simulasi. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan DC sebesar 52 V, frekuensi *switching* 7.842 kHz, frekuensi fundamental 50 Hz, indeks modulasi sebesar 0.92, *shoot through duty ratio* sebesar 17% dan beban resistif tiga fasa sebesar 120 ohm. Nilai tegangan DC yang diinputkan didesain mendekati nilai input dari output generator yaitu 52 V.

Pengukuran dilakukan dengan melihat karakteristik gelombang V_{GS} . Berdasarkan hasil uji didapatkan frekuensi *switching* sekitar 7.8 kHz. Nilai tersebut mendekati nilai frekuensi *switching* dari simulasi yaitu sebesar 7.842 kHz atau sebanding dengan periode sebesar 127.5 μs . *Shoot through duty ratio* diatur pada nilai 17% atau pada periode 20.5 s. 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} bergantung pada nilai tegangan DC yang disuplai ke *driver*. Pada implementasi ini tegangan DC yang disuplai sebesar 12 V, namun pada pengukuran pada osiloskop berturut-turut pada MOSFET 1,2 dan 3 didapatkan tegangan sebesar 12.4 V, 12.8 V, 12.8 V. Adapun karakteristik sinyal *simple boost kontrol* dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Karakteristik Sinyal Implementasi *Simple Boost Control*

Pengujian sinyal *simple boost control* juga membandingkan karakteristik sinyal antara *gate-source* (V_{GS}) dan *drain-source* (V_{DS}) pada MOSFET. Berdasarkan hasil pengujian, karakteristik sinyal sudah sesuai dengan simulasi dan teori dimana ketika V_{GS} dalam kondisi *on*, maka baik dalam kondisi aktif maupun *shoot through zero state* nilai V_{DS} bernilai nol. Sedangkan ketika V_{GS} dalam kondisi *off*, maka V_{DS} akan aktif dan memiliki nilai tegangan. Fenomena ini muncul bergantian dan secara kontinyu mengikuti *switching* yang diberikan oleh rangkaian *simple boost control*. Adapun bentuk gelombang antara V_{GS} dan V_{DS} ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Karakteristik Sinyal Penyaklaran MOSFET V_{GS} dan V_{DS}

4.5 Pengujian Rangkaian *Z-Source Inverter*

Pada pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja *Z-Source Inverter* terlebih dahulu sebelum diuji bersama generator induksi. Terdapat beberapa parameter yang ditinjau karakteristiknya, antara lain gelombang induktor dan kapasitor, gelombang tegangan DC bus, gelombang tegangan output, dan gelombang arus output. Pengujian dilakukan dengan memasukkan tegangan input pada rangkaian sebesar 52 V, dengan beban pengujian resistor tiga fasa 120 ohm. Tegangan input yang diberikan berasal dari generator induksi yang outputnya telah disearahkan menjadi tegangan DC sebesar 52 V.

Pada pengujian rangkaian *Z-Source Inverter* ini, lebih ditekankan pada bentuk gelombang yang dihasilkan oleh inverter. Output tegangan yang dihasilkan oleh inverter adalah 60 V pada nilai *shoot through duty ratio* 19%. Alasan output tegangan sebesar 60 V adalah karena disesuaikan dengan rating peralatan yang tersedia di laboratorium. Tegangan DC yang dihasilkan output generator yang disearahkan adalah sebesar 52 V. Daya input yang didesain adalah 100 W dan beban resistif yang digunakan memiliki rating arus maksimal sebesar 1 A sehingga tegangan output yang didesain yaitu:

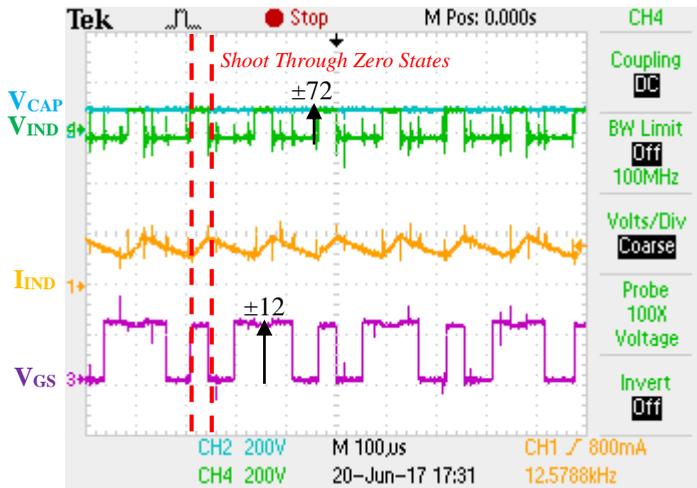
$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$V = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I \cdot \cos \varphi} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 1} = 60 \text{ V}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut maka tegangan output yang digunakan sebagai acuan adalah sebesar 60 V.

4.5.1 Pengujian Karakteristik Gelombang Induktor dan Kapasitor pada Rangkaian *Z-Source Inverter*

Pada pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik gelombang pada induktor dan kapasitor pada rangkaian *Z-Source Inverter*. Karakteristik yang ditinjau adalah fase *charge-discharge* dari induktor dan kapasitor. Berdasarkan teori, fase *charge-discharge* antara induktor dan kapasitor saling berkebalikan. Pada fase *shoot through zero states*, ketika induktor mengalami *charging*, maka kapasitor akan mengalami *discharging*. Sebaliknya ketika induktor mengalami *discharging*, maka kapasitor akan mengalami *charging*. Adapun hasil pengujian gelombang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Karakteristik Gelombang Induktor dan Kapasitor pada Fase *Charge-Discharge*

Pada Gambar 4.7 menunjukkan bentuk gelombang tegangan pada komponen kapasitor dan induktor yang dibandingkan dengan tegangan 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 perhitungan nilai tegangan induktor adalah 79.29 V, sedangkan pada implementasi nilai tegangan yang muncul telah menunjukkan nilai yang mendekati tegangan tersebut. Hal ini dapat disimpulkan bahwa hasil implementasi telah mendekati simulasi.

Pada penelitian ini, nilai *ripple* arus induktor dihitung yaitu:

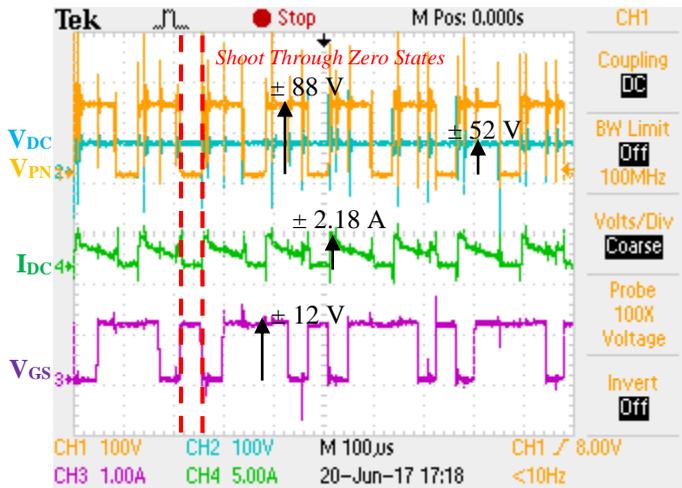
$$\text{ripple} = \frac{I_{\text{mean}}}{I_{\text{pk-pk}}} \times 100\% = \frac{0.44}{2.18} \times 100\% = 20.18\%$$

Hal ini terdapat perbedaan dengan desain dikarenakan komponen induktor yang tidak ideal. Pada saat arus melewati induktor semakin besar maka inti akan semakin panas sehingga menyebabkan nilai permeabilitas inti berubah. Apabila nilai permeabilitas inti berubah, maka nilai induktansi juga berubah. Selain itu *ripple* arus induktor juga dipengaruhi oleh rugi tembaga pada belitan induktor, rugi fluks bocor akibat pengaruh *air gap* dan rugi inti besi. Berdasarkan hasil pengujian implementasi hasil

gelombang tegangan pada kapasitor dan induktor, secara umum telah sesuai dengan karakteristik tegangan inverter di simulasi.

