



TUGAS AKHIR - TE 141599

DESAIN DAN IMPLEMENTASI *SWITCHED COUPLED INDUCTOR QUASI-Z-SOURCE INVERTER* TIGA FASA DENGAN METODE *SIMPLE BOOST CONTROL* UNTUK SUPLAJ MOTOR INDUKSI

DHIYA IRFANO AZMI
NRP 07111440000114

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Ir. Margo Pujiantara., M.T.

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

--Halaman ini sengaja dikosongkan--



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THREE PHASE
SWITCHED COUPLED INDUCTOR QUASI-Z-SOURCE
INVERTER WITH SIMPLE BOOST CONTROL FOR
INDUCTION MOTOR SUPPLY**

DHIYA IRFANO AZMI
NRP 07111440000114

Advisors
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Dr. Ir. Margo Pujiantara., M.T.

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

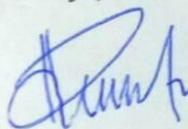
--Halaman ini sengaja dikosongkan--

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan dari Tugas Akhir saya dengan judul "*Desain Dan Implementasi Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter Tiga Fasa dengan Metode Simple Boost Control untuk Suplai Motor Induksi*" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018



DHIYA IRFANO AZMI
NRP. 07111440000114

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI SWITCHED
COUPLED INDUCTOR QUASI-Z-SOURCE INVERTER
TIGA FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST
CONTROL UNTUK SUPLAI MOTOR INDUKSI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003



Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.
NIP. 196603181990101001



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SWITCHED COUPLED INDUCTOR QUASI-Z-SOURCE INVERTER TIGA FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL UNTUK SUPLAI MOTOR INDUKSI

Nama : Dhiya Irfano Azmi

NRP : 07111440000114

Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Margo Pujiantara., M.T.

ABSTRAK

Pembangkit listrik dengan energi terbarukan seperti panel surya sudah banyak dikembangkan. Panel surya dapat dihubungkan dengan jala-jala atau peralatan listrik seperti motor induksi. Namun panel surya memiliki tegangan keluaran yang bergantung pada iradiansi dan suhu sekitar. Oleh karena itu diperlukan konverter peningkat tegangan dan *inverter* agar dapat mensuplai motor induksi. penggunaan *inverter* dengan konversi dua tingkat memiliki efisiensi yang rendah. *Z source inverter* merupakan *inverter* dengan konversi satu tingkat yang dapat memanfaatkan kondisi *shoot through zero state* untuk peningkat tegangan. namun peningkatan tegangan pada *Z source inverter* tidak besar dan terbatas oleh kemampuan komponen tersebut dan kualitas daya yang dihasilkan. Oleh karena itu diperlukan desain topologi *Z-source inverter* yang memiliki kemampuan meningkatkan tegangan yang lebih tinggi tanpa mengurangi kualitas daya keluaran yang dihasilkan. Dalam tugas akhir ini akan dirancang dan implementasi *Switched Coupled Inductor Quasi Z-Source Inverter* (SCL-qZSI) 3 fasa dengan metode *simple boost control* untuk mencatu motor induksi. Desain SCL-qZSI dapat memberikan rasio peningkatan tegangan dan efisiensi tinggi sehingga cocok untuk diaplikasikan langsung dengan motor induksi.

Kata Kunci : Motor Induksi, *Simple Boost Control*, *Shoot Through Zero State*, *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter*.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THREE PHASE SWITCHED COUPLED INDUCTOR QUASI-Z-SOURCE INVERTER WITH SIMPLE BOOST CONTROL FOR INDUCTION MOTOR SUPPLY

Nama : Dhiya Irfano Azmi

NRP : 07111440000114

Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ir. Margo Pujiantara., M.T.

ABSTRACT

Power plants with renewable energy such as solar panels have been widely developed. Solar panels can be connected with mesh or electrical equipment such as induction motors. However, solar panels have an output voltage that depends on the irradiance and ambient temperature. Therefore, voltage-converter and inverter converters are required to supply induction motors. the use of inverters with two-tier conversion has low efficiency. Z source inverter is a one-level conversion inverter that can take advantage of zero-state shoot-through conditions for voltage boosters. but the increase in voltage in Z source inverters is not large and is limited by the ability of the component and the quality of power generated. Therefore it is necessary to design topology Z-source inverter that has the ability to increase the voltage higher without reducing the quality of output power generated. In this final project will be designed and implementation of Switched Coupled Inductor Quasi Z-Source Inverter (SCL-qZSI) 3 phase with simple boost control method to supply induction motor. The SCL-qZSI design can provide a high voltage and high efficiency ratios making it suitable for direct application with induction motors.

Keyword : Induction Motor, Simple Boost Control, *Shoot Through Zero State, Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter.*

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah senantiasa saya panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas limpahan barokah, rahmat dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan buku penelitian ini dengan judul **“Desain Dan Implementasi *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter* Tiga Fasa dengan Metode *Simple Boost Control* untuk Suplai Motor Induksi”**. Buku ini saya persembahkan khususnya untuk keluarga saya dan umumnya untuk bahan referensi penelitian selanjutnya. “fainnama'al usri yusro, innama'al usri yusro”. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Penulisan buku dilakukan dengan melalui perjuangan yang berat, penuh semangat dan kesungguhan, namun buku Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna.

Selama pengerjaan Tugas Akhir ini banyak pihak-pihak yang membantu baik berupa doa, bimbingan, jasa, dalam menyelesaikan penelitian ini, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam pengerjaan buku Tugas Akhir ini.

Secara khusus penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu saya dan ayah saya, serta kakak dan adik saya yang sellau setia mamotivasi
2. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi yang setiap hari menemani dan memberikan semangat
4. Calon Penyempurna Separuh Agamaku yang selalu memberikan motivasi dan semangat, semoga kita selalu berada di dalam naungan Cinta-Nya

Penulis pun memohon maaf atas segala kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2018

Dhiya Irfano Azmi

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi Penulisan	5
BAB 2 SWITCHED-COUPLED-INDUCTOR QUASI-Z-SOURCE INVERTER TIGA FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL	7
2.1 Voltage Source Inverter Tiga Fasa	7
2.2 Z-Source Inverter Tiga Fasa	8
2.2.1 Penurunan Persamaan Rasio Peningkatan Tegangan ZSI	10
2.3 Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter (SCL qZSI) Tiga Fasa	14
2.3.1 Analisis Rangkaian Ekuivalen Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter	15
2.4 Penurunan Parameter Komponen	19
2.4.1 Induktor	20
2.4.2 Induktor Terkopel Tiga Belitan	21
2.4.3 Kapasitor	22
2.5 Stres Tegangan dan Arus Pada Tiap Komponen	23
2.6 Motor Induksi 3 Fasa	25
2.6.1 Cara Kerja Motor Induksi 3 Fasa	26
2.7 Simple Boost Control	27

BAB 3 DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI INVERTER	29
3.1 Diagram Blok Sistem	29
3.2 Motor Induksi Tiga Fasa.....	30
3.3 Desain Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter dengan Metode Simple Boost Control.....	31
3.3.1 Penentuan Rasio Konversi dan Shoot Through Duty Ratio	32
3.3.2 Penentuan Nilai Induktor.....	33
3.3.3 Penentuan Nilai Induktor Terkopel Tiga Belitan	34
3.3.4 Penentuan Nilai Kapasitor	34
3.4 Simulasi pada Kondisi <i>Steady State</i>	35
3.5 Implementasi Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter	39
3.5.1 Penentuan Kapasitor.....	39
3.5.2 Penentuan Induktor	40
3.5.3 Penentuan Dioda	44
3.5.4 Penentuan Mosfet.....	44
3.5.5 Desain Simple Boost Control	45
3.5.6 Hasil Implementasi Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter	46
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA	49
4.1 Pengujian Sinyal Simple Boost Control	50
4.2 Pengujian Sinyal Pensaklaran pada induktor dan Kapasitor..	52
4.3 Tegangan DC Bus pada Rangkaian SCL qZSI.....	54
4.4 Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus Keluaran Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter	55
4.5 Pengujian Pembebanan SCL qZSI pada Motor Induksi Tiga Fasa.....	58
4.6 Pengujian Faktor Peningkatan Tegangan Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter.....	60
BAB 5 PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	67
RIWAYAT HIDUP.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Topologi <i>Voltage Source Inverter</i> [5]	7
Gambar 2.2.	Topologi <i>Z-Source Inverter</i> Tiga Fasa	9
Gambar 2.3.	Rangkaian Ekuivalen <i>Z-Source Inverter</i> pada Saat Kondisi Aktif.....	10
Gambar 2.4.	Rangkaian Ekuivalen <i>Z-Source Inverter</i> pada Saat Kondisi <i>null</i>	11
Gambar 2.5.	Rangkaian Ekuivalen <i>Z-Source Inverter</i> pada Saat Kondisi <i>Shoot Through Zero State</i>	11
Gambar 2.6.	Topologi <i>Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter</i> Tiga Fasa.....	14
Gambar 2.7.	Rangkaian Ekuivalen SCL qZSI pada Saat Kondisi <i>Shoot Through Zero State</i>	15
Gambar 2.8.	Rangkaian Ekuivalen SCL qZSI pada Saat Kondisi Aktif	16
Gambar 2.9a.	Rangkaian Reluktansi induktor terkopel tiga belitan di inti tipe EE pada saat kondisi <i>shoot-through zero state</i> [1].	22
Gambar2.9b.	Rangkaian Reluktansi induktor terkopel tiga belitan di inti tipe EE pada saat kondisi <i>non shoot through zero state</i> [1].	22
Gambar 2.10a.	Rotor Motor Induksi Jenis <i>Cage</i>	25
Gambar 2.10b.	Rotor Motor Induksi Jenis <i>Wound</i> [11].....	25
Gambar 2.11.	Pembangkitan Sinyal SPWM dengan Metode <i>Simple Boost Control</i>	27
Gambar 3.1.	Diagram Blok Keseluruhan Sistem SCL qZSI Tiga Fasa untuk Suplai Motor Induksi.....	29
Gambar 3.2.	Rangkaian Simulasi SCL qZSI dengan kondisi <i>Steady State</i>	36
Gambar 3.3.	Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} dan V_{C2} , serta arus I_{L1} dan I_m	37
Gambar 3.4.	Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} dan V_{PN} , serta arus I_m dan I_m	38
Gambar 3.5.	Bentuk Gelombang Tegangan V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} dan Arus I_o	38
Gambar 3.6(a).	Spektrum Frekuensi <i>Fast Fourier Transform</i> pada Tegangan Keluaran SCL qZSI.	39

Gambar 3.6(b).	Spektrum Frekuensi <i>Fast Fourier Transform</i> pada Arus Keluaran SCL qZSI.	39
Gambar 3.7.	Diagram Blok Metode Pensakelaran <i>Simple Boost Control</i>	45
Gambar 3.8.	Hasil Implementasi rangkaian <i>Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter</i>	47
Gambar 4.1.	Pengujian <i>Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter</i> Tiga Fasa.....	49
Gambar 4.2.	Hasil Pengujian Sinyal Sinusoidal Pulse Width Modulation dengan Metode <i>Simple Boost Control</i>	50
Gambar 4.3.	Sinyal Hasil Pensakelaran MOSFET	51
Gambar 4.4.	Bentuk Sinyal Arus Induktor L_1 dan L_m Terhadap Pensakelaran	52
Gambar 4.5.	Bentuk Sinyal Tegangan Kapasitor dan Arus Induktor Terhadap Pensakelaran	53
Gambar 4.6.	Hasil Pengujian Sinyal Tegangan V_{PN} dan Arus Induktor Terhadap pensakelaran MOSFET V_{GS}	55
Gambar 4.7.	Bentuk Sinyal Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus keluaran SCL qZSI	56
Gambar 4.8.	Diagram Fasor Tegangan Keluaran SCL qZSI.....	57
Gambar 4.9.	Diagram Fasor Arus Keluaran SCL qZSI.....	57
Gambar 4.10a.	Spektrum Frekuensi pada Tegangan Keluaran SCL qZSI	58
Gambar 4.10b.	Spektrum Frekuensi pada Arus Keluaran SCL qZSI	58
Gambar 4.11.	Kurva Pengaruh Pembebanan Motor Induksi Terhadap Efisiensi SCL qZSI.....	60
Gambar 4.12.	Grafik Pengujian Faktor Peningkatan Tegangan SCL qZSI	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Metode pensakelaran VSI dengan SPWM [7].	8
Tabel 2.2.	Metode Pensakelaran SPWM dengan <i>simple boost control</i> [7]	9
Tabel 3.1.	Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa [14].	30
Tabel 3.2.	Parameter Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa [14].	31
Tabel 3.3.	Spesifikasi Awal Desain SCL qZSI	32
Tabel 3.4.	Parameter Rangkaian Simulasi SCL qZSI Tiga Fasa	35
Tabel 3.5.	Spesifikasi Inti Induktor MAGNETICS Kool Mu 0077439A7 [16]	41
Tabel 3.6.	Parameter Komponen Implementasi SCL qZSI	46
Tabel 4.1.	Hasil Pengujian <i>Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter</i> pada Pembebanan Motor Induksi Tiga Fasa	59

--Halaman ini sengaja dikosongkan—

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini energi listrik merupakan kebutuhan utama manusia di dunia, sebagian besar peralatan yang digunakan menggunakan energi listrik, di industri pun listrik menjadi kebutuhan utama untuk mensuplai peralatannya, tanpa adanya listrik maka motor di industri maupun di perumahan tidak akan bisa berputar.

Dengan banyaknya kebutuhan listrik, sehingga saat ini penelitian dan penggunaan panel surya semakin digencarkan. Bahkan panel surya sekarang sudah dikembangkan dengan jenis *thin film* yang memiliki performa yang lebih baik di suhu tinggi, ringan, fleksibel serta instalasi yang mudah. Namun panel surya memiliki karakteristik tegangan output per-*cell*nya yang bergantung pada suhu dan intensitas cahaya matahari, dan tegangan keluaran panel surya relatif kecil. Sehingga jika ingin dihubungkan dengan motor induksi, diperlukan konverter peningkat tegangan sebelum masuk ke *inverter*. Cara yang biasa dilakukan adalah dengan menggunakan *inverter* dengan dua tingkat konversi, seperti *boost voltage source inverter* yang mana gabungan dari *boost converter* dengan *voltage source inverter*, topologi tersebut memiliki efisiensi konversi yang rendah karena memiliki rugi-rugi switching yang besar, dan *gate driver* harus dirancang khusus agar tidak terdapat kondisi *shoot through* yang bisa merusak komponen *switching* tersebut [1], [2]

Z-source inverter merupakan inverter dengan satu tingkat konversi yang memanfaatkan keadaan *shoot-through zero state* untuk peningkatan tegangan dengan efisiensi tinggi, peningkatan tegangan keluaran diatur dengan *shoot-through duty ratio*, semakin besar *duty cycle shoot through* pada *Z-source inverter* konvensional, maka akan mengurangi performa komponen serta penurunan kualitas daya yang dihasilkan, sehingga efisiensi inverter akan berkurang [3].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka penulis mengusulkan rangkaian perkembangan dari *Z-source inverter* yaitu topologi *Switched Coupled inductor Quasi-Z-Source Inverter* yang dapat meningkatkan rasio konversi tegangan satu tingkat dengan *shoot through duty ratio* yang kecil berdasarkan perbandingan jumlah belitan induktor terkopel pada rangkaian tersebut. Dengan diterapkannya topologi ini

diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dari *inverter* yang dapat digunakan untuk mensuplai motor induksi.

1.2 Perumusan Masalah

Tegangan yang dihasilkan oleh panel surya tergantung pada temperature dan iradiasi dan relatif kecil, sehingga perlu adanya *inverter* peningkat tegangan agar dapat mensuplai motor induksi. Sehingga permasalahan pada tugas akhir ini adalah mendesain dan mengimplementasikan *switched coupled inductor Quasi-Z-Source inverter* (SCL qZSI) dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Mendesain dan mengimplementasikan *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter* (SCL qZSI) tiga fasa dengan metode *simple boost control*.
2. Mengidentifikasi karakteristik *simple boost control*.
3. Mengetahui kinerja dari SCL qZSI tiga fasa untuk suplai motor induksi.

1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen yang terdapat pada pasaran dan peralatan di laboratorium Departemen Teknik Elektro ITS.
2. Pengujian alat untuk inverter ini menggunakan alat yang terdapat pada laboratorium konversi energi listrik, yaitu sumber tegangan DC, motor induksi tiga fasa 56V 50Hz, dan pengereman motor.
3. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dengan kondisi *steady state* dan semua komponen dianggap ideal.