4.5.2. Pengujian Karakteristik Tegangan DC Bus

Pengujian rasio konversi tegangan pada inverter dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang karakteristik serta perbandingan tegangan input (V_{DC}) dengan tegangan DC bus (V_{PN}). Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan inverter sebesar 52 V, frekuensi fundamental sebesar 50 Hz, indeks modulasi sebesar 0.92, *shoot through duty ratio* sebesar 19%. Pada saat inverter pada kondisi *shoot through zero state*, maka kapasitor akan mengalami *discharging*. Sedangkan tegangan DC bus menjadi nol. Berdasarkan hasil pengujian, karakteristik gelombang tegangan DC bus dapat dilihat pada Gambar 4.8.



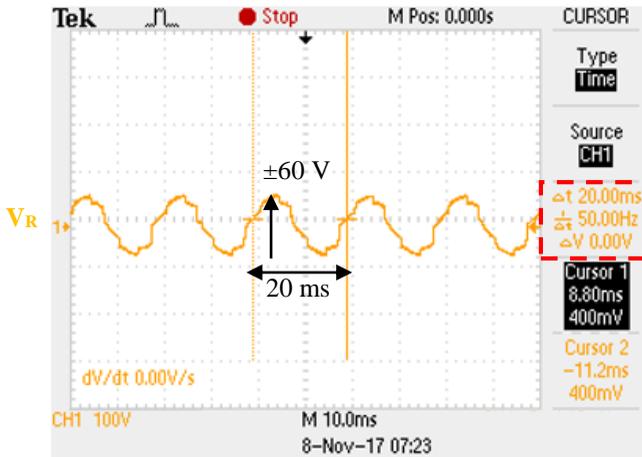
Gambar 4.8. Karakteristik Gelombang Tegangan DC Bus

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. Selain itu nilai tegangan DC bus lebih besar daripada tegangan input.

Hal ini menunjukkan telah ada proses penaikan tegangan input menjadi beberapa kali lipat. Berdasarkan hasil implementasi gelombang telah sesuai dengan simulasi.

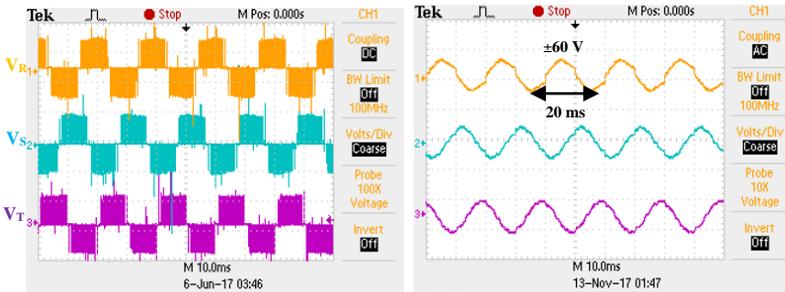
4.5.3 Pengujian Karakteristik Gelombang Tegangan dan Arus Output Inverter

Gelombang output pada inverter dapat diketahui pada karakteristik gelombang tegangan dan arus yang terdapat pada beban. Pada pengujian ini sistem dibebani dengan beban resistif tiga fasa sebesar 120 ohm. Nilai *shoot through* diberikan mulai dari nol hingga mencapai nilai *shoot through* pada nilai tegangan 60 V, yaitu sebesar 19%. Output frekuensi gelombang tegangan yang dihasilkan memiliki frekuensi fundamental sebesar 50 Hz. Adapun bentuk gelombang tegangan yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4.9.

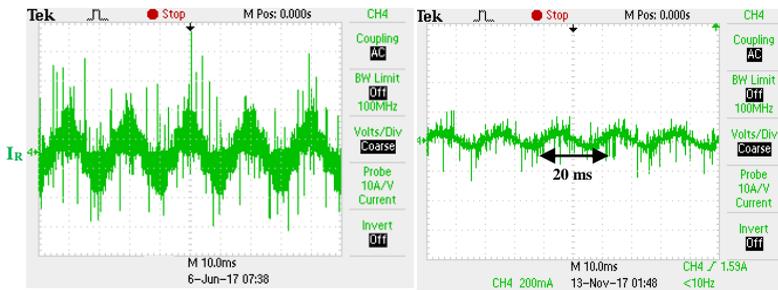


Gambar 4.9. Karakteristik Gelombang Tegangan Output

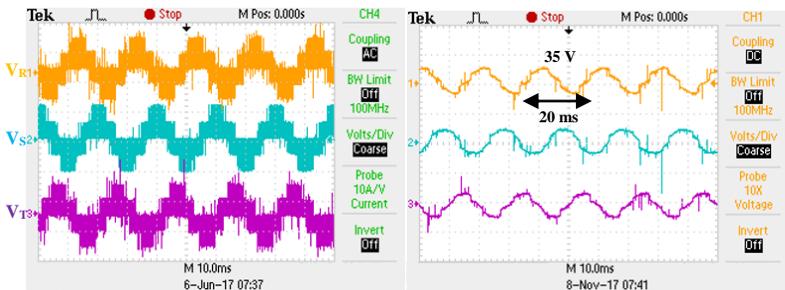
Karakteristik gelombang tegangan *line to line* yang dihasilkan pada awalnya berupa gelombang SPWM dengan frekuensi *switching* tinggi. Namun setelah pemasangan filter LC maka bentuk gelombang yang dihasilkan menjadi gelombang sinusoidal tiga fasa yang tiap fasanya terpisah sudut 120° (Gambar 4.10). Selain gelombang tegangan *line to line*, perubahan bentuk karakteristik gelombang juga terjadi pada arus dan tegangan *line to neutral*. Adapun bentuk gelombang arus output dan tegangan *line to neutral* ditunjukkan pada Gambar 4.11 dan 4.12.