1.5 Metodologi

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

1. Studi Literatur

Mempelajari prinsip kerja dari topologi *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter* (SCL qZSI) tiga fasa dengan metode *simple boost control*. SCL qZSI merupakan rangkaian impedansi yang terdiri dari rangkaian impedansi yang terdiri dari induktor, induktor terkopel, dan kapasitor yang mampu meningkatkan tegangan keluaran dengan adanya *shoot through* dari *simple boost control* serta perbandingan belitan pada induktor terkopel tersebut. Beberapa hal yang perlu dipelajari yaitu cara kerja SCL qZSI, penurunan parameter rangkaian, metode pensaklaran dengan *simple boost control*.

2. Desain dan Simulasi

Pada tahap ini dilakukan perhitungan secara matematis mengenai SCL qZSI, menghitung nilai komponen yang digunakan pada SCL qZSI. Selanjutnya dilakukan simulasi menggunakan *software Power Simulator* (PSIM) untuk memastikan bahwa SCL qZSI dapat bekerja sesuai dengan desain yang diinginkan.

3. Implementasi Alat

Pada tahap ini dilakukan pembuatan SCL qZSI sesuai dengan desain yang telah dibuat. Beberapa komponen yang diperlukan yaitu enam buah *MOSFET*, dua buah kapasitor, satu buah induktor, satu buah induktor terkopel tiga belitan, tiga buah dioda fast switching, lima buah sumber DC, dan satu buah *Arduino Mega 2560*. Setelah semua komponen tersedia, dilakukan desain PCB dan pembuatan alat.

4. Pengujian Alat

Pada tahap ini dilakukan pengujian SCL qZSI yang telah diimplementasikan. Pengujian dilakukan menggunakan peralatan yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik yaitu sumber DC, motor tiga fasa 56V 50Hz, serta pengereman motor. Pada tahap dilakukan pengambilan data sinyal menggunakan osiloskop dan peralatan pendukung lainnya.

5. Analisis Data

Setelah dilakukan pengujian dan diperoleh data hasil pengujian, maka dilakukan analisis dari data tersebut. Analisis dilakukan untuk mengetahui apakah SCL qZSI yang diimplementasikan telah sesuai dengan hasil simulasi pada PSIM. Analisis data meliputi bentuk sinyal pensaklaran *simple boost control*, harmonisa tegangan dan arus yang tersisa setelah filter, efisiensi daya dan performa SCL qZSI untuk aplikasi suplai motor induksi.

6. Kesimpulan

Kesimpulan didapatkan berdasarkan hasil analisis data yang diperoleh dari simulasi rangkaian, perhitungan, dan pengujian SCL qZSI.

1.6 Sistematika Penulisan

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

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi tugas akhir ini.

BAB 2 Dasar Teori

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang SCL qZSI, penurunan parameter komponen, teknik pensaklaran dengan metode *simple boost control*, dan motor induksi tiga fasa.

BAB 3 Perancangan dan Implementasi Sistem

Bab ini berisi mengenai perancangan SCL qZSI secara matematis, simulasi menggunakan *software* PSIM, dan implementasi SCL qZSI tiga fasa dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi.

BAB 4 Pengujian Sistem dan Analisis Data

Bab ini berisikan pengujian dan analisis data terhadap hasil pengujian dari SCL qZSI dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi tiga fasa.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

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

1.7 Relevansi Penulisan

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

1. Menjadi referensi yang dapat menunjang industri kelistrikan, terutama yang berhubungan dengan konversi tegangan DC ke tegangan AC tiga fasa.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan tugas akhir topik yang serupa.
3. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan konverter, khususnya mengenai SCL qZSI tiga fasa dengan metode *simple boost control*.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

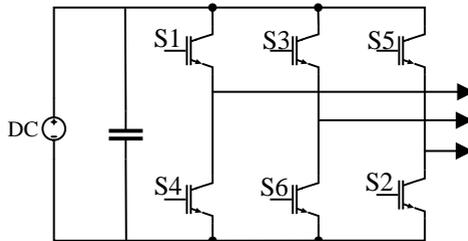
BAB 2

SWITCHED-COUPLED-INDUCTOR QUASI-Z-SOURCE INVERTER TIGA FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL

Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter (SCL qZSI) merupakan perkembangan dari topologi *Quasi-Z-Source inverter* (qZSI) yang mana juga termasuk topologi *Z Source Inverter*. Topologi ini mengganti induktor pada qZSI menjadi rangkaian induktor terkopel tiga belitan, kapasitor, dan dioda. SCL qZSI mempunyai kemampuan meningkatkan tegangan keluaran lebih tinggi dengan menggunakan metode pensaklaran *simple boost control* tanpa ada penambahan konverter lain seperti *dual stage Voltage Source inverter*. *Voltage Source Inverter* (VSI) memerlukan *boost converter* untuk meningkatkan tegangan keluarannya, yang mengakibatkan berkurangnya efisiensi dari inverter tersebut [1,3,4].

2.1 *Voltage Source Inverter Tiga Fasa*

Voltage source inverter merupakan salah satu topologi yang berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC tiga fasa. *Voltage source inverter* terdiri dari enam buah komponen pensaklaran yang mana dapat diatur tegangan, fasa dan frekuensi keluarannya.



Gambar 2.1 Topologi *Voltage Source Inverter* [5]

Komponen pensaklaran pada topologi VSI harus diberikan *death-time* agar tidak dapat keadaan aktif sfecara bersamaan antara S1 dengan S4, S3 dengan S6, serta S5 dengan S2. Hal tersebut harus diperhatikan karena akan menimbulkan hubung singkat pada sumber

tegangan DC masukannya . Kondisi pensaklaran yang digunakan oleh VSI dapat dilihat pada tabel 2.1. Terdapat keadaan aktif yaitu kondisi satu sampai enam yang mana inverter akan menghasilkan tegangan keluaran AC tiga fasa, dan keadaan null pada kondisi tujuh dan delapan yang mana inverter tidak mengeluarkan tegangan AC. Terdapat beberapa metode pensaklaran topologi VSI, pada umumnya yang digunakan adalah metode *sinusoidal single pulse modulation* (SPWM). Dengan menggunakan metode tersebut, tegangan keluaran yang dihasilkan oleh inverter dapat dinyatakan dengan rumus

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

Dimana M adalah indeks modulasi ($M < 1$), \widehat{V}_{ac} adalah tegangan rms *line to neutral*, dan V_{in} adalah tegangan masukan *inverter* [6].

Tabel 2.1 Metode pensaklaran VSI dengan SPWM [7].

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

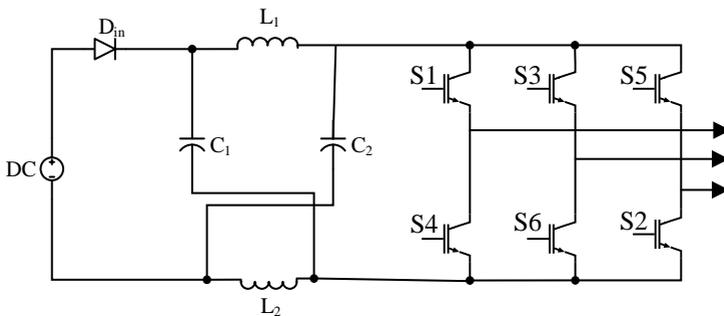
2.2 Z-Source Inverter Tiga Fasa

Z-Source inverter (ZSI) merupakan salah satu topologi inverter tiga fasa yang memiliki jaringan impedansi terdiri dari dua buah ~~inducto~~induktor dan dua buah kapasitor. ZSI memiliki kemampuan sebagai peningkat tegangan dan sebagai penurun tegangan tanpa memerlukan komponen pensaklaran tambahan seperti *dual stage voltage source inverter*. Rangkaian *Z-Source* dapat digunakan sebagai konverter DC-AC, AC-DC, DC-DC, dan AC-AC [3,8]. Rangkaian ZSI dapat dilihat pada gambar 2.2. ZSI dapat meningkatkan tegangan keluaran inverter

dengan penambahan *shoot through duty cycle* pada metode pensaklaran *simple boost control* yang terdapat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Metode Pensaklaran SPWM dengan *simple boost control* [7]

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



Gambar 2.2. Topologi Z-Source Inverter Tiga Fasa

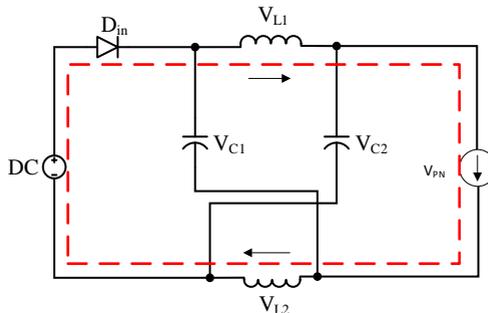
Topologi ZSI dapat mengatasi permasalahan yang ada pada topologi VSI dan CSI yang tidak dapat beroperasi sebagai peningkat atau penurun tegangan tanpa konverter tambahan, seperti *boost converter* atau *buck converter*. Komponen pensaklaran pada VSI dan CSI harus

diberikan *death time* agar tidak terjadi *short circuit* dan merusak komponen pensaklarannya. Pada topologi ZSI keadaan *short circuit* atau dinamakan *shoot through* dimanfaatkan sebagai peningkat tegangan keluaran karena adanya pengisian dan pengosongan jaringan impedansi tersebut [9].

Teknik pensaklaran ZSI dapat dilihat pada tabel 2.2. Terdapat sembilan kondisi pensaklaran yang digunakan ZSI, berbeda dengan VSI yang hanya memiliki delapan kondisi pensaklaran yang diperbolehkan [10].

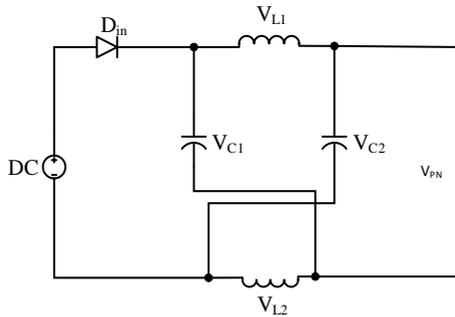
2.2.1 Penurunan Persamaan Rasio Peningkatan Tegangan ZSI

Berdasarkan mode pensaklaran pada tabel 2.2. Terdapat tiga kondisi operasi, yaitu mode aktif, *null*, dan *shoot through*. Penurunan persamaan ZSI dilakukan dengan mengasumsikan nilai induktor L_1 dan L_2 serta kapasitor C_1 dan C_2 memiliki nilai yang sama ($L_1=L_2=L$ dan $C_1=C_2=C$).



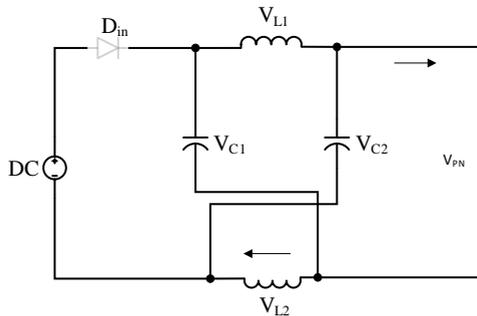
Gambar 2.3. Rangkaian Ekuivalen Z-Source Inverter pada Saat Kondisi Aktif

Mode Aktif : inverter beroperasi dalam mode aktif dan rangkaian ekuivalen dapat dilihat pada gambar 2.3. pada kondisi ini, tegangan masukan DC akan mengalir ke rangkaian impedansi yang terdiri dari induktor dan kapasitor. Pada mode aktif, kapasitor akan mengalami pengisian tegangan, dan energi akan mengalir ke beban melalui induktor. Induktor pada kondisi aktif akan mengalami pengosongan arus [6,12].



Gambar 2.4. Rangkaian Ekuivalen Z-Source Inverter pada Saat Kondisi *null* .

Mode *null* : Pada mode *null* inverter beroperasi dalam salah satu dari dua keadaan *null*, yaitu hanya komponen pensakelaran bagian atas saja yang aktif, atau bagian yang bawah saja. Pada mode *null* rangkaian dapat diasumsikan sebagai rangkaian terbuka pada bagian keluarannya seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.5. Rangkaian Ekuivalen Z-Source Inverter pada Saat Kondisi *Shoot Through Zero State*.

Mode Shoot through zero state : Inverter beroperasi dalam salah satu dari tujuh keadaan *shoot through zero states*. ~~Pada mode~~ Pada kondisi ini, rangkaian dapat diasumsikan sebagai short circuit rangkaian hubung singkat seperti pada gambar 2.5. Selama mode Shoot through zero state, tidak terdapat tegangan keluaran pada inverter sama seperti dengan kondisi mode H-null. Tegangan DC kapasitor akan meningkat sesuai dengan besarnya *shoot through duty ratio*.

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

$$\begin{cases} V_{L1} = V_{L2} = V_L \\ V_{C1} = V_{C2} = V_C \end{cases} \quad (2.2)$$

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

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

Pada saat mode aktif dan null dengan interval waktu T_I . Berdasarkan hukum khirchoff maka persamaan tegangan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{cases} V_L \neq V_C, V_d = V_{in} = V_L + V_C \\ V_L = V_{in} - V_C = V_C - V_{PN} \\ V_{PN} = V_C - V_L = 2V_C - V_{in} \end{cases} \quad (2.4)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{V}_L &= V_C * T_o + (V_{in} - V_C) * T_1 = 0 \\ \frac{V_C}{V_{in}} &= \frac{T_1}{T_1 - T_o} \end{aligned} \quad (2.5)$$

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

$$\begin{aligned} D_o &= T_o * f_s \\ T_o &= D_o / f_s \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

$$\begin{aligned}\bar{V}_{PN} &= \frac{T_0 \cdot 0 + T_1 \cdot (2V_C - V_{in})}{T} \\ \bar{V}_{PN} &= \frac{T_1 \cdot (2V_C - V_{in})}{T} \\ \bar{V}_{PN} &= \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{in}\end{aligned}$$

dengan substitusi ke persamaan 2.12 maka didapatkan

$$\bar{V}_{PN} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{in} = V_C \quad (2.7)$$

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

$$V_{PN} = V_C - V_L = 2 * V_C - V_{in} \quad (2.8)$$

Substitusi V_C dari persamaan 2.7 ke persamaan 2.8 maka didapatkan

$$\overline{V_{pn}} = \frac{T}{T_1 - T_0} V_{in} = B * V_{in} \quad (2.9)$$

Dimana B ada faktor peningkat tegangan

$$B = \frac{T}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1 - (2\frac{T_0}{T})} \geq 1 \quad (2.10)$$

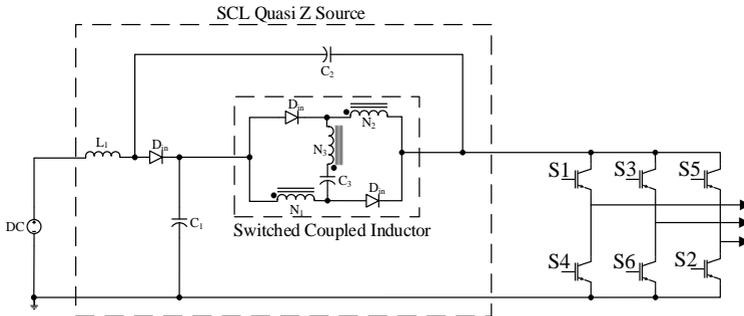
Sehingga tegangan maksimum fasa ke netral yaitu

$$\overline{V_{ac}} = \frac{M * \overline{V_{PN}}}{2} = \frac{M * B * V_{in}}{2} \quad (2.11)$$

Dimana M adalah indeks modulasi ($M \leq 1$). Dengan mengubah nilai shoot through duty ratio maka faktor peningkatan tegangan (B) dapat berubah.

2.3 Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter (SCL qZSI) Tiga Fasa

SCL qZSI merupakan topologi *inverter* yang memiliki jaringan impedansi yang terdiri dari satu buah induktor, satu buah induktor terkopel tiga belitan, dan tiga buah kapasitor seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Topologi *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter Tiga Fasa*

SCL qZSI ini hanya beroperasi sebagai peningkat tegangan (*boost*) tanpa memerlukan konverter tambahan. Keuntungan dari topologi SCL qZSI yaitu memiliki *common ground* antara tegangan sumber DC dengan sisi inverter, arus *starting* yang rendah, peningkatan tegangan yang lebih tinggi dengan *duty cycle D* yang rendah, sehingga menghasilkan *voltage stress* yang kecil pada tiap komponen dan menghasilkan tegangan keluaran dengan kualitas tinggi [9].

Topologi SCL qZSI mengatasi permasalahan pada topologi *Z-Source inverter* yang membutuhkan *duty cycle* yang tinggi untuk meningkatkan tegangan, yang menyebabkan efisiensi dari inverter tersebut berkurang. Dengan adanya rangkaian impedansi pada topologi SCL qZSI dapat meningkatkan tegangan keluaran dengan *duty cycle shoot through* yang rendah, sehingga memiliki efisiensi rangkaian yang tinggi.