Gambar 4.10. Karakteristik Gelombang Tegangan Output *Line to Line* Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter LC



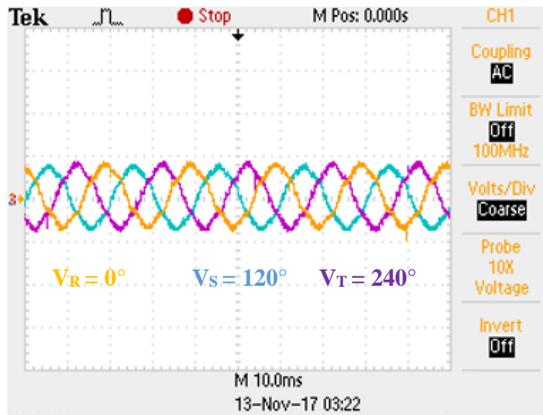
Gambar 4.11. Karakteristik Gelombang Arus Output Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter LC



Gambar 4.12. Karakteristik Gelombang Tegangan Output *Line to Neutral* Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter LC

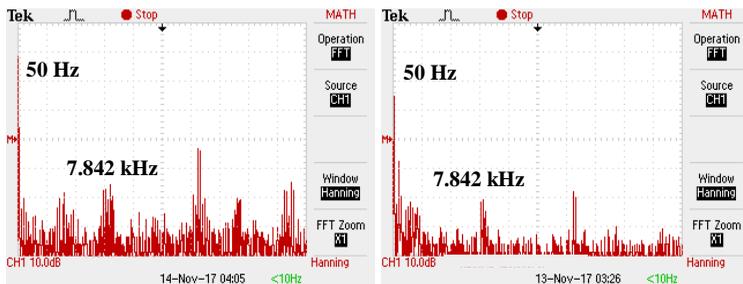
Berdasarkan pengujian karakteristik gelombang tegangan dan arus, bentuk gelombang yang dihasilkan telah sesuai dengan simulasi. Gelombang tegangan juga terpisah 120° yang membuktikan bahwa telah

terbentuk gelombang tegangan tiga fasa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13.



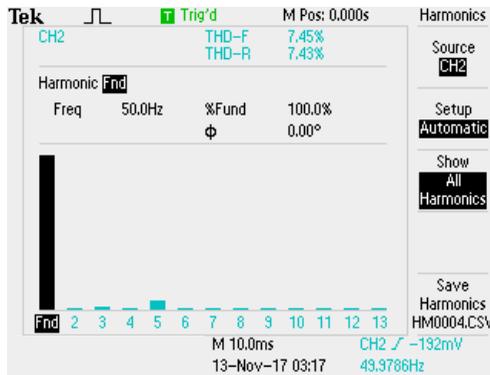
Gambar 4.13. Karakteristik Gelombang Tegangan Tiga Fasa

Pada hasil implementasi didapatkan spektrum frekuensi tegangan output *Z-Source Inverter* yang mengandung frekuensi fundamental dan frekuensi penyaklaran yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14. Spektrum Frekuensi Output Sebelum dan Sesudah Pemasangan Filter

Berdasarkan Gambar 4.14, spektrum frekuensi yang dihasilkan setelah pemasangan filter lebih baik dibandingkan sebelum pemasangan filter. Pada tegangan output, juga dilihat nilai *total harmonic distortion* (THD) yang dihasilkan. Adapun nilai THD yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15. Grafik Nilai *Total Harmonic Distortion* Tegangan Output

Berdasarkan Gambar 4.15, nilai tegangan rms terbesar terdapat pada frekuensi fundamental sebesar 50 Hz. Sedangkan nilai tegangan rms lainnya tersebar pada frekuensi orde ke-n. Nilai THD gelombang tegangan output yang dihasilkan sebesar 7.43%. Nilai ini melebihi nilai toleransi THD sebesar 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa gelombang output yang dihasilkan perlu dibuatkan filter yang lebih mampu mengurangi nilai THD hingga batas toleransi yang diperbolehkan.

4.6 Kontrol Tegangan pada *Z-Source Inverter*

Kontrol tegangan pada *Z-Source Inverter* bertujuan untuk mengetahui metode pengontrolan tegangan ketika terjadi perubahan tegangan output. Pengujian ini menitikberatkan pada kemampuan respon inverter dalam mengatur tegangan agar menjadi konstan. Pada pengujian ini input *Z-Source Inverter* disetting tetap dengan nilai tegangan DC 52 V. Variasi beban yang diberikan adalah mulai nilai 275 Ω sampai 35 Ω . Kemudian nilai indeks modulasi sebesar 0.92, frekuensi output sebesar 50 Hz. Pada pengujian ini, tegangan output dijaga konstan 60 V dengan nilai *shoot through duty ratio* yang berubah-ubah. Beban menggunakan rheostat tiga fasa dengan kapasitas maksimal arus sebesar 1 A. Secara teoritis untuk mengatur tegangan pada output rangkaian *Z-Source Inverter* adalah mengatur nilai *shoot through duty ratio* yang dinaikan secara bertahap untuk menjaga tegangan output tetap konstan. Berdasarkan pengujian didapatkan hasil pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Kontrol Tegangan *Z-Source Inverter* dengan Perubahan Beban

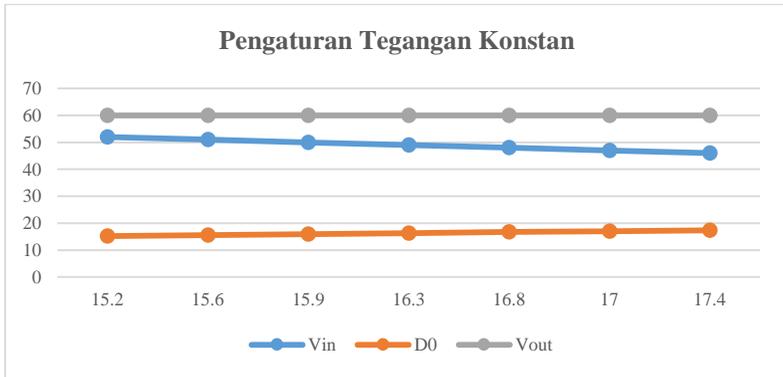
$R_{load} (\Omega)$	D_0	$V_{in} (V)$	$V_{out} (V)$
275	12	52	60
235	12	52	60
195	13	52	60
155	13	52	60
115	14	52	60
75	14	52	60
35	15	52	60

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya resistansi beban, maka arus output (arus yang menuju beban) semakin kecil. Sebaliknya, semakin berkurang resistansi beban, maka arus output semakin besar. Realitanya, tegangan yang dihasilkan juga menurun, sehingga untuk menjaga tegangan agar konstan, jika resistansi beban bertambah maka *shoot through duty ratio* akan turun. Sebaliknya jika resistansi beban berkurang, maka *shoot through duty ratio* akan naik. Pengontrolan tegangan dilakukan secara manual dengan mengubah nilai *shoot through duty ratio*.

Pengontrolan tegangan juga berlaku ketika kondisi terjadi perubahan pada input yang dalam kasus ini terjadi perubahan putaran turbin. Hal ini tentu akan berpengaruh terhadap output tegangan yang dihasilkan. Pada pengujian perubahan input ini diberikan input suplai tegangan DC antara 45 V hingga 52 V dengan pemberian beban tetap sebesar 35 ohm. Pengaturan *shoot through duty ratio* dilakukan secara manual dengan menyesuaikan output tegangan sebesar 60 V. Adapun hasilnya disajikan pada Tabel 4.2.