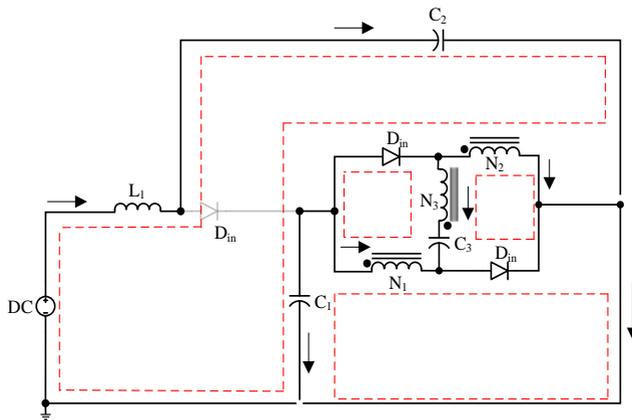
2.3.1 Analisis Rangkaian Ekuivalen *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter*

Berdasarkan kondisi pensaklaran *simple boost control*, SCL qZSI dapat dibagi menjadi 3 kondisi operasi, yaitu mode aktif, null, dan *shoot through zero state*.

2.3.1.1 *Shoot-Through State*

Pada kondisi *shoot through*, rangkaian inverter dapat diasumsikan sebagai rangkaian hubung singkat seperti gambar 2.7. Pada kondisi ini dioda D_{in} pada kondisi tidak aktif, sedangkan D_1 dan D_2 pada kondisi aktif.

Induktor L_1 dan induktor terkopel pada mode *shoot through zero state* akan mengalami pengisian arus, sedangkan pada kapasitor akan mengalami pengosongan tegangan. selama mode *shoot through* tidak terdapat tegangan keluaran pada inverter.



Gambar 2.7. Rangkaian Ekuivalen SCL qZSI pada Saat Kondisi *Shoot Through Zero State*

Dengan menggunakan teori KVL dari rangkaian ekuivalen pada gambar 2.2 dalam keadaan *shoot through state*, didapatkan persamaan :

$$V_{L1} = V_{in} + V_{C2} \quad (2.12)$$

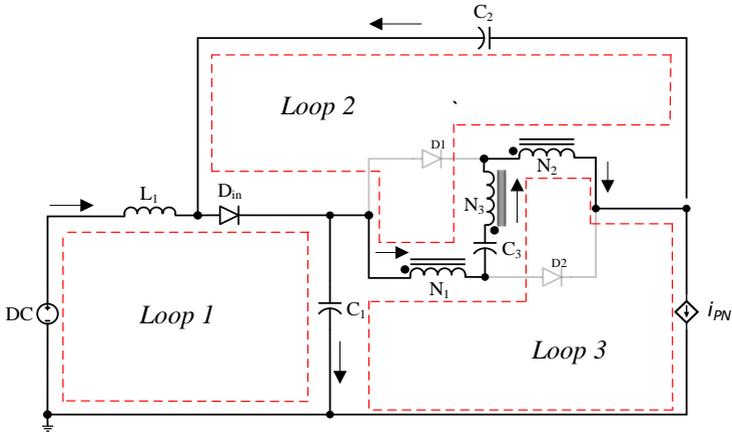
$$V_{C3} = V_{N1} + V_{N2} = (n + 1) V_{N1} \quad (2.13)$$

$$V_{C3} = (n + 1)V_{C1} \quad (2.14)$$

$$i_{C2} = I_{in} \quad (2.15)$$

2.3.1.2 Nonshoot-Through State

Pada mode *Nonshoot through zero state* terdapat dua mode operasi, yaitu aktif dan *null*. Pada mode operasi aktif, rangkaian ekuivalen dapat dilihat pada gambar 2.8. selama kondisi aktif, diode D_1 dan D_2 dalam kondisi tidak aktif. Pada mode operasi ini, kapasitor akan mengalami pengisian tegangan sedangkan induktor L_1 dan induktor terkopel akan mengalami pengosongan arus.



Gambar 2.8. Rangkaian Ekuivalen SCL qZSI pada Saat Kondisi Aktif

Dengan menggunakan hukum KVL dari rangkaian ekuivalen pada gambar 2.8. maka dapat dianalisa sebagai berikut :
 dari *Loop 1* didapatkan persamaan

$$V_{in} = V_{C1} - V_{L1} \quad (2.16)$$

dari *Loop 2* didapatkan persamaan

$$V_{C2} = V_{C3} + V_{N1} + V_{N2} + V_{N3} \quad (2.17)$$

$$V_{N1} + V_{N2} + V_{N3} = V_{C2} - V_{C3} \quad (2.18)$$

Persamaan perbandingan belitan pada inductor terkopel N_1 , N_2 , dan N_3 yaitu

$$V_{N3} = nV_{N1} = nV_{N2} \quad (2.19)$$

sehingga didapatkan persamaan

$$V_{N1} + nV_{N1} + nV_{N1} = V_{C2} - V_{C3} \quad (2.20)$$

$$V_{N1} = \frac{V_{C2} - V_{C3}}{n+2} \quad (2.21)$$

Dari *Loop 3* didapatkan persamaan

$$V_{PN} = V_{C1} + V_{C3} + V_{N1} + V_{N2} + V_{N3} \quad (2.22)$$

Substitusi persamaan (2.14) dan (2.19) ke (2.22),

$$V_{PN} - \frac{V_{C3}}{(n+1)} - V_{C3} = (n+2) V_{N1} \quad (2.23)$$

$$V_{N1} = \frac{V_{PN}}{(n+2)} - \frac{V_{C3}}{(n+1)} \quad (2.24)$$

Substitusi persamaan (2.17) ke (2.22),

$$V_{PN} = V_{C1} + V_{C3} + V_{C2} - V_{C3} \quad (2.25)$$

$$V_{PN} = V_{C1} + V_{C2} \quad (2.26)$$

$$V_{C1} = V_{PN} - V_{C2} \quad (2.27)$$

Substitusi persamaan (2.27) ke (2.16),

$$V_{in} = V_{PN} - V_{C2} - V_{L1} \quad (2.28)$$

$$V_{L1} = V_{PN} - V_{C2} - V_{in} \quad (2.29)$$

Dengan menggunakan kondisi *voltage-second balance* pada inductor L_1 dari (2.12) dan (2.29), didapatkan

$$V_{PN} = \frac{V_{C2} + V_{in}}{(1-D)} \quad (2.30)$$

Dengan menggunakan kondisi *voltage-second balance* pada induktor terkopel N_1 dari (2.13) dan (2.21), didapatkan

$$V_{C3} = \frac{(n+1)(n+D)}{(D+n+1)} V_{C2} \quad (2.31)$$

Dengan menggunakan kondisi *voltage-second balance* pada induktor terkopel N_1 dari (2.13) dan (2.24), didapatkan

$$V_{C3} = \frac{(n+1)(1-D)}{(n+2)} V_{PN} \quad (2.32)$$

Substitusi persamaan (2.31) dan (2.32), didapatkan

$$V_{C2} = \frac{D+n+1}{(n+2)} V_{PN} \quad (2.33)$$

Selanjutnya substitusi persamaan 2.30 dengan persamaan 2.33

$$V_{C2} = \frac{D+n+1}{(n+2)} \times \frac{V_{C2} + V_{in}}{(1-D)} \quad (2.34)$$

$$V_{C2} = \frac{D+n+1}{(1-(3+n)D)} V_{in} \quad (2.35)$$

Substitusi persamaan (2.30) dan (2.35),

$$V_{PN} (1-D) - V_{in} = \frac{D+n+1}{(n+2)} V_{PN} \quad (2.36)$$

$$V_{in} = \left(\frac{(n+2)(1-D)}{(n+2)} - \frac{D+n+1}{(n+2)} \right) V_{PN} \quad (2.37)$$

$$V_{PN} = \frac{n+2}{1-(3+n)D} V_{in} \quad (2.38)$$

Selanjutnya substitusi persamaan 2.38 dengan 2.32

$$V_{C3} = \frac{(n+1)(1-D)}{(n+2)} \times \frac{n+2}{1-(3+n)D} V_{in} \quad (2.39)$$

$$V_{C3} = \frac{(n+1)(1-D)}{1-(3+n)D} V_{in} \quad (2.40)$$

Untuk tegangan pada kapasitor C_1 didapatkan dari persamaan 2.14

$$\begin{aligned} V_{C3} &= (n + 1)V_{C1} \\ V_{C1} &= \frac{V_{C3}}{(n+1)} \\ V_{C1} &= \frac{(1-D)}{1 - (3+n)D} V_{in} \end{aligned} \quad (2.41)$$

Sehingga, *boost factor* dari SCL qZSI ini adalah

$$B = \frac{V_{PN}}{V_{in}} = \frac{n + 2}{1 - (3 + n)D} \quad (2.42)$$

Tegangan maksimum fasa ke netral yang dihasilkan oleh inverter yaitu

$$\overline{V}_{ac} = \frac{M \overline{V}_{PN}}{2} = \frac{M B V_{in}}{2} \quad (2.43)$$

Dimana M adalah indeks modulasi ($M \leq 1$). Dengan menggunakan metode *simple boost control*, hubungan antara indeks modulasi M dengan *shoot through duty ratio* (D) yaitu

$$D = \frac{T_0}{T} = 1 - M \quad (2.44)$$

Dimana T_0 adalah periode *shoot through* dan T adalah perido SPWM. Jika disubstitusi persamaan (2.44) dan (2.42), didapatkan

$$B = \frac{n + 2}{(n+3)M - (n+2)} \quad (2.45)$$

Penguat tegangan dari rangkaian SCL qZSI adalah

$$G = \frac{\overline{V}_{ac}}{V_{in}/2} = M \times B = \frac{(n + 2)M}{(n + 3)M - (n+2)} \quad (2.46)$$

2.4 Penurunan Parameter Komponen

SCL qZSI memiliki beberapa parameter yang harus ditentukan nilainya. Parameter-parameter yang perlu ditentukan nilainya yaitu C_1 , C_2 , C_3 , L_1 , L_m , L_{k1} .

2.4.1 Induktor

Arus yang mengalir pada induktor L_1 pada SCL qZSI mengalami kondisi pengisian dan pengosongan tanpa menyentuh nilai nol, atau disebut *continous current mode* (CCM).

Arus pada induktor L_1 akan naik secara linier pada saat keadaan *shoot through*, dan akan mengalami pengurangan arus secara linier pada saat kondisi aktif dan *null*. Besar arus rata-rata yang mengalir pada L_1 yaitu :

$$\bar{I}_L = \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad (2.47)$$

Dimana P_{in} adalah daya masukan inverter.

Nilai arus induktor maksimum terjadi pada saat mode *shoot through zero state*. Untuk menentukan nilai induktor L_1 maka perlu ditentukan nilai *peak to peak* arus induktor (ΔI_L).

$$\text{Nilai maksimum arus induktor : } \hat{I}_L = \bar{I}_L + 0.5\Delta I_L \quad (2.48)$$

$$\text{Nilai minimum arus induktor : } \check{I}_L = \bar{I}_L - 0.5\Delta I_L \quad (2.49)$$

$$\Delta I_L = \hat{I}_L - \check{I}_L \quad (2.50)$$

Selama mode *shoot-through zero state* tegangan induktor L_1 menggunakan rumus pada 2.12.

$$V_{L1} = V_{in} + V_{C2}$$

Dengan nilai tegangan capacitor C_2 menggunakan rumus 2.35, dengan nilai $n=1$

$$V_{L1} = V_{in} + \frac{D+2}{(1-4D)} V_{in} \quad (2.51)$$

$$V_{L1} = \left(1 + \frac{D+2}{(1-4D)}\right) V_{in}$$

Sehingga nilai induktor dapat ditentukan menggunakan rumus

$$L = \frac{V_{L1} * T_0}{\Delta I} \quad (2.52)$$

T_0 dapat dihitung dengan persamaan 2.44.

2.4.2 Induktor Terkopel Tiga Belitan

Arus mengalir pada induktor terkopel N_1, N_2 , dan N_3 pada SCL qZSI mengalami kondisi pengisian dan pengosongan tanpa menyentuh nilai nol, atau disebut *continous current mode* (CCM). Arus pada induktor terkopel akan naik secara linier pada saat keadaan *shoot through*, dan akan mengalami pengurangan arus secara linier pada saat kondisi aktif dan *null*. Jumlah perbandingan belitan induktor terkopel dirumuskan sebagai berikut

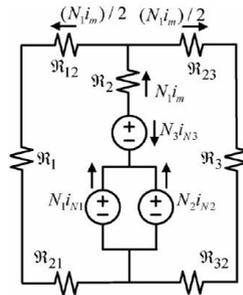
$$n = N_3/N_1 = N_3/N_2 \quad (2.53)$$

perbandingan belitan mempengaruhi tegangan keluaran pada SCL qZSI, sehingga topologi ini dapat mempunyai peningkatan yang tinggi dengan mengatur jumlah n pada induktor terkopel tersebut. Besar nilai induktansi magnetisasi L_m didapatkan dari rumus

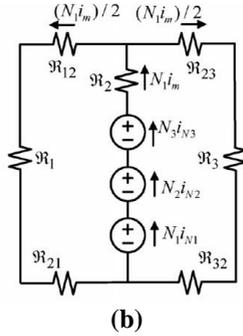
$$L_m = \frac{L_1}{3} \quad (2.54)$$

Induktor terkopel tiga belitan pada SCL qZSI harus memperhatikan *dot* antara belitan induktor N_1, N_2 , dan N_3 karena mempengaruhi arah arus magnetisasi I_m yang mengalir pada inti induktor tersebut.

Jika dilihat dari rangkaian ekuivalen reluktansi induktor terkopel yang terpasang di core EE, pada saat kondisi *shoot through*, kumparan N_1 dan N_2 diparalel dengan arah dot yang sama sehingga menghasilkan arah arus magnetisasi yang sama, tetapi kumparan N_3 menghasilkan arah arus magnetisasi yang berbeda.



(a)



Gambar 2.10a. Rangkaian Reluktansi induktor terkopel tiga belitan di inti tipe EE pada saat kondisi *shoot-through zero state* [1].

Gambar 2.9b. Rangkaian Reluktansi induktor terkopel tiga belitan di inti tipe EE pada saat kondisi *non shoot through zero state* [1].

Arah arus yang berkebalikan dari N_3 sangat penting guna untuk mengurangi besar arus magnetisasi yang mengalir didalam inti tersebut, sehingga induktor tidak mudah saturasi. Besar resultan flux yang mengalir pada inti induktor pada saat *shoot through zero state* adalah

$$N_1 I_m = N_1 i_1 + N_2 i_2 - N_3 i_3 \quad (2.55)$$

$$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 \quad (2.56)$$

Sedangkan pada saat kondisi *nonshoot through zero state*, ketiga belitan tersebut mempunyai arah arus magnetisasi yang sama, sehingga besar resultan flux yang mengalir pada saat kondisi *nonshoot through* adalah

$$N_1 I_m = N_1 i_1 + N_2 i_2 + N_3 i_3 \quad (2.57)$$

$$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 \quad (2.58)$$

2.4.3 Kapasitor

Kapasitor pada SCL qZSI digunakan untuk mengatur penyerap arus ripple induktor, dan sebagai penstabil tegangan. Tegangan kapasitor akan naik secara linier ketika mode aktif dan null, dan akan turun sekaligus mengisi arus pada induktor pada saat mode *shoot through*. Nilai kapasitor dapat dihitung dengan cara menentukan *peak to peak* tegangan

kapasitor (ΔV_C). Sehingga nilai kapasitor dapat dihitung menggunakan rumus

$$C = \frac{\bar{I}_c T_0}{\Delta V_C} \quad (2.59)$$

2.5 Stres Tegangan dan Arus Pada Tiap Komponen

Tegangan yang diterima oleh tiap komponen C_1 , C_2 , C_3 , L_1 didapat dari subbab analisa rangkaian SCL qZSI, yaitu

$$V_{C1} = \frac{(1-D)}{1-(3+n)D} V_{in}$$

$$V_{C2} = \frac{D+n+1}{(1-(3+n)D)} V_{in}$$

$$V_{C3} = \frac{(n+1)(1-D)}{1-(3+n)D} V_{in}$$

$$V_{L1} = \left(1 + \frac{D+2}{(1-4D)}\right) V_{in}$$

Stres tegangan pada induktor terkopel tiga belitan sebesar sepertiga dari nilai tegangan L_2 pada *Quasi-Z-Source Inverter*, yaitu :

$$V_{N1,2,3_SCL-qZSI} = \frac{G}{3} V_{in} \quad (2.60)$$

Sedangkan untuk besar arus yang mengalir pada L_1 dapat dicari dengan persamaan 2.47.

$$\begin{aligned} \bar{I}_L &= \frac{P}{V_{in}} \\ \widehat{I}_{Lmax} &= \bar{I}_L + \widehat{I}_L \end{aligned} \quad (2.61)$$

Untuk arus yang mengalir pada induktor terkopel, dengan menggunakan analisa KCL pada rangkaian SCL qZSI, didapatkan persamaan arus puncak pada induktor terkopel sebagai berikut

$$\widehat{I}_{N1,2} = S_D \times \left(\frac{1+2D}{6D}\right) I_{in} \quad (2.62)$$

$$\widehat{I}_{N3} = S_D \times (2I_{N1,2} - I_{in}) \quad (2.63)$$

Dengan $S_D = 1$ pada mode *shoot through* dan $S_D = 0$ pada mode *nonshoot through*.

Meskipun arus puncak yang mengalir berbeda, tetapi memiliki nilai arus rata-rata yang sama pada tiap induktornya, sehingga untuk arus rata-rata pada induktor $L_1, L_{N1}, L_{N2}, L_{N3}$ adalah sebagai berikut

$$\overline{I_{N1,2,3}} = \overline{I_L} = \frac{P}{V_{in}} \quad (2.64)$$

Sehingga dengan menggunakan analisa KCL pada rangkaian ekuivalen SCL qZSI dan persamaan 2.64. Sehingga didapatkan arus rata-rata yang mengalir pada tiap kapasitor pada persamaan berikut

$$\overline{I_{C1,2,3}} = \overline{I_L} \quad (2.65)$$

Arus puncak yang mengalir pada komponen pensakelaran pada saat keadaan *shoot through* dapat dicari dengan menggunakan KCL pada rangkaian ekuivalen SCL qZSI [], sehingga didapatkan persamaan

$$\widehat{i_{sh}} = \frac{2+4D}{3D} I_{in} \quad (2.66)$$

Besar arus puncak yang mengalir pada dioda D_{in} dapat dicari dengan menggunakan KCL pada rangkaian ekuivalen SCL qZSI, sehingga didapatkan persamaan

$$\widehat{i_{Din}} = \frac{I_{in}}{1-D} \quad (2.67)$$

Untuk arus puncak yang mengalir pada dioda D_1 dan D_2 hanya ada pada saat kondisi *shoot through*, dan ketika *nonshoot through* dioda dioperasikan *reverse* sehingga tidak ada arus yang mengalir pada dioda, sehingga ketika kondisi *shoot through* arus yang mengalir pada dioda D_1 dan D_2 sama dengan berikut

$$\begin{aligned} \widehat{I_{D1,2}} &= I_{N1,2} + I_{N3} \\ \widehat{I_{D1,2}} &= \left(\frac{1+2D}{6D}\right) I_{in} + (2I_{N1,2} - I_{in}) \end{aligned} \quad (2.50)$$

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

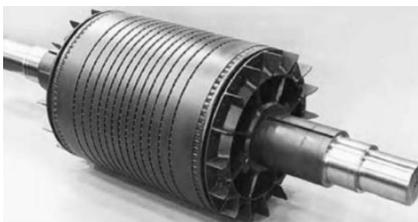
$$V_d = V_{DS} = \overline{V_{pn}} = B * V_{in} \quad (2.51)$$

Arus puncak yang mengalir pada mosfet pada saat kondisi *shoot through* dapat menggunakan persamaan berikut

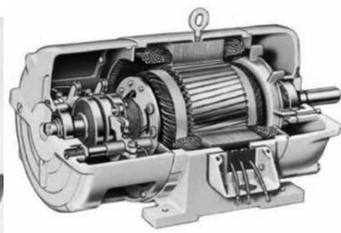
$$\widehat{I}_{sh} = \frac{2+4D}{3D} I_{in}$$

2.6 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi tiga fasa adalah sebuah motor asinkron yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Motor induksi terbagi dalam dua jenis berdasarkan rotornya yaitu cage dan wound seperti pada gambar 2.10a dan 2.10b. 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 [11].



(a)



(b)

Gambar 2.10a. Rotor Motor Induksi Jenis *Cage*

Gambar 2.11b. Rotor Motor Induksi Jenis *Wound* [11]

2.6.1 Cara Kerja Motor Induksi 3 Fasa

Apabila sumber tegangan tiga fasa diberikan pada stator maka akan muncul arus stator. Arus tersebut menimbulkan medan magnet B_s yang berputar berlawanan dengan arah jarum jam. Kecepatan medan putar dapat dirumuskan sebagai berikut

$$n_{\text{sync}} = \frac{120 f}{P} \quad (2.52)$$

Dimana f = frekuensi sistem

P = jumlah kutub pada motor induksi.

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

$$e_{\text{ind}} = (v \times B) \times l \quad (2.53)$$

Dimana v = kecepatan relatif batang terhadap medan magnet

B = intensitas fluks magnet

l = panjang konduktor.

Arus akan muncul pada rotor karena batang konduktor saling terhubung singkat. Arus mengalir pada rotor dari atas ke bawah batang konduktor. Arus pada rotor tersebut akan menghasilkan medan magnet B_R . Sehingga motor akan terjadi induksi berdasarkan persamaan berikut

$$\tau_{\text{ind}} = k B_R \times B_s \quad (2.54)$$

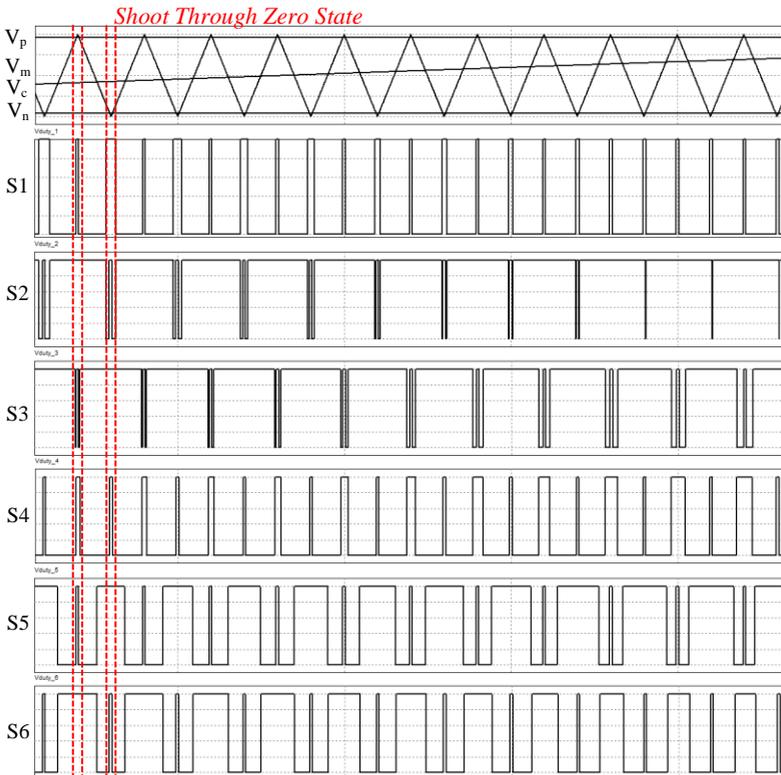
Torsi yang terinduksi berlawanan dengan arah jarum jam sehingga arah putaran motor akan bergerak berlawanan dengan arah jarum jam.

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

$$\text{slip (\%)} = \frac{n_{\text{sync}} - n_m}{n_{\text{sync}}} \times 100\% \quad (2.55)$$

2.7 Simple Boost Control

Simple boost control merupakan sinusoida PWM yang termodifikasi dengan menambahkan *shoot through state* dalam satu periode *switching*. Dibutuhkan tambahan dua sinyal DC yang digunakan untuk membuat *shoot through duty ratio* (D). Sinyal tegangan DC yang pertama berada pada sisi positif dari sinyal referensi sinusoidal (V_m), sedangkan sinyal tegangan DC yang kedua berada di sisi negatif. Ketika sinyal pembawa segitiga (V_c) lebih besar daripada sinyal DC positif (V_p), dan lebih kecil dari sinyal DC negatif (V_n), maka rangkaian akan berada dalam kondisi *shoot through* [12], [13].



Gambar 2.12. Pembangkitan Sinyal SPWM dengan Metode *Simple Boost Control*

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 3

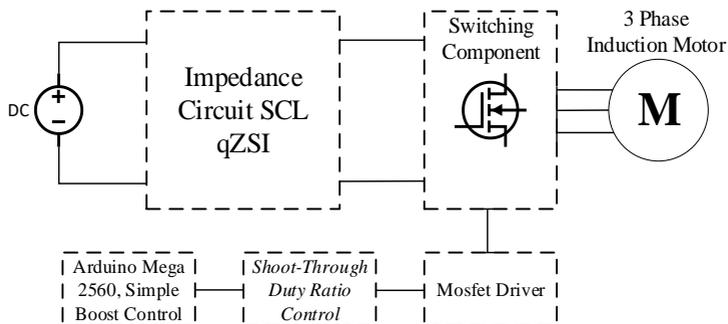
DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI INVERTER

Pada bab 3 akan dibahas mengenai proses desain, simulasi dan implementasi *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source inverter* tiga fasa dengan metode *simple boost control*. Proses yang dilakukan untuk mendesain SCL qZSI dilakukan dengan melakukan perhitungan dan menentukan komponen-komponen yang dibutuhkan untuk implementasi SCL qZSI tiga fasa dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi.

Proses yang dilakukan selanjutnya adalah mensimulasikan SCL qZSI pada aplikasi PSIM untuk memastikan desain yang dibuat dapat berkerja sesuai dengan yang diharapkan. Hasil dari desain dan simulasi akan digunakan untuk mengimplementasikan SCL qZSI tiga fasa.

3.1 Diagram Blok Sistem

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



Gambar 3.1. Diagram Blok Keseluruhan Sistem SCL qZSI Tiga Fasa untuk Suplai Motor Induksi

Dapat dilihat dari gambar 3.1 diatas bahwa sumber DC *input* dari Inverter menggunakan sumber tegangan DC yang terdapat di laboratorium konversi energi listrik B101. Sinyal *simple boost control* sebagai metode penyalan MOSFET dihasilkan dengan menggunakan Arduino Mega 2560. *Output* sinyal dari Arduino Mega 2560 terdiri dari 3 buah SPWM yang memiliki perbedaan sudut 120° dan 2 buah PWM. Sinyal SPWM dan PWM kemudian digabung menggunakan gerbang logika OR untuk mendapat sinyal *simple boost control*. Pada implementasi, nilai dari *shoot through duty ratio* pada *simple boost control* dapat di kontrol. Pengaturan *shoot through duty ratio* digunakan untuk mengatur faktor peningkatan tegangan. Output sinyal SPWM yang dihasilkan memiliki nilai ampiltudo sebesar 5 V. MOSFET akan bekerja ketika diberi sinyal PWM dengan nilai amplitudo ± 20 V sehingga dibutuhkan driver MOSFET sebagai peningkat nilai tegangan amplitudo PWM.

3.2 Motor Induksi Tiga Fasa

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

Tabel 3.1. Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa [14].

Paramater	Nilai
Tegangan Rating, V_{LL}	56 V
Arus Rating	8.25 A
Daya Keluaran	1 HP
Frekuensi	50 Hz
Jumlah Pole	4
Kecepatan	1390 rpm
Efisiensi	73 %
Faktor Daya	0.76
Inersia Motor	0.0021 kg.m^2
Kelas Isolasi (IS)	F
Index Protection (IP)	55

Motor induksi yang digunakan pada implementasi merupakan hasil desain ulang sehingga tegangan kerja motor yaitu 56 V dan dirangkai dalam hubungan delta. Pada tabel 3.1 menunjukkan bahwa rating kecepatan dari motor induksi yaitu 1390 rpm pada frekuensi 50 Hz sedangkan nilai dari faktor dayanya yaitu 0.76. Aplikasi dari *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter* dengan menggunakan metode *simple boost control* yaitu digunakan untuk mensuplai motor induksi tersebut. Parameter rangkaian ekuivalen motor induksi 3 fasa pada tabel 3.2 digunakan sebagai parameter masukan untuk simulasi desain pembebanan *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source inverter*.

Tabel 3.2. Parameter Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa [14].

Parameter	Nilai
Resistansi Stator, R1	1.0297
Reaktansi Stator, X1	1.02
Resistansi Rotor R2	0.4973
Reaktansi Motor	1.02
Reaktansi Magnetisasi, Xm	12.3771

3.3 Desain Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter dengan Metode Simple Boost Control

Desain SCL qZSI bertujuan untuk menentukan parameter awal dari SCL qZSI dengan mempertimbangkan kondisi peralatan yang ada di laboratorium dan ketersediaan komponen yang ada di pasaran untuk mempermudah proses implementasi SCL qZSI. Menentukan parameter awal *inverter* berpengaruh terhadap nilai kapasitas komponen seperti kapasitor, induktor dan nilai *shoot through duty ratio* yang digunakan sebagai control SCL qZSI. Tabel 3.3 dibawah ini merupakan parameter awal untuk mendesain SCL qZSI. Tegangan *input* dan daya *inverter* ditentukan berdasarkan sumber DC yang tersedia pada laboratorium. Dengan adanya keterbatasan alat pembebanan motor induksi dan sumber DC di laboratorium konversi energi listrik maka desain *inverter* dibuat 100 W dengan tegangan masukan 24 V.

Tabel 3.3. Spesifikasi Awal Desain SCL qZSI

Parameter	Nilai
Daya Maksimum, $P_{out\ max}$	100 Watt
Tegangan Masukan, V_{in}	24 Volt
Tegangan Keluaran Antar Fasa, V_{LL}	56 Volt
Frekuensi Output, f_o	50 Hz
Indeks Modulasi, M	0.92
<i>Shoot Through Duty Cycle</i> , D	0.08
Frekuensi Pensaklaran SPWM, f_s	10 kHz
Ripple Tegangan Kapasitor, ΔV_C	1.5%
Ripple Arus Induktor, ΔI_L	9%

3.3.1 Penentuan Rasio Konversi dan *Shoot Through Duty Ratio*

Berdasarkan persamaan (2.42) yang didapatkan melalui analisis rangkaian ekuivalen pada Bab 2 maka rasio konversi pada *inverter* bergantung pada nilai *shoot through duty ratio*. Faktor peningkatan tegangan (B) yang dibutuhkan untuk mendapatkan tegangan keluaran *line to line* sebesar 56 Vrms dan dengan menggunakan nilai indeks modulasi 0.92 maka faktor peningkatan tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.18

$$B = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{\sqrt{3}} \times \frac{2}{0.92 \cdot 90}$$

$$B = 4.33$$

nilai *shoot through duty ratio* didapatkan menggunakan persamaan 2.44

$$D = 1 - M$$

$$D = 1 - 0.92$$

$$D = 0.08$$

Jika frekuensi pensaklaran yang digunakan adalah 10 kHz, maka periode *shoot through* dapat dihitung dengan 2.44

$$D = \frac{T_o}{T}$$

$$T_o = D * T$$

$$T_o = D/f_s$$

$$T_o = 0.08/10000 = 8 \mu s$$

3.3.2 Penentuan Nilai Induktor

Nilai induktor L_1 yang dibutuhkan untuk menghasilkan nilai *ripple* pada arus induktor sebesar 9% dapat digunakan menggunakan persamaan 2.52. Pertama hitung arus pada induktor dengan menggunakan persamaan 2.47

$$\bar{I}_L = I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{100}{24} = 4.16 A$$

dengan menentukan *ripple* 9% (*peak to peak*) maka arus induktor yaitu:

$$\frac{\Delta I_L}{\bar{I}_L} = RF * I_L$$

$$\frac{\Delta I_L}{\bar{I}_L} = 9\% * 4.16 = 0.3744 A$$

Tegangan pada komponen induktor pada saat kondisi *shoot through* dapat dilihat pada persamaan 2.51.

$$V_{L1} = \left(1 + \frac{D+2}{(1-4D)}\right) V_{in}$$

$$V_{L1} = \left(1 + \frac{0.08+2}{(1-4 \times 0.08)}\right) 24$$

$$V_{L1} = 97.4 V$$

Maka dengan persamaan 2.52, nilai induktor yang dibutuhkan sebesar

$$L = \frac{V_{L1} * T_o}{\Delta I}$$

$$L = \frac{97.4 \times 8 \times 10^{-6}}{0.3744}$$

$$L = 2 \text{ mH}$$

3.3.3 Penentuan Nilai Induktor Terkopel Tiga Belitan

Penentuan nilai L_m yang dibutuhkan pada induktor terkopel dapat menggunakan persamaan 2.54.