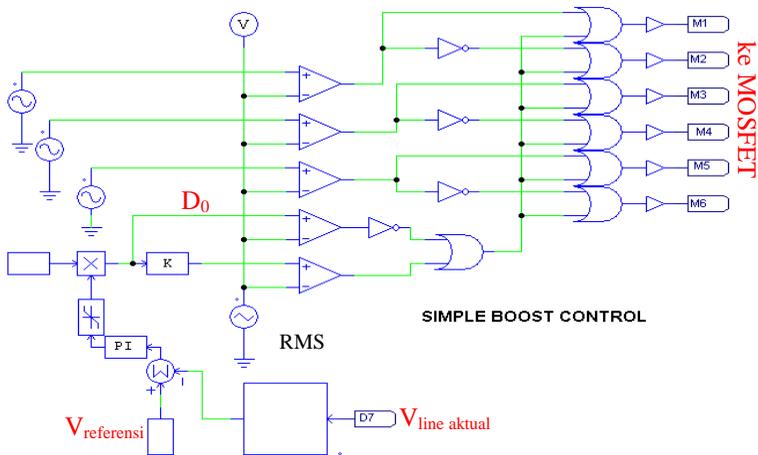
Tabel 4.2. Kontrol Tegangan *Z-Source Inverter* dengan Perubahan Input

$V_{in} (V)$	D_0	$R_{load} (\Omega)$	$V_{out} (V)$
52	15.2	35	60
51	15.6	35	60
50	15.9	35	60
49	16.3	35	60
48	16.8	35	60
47	17.0	35	60
46	17.4	35	60



Gambar 4.16. Grafik Pengaturan Tegangan Konstan

Berdasarkan Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa ketika terjadi penurunan tegangan input (V_{in}), maka sistem merespon untuk menjaga tegangan output (V_{out}) tetap konstan dengan menaikkan nilai *shoot through duty ratio* (D_0) secara bertahap. Adapun untuk pengontrolan secara otomatis dilakukan secara *close loop* dan dibuktikan melalui simulasi dengan konfigurasi rangkaian seperti pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Konfigurasi Rangkaian *Close Loop*

Tegangan yang dikontrol adalah tegangan output *line to line*. Tegangan ini disensing sebagai tegangan aktual ($V_{line\ aktual}$). Kemudian sensing tegangan ini disampling menjadi nilai rms kemudian

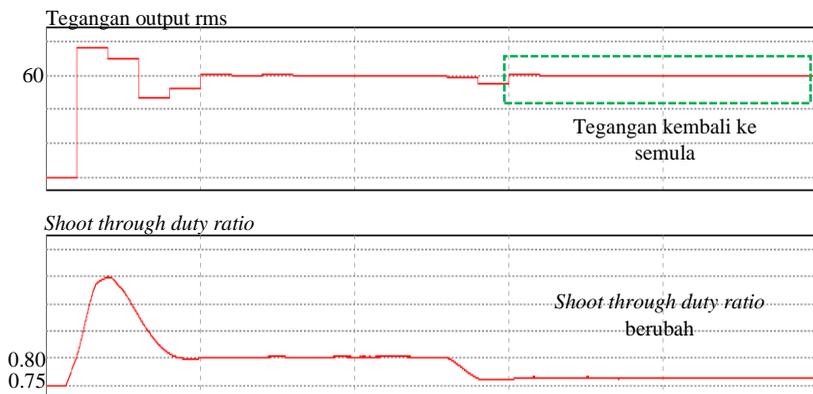
dibandingkan dengan tegangan referensi ($V_{\text{referensi}}$). Error yang dihasilkan akan diproses oleh kontroler PI menjadi sebuah nilai *shoot through* (D_0). Nilai ini dibatasi sesuai dengan nilai *shoot through* yang berlaku pada topologi ZSI kemudian masuk kembali ke rangkaian *switching simple boost control* untuk merespon tegangan agar menjadi konstan.

Pengontrolan secara otomatis dilakukan melalui simulasi dengan merubah sumber. Perubahan sumber yang digunakan adalah tegangan DC dalam *range* tegangan dibawah dan diatas 52 V, dengan beban 35 Ω . Untuk pengontrolan secara otomatis digunakan kontroler PI dengan nilai *gain* 0,0007 dan *time constant* 0,002.

Tabel 4.3. Kontrol Tegangan Z-Source Inverter pada Simulasi

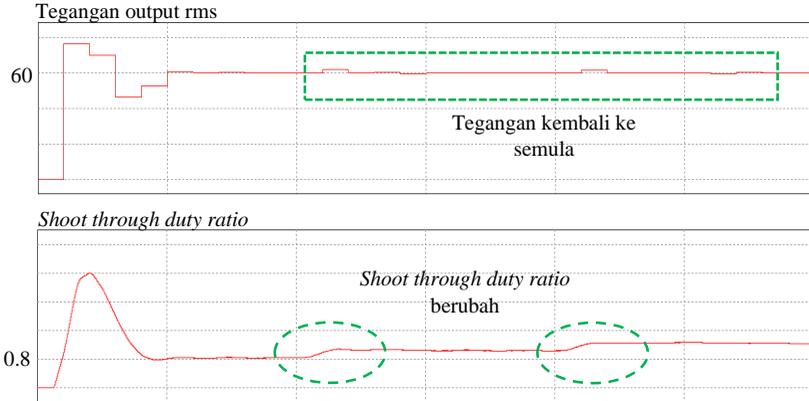
V_{in} (V)	D_0	R_{load} (Ω)	V_{out}
52	19.8	35	60
51	20.4	35	60
50	21.4	35	60
49	21.7	35	60
48	22.3	35	60
47	23.0	35	60
46	23.6	35	60

Data pada Tabel 4.3 dapat dianalisa bahwa ketika sumber input diubah menjadi lebih kecil, dan diinginkan agar tegangan output tetap pada nilai referensi, maka dilakukan pengontrolan nilai *shoot through duty ratio*, sehingga nilai arus input meningkat. Pembuktian dengan kurva yaitu:



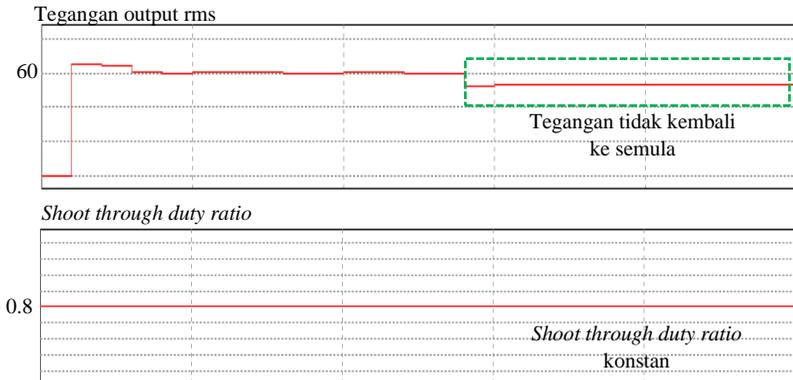
Gambar 4.18. Respon Sistem Dengan Kontroler

Pada Gambar 4.18 dapat dijelaskan bahwa untuk sistem dengan kontrol tegangan output, ketika terjadi perubahan tegangan output maka sistem akan merespon melalui kontroler sehingga tegangan output dapat dikembalikan ke nilai referensi yang telah ditetapkan sebelumnya. Peresponan ini dilakukan dengan cara merubah nilai *shoot through duty ratio*. Pada kasus ini tegangan mengalami drop, sehingga nilai *shoot through duty ratio* mengalami kenaikan (prosentase turun).



Gambar 4.19. Respon Sistem Menggunakan Kontroler dengan Banyak Perubahan Tegangan pada Sisi Output

Adapun sistem tanpa kontroler direpresentasikan dengan kurva berikut:



Gambar 4.20. Respon Sistem Tanpa Kontroler

Pada Gambar 4.20 dapat dijelaskan bahwa ketika terjadi perubahan pada tegangan output, untuk sistem tanpa kontrol tidak dapat merespon terjadinya perubahan tegangan tersebut untuk diatur pada kondisi semula. Hal ini dikarenakan sistem tanpa kontroler tidak merespon perubahan tegangan dengan merubah nilai *shoot through duty ratio*, sehingga otomatis nilai tegangan pada kondisi berikutnya tidak akan berubah.