$$\begin{aligned}L_m &= \frac{L_1}{3} \\L_m &= \frac{2 \text{ mH}}{3} \\L_m &= 660 \text{ uH}\end{aligned}$$

3.3.4 Penentuan Nilai Kapasitor

Penentuan nilai kapasitor minimum yang dibutuhkan untuk menghasilkan ripple tegangan C_1 sebesar 1.5%. Besar arus rata-rata yang mengalir pada kapasitor yaitu $\overline{I_{C_{1,2,3}}} = \overline{I_L}$, sehingga dengan menggunakan persamaan 2.59,

$$\begin{aligned}C_2 &= \frac{\overline{I_L} \times T_0}{\Delta V_C} \\C_2 &= \frac{\overline{I_L} \times T_0}{\Delta V_C} \\C_2 &= \frac{4.16 \times 8 \times 10^{-6}}{73.4 \times 1\%} \\C_2 &= 30 \text{ uF}\end{aligned}$$

Selanjutnya untuk besar kapasitor C_2 yang dibutuhkan untuk menghasilkan ripple tegangan C_2 sebesar 1.5%

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{\overline{I_L} \times T_0}{\Delta V_C} \\C_1 &= \frac{\overline{I_L} \times T_0}{\Delta V_C} \\C_1 &= \frac{4.16 \times 8 \times 10^{-6}}{32.471 \times 1.5\%} \\C_1 &= 68 \text{ uF}\end{aligned}$$

Selanjutnya untuk besar kapasitor C_2 yang dibutuhkan untuk menghasilkan ripple tegangan C_2 sebesar 1.5%

$$C_3 = \frac{\bar{I}_L \times T_0}{\Delta V_C}$$

$$C_3 = \frac{\bar{I}_L \times T_0}{\Delta V_C}$$

$$C_3 = \frac{4.16 \times 8 \times 10^{-6}}{69.941 \times 1.5\%}$$

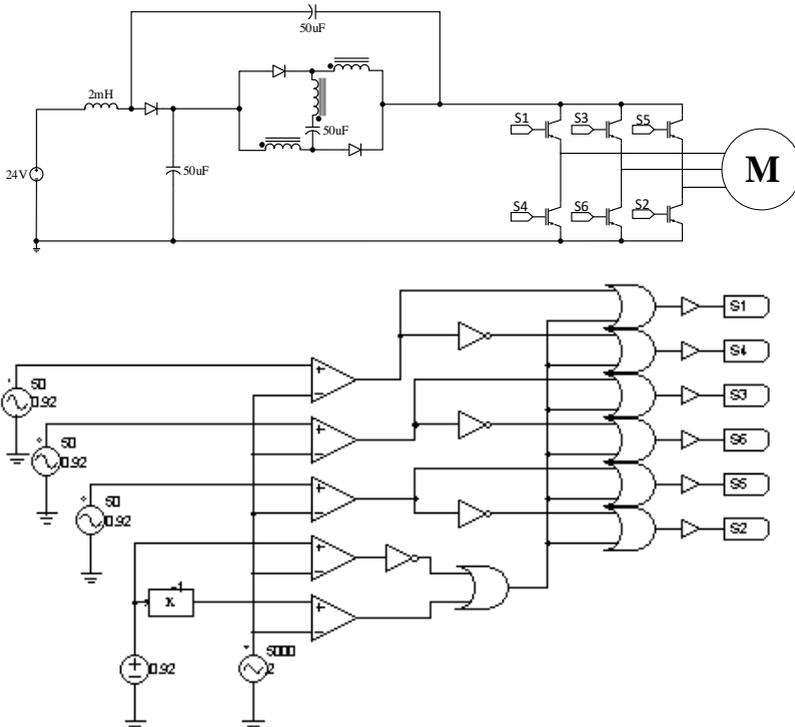
$$C_3 = 31.72 \mu F$$

3.4 Simulasi pada Kondisi *Steady State*

Simulasi SCL qZSI pada kondisi *steady state* dilakukan dengan menggunakan software PSIM, simulasi ini bertujuan untuk mengetahui bawah *inverter* bekerja sesuai dengan desain yang telah dirancang sebelumnya. Rangkaian simulasi SCL qZSI dapat dilihat pada gambar 3.2. Parameter yang digunakan dapat dilihat pada table 3.4. Metode pensaklaran yang digunakan menggunakan metode *simple boost control*.

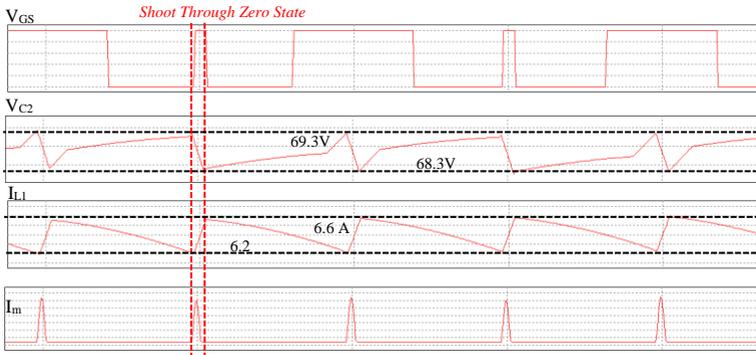
Tabel 3.4. Parameter Rangkaian Simulasi SCL qZSI Tiga Fasa

Parameter	Nilai
Tegangan masukan, V_{in}	24 V
Induktor L_1, L_2	2 mH
Kapasitor C_1, C_2	50 μF
Ripple tegangan kapasitor, $V_{\text{kapasitor}} (\Delta V_C)$	1.5 %
Ripple Arus induktor, $I_{L, \text{peak to peak}}$	9 %
Indeks modulasi, M	0.92
Shoot through duty ratio, D_o	0.08
Parameter	Nilai
Frekuensi output, f_o	50 Hz
Frekuensi pensaklaran, f_s	10 kHz
Perbandingan belitan, n	1



Gambar 3.2. Rangkaian Simulasi SCL qZSI dengan kondisi *Steady State*

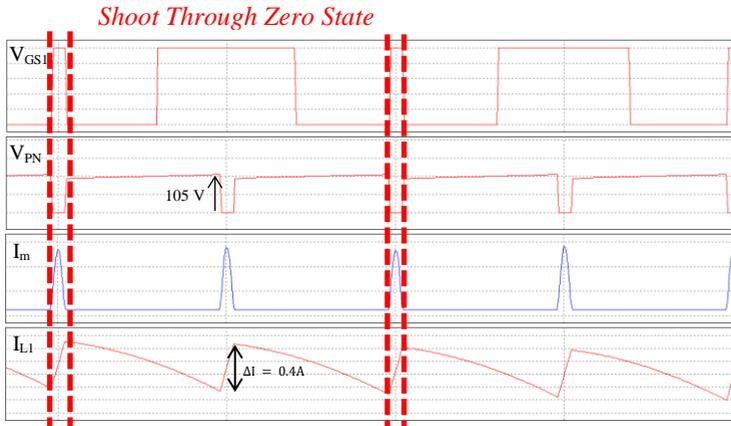
Dilihat dari hasil simulasi PSIM, pada saat SCL qZSI masuk ke mode *shoot through zero state*, maka kapasitor akan mengalami pengurangan tegangan, dan arus pada induktor L_1 dan L_m pada induktor terkopel akan naik seperti pada gambar 3.3. Pada saat SCL qZSI masuk ke mode *nonshoot through zero state*, maka kapasitor akan mengalami kenaikan tegangan dan induktor L_1 dan L_m akan mengalami penurunan arus. Arus puncak pada induktor L_1 sebesar 6.6 A dan arus minimumnya sebesar 6.2 A, sehingga besar ripple arus pada induktor 0.4A atau sebesar 9% dari arus rata ratanya.



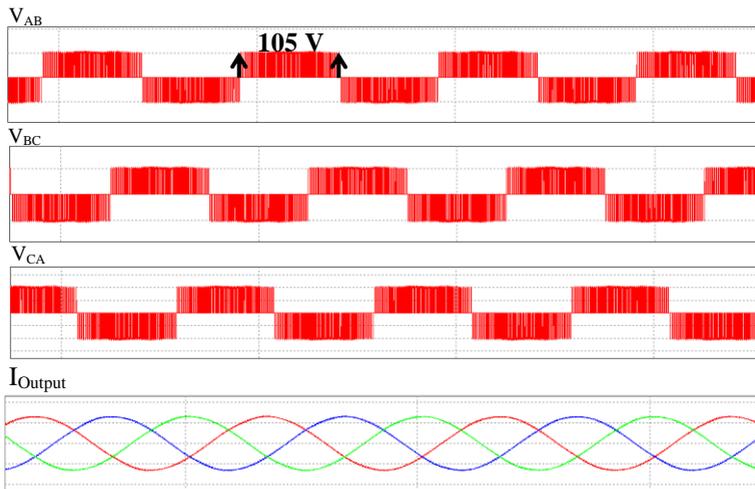
Gambar 3.3. Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} dan V_{C2} , serta arus I_{L1} dan I_m

Pada tegangan *dlink* (V_{PN}) terjadi peningkatan tegangan dibanding dengan tegangan DC masukannya. Pada saat SCL qZSI masuk ke mode *shoot through zero state*, maka nilai tegangan V_{PN} akan bernilai nol, karena komponen pensaklaran mengalami *short circuit*. Dari hasil simulasi SCL qZSI di PSIM, didapatkan besar tegangan V_{PN} sebesar 104 Volt sedangkan tegangan masukan *inverter* sebesar 24V. Sehingga terjadi adanya peningkatan tegangan (*boost factor*) pada rangkaian impedansi SCL qZSI sebesar 4.41. besarnya arus puncak pada induktor terkopel ini disebabkan karena arus pada mode *shoot through zero state* mengalir langsung ke induktor terkopel tersebut, sehingga memiliki arus puncak yang tinggi, besar arus rata-rata pada I_m yaitu 3.2A, sedangkan arus rata-rata I_{L1} sebesar 6.25A.

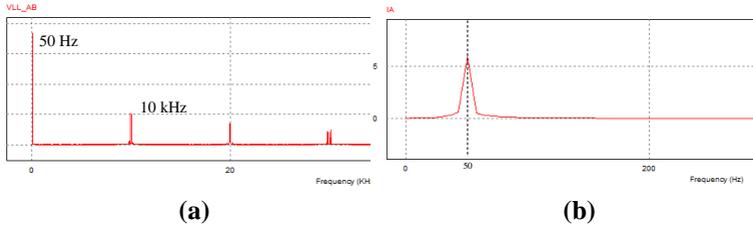
Tegangan keluaran dari SCL qZSI mempunyai frekuensi fundamental 50Hz dengan amplitude senilai 56V, serta mengandung harmonisa di frekuensi 10kHz seperti pada spektrum *fast fourier transform* ada gambar 3.6(a). Tegangan keluaran dari SCL qZSI terdistorsi oleh harmonisa sebesar 78% sedangkan untuk arus yang mengalir ke motor induksi tiga fasa terdistorsi oleh harmonisa sebesar 0.9% seperti pada gambar 3.6(b). Harmonisa yang tinggi pada tegangan keluaran dari SCL qZSI ini akibat tidak adanya filter harmonisa pada bagian keluarannya. Namun arus yang mengalir sedikit mengandung harmonisa karena SCL qZSI dibebani oleh motor induksi.



Gambar 3.4. Bentuk Gelombang Tegangan V_{GS} dan V_{PN} , serta arus I_m dan I_m



Gambar 3.5. Bentuk Gelombang Tegangan V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} dan Arus I_o



Gambar 3.6(a). Spektrum Frekuensi *Fast Fourier Transform* pada Tegangan Keluaran SCL qZSI.

Gambar 3.7(b). Spektrum Frekuensi *Fast Fourier Transform* pada Arus Keluaran SCL qZSI.

3.5 Implementasi Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter

pada tahap implementasi ini, dilakukan pembuatan alat SCL qZSI sesuai dengan desain yang sudah dibuat sebelumnya. Tahap ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana kinerja dari SCL qZSI tiga fasa dengan metode pensaklaran *simple boost control* yang diberi beban berupa motor induksi tiga fasa dengan tegangan rms rating 56 V.

3.5.1 Penentuan Kapasitor

Dari hasil perhitungan desain kapasitor, didapatkan nilai 50uF dan sesuai dengan yang tersedia di pasaran. Selanjutnya dipilih rating tegangan kapasitor sesuai dengan tegangan maksimum yang diterima tiap kapasitor, tegangan rating kapasitor yang harus dipenuhi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.41. Dengan nilai $n=1$, maka untuk C_1 adalah sebagai berikut

$$V_{C1} = \frac{(1-D)}{1-4D} V_{in}$$

$$V_{C1} = \frac{(1-0.08)}{1-4 \times 0.92} \times 24$$

$$V_{C1} = 31.18 \text{ V}$$

Untuk kapasitor C_2 sebagai berikut

$$V_{C2} = \frac{D+2}{(1-4D)} V_{in}$$

$$V_{C2} = \frac{0.08+2}{(1-4 \times 0.08)} \times 24$$

$$V_{C2} = 70.4 \text{ V}$$

Untuk kapasitor C_3 sebagai berikut

$$V_{C3} = \frac{2(1-D)}{1-4D} V_{in}$$

$$V_{C3} = \frac{2(1-0.08)}{1-4 \times 0.08} \times 24$$

$$V_{C3} = 62.24 \text{ V}$$

Kapasitor yang dipilih harus mampu menahan tegangan yang diterima oleh tiap kapasitor C_1 , C_2 , dan C_3 . Pemilihan kapasitor juga harus memperhatikan besar nilai ESR pada tiap kapasitornya guna mendapatkan efisiensi yang tinggi, sehingga dipilih kapasitor vishay MKP 50uF/800V dengan nomor seri MKP1848650084Y. Kapasitor tersebut mempunyai nilai ESR $5\text{m}\Omega$ [15] dan diharapkan mengurangi rugi rugi yang dapat mengurangi efisiensi SCL qZSI.

3.5.2 Penentuan Induktor

Pemilihan inti induktor dan penentuan kawat yang tepat merupakan hal yang sangat penting dalam pembuatan induktor untuk mengurangi rugi-rugi akibat inti yang saturasi, rugi-rugi tembaga, serta menghindari *skin effect*. Induktor L_1 dan induktor terkopel tiga belitan dibuat dengan inti dan jenis kawat yang sama. Kawat yang digunakan mempunyai ukuran 1mm yang dipilin sebanyak enam kali, agar dapat dialiri arus 12A dengan frekuensi pensakelaran 10kHz.

Inti induktor yang digunakan menggunakan tipe toroid MAGNETICS Kool Mu 0077439A7 yang memiliki spesifikasi pada tabel 3.5.

Tabel 3.5. Spesifikasi Inti Induktor MAGNETICS Kool Mu 0077439A7 [16]

Nama	Nilai
Effective magnetic path length, l_e	107 mm
Effective magnetic cross section, A_e	199 mm ²
Relative effective permeability, μ_e	60
Effective magnetic volume , V_e	21300 mm ³
Bahan	85% Besi
	9% Silikon
	6% Aluminium
Inductance Factor, A_L	$135 \pm 8\% \frac{nH}{T^2}$
Saturation magnetization, B_s	1.05 T
Gap	0 mm

Dengan nilai induktor L_1 yang dibuat adalah 2mH, sehingga jumlah belitan yang diperlukan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$N_{L_1} = \sqrt{\frac{L_1}{A_L}}$$

$$N_{L_1} = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3}}{135 \times 10^{-9}}}$$

$$N_{L_1} = 121 \text{ Belitan}$$

Dengan jumlah belitan tersebut, dapat dihitung besar fluks yang mengalir pada induktor L_1 dengan menggunakan rumus

$$\beta_{L_1} \max = \frac{L \times I_{L\max}}{A_e \times N} T$$

$$\beta_{L_1} \max = \frac{2 \times 10^{-3} \times 4.167}{199 \times 10^{-6} \times 121}$$

$$\beta_{L_1} \max = 0.34 T$$

Berdasarkan perhitungan kerapatan medan magnet (B) tersebut, maka nilai fluks yang dihasilkan masih dapat diterima oleh inti induktor yang memiliki nilai maksimum flux sebesar 1.05 T, sehingga tidak terjadi saturasi pada inti induktor tersebut.

Selanjutnya perhitungan induktor terkopel tiga belitan, dengan nilai L_m sebesar 660uH dan perbandingan jumlah belitan n sama dengan satu. Banyaknya belitan yang dibutuhkan adalah sebagai berikut

$$N_1 = \sqrt{\frac{L_m}{A_L}}$$

$$N_1 = \sqrt{\frac{0.66 \times 10^{-3}}{135 \times 10^{-9}}}$$

$$N_1 = 70 \text{ Belitan}$$

Sehingga dengan perbandingan jumlah belitan $n=1$, maka

$$1 = N_3/N_1 = N_3/N_2$$

$$N_1 = N_2 = N_3 = 70 \text{ Belitan}$$

Dengan jumlah belitan tersebut, dapat dihitung besar flux yang mengalir pada induktor terkopel tersebut berdasarkan arus maksimal yang mengalir pada tiap belitan pada saat kondisi *shoot through*. Untuk mencari nilai $\beta_1 \max$, hitung arus $I_{N1 \max}$ terlebih dahulu menggunakan persamaan 2.62.

$$I_{N1,2 \max} = S_D \times \left(\frac{1+2D}{6D}\right) I_{in}$$

$$I_{N1,2 \max} = 1 \times \left(\frac{1+2 \times 0.08}{6 \times 0.08}\right) \times 4.167$$

$$I_{N1,2 \max} = 10 \text{ A}$$

Sehingga nilai $\beta_1 \max$ dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$\beta_{N1 \max} = \frac{L_{N1} \times I_{N1 \max}}{A_e \times N_1} T$$

$$\beta_{N1 \max} = \frac{0.66 \times 10^{-3} \times 10}{199 \times 10^{-6} \times 70}$$

$$\beta_{N1 \max} = 0.4730 \text{ T}$$

Selanjutnya untuk mencari nilai $\beta_2 \max$, hitung arus $I_{N2 \max}$ terlebih dahulu menggunakan persamaan 2.62.

$$\begin{aligned} I_{N1,2 \max} &= S_D \times \left(\frac{1+2D}{6D} \right) I_{in} \\ I_{N1,2 \max} &= 1 \times \left(\frac{1+2 \times 0.08}{6 \times 0.08} \right) \times 4.167 \\ I_{N1,2 \max} &= 10 \text{ A} \end{aligned}$$

Sehingga nilai $\beta_2 \max$ dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \beta_{N2 \max} &= \frac{L_{N2} \times I_{N2 \max}}{A_e \times N_2} T \\ \beta_{N2 \max} &= \frac{0.66 \times 10^{-3} \times 10}{199 \times 10^{-6} \times 70} T \\ \beta_{N2 \max} &= 0.4730 T \end{aligned}$$

Selanjutnya untuk mencari nilai $\beta_3 \max$, hitung arus $I_{N3 \max}$ terlebih dahulu menggunakan persamaan 2.63.

$$\begin{aligned} I_{N3} &= S_D \times (2I_{N1,2} - I_{in}) \\ I_{N3} &= 1 \times (2 \times 10 - 4.167) \\ I_{N3} &= 15.833 \text{ A} \end{aligned}$$

Sehingga nilai $\beta_3 \max$ dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned} \beta_{N3 \max} &= \frac{L_{N2} \times I_{N3 \max}}{A_e \times N_3} T \\ \beta_{N3 \max} &= \frac{0.66 \times 10^{-3} \times 15.833}{199 \times 10^{-6} \times 70} \\ \beta_{N3 \max} &= 0.7501 T \end{aligned}$$

Pada kondisi *shoot through*, jumlah flux yang mengalir pada inti induktor terkopel tersebut berdasarkan persamaan 2.56. adalah

$$\begin{aligned} \phi_m &= \phi_1 + \phi_2 - \phi_3 \\ \beta_m &= \beta_1 + \beta_2 - \beta_3 \\ \beta_m &= 0.4730 + 0.4730 - 0.7501 \\ \beta_m &= 0.1959 T \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan kerapatan medan magnet (B) tersebut, maka nilai fluks yang dihasilkan oleh induktor terkopel pada mode *shoot through zero state* masih dapat diterima oleh inti induktor yang memiliki nilai maksimum flux sebesar 1.05 Gauss, sehingga tidak terjadi saturasi pada inti induktor tersebut.

3.5.3 Penentuan Dioda

Frekuensi pensakelaran yang digunakan dalam pengujian SCL qZSI adalah 10kHz, oleh karena itu dioda yang digunakan harus memiliki kemampuan *reverse recovery time* (t_{rr}) yang tinggi, t_{rr} yang dibutuhkan didapatkan dari rumus periode pensakelaran

$$t_{rr} = \frac{1}{f} = \frac{1}{10000} = 100 \text{ us}$$

Selanjutnya menentukan arus yang mengalir pada dioda tersebut, untuk arus yang mengalir pada dioda D_{in} , D_1 , dan D_2 dapat menggunakan rumus pada persamaan 2.49,

$$i_{D_{in,1,2}} = \frac{\overline{I_m}}{1 - D}$$

$$i_{D_{in,1,2}} = \frac{6.25}{1 - 0.08} = 6.8 \text{ A}$$

Setelah itu dipilih dioda dengan jenis MUR1560, dioda ini adalah jenis dioda *ultrafast switching* yang mempunyai *time reverse recovery* 60 ns, dioda ini juga memiliki tegangan breakdown sebesar 600V, dan arus maksimum 15A [17].

3.5.4 Penentuan Mosfet

Pada rangkaian SCL qZSI tiga fasa menggunakan enam buah komponen pensakelaran, komponen yang digunakan adalah mosfet. Untuk menentukan tegangan yang diterima oleh mosfet dapat dari persamaan 2.51 berikut.

$$V_d = V_{DS} = \overline{V_{pn}} = B * V_{in}$$

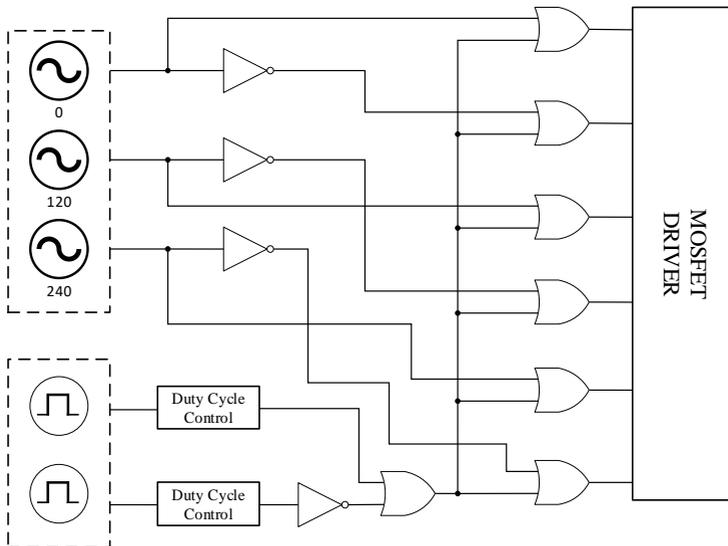
$$V_{DS} = 4.33 * 24$$

$$V_{DS} = 106 \text{ V}$$

Sehingga mosfet yang digunakan adalah jenis IRFP460 yang mampu menerima tegangan maksimum *drain* dan *source*-nya (V_{DS}) sebesar 500 V dengan arus maksimum yang dapat mengalir dari *drain* ke *source* (I_{DS}) sebesar 20A. Tegangan maksimum antara *gate* dengan *source* (V_{GS}) sebesar 20 V. Ketika mosfet IRFP460 dalam kondisi aktif, besar hambatan yang terdapat diantara *drain* dan *source* (R_{DS}) sebesar 0.27Ω [18].

3.5.5 Desain Simple Boost Control

Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter menggunakan metode *simple boost control* yang diprogram dengan Arduino Mega. Sinyal keluaran Arduino berupa tiga buah SPWM tiga fasa yang memiliki perbedaan fasa 120° dan satu buah sinyal PWM dengan frekuensi 10 kHz. Parameter yang dikontrol yaitu besar *shoot through duty ratio* sehingga tegangan keluaran SCL qZSI dapat dikontrol. SPWM dan PWM dari Arduino dimasukan ke IC logika OR dan NOT agar dapat dihasilkan *simple boost control* seperti pada blok diagram gambar 3.7.



Gambar 3.8. Diagram Blok Metode Pensakelaran *Simple Boost Control*

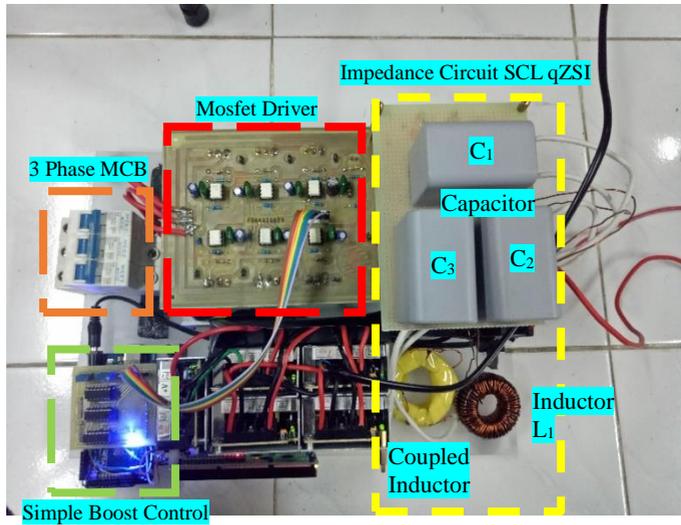
3.5.6 Hasil Implementasi Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter

Berdasarkan pada perhitungan desain pada subbab sebelumnya, maka komponen yang diperlukan untuk mengimplemtasikan SCL qZSI tiga fasa dapat dilihat pada tabel

Tabel 3.6. Parameter Komponen Implementasi SCL qZSI

Komponen Z-Source Inverter	Nilai
Induktor L_1	2 mH
Coupled induktor ($n=1$) L_m	660 μ H
Kapasitor C_1 , C_2 , C_3	50 μ F/800V
Dioda	MUR1560
Mosfet ($S1 - S6$)	IRFP460LC
Simple Boost Control dan Gate Driver	Nilai
Micro Controller	Arduino Mega
IC or Logic	74HCT04
IC not Logic	74HCT32
Gate Driver	FOD3182V
Gate Supply	12 Vdc

Komponen yang digunakan pada implementasi SCL qZSI disesuaikan dengan komponen yang dijual di pasaran. Nilai yang dipilih pada implementasi merupakan nilai yang lebih tinggi dari nilai pada desain dan perhitungan untuk mengantisipasi voltage dan current spike pada SCL qZSI.



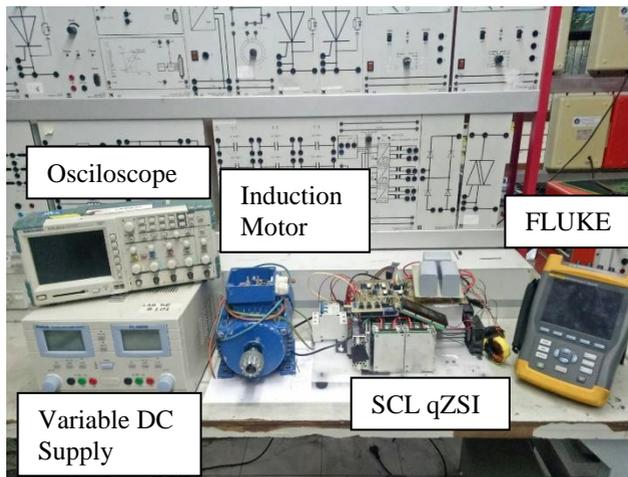
Gambar 3.9. Hasil Implementasi rangkaian *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter*.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dibahas tentang pengujian dan analisis data dari hasil implementasi *switched coupled inductor Quasi-Z-Source Inverter* tiga fasa dengan metode pensakelaran *simple boost control* untuk suplai motor induksi. Pengujian yang akan dilakukan adalah pengujian gelombang keluaran dari *simple boost control* yang berupa *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)*, pensakelaran MOSFET, bentuk arus induktor terhadap pensakelaran, analisa bentuk tegangan dan keluaran SCL qZSI, efek penambahan torsi motor induksi terhadap efisiensi SCL qZSI, pengaruh *shoot through duty ratio* terhadap peningkatan tegangan keluaran SCL qZSI, dan membandingkannya dengan simulasi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan peralatan yang telah tersedia di laboratorium. Peralatan yang digunakan yaitu sumber tegangan DC, motor induksi tiga fasa yang telah dibelit ulang dan digunakan oleh tugas akhir sebelumnya. Untuk mengamati gelombang tegangan dan arus pada SCL qZSI digunakan FLUKE *power quality analyzer*, osiloskop Tektronix TPS 2014B dengan *probe* tegangan Tektronix standar CAT II dan *probe* arus Tektronix A622.

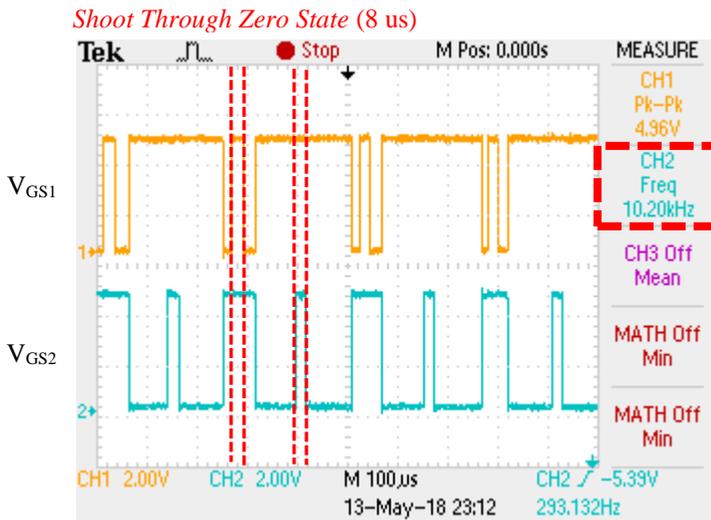


Gambar 4.1. Pengujian *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter* Tiga Fasa

4.1 Pengujian Sinyal Simple Boost Control

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang SPWM yang dihasilkan oleh *simple boost control* untuk aplikasi SCL qZSI telah sesuai dengan hasil simulasi. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan 24V DC dengan frekuensi pensakelaran sebesar 10 kHz, frekuensi *fundamental* keluaran SCL qZSI sebesar 50 Hz, indeks modulasi pensakelaran sebesar 0.92, *shoot through duty ratio* sebesar 8%, dan motor induksi tiga fasa diberi beban 0.4 Nm.

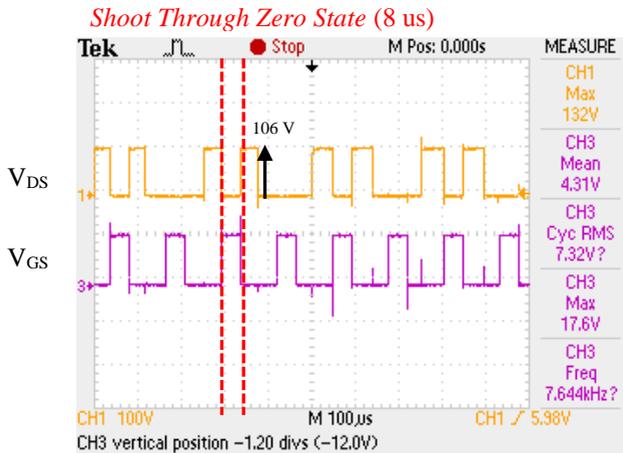
Hasil implementasi *simple boost control* dengan menggunakan mikrokontroler *arduino mega* dapat dilihat pada gambar 4.2. *sine pulse width modulation* (SPWM) yang dihasilkan mempunyai frekuensi 10.2 kHz, hasil tersebut mendekati dengan desain dan simulasi yaitu 10 kHz atau sebanding dengan 100 us. *Shoot through duty ratio* diatur hingga 8% atau pada periode 8 us.



Gambar 4.2. Hasil Pengujian Sinyal *Sinusoidal Pulse Width Modulation* dengan Metode *Simple Boost Control*

Pada periode tersebut, SCL qZSI akan mengalami hubung singkat pada komponen pensakelarnya atau masuk ke kondisi *shoot through* seperti yang dijelaskan sebelumnya pada bab 2.

Selanjutnya pengujian *simple boost control* pada MOSFET di rangkaian SCL qZSI dapat dilihat di gambar 4.3, pengujian dilakukan dengan melihat bentuk tegangan pada bagian *gate-source* (V_{GS}) dan *drain-source* (V_{DS}) pada mosfetnya. Hasil dari pengujian bentuk tegangan telah sesuai dengan desain dan simulasi. Pada saat MOSFET diberikan tegangan pada bagian *gate-source* ($V_{GS(on)}$) maka tegangan MOSFET pada bagian *drain-source* (V_{DS}) akan bernilai nol, begitu juga pada saat kondisi *shoot through*, maka V_{DS} akan bernilai nol. Pada saat MOSFET tidak diberi tegangan pada bagian *gate-source* ($V_{GS(off)}$), maka V_{DS} akan memiliki tegangan sebesar tegangan DC bus SCL qZSI (V_{PN}).