4.7 Kontrol Frekuensi

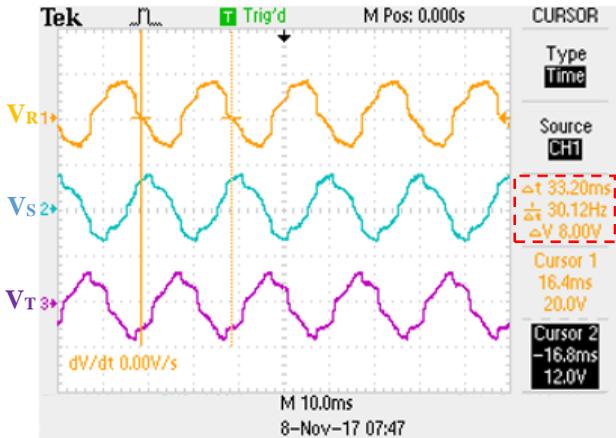
Gelombang output pada inverter juga dapat diketahui pada karakteristik gelombang frekuensi yang ada pada beban. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk membuktikan bahwa frekuensi yang dihasilkan generator bergantung pada putaran generator. Jika terjadi putaran generator berubah, maka secara otomatis frekuensi yang dihasilkan juga berubah. Namun, perubahan ini tidak menjadi masalah jika generator dihubungkan dengan rangkaian inverter. Tegangan AC yang dihasilkan generator dengan frekuensi tertentu dikonversi menjadi DC sehingga frekuensinya menjadi nol. Kemudian tegangan DC ini diubah menjadi AC kembali oleh inverter dimana pada inverter telah disetting nilai frekuensi tertentu. Oleh karena itu, frekuensi output yang dihasilkan akan selalu mengikuti frekuensi setting pada inverter. Adapun pembuktian pengujian kontrol frekuensi ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Pengujian Pengaturan Frekuensi

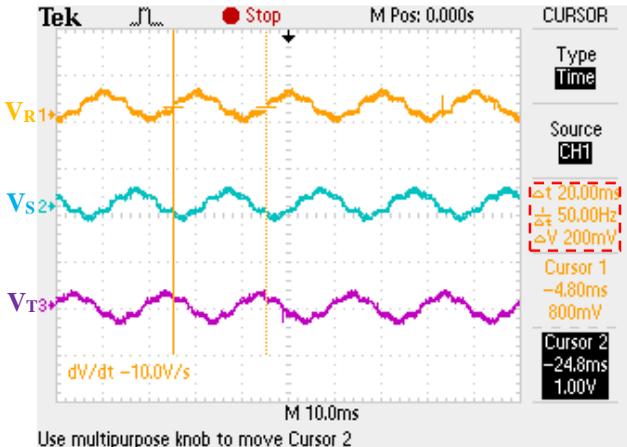
$f_{\text{generator}}$	n (rpm)	$f_{30 \text{ HZ}}$	$f_{50 \text{ HZ}}$	$f_{70 \text{ HZ}}$
50	1492.2	30	50	70
51	1522.3	30	50	70
52	1552.2	30	50	70
53	1582.2	30	50	70
54	1612.2	30	50	70
55	1642.1	30	50	70
56	1671.8	30	50	70
57	1701.8	30	50	70
58	1731.6	30	50	70
59	1761.5	30	50	70
60	1791.2	30	50	70

Pada Tabel 4.6 dapat dianalisa bahwa ketika putaran generator diubah, maka frekuensi generator juga berubah. Namun, setelah dilewatkan ke rangkaian inverter, adanya perubahan putaran generator

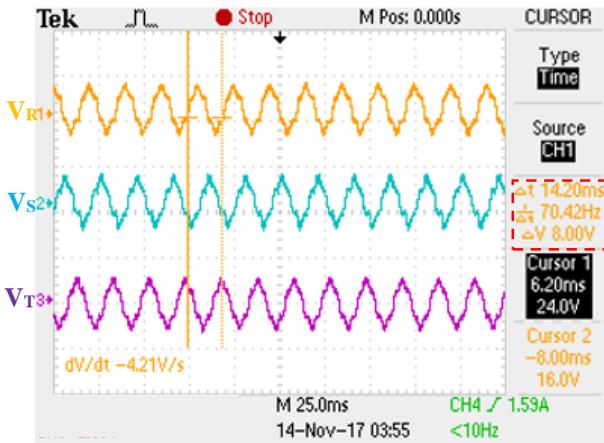
tidak mengubah nilai frekuensi output sistem. Hal ini dikarenakan output akan mengikuti frekuensi setting pada inverter. Ketika inverter disetting dengan frekuensi 50 Hz, maka output frekuensi yang dihasilkan juga 50 Hz. Hal ini juga berlaku ketika frekuensi inverter disetting 30 Hz dan 70 Hz. Adapun bentuk gelombang dengan pengujian frekuensi output inverter, ditunjukkan pada Gambar 4.21, Gambar 4.22, dan Gambar 4.23.



Gambar 4.21. Karakteristik Gelombang pada Frekuensi 30 Hz



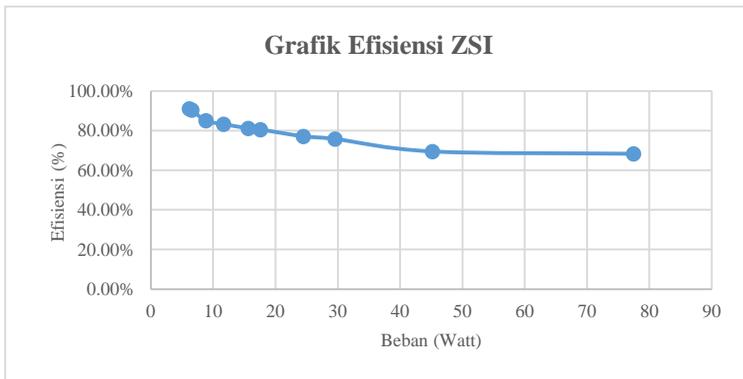
Gambar 4.22. Karakteristik Gelombang pada Frekuensi 50 Hz



Gambar 4.23. Karakteristik Gelombang pada Frekuensi 70 Hz

4.8. Pengujian Efisiensi Z-Source Inverter

Pengujian efisiensi dilakukan untuk mengetahui pengaruh performa inverter. Pada pengujian ini, efisiensi ditentukan dengan cara membandingkan daya input dengan daya output inverter. Pengujian efisiensi inverter dilakukan dengan cara menaikkan nilai *shoot through duty ratio* pada beban tetap sebesar 120 ohm. Adapun hasil pengujian efisiensi Z-Source Inverter ditunjukkan pada Gambar 4.24.