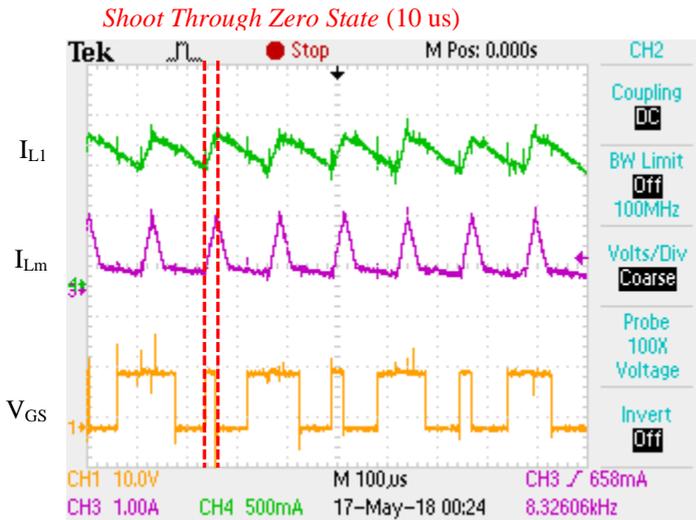


Gambar 4.3. Sinyal Hasil Pensakelaran MOSFET

Tegangan pada V_{DS} secara matematis diperoleh sebesar 106V, dan pada implementasi didapatkan tegangan V_{DS} sebesar 106 V, namun pada pengukuran di osiloskop pada gambar 4.3, pada tab pengukuran CH1 Max didapatkan tegangan 132 V dikarenakan terdapat *spike* tegangan yang muncul pada V_{DS} tersebut. Dari hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa teknik pensakelaran MOSFET dengan metode *simple boost control* telah sesuai dengan desain dan simulasi.

4.2 Pengujian Sinyal Pensaklaran pada induktor dan Kapasitor

Pengujian bentuk arus pada induktor L_1 dan induktor terkopel L_m , serta bentuk tegangan pada kapasitor terhadap pensaklaran SPWM pada MOSFET. Pengujian dilakukan dengan mengamati perubahan pengisian dan pengosongan arus induktor L_1, L_m dan tegangan kapasitor, lalu membandingkannya dengan hasil simulasi. Proses pengisian arus pada induktor L_1, L_m dan pengosongan tegangan kapasitor terjadi pada saat kondisi *shoot through zero state*, sedangkan pada kondisi *nonshoot through* terjadi pengosongan arus induktor L_1, L_m dan pengisian tegangan pada kapasitor. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan pada SCL qZSI sebesar 24 V, frekuensi fundamental keluaran SCL qZSI sebesar 50 Hz, *Shoot through duty ratio* sebesar 10%, dan motor induksi tanpa diberi pembebanan atau sebesar 0 Nm.

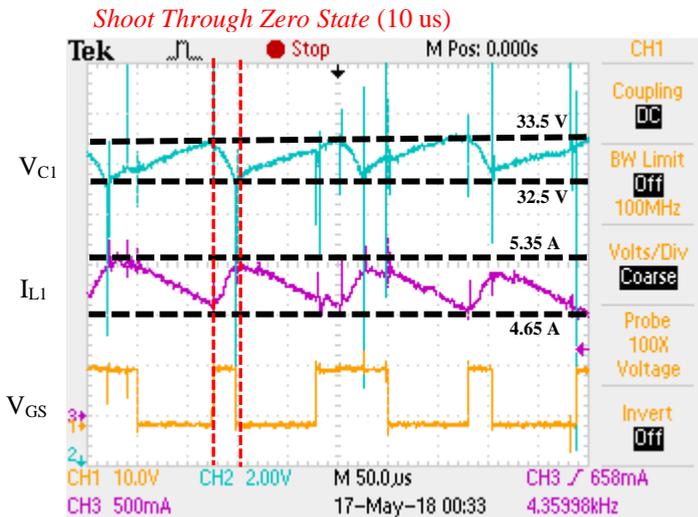


Gambar 4.4. Bentuk Sinyal Arus Induktor L_1 dan L_m Terhadap Pensaklaran

Pada gambar 4.4 menunjukkan bentuk gelombang arus pada induktor L_1 dan induktor terkopel L_m yang dibandingkan dengan bentuk tegangan bagian *gate-source* MOSFET (V_{GS}). Pada saat SCL qZSI memasuki mode *shoot through zero state*, maka akan terjadi pengisian

arus pada induktor L_1 dan L_m . Selanjutnya ketika masuk ke mode *nonshoot through* terjadi pengosongan arus induktor.

Pada kapasitor, proses pengisian tegangan terjadi pada saat kondisi *nonshoot through state*, sedangkan pada saat kondisi *shoot through* terjadi pengosongan tegangan seperti pada gambar 4.5. Proses pengosongan dan pengisian pada induktor dan kapasitor menghasilkan *ripple*, pada induktor L_1 *ripple* arus yang dihasilkan adalah 14% sedangkan pada kapasitor, *ripple* tegangan yang dihasilkan adalah 3% apabila dibandingkan dengan hasil desain dan simulasi memiliki *ripple* arus induktor sebesar 9% dan ripple tegangan kapsitor sebesar 1.5%. perbedaan ini terjadi karena saat implementasi induktor dan kapasitor yang digunakan tidak ideal. Pada kapasitor yang dialiri arus yang besar, maka akan terjadi perubahan nilai kapasitansinya sehingga *ripple* tegangan yang dihasilkan berbeda dengan desain. Ketika induktor dialiri arus yang besar, mengakibatkan timbulnya rugi-rugi panas pada konduktor induktornya, sehingga mengubah nilai permeabilitas inti induktor, perubahan ini akan mempengaruhi nilai induktansi. Selain rugi-rugi histerisis pada inti induktor tersebut yang menyebabkan *ripple* arus induktor implementasi berbeda dengan desain dan simulasi.



Gambar 4.5. Bentuk Sinyal Tegangan Kapasitor dan Arus Induktor Terhadap Pensakelaran

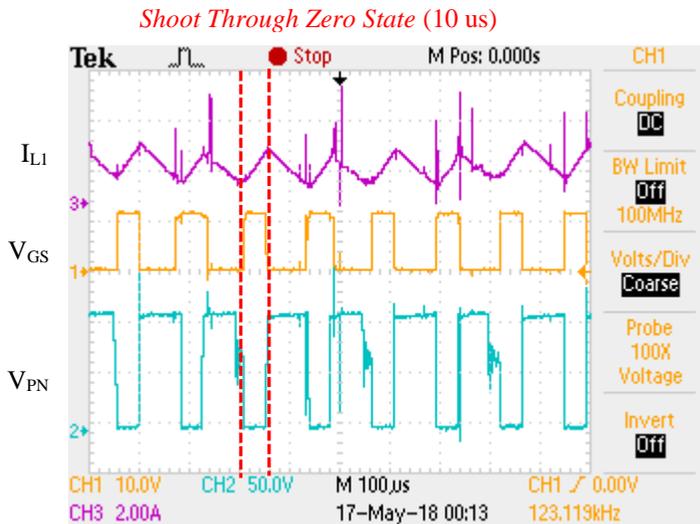
Ripple tegangan kapasitor pada implementasi juga memiliki perbedaan dengan hasil desain dan simulasi, hal ini terjadi karena kapasitor yang digunakan tidak ideal, terdapat nilai *equivalent series resistance* (ESR) yang menyebabkan rugi-rugi panas ketika kapasitor dialiri arus yang besar, rugi-rugi tersebut akan menyebabkan nilai kapasitansi berubah. Selain itu nilai kapasitansi tergantung pada frekuensi yang digunakan, pada saat pengukuran kapasitor dengan LCR meter dengan frekuensi pengujian sebesar 10 kHz, nilai kapasitansi sebesar 48 uF, sehingga ripple tegangan kapasitor akan berbeda dengan hasil pada desain dan simulasi.

Dari pengujian implementasi bentuk gelombang tegangan kapasitor dan arus induktor dapat disimpulkan bahwa hasil pengujian telah sesuai dengan karakteristik rangkaian SCL qZSI pada desain dan simulasi rangkaian SCL qZSI, namun memiliki perbedaan nilai ripple arus dan tegangan akibat ketidakidealan induktor dan kapasitor yang digunakan.

4.3 Tegangan DC Bus pada Rangkaian SCL qZSI

Pengujian hasil sinyal tegangan DC bus dan rasio peningkatan tegangan pada SCL qZSI dilakukan untuk mengetahui karakteristik serta perbandingan peningkatan tegangan input dengan tegangan DC bus. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan DC sebesar 24V, frekuensi *fundamental* keluaran SCL qZSI 50 Hz, indeks modulasi sebesar 0.92, *shoot through duty ratio* sebesar 10% dan motor induksi tidak diberi pembebanan atau sebesar 0 Nm.

Pada gambar 4.6 menunjukkan gelombang tegangan pada DC bus (V_{PN}), arus induktor I_{L1} , dan tegangan MOSFET bagian *gate-source* (V_{GS}) pada saat SCL qZSI diberikan tegangan masukan sebesar 24V dan *shoot through duty ratio* sebesar 10%. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dapat dianalisis bahwa pada saat pensakelaran masuk ke kondisi *shoot through zero state* maka tegangan pada DC bus V_{PN} akan turun menjadi 0V dikarenakan terjadinya *short circuit* pada komponen pensakelarnya, dan arus induktor L_1 akan mengalami pengisian arus. Pada saat kondisi *nonshoot through* tegangan pada DC bus V_{PN} akan naik menjadi 106 V dan terjadi pengosogan arus induktor L_1 . pada hasil perhitungan desain, tegangan V_{PN} 106 V, dan pada hasil implementasi didapatkan tegangan V_{PN} sebesar 106 V.

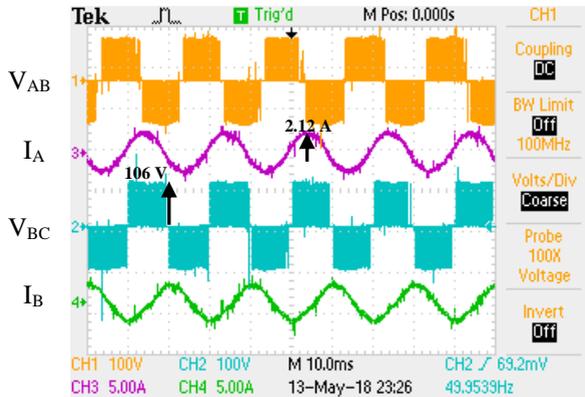


Gambar 4.6. Hasil Pengujian Sinyal Tegangan V_{PN} dan Arus Induktor Terhadap persakelaran MOSFET V_{GS}

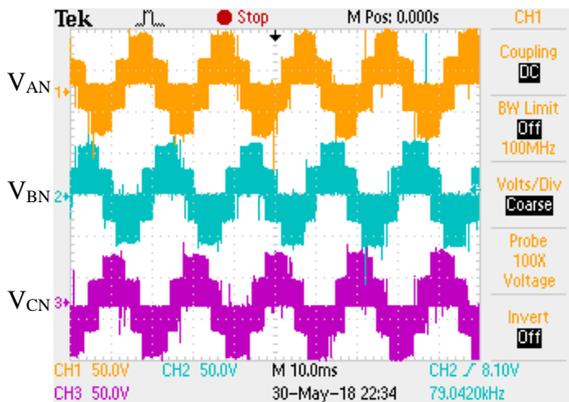
Berdasarkan hasil pengujian tegangan DC bus dan arus induktor L_1 pada implementasi SCL qZSI telah sesuai dengan karakteristik SCL qZSI di desain dan simulasi. Namun terdapat perbedaan nilai ripple arus pada induktor L_1 dikarenakan induktor yang digunakan tidak ideal.

4.4 Pengujian Gelombang Tegangan dan Arus Keluaran Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter

Pengujian arus dan tegangan keluaran pada SCL qZSI dilakukan untuk membuktikan bahwa hasil implementasi telah sesuai dengan hasil dari desain dan simulasi. Pengujian dilakukan dengan mengukur sinyal tegangan dan arus keluaran SCL qZSI, lalu dianalisa dengan melihat bentuk gelombang, perbedaan fasanya, spektrum frekuensi dan harmonisa gelombangnya. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan masukan sebesar 24 V, frekuensi keluaran *fundamental* sebesar 50 Hz, indeks modulasi sebesar 0.92, *shoot through duty ratio* sebesar 10% dan motor induksi tidak diberi beban, atau sebesar 0 Nm.



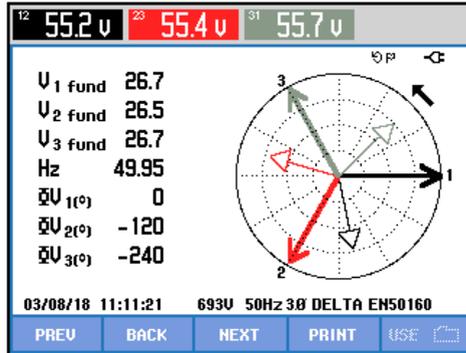
Gambar 4.7. Bentuk Sinyal Pengujian Gelombang Tegangan Antar Fasa dan Arus keluaran SCL qZSI



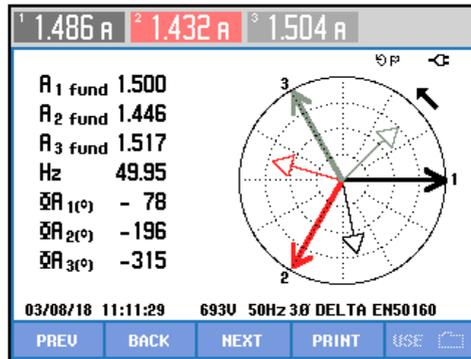
Gambar 4.8. Bentuk Sinyal Pengujian Gelombang Tegangan Antara Fasa dan Netral SCL qZSI

Hasil tegangan dan arus keluaran pada SCL qZSI dapat dilihat pada gambar 4.7. Bentuk tegangan keluaran SCL qZSI berupa SPWM yang memiliki perbedaan sudut fasa sebesar 120° antar fasanya seperti pada gambar 4.9. Sedangkan bentuk gelombang arus keluaran SCL qZSI berupa gelombang sinusoidal karena diberi pembeban motor induksi yang didalamnya terdapat kumparan seperti induktor, perbedaan sudut fasa gelombang arus dapat dilihat pada gambar 4.10. Nilai tegangan rms keluaran yang terukur pada FLUKE yaitu 55.7 V, sedangkan besar

tegangan puncak yaitu sebesar 106 V atau sama dengan tegangan pada DC bus, sedangkan untuk besar arus keluaran rms yang mengalir sebesar 1.5A dan arus puncaknya sebesar 2.12 A.

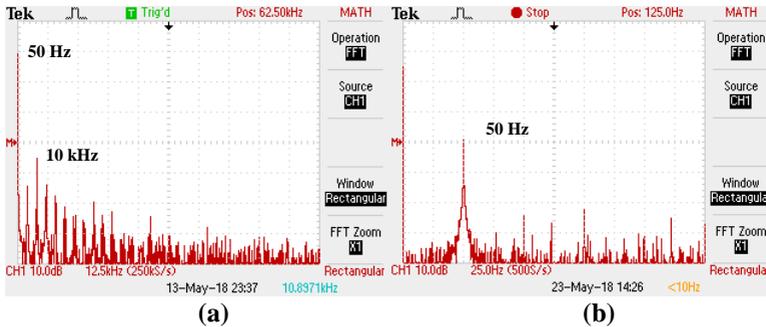


Gambar 4.9. Diagram Fasor Tegangan Keluaran SCL qZSI



Gambar 4.10. Diagram Fasor Arus Keluaran SCL qZSI

Berdasarkan Analisa *fast fourier transform* (FFT) dengan menggunakan osiloskop TEKTRONIK, pada tegangan keluaran SCL qZSI nilai terbesar berada pada frekuensi *fundamental* yaitu 50Hz dan frekuensi pensakelarnya yaitu 10 kHz yang dapat dilihat pada gambar 4.11 (a).



Gambar 4.11a. Spektrum Frekuensi pada Tegangan Keluaran SCL qZSI
Gambar 4.12b. Spektrum Frekuensi pada Arus Keluaran SCL qZSI

Sedangkan pada arus keluaran SCL qZSI hanya mengandung frekuensi *fundamental* saja yaitu 50 Hz seperti yang terdapat pada gambar 4.11 (b).