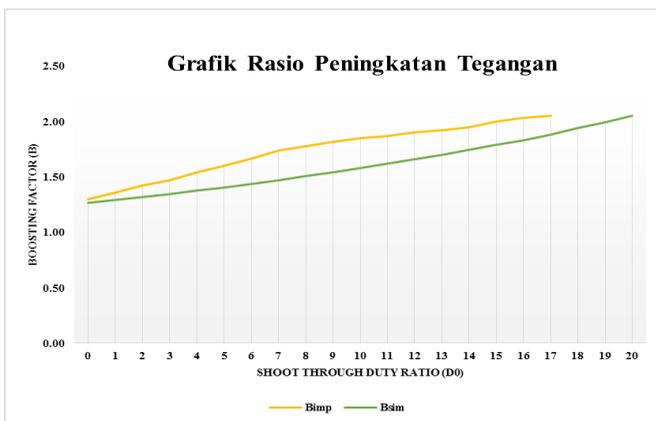
Gambar 4.24. Kurva Pengaruh Pembebanan terhadap Efisiensi Inverter

Inverter memiliki efisiensi rata – rata sebesar 80.2%. Penambahan beban menyebabkan efisiensi Z-Source Inverter semakin menurun. Hal

ini disebabkan *losses* yang semakin besar karena arus yang mengalir ke beban semakin besar seiring dengan penambahan *shoot through duty ratio*. *Losses* yang terjadi pada inverter antara lain *switching loss*, rugi inti induktor, rugi pada dioda *fast switching* dan *charge-discharge* kapasitor.

4.9 Pengujian *Boosting Factor*

Pengujian perbandingan *boosting factor* bertujuan untuk mengetahui faktor peningkatan tegangan pada rangkaian *Z-Source Inverter*. *Boosting factor* (B) merupakan perbandingan antara tegangan DC bus dengan tegangan input DC. Secara teori, *boosting factor* semakin besar seiring dengan kenaikan nilai *shoot through duty ratio* (D_0), sehingga tegangan output yang dihasilkan oleh inverter juga semakin besar. Pengujian rasio konversi dilakukan dengan cara memberikan tegangan input konstan sebesar $V_{in} = 60$ V dan *shoot through duty ratio* dinaikkan secara bertahap. Adapun perbandingan *boosting factor* ditunjukkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25. Grafik Perbandingan antara *Shoot Through Duty Ratio* (D_0) dengan *Boosting Factor* (B)

Nilai *boosting factor* pada Gambar 4.25 adalah sebesar 2.05 kali pada *shoot through duty ratio* 17%. Semakin besar nilai *shoot through duty ratio* maka *boosting factor* akan meningkat sehingga tegangan output juga meningkat. Namun, terdapat perbedaan antara hasil perhitungan dengan hasil implementasi. Perbedaan tersebut diakibatkan komponen yang tidak ideal sehingga terdapat drop tegangan pada komponen seperti kapasitor, induktor, dioda dan MOSFET yang memiliki hambatan dalam.

Semakin besar nilai *shoot through duty cycle* maka semakin besar pula nilai arus yang mengalir sehingga drop tegangan akan semakin besar pula. Selain itu, untuk mencapai nilai *boosting factor* yang sama maka nilai pada implementasi dapat dicapai dengan nilai *shoot through duty ratio* yang lebih rendah dibandingkan simulasi.

4.10 Pengujian Z-Source Inverter dengan Perubahan Kecepatan Generator Induksi

Pengujian sistem juga dilakukan dengan merubah kecepatan putar generator induksi. Secara realitanya pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro, penambahan kecepatan pada generator induksi terjadi dengan mengatur *gate valve* lebih besar, sehingga air yang mengalir juga lebih besar. Secara teori, semakin besar putaran yang dihasilkan oleh generator maka tegangan yang dihasilkan juga semakin meningkat. Peningkatan tegangan ini berarti juga peningkatan tegangan untuk input inverter. Pada pengujian ini diatur kecepatan putar generator masih dalam *range* kecepatan sinkronnya. Pengaturan dilakukan dengan mengatur *variable frequency drive*. Adapun hasil pengujian perubahan kecepatan generator induksi ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Tabel Pengujian Kecepatan Generator Induksi

f	RPM	D ₀	B	V _{dc}	V _{out}
50	1492.2	17	2.05	52.75	60.92
51	1522.3	17	2.05	57.78	66.73
52	1552.2	17	2.05	62.69	72.40
53	1582.2	17	2.05	65.96	76.18
54	1612.2	17	2.05	68.89	79.56
55	1642.1	17	2.05	72.51	83.74
56	1671.8	17	2.05	75.32	86.99
57	1701.8	17	2.05	78.48	90.64
58	1731.6	17	2.05	80.11	92.52
59	1761.5	17	2.05	83.62	96.58
60	1791.2	17	2.05	85.14	98.33

Pada Tabel 4.8 dapat ditunjukkan bahwa pada nilai *shoot through duty cycle* tetap, tegangan generator meningkat seiring dengan penambahan kecepatan *prime mover*. Tegangan yang dihasilkan pada frekuensi antara 50 hingga 60 Hz meningkat secara bertahap.

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

BAB V

PENUTUP

Pada bab ini terdapat kesimpulan dan saran yaitu:

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap simulasi dan implementasi *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control* untuk pengatur tegangan dan frekuensi pada pembangkit listrik tenaga mikro hidro dapat disimpulkan menjadi beberapa hal sebagai berikut:

1. *Z-Source Inverter* didesain dengan kapasitas daya 100 W mengacu pada aplikasi pembangkit listrik tenaga mikro hidro yang memiliki potensi tinggi jatuh sebesar 1.062 m dan debit sebesar 10 liter/s.
2. Motor induksi dapat bekerja sebagai generator induksi jika dapat diputar diatas kecepatan sinkronnya dan disuplai oleh daya reaktif dari kapasitor *bank*
3. Hasil gelombang dari implementasi *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control* telah sesuai dengan simulasi
4. Untuk kontrol tegangan output konstan 60 V, pada *Z-Source Inverter* dilakukan dengan cara mengatur nilai *shoot through duty ratio* pada range 15 – 17%, beban 35 ohm dan dengan perubahan nilai tegangan input 52 hingga 46 V. Jika tegangan input lebih tinggi maka nilai *shoot through duty ratio* juga menurun, sebaliknya jika tegangan input rendah, maka nilai *shoot through duty ratio* meningkat
5. Untuk pengontrolan tegangan konstan pada simulasi digunakan parameter PI dengan nilai *gain* 0,0007 dan *time constant* 0,002
6. Pengaturan frekuensi output tidak bergantung pada perubahan kecepatan generator karena kontrol frekuensi berasal dari setting frekuensi *fundamental* inverter sebesar 50 Hz
7. Nilai THD gelombang tegangan output sebesar 7.43%, sehingga masih perlu perbaikan filter agar sesuai dengan toleransi nilai THD sebesar 5%.
8. Efisiensi rata – rata *Z-Source Inverter* yaitu sebesar 80.2 %.
9. Topologi *Z-Source Inverter* dengan metode *simple boost control* pada penelitian ini dapat memiliki rasio konversi 2.05 kali pada *shoot through duty ratio* 17%.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk perkembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. *Z-Source Inverter* sebaiknya diberi tambahan filter pada sisi keluaran sehingga bentuk tegangan dapat berupa sinusoidal.
2. Kontrol penyalaan *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.
3. Penambahan *snubber* pasif atau aktif pada *Z-Source Inverter* dapat dilakukan untuk mengurangi *spikes* tegangan pada MOSFET.
4. Induktor dibuat lebih bagus lagi agar tidak mudah saturasi akibat arus yang besar

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Steinbring, M. Pacas and M. Alnajjar, "Emulation of a Micro-Hydro-Turbine for Standalone Power Plants with Z-Source Inverter," *IEEE*, p. 1, 2012.
- [2] A. Susatyo and R. A. Subekti, "Implementasi Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Kapasitas 30 kW di Desa Cibunar Kabupaten Tasikmalaya Jawa Barat," in *Prosiding Seminar Daur Bahan Bakar ISSN 1693-4687*, Serpong, 2009.
- [3] A. M. Dimiyati, "Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Desa Setren Kecamatan Slogoimo Kabupaten Wonorejo," *Jurnal Emitor ISSN 1411-8890*, vol. 15, 2014.
- [4] Direktorat Kawasan Khusus dan Daerah Tertinggal, "Laporan Akhir Hasil Evaluasi Kebijakan Perencanaan Pembangunan Kawasan Tertinggal," BAPPENAS, Jakarta, 2007.
- [5] T. Shokrollah Hamid, "Voltage Source Inverter for Voltage Control and Frequency Control of A Stand-Alone Self-Excited Induction Generator," University of Toronto, Canada, 1998.
- [6] C. Marinescu and C. P. Ion, "Optimum Control for an Autonomous Micro Hydro Power Plant with Induction Generator," *IEEE Romania*, 28 Juni- 2 Juli 2009.
- [7] H. Ardiansyah, D. C. Riawan and S. Anam, "Studi Regulasi Output Generator Induksi dengan Voltage Source Inverter," *Jurnal POMITS*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012.
- [8] Y. B. Satriawisesa, D. C. Riawan and T. Yuwono, "Pengaturan Tegangan dan Frekuensi Generator Induksi Tiga Fasa Penguatan Sendiri Menggunakan Voltage Source Inverter dan Electronic Load Controller," *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2013.

- [9] F. Z. Peng, "Z-Source-Inverter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39 No 2 , Mar-Apr 2003.
- [10] P. H. Zope, A. J. Pattil and A. Somkuwar, "Performance and Simulation Analysis of Single Phase Grid Connected PV System Based on Z-Source Inverter," in *Power Electronics, Drives and Energy Systems Int. Conference*, Dec 2010.
- [11] Y. Huang, M. Shen, F. Z. Peng and J. Wang, "A Z-Source Inverter for Residential Photovoltaic Systems," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 21 No 6, pp. 1776-1782, Nov. 2006.
- [12] S. Patil and P. Parikh, "Comparative Analysis of Simple Boost and Double Carrier PWM Control on PV Powered Z-Source Inverter," *IEEE*, 2014.
- [13] S. Rajakaruna and Y. Jayawickrama, "Designing impedance network of Z-source inverters," in *The 7th International Power Engineering Conference IPEC 2005.*, pp. 962,967 Vol. 2, Nov. 29 2005- Dec. 2 2005.
- [14] M. Hanif, M. Basu and K. Gaughan, "Understanding the Operation of a Z-Source Inverter for Photovoltaic Application with a Design Example," *IET Power Electron*, vol. 4, no. 3, pp. 278-287, 2011.
- [15] M. Rashid, *Power electronics: circuit devices and applications*, Prentice Hall, 1993.
- [16] M. Shen, J. Wang, A. Joseph, F. Z. Peng, L. M. Tolbert and D. J. Adams, "Maximum constant boost control of the Z source inverter," *IEEE*, p. 147, 2004.
- [17] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals 4th ed*, New York: The McGraw-Hill Companies, 2005.

- [18] P. Pejovic, "Three-Phase Diode Rectifiers with Low Harmonics Current Injection Methods," *Springer*, vol. VIII, no. ISBN: 978-0-387-29310-3, p. 318, 2007.
- [19] G. L. Calzo, A. Lidozzi, L. Solero and F. Crescimbin, "LC Filter Design for On-Grid and Off-Grid Distributed Generating Units," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, p. 1, April 2015.
- [20] C. T. Pham, A. Shen, P. Q. Dzung, N. B. Anh and N. X. Phu, "Comparison of Control Methods for Z- Source Inverter," *Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, pp. 187-195, 2012.
- [21] B. Y. Husodo, S. Ayob, A. and M. Taufik, "Simulation of Modified Simple Boost Control for Z- Source Inverter," *International Journal of Automation and Power Engineering*, vol. 2, no. 4, 2013.
- [22] Y. S. Putro, P. T. Juwono and P. H. Wicaksono, "Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) di Sungai Atei Desa Tumbang Atei Kecamatan Sanamang Mantikai Kabupaten Katingan Provinsi Kalimantan Tengah," *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, 2014.
- [23] F. Siervo and F. Lugaresi, Dimensions of Pelton Turbines, Water Power and Dam Construction, December 1978.
- [24] S. Gregory, Developments in the design of water turbines, Power & Dam Construction, May 1989.
- [25] K. Kpordze and C. Warmick, Selection of Turbine Diameter and Speed for Francis, Kaplan and Pelton Hydraulic Turbines, University of Idaho, 1983.
- [26] USBR, "Selecting Hydraulic Reaction Turbines," *A Water Resources Technical Publication Engineering Monograph*, vol. No 20, 1976.

- [27] M. Qahhar, D. C. Riawan and D. A. Asfani, "Penurunan Rating Tegangan pada Belitan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Rewinding Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Juli 2013.
- [28] TDKCompany, "Ferrites and Accessories: E55/28/21 Core," *EPCOS AG*, June 2013.
- [29] TDKCompany, "Ferrites and Accessories: SiFerrit Material N87," *EPCOS AG*, September 2006.
- [30] Tahmid, 30 April 2013. [Online]. Available: <http://tahmidmc.blogspot.co.id/2013/05/using-tlp250-for-isolated-mosfet-gate.html>. [Accessed 31 May 2017].

LAMPIRAN

```
/****** DDS-sinewave - 3phase *****/
// Rifki Dwisetyo Wicaksono - 2213100089 - Teknik Elektro ITS -
// Copyright Protected - Modified Spwm 3 Phase With Shoot Through Zero
// State And Variable Frequency Output//
// SIMPLE BOOST CONTROL
// Use at your own risk
// You are NOT allowed to use any part of the scripts or what ever of
// this coding without my permission!

//-----//
// 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>

// Useful AVR macros for setting and resetting bits
#define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit)) // clear a bit
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit)) // set a bit

// 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 ONE_WIRE_BUS 22
        // Temperature Input is on Pin 22

byte bb;

// variables used inside interrupt service declared as volatile
volatile byte icnt;           // var inside interrupt
volatile byte icnt1;         // var inside interrupt
volatile byte c4ms;          // counter incremented every 4ms
volatile unsigned long phase_accum; // phase accumulator
volatile unsigned long tword_m; // dds tuning word m

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 Input;                // initialization for mosfet temperature

// 8bit table of 256 sine values / one sine period / stored in flash memory
//index modulation = 0.92 sinelookup method
//PROGMEM const unsigned char sine256[] =
//{
//128, 131, 133, 136, 139, 141, 144, 146, 149, 152, 154, 157, 159, 162,
//164, 167, 169, 172, 174, 177, 179, 181, 184, 186, 188, 190, 192, 194,
//197, 199, 201, 202, 204, 206, 208, 210, 211, 213, 215, 216, 218, 219,
//221, 222, 223, 224, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 231, 232, 233, 233,
//234, 234, 235, 235, 235, 236, 236, 236, 236, 236, 236, 235, 235,
//235, 234, 234, 233, 233, 232, 231, 231, 230, 229, 228, 227, 226, 224,
//223, 222, 221, 219, 218, 216, 215, 213, 211, 210, 208, 206, 204, 202,
//201, 199, 197, 194, 192, 190, 188, 186, 184, 181, 179, 177, 174, 172,
//169, 167, 164, 162, 159, 157, 154, 152, 149, 146, 144, 141, 139, 136,
//133, 131, 128, 125, 123, 120, 117, 115, 112, 110, 107, 104, 102, 99,

```

```
//97, 94, 92, 89, 87, 84, 82, 79, 77, 75, 72, 70, 68, 66, 64, 62, 59, 57, 55,
//54, 52, 50, 48, 46, 45, 43, 41, 40, 38, 37, 35, 34, 33, 32, 30, 29, 28, 27,
//26, 25, 25, 24, 23, 23, 22, 22, 21, 21, 21, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 21,
//21, 21, 22, 22, 23, 23, 24, 25, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 37,
//38, 40, 41, 43, 45, 46, 48, 50, 52, 54, 55, 57, 59, 62, 64, 66, 68, 70, 72,
//75, 77, 79, 82, 84, 87, 89, 92, 94, 97, 99, 102, 104, 107, 110, 112, 115,
//117, 120, 123, 125};
```

```
// 8bit table of 256 sine values / one sine period / stored in flash memory
//index modultaion = 0.8 sinelookup method
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, 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
};
```

```
// 8bit table of 256 sine values / one sine period / stored in flash memory
//index modultaion = 0.7 sinelookup method
//PROGMEM const unsigned char sine256[] =
//{{
//128, 129, 130, 132, 133, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 144,
//145, 146, 147, 148, 149, 150, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159,
//160, 161, 162, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 167, 168, 169, 170, 170,
//171, 172, 172, 173, 173, 174, 174, 175, 175, 175, 176, 176, 177, 177,
//177, 177, 177, 178, 178, 178, 178, 178, 178, 178, 178, 178, 178, 178,
```

```

//177, 177, 177, 177, 177, 176, 176, 175, 175, 175, 174, 174, 173, 173,
//172, 172, 171, 170, 170, 169, 168, 167, 167, 166, 165, 164, 163, 162,
//162, 161, 160, 159, 158, 157, 156, 155, 154, 153, 152, 150, 149, 148,
//147, 146, 145, 144, 143, 141, 140, 139, 138, 137, 135, 134, 133, 132,
//130, 129, 128, 127, 126, 124, 123, 122, 121, 119, 118, 117, 116, 115,
//113, 112, 111, 110, 109, 108, 107, 106, 104, 103, 102, 101, 100, 99,
//98, 97, 96, 95, 94, 94, 93, 92, 91, 90, 89, 89, 88, 87, 86, 86, 85, 84, 84,
//83, 83, 82, 82, 81, 81, 81, 80, 80, 79, 79, 79, 79, 79, 78, 78, 78, 78, 78,
//78, 78, 78, 78, 78, 79, 79, 79, 79, 79, 80, 80, 81, 81, 81, 82, 82, 83,
//83, 84, 84, 85, 86, 86, 87, 88, 89, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 94, 95, 96, 97,
//98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112,
//113, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 122, 123, 124, 126, 127
//};

```

```
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;
```

```
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);
```

```
/**/
```

```
void setup()
```

```
{
```

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

```
    lcd.begin(16, 2);
```

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

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

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

```
    lcd.print("RIZKI MENDUNG A");
```

```

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("SIMPLE BOOST");

delay(4000);
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

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

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

// disable interrupts to avoid timing distortion
cbi (TIMSK0, TOIE0);
    // disable Timer0 !!! delay() is now not available
sbi (TIMSK2, TOIE2);
    // enable Timer2 Interrupt

dfreq = 40;
    // initial output frequency = 50 Hz
tword_m = twoTo32 * dfreq / refclk;
    // calculate 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
}

//*****
void loop()
{
  if (c4ms > 1)                // timer / wait for a full second
  {
    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
    dfreq = 50;
    cbi (TIMSK2, TOIE2);      // disble Timer2 Interrupt
    //tword_m = twoTo32 * dfreq / refclk;    // calculate DDS new
tuning word
    tword_m = 54760833.02;    // for constant 50 Hz
    //tword_m = 65712999;    // 60 Hz
    //tword_m = 76665166;    // 70 Hz
    //tword_m = 43808666.42;  // 40 Hz
    //tword_m = 32856499;    // 30 Hz
    //tword_m = 27380416.    // 25 Hz
    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 reverse duty cycle ratio with PWM_OUT_7
analogWrite(PWM_OUT_8, Val/4);
// Set duty cycle ratio
delay(100);
// 1000 ms delay for stability purpose

//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

```

```

//print out info to LCD
// LCD print parameter row 1
lcd.setCursor(0, 0);
//lcd.print("MOSFET TEMP : ");
//lcd.print(int(Input));
//lcd.print("C ");

// LCD print parameter row 1
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("M :");
lcd.print("%");

// LCD print parameter row 2
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("ST:");
lcd.print(int((100 * (Val / 4)) / 256));
lcd.print("%");

// LCD print parameter row 3
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("  Ff:");
lcd.print(int(dfreq));
lcd.print("Hz");

// LCD print parameter row 4
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("  Fs:");
lcd.print(int(2*refclk/1000));
lcd.print("kHz");
}

//*****
// timer1 setup
// prescaler = 1, 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);

// Timer1 PWM Mode set to Phase Correct PWM
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 = 1, 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);

// Timer2 PWM Mode set to Phase Correct PWM
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 ms
  {
    c4ms++;
    icnt1 = 0;
  }
  cbi(PORTD, TEST_PIN); // reset PORTD,TEST_PIN
}

```

--Halaman ini sengaja dikosongkan --

Tabel Kabel Tembaga AWG

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms/1000ft]	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

--Halaman ini sengaja dikosongkan --

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis bernama **Rizki Mendung Ariefianto**, salah satu mahasiswa S1 Teknik Elektro FTE – ITS, program studi Teknik Sistem Tenaga, yang lahir di Lumajang, 27 September 1995. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Sumbermujur 1, SMPN 1 Candipuro dan SMAN 2 Lumajang. Rizki Mendung Ariefianto adalah seorang mahasiswa yang mempunyai hobi menjelajah alam dengan mendaki gunung. Selama di bangku perkuliahan, penulis aktif di organisasi yaitu sebagai Staff FSLDK JMMI ITS 2014/2015 dan Kadep Syiar KALAM 2015/2016. Selain itu, penulis memanfaatkan waktunya untuk membuat karya tulis dan karya cipta guna diikuti dalam perlombaan tertentu. Berbagai kejuaraan telah dimenangkan penulis baik skala nasional maupun internasional sehingga mengantarkan penulis menjadi ITS Heroes atau Mahasiswa Berprestasi Utama ITS tahun 2017. Beberapa penelitian yang pernah dibuat penulis adalah tentang distilator bertenaga *hybrid* matahari-angin, pendingin bertenaga surya terkontrol, kapal tradisional *hybrid* matahari-angin-ombak-air laut, pembangkit listrik tenaga gelombang tipe *buoy-piston* dan desain pembangkit listrik tenaga mikro hidro tipe turbin *crossflow*. Selain itu penulis juga aktif sebagai Trainer keilmiah Navigator di ITS dan menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Teknik Elektro ITS. Dengan mengusung prinsip hidup “*Lakoni Wae*” atau jalani saja, penulis merupakan berusaha menerima kehendak Sang Ilahi yang tentunya dibarengi suatu usaha. Ketika terwujud syukur Alhamdulillah dan ketika belum terwujud berusaha sabar. Karena pada hakikatnya Allah memberikan yang terbaik bagi manusia.