4.5 Pengujian Pembebanan SCL qZSI pada Motor Induksi Tiga Fasa

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa *switched coupled inductor Quasi-Z-Source inverter* yang disambungkan ke motor induksi tiga fasa. Pengujian SCL qZSI dengan pembebanan motor induksi dilakukan dengan cara memberikan tegangan masukan DC sebesar 24 V, indeks modulasi sebesar 0.92, frekuensi keluaran *fundamental* sebesar 50 Hz, dan mengatur *shoot through duty ratio* agar tegangan keluaran antar fasanya dijaga tetap yaitu 56 V. Pembebanan motor induksi menggunakan alat pengeraman motor di laboratorium, dan dinaikan bertahap dari torsi 0 Nm sampai 0.4 Nm.

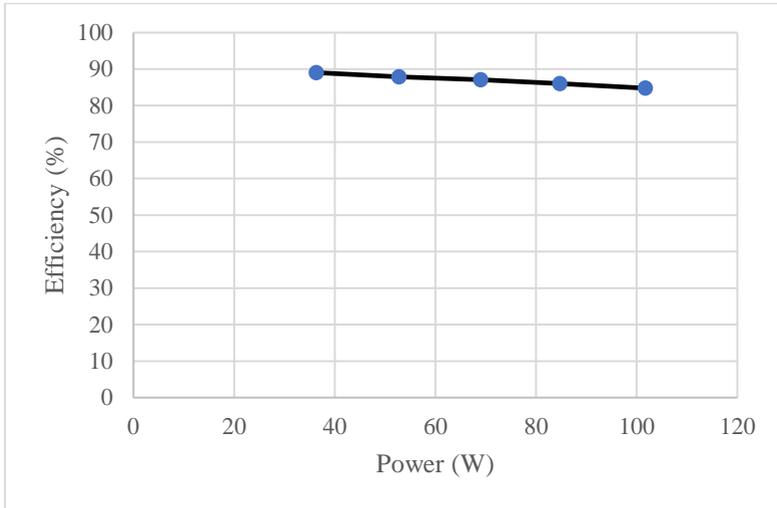
Berdasarkan hasil pengujian *switched coupled inductor Quasi-Z-Source inverter* dengan pembebanan motor induksi didapatkan data pada tabel 4.1. Pada saat motor tidak diberi beban, maka inverter membutuhkan nilai *shoot through duty ratio* sebesar 10% dan ketika torsi pembebanan dinaikan, maka untuk menjaga tegangan antar fasa keluaran tetap, maka *shoot through duty ratio* dinaikan secara bertahap.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter* pada Pembebanan Motor Induksi Tiga Fasa

V_I	I_I	D_o (%)	RPM	τ	PF	V_{LL} (V)	I_O (A)	P_I (W)	P_O (W)
24	1.7	10	1474	0	0.25	56	1.5	40	36
24	2.5	10.7	1465	0.1	0.33	56	1.65	60	53
24	3.3	12	1452	0.2	0.4	56	1.78	79	69
24	4.1	13	1442	0.3	0.46	56	1.9	98	85
24	5	14.1	1430	0.4	0.5	56	2.1	120	101

Berdasarkan hasil pengujian *switched coupled inductor Quasi-Z-Source inverter* pada saat pembebanan motor sebesar 0 Nm, *shoot through duty ratio* yang dibutuhkan yaitu 10%, sedangkan pada desain dan simulasi dibutuhkan 8%, perbedaan ini terjadi karena adanya drop pada tegangan DC bus. Ketidakidealitas komponen yang digunakan merupakan penyebab utama drop tegangan tersebut, setiap komponen yang digunakan mempunyai nilai resistansi yang menyebabkan adanya drop tegangan, *power dissipation*, dan peningkatan suhu komponen.

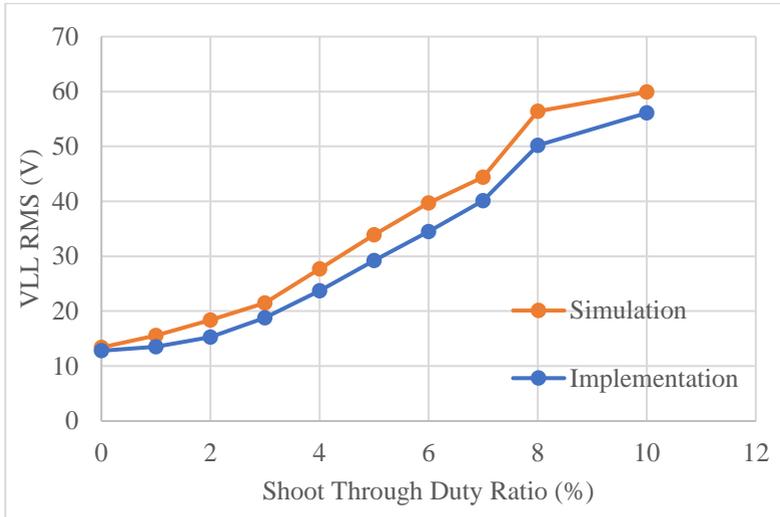
Berdasarkan hasil pengujian tersebut, dapat dilihat bahwa SCL qZSI mempunyai efisiensi rata-rata sebesar 87% dan grafik efisiensi rangkaian SCL qZSI terhadap perubahan pembebanan motor dapat dilihat pada gambar 4.13. Semakin besar pembebanan yang diberikan pada motor induksi, maka efisiensi rangkaian SCL qZSI akan semakin menurun, hal ini disebabkan meningkatnya rugi-rugi pada setiap komponennya seiring dengan meningkatnya arus yang mengalir pada komponen tersebut. Rugi-rugi yang terdapat pada rangkaian SCL qZSI antara lain *switching loss*, rugi pada inti inductor, rugi panas pada kapasitor, rugi pada dioda dan MOSFET.



Gambar 4.13. Kurva Pengaruh Pembebanan Motor Induksi Terhadap Efisiensi SCL qZSI

4.6 Pengujian Faktor Peningkatan Tegangan Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter

Pengujian faktor peningkatan tegangan bertujuan untuk mengetahui rasio peningkatan tegangan *switched coupled inductor Quasi-Z-Source inverter* dengan metode pensakelaran *simple boost control*. Faktor peningkatan tegangan (B) adalah perbandingan antara tegangan pada DC bus (V_{PN}) dengan tegangan masukan SCL qZSI (V_{in}). Secara teori semakin besar *shoot through duty ratio*, maka tegangan keluaran SCL qZSI juga akan semakin besar. Pengujian faktor peningkatan tegangan dilakukan dengan cara memberikan tegangan masukan DC sebesar 24 V secara konstan, dan menaikkan *shoot through duty ratio* secara bertahap, motor induksi tidak diberi pembebanan atau sebesar 0 Nm.



Gambar 4.14. Grafik Pengujian Faktor Peningkatan Tegangan SCL qZSI

Berdasarkan hasil implementasi, semakin besar *shoot through duty ratio* maka tegangan keluaran SCL qZSI juga akan semakin besar. Namun terdapat perbedaan antara hasil simulasi dan simulasi, grafik perbandingan hasil pengujian faktor peningkatan tegangan dapat dilihat pada gambar 4.14. Perbedaan peningkatan tegangan pada implementasi diakibatkan komponen yang digunakan seperti kapasitor, induktor, dioda, dan MOSFET mempunyai hambatan dalam. Resistansi tersebut yang membuat adanya drop tegangan pada implementasi. Semakin besar *shoot through duty ratio*, maka arus yang mengalir juga akan semakin besar, dan drop tegangan juga akan semakin besar.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 5

PENUTUP

Pada bab ini akan dibahas tentang kesimpulan dan saran dari tugas akhir yang telah disusun.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap desain, simulasi dan implementasi dari *switched coupled inductor Quasi-Z-Source inverter* dengan metode *simple boost control* untuk suplai motor induksi tiga fasa, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rangkaian *switched coupled inductor Quasi-Z-Source inverter* dengan metode pensakelaran *simple boost control* dapat meningkatkan tegangan keluaran tanpa penambahan topologi konverter lain.
2. Pada implementasi SCL qZSI dengan pembebanan motor induksi, tegangan keluaran SCL qZSI mengandung frekuensi fundamental 50 Hz dan frekuensi pensakelaran sebesar 10 kHz, sedangkan arus yang mengalir mengandung frekuensi fundamental dengan harmonisa sebesar 2%.
3. Efisiensi rata-rata SCL qZSI yaitu sebesar 87%
4. Peningkatan tegangan keluaran pada implementasi SCL qZSI berbeda dengan desain dan simulasi, karena adanya drop tegangan pada masing-masing komponen.

5.2 Saran

Berdasarkan analisa dari pengujian yang telah dilakukan, saran yang diberikan untuk perkembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Implementasi SCL qZSI sebaiknya diberi filter harmonisa pada bagian keluarannya agar tegangan yang dihasilkan hanya mengandung frekuensi fundamentalnya saja yaitu 50 Hz.
2. Penambahan rangkaian snubber pada topologi SCL qZSI dapat dilakukan untuk mengurangi *spikes* tegangan pada sisi *drain-source* MOSFET.
3. Pada pemilihan komponen sebaiknya menggunakan komponen dengan nilai resistansi yang kecil, agar dapat mengurangi besar

rugi-rugi daya, dan drop tegangan sehingga memiliki efisiensi yang tinggi.

4. Menggunakan pendingin yang baik pada komponen MOSFET dan dioda, sehingga dapat mengurangi drop tegangan dan rugi-rugi daya pada rangkaian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. F. Ahmed, H. Cha, S. H. Kim, and H. G. Kim, "Switched-Coupled-Inductor Quasi-Z-Source Inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1241–1254, 2016.
- [2] Q. Inverter, F. Ahmed, H. Cha, S. Kim, and H. Kim, "A High Voltage Gain Switched-Coupled-Inductor," pp. 480–484, 2014.
- [3] W. Zhang, "Design of Z-Source Inverter for Electric Bikes," 2017.
- [4] Y. Li, J. Anderson, F. Z. Peng, and D. Liu, "Quasi-Z-Source Inverter for Photovoltaic Power Generation Systems," *Appl. Power Electron. Conf. Expo. 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annu. IEEE*, pp. 918–924, 2009.
- [5] M. Ashari, *Desain Konverter Elektronika Daya*. INFORMATIKA, 2017.
- [6] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*. 2007.
- [7] R. D. Wicaksono, "DESAIN DAN IMPLEMENTASI Z-SOURCE INVERTER 3 FASA DENGAN METODE SIMPLE BOOST CONTROL," ITS, 2017.
- [8] 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, p. 278, 2011.
- [9] O. Ellabban and H. Abu-Rub, "Z-Source Inverter: Topology Improvements Review," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 1, pp. 6–24, 2016.
- [10] M. S. Bakar, N. A. Rahim, K. H. Ghazali, and A. H. M. Hanafi, "Z-source inverter pulse width modulation: A survey," *InECCE 2011 - Int. Conf. Electr. Control Comput. Eng.*, no. June, pp. 313–316, 2011.
- [11] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, 2003.
- [12] C. Pham, A. Shen, P. Q. Dzung, N. B. Anh, and N. X. Phu, "A Comparison of Control Methods for Z-Source Inverter," *Energy Power Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 187–195, 2012.
- [13] Y. P. Siwakoti, F. Z. Peng, F. Blaabjerg, P. C. Loh, G. E. Town, and S. Yang, "Impedance-source networks for electric power conversion part II: Review of control and modulation techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp.

- 1887–1906, 2015.
- [14] M. Qahhar, D. Candra, D. Anton, and A. D. Konstruksi, “Penurunan Rating Tegangan pada Belitan Motor Induksi 3 Fasa dengan Metode Rewinding untuk Aplikasi Kendaraan Listrik,” ITS, 2013.
 - [15] V. Roederstein, “MKP1848 DC-Link Vishay Roederstein Metallized Polypropylene Film Capacitors DC-Link Capacitor MKP1848 DC-Link CODE Vishay Roederstein MKP 1848.”
 - [16] MAGNETICS, “0077439A7 KOOL MU 060 PERM 46.7mm OD,” 2016.
 - [17] ON Semiconductor, “MUR1520 - Switch-mode Power Rectifiers,” 2014.
 - [18] VISHAY, “Product Summary Symbol Unit Test Conditions IRFP460,” 2011.

LAMPIRAN

1. Tabel Kawat Tembaga AWG

AWG	Diameter (mm)	Luas Area (mm ²)	Arus (A)
1	7,350	42,4000	119
2	6,540	33,6000	94
3	5,190	21,2000	75
4	5,190	21,2000	60
5	4,620	16,8000	47
6	4,110	13,3000	37
7	3,670	10,6000	30
8	3,260	8,3500	24
9	2,910	6,6200	19
10	2,590	5,2700	15
11	2,300	4,1500	12
12	2,050	3,3100	9,3
13	1,830	2,6300	7,4
14	1,630	2,6300	5,9
15	1,450	1,650	4,7
16	1,290	1,3100	3,7
17	1,150	1,0400	2,9
18	1,024	0,8230	2,3
19	0,912	0,6530	1,8
20	0,812	0,5190	1,5
21	0,723	0,4120	1,2
22	0,644	0,3250	0,92
23	0,573	0,2590	0,729
24	0,511	0,4120	0,577
25	0,455	0,1630	0,457
26	0,405	0,1280	0,361
27	0,361	0,1020	0,288
28	0,321	0,0804	0,226
29	0,286	0,0646	0,182
30	0,255	0,0503	0,142

2. Program Arduino

```
#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_1 128 // Offset for second-phase 120 degree
on pin1
#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(0x27, 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
//SPWM M=0.92
PROGMEM const unsigned char sine256[] =
{
128, 131, 134, 137, 140, 142, 145, 148, 151, 154, 157, 159, 162, 165,
168, 170,
173, 176, 178, 181, 184, 186, 189, 191, 194, 196, 198, 201, 203, 205,
207, 209,
211, 213, 215, 217, 219, 221, 223, 224, 226, 228, 229, 231, 232, 233,
235, 236,
237, 238, 239, 240, 241, 242, 242, 243, 244, 244, 245, 245, 245, 246,
246, 246,
246, 246, 246, 246, 245, 245, 245, 244, 244, 243, 242, 242, 241, 240,
239, 238,
237, 236, 235, 233, 232, 231, 229, 228, 226, 224, 223, 221, 219, 217,
215, 213,
211, 209, 207, 205, 203, 201, 198, 196, 194, 191, 189, 186, 184, 181,
178, 176,
173, 170, 168, 165, 162, 159, 157, 154, 151, 148, 145, 142, 140, 137,
134, 131,
128, 125, 122, 119, 116, 114, 111, 108, 105, 102, 99, 97, 94, 91, 88,
86, 83, 80,
78, 75, 72, 70, 67, 65, 62, 60, 58, 55, 53, 51, 49, 47, 45, 43, 41, 39,
37, 35, 33,
32, 30, 28, 27, 25, 24, 23, 21, 20, 19, 18, 17, 16, 15, 14, 14, 13, 12,
12, 11, 11,

```

```

11, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 11, 11, 11, 12, 12, 13, 14, 14, 15, 16,
17, 18, 19,
20, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 32, 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49,
51, 53, 55,
58, 60, 62, 65, 67, 70, 72, 75, 78, 80, 83, 86, 88, 91, 94, 97, 99, 102,
105, 108,
111, 114, 116, 119, 122, 125
};
//index modultaion = 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, 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 modultaiion = 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, 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 modultaiion = 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
//};

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

```

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

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

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

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

```

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

double dfreq;

//choose one switching frequency
//const double refclk = 62500;           // measured fs = 62.5 KHz for
FAST PWM
//const double refclk = 31372.55;       // measured fs = 31.25 KHz
for PHASE CORRECT PWM
//const double refclk = 3921.16;
const double refclk = 500;
//const double refclk = 1000;

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(20, 4);
lcd.backlight();
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);

```

```

lcd.print("Bismillah Tugas Akhir");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("3PHASE INVERTER");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("IRFANO AZMI :)");

// LCD progress bar
lcd.createChar(0, 11);
lcd.createChar(1, 12);
lcd.createChar(2, 13);
lcd.createChar(3, 14);
lcd.createChar(4, 15);
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("          ");
for (int i = 0; i < 20; i++)
{
  for (int j = 0; j < 5; j++)
  {
    lcd.setCursor(i, 3);
    lcd.write(j);
    delay(40);
  }
}
delay(400);
lcd.clear();

pinMode(LED_PIN, OUTPUT);           // sets the digital pin as
output
pinMode(TEST_PIN, OUTPUT);          // sets the digital pin as
output
pinMode(PWM_OUT_1, OUTPUT);         // PWM output /
frequency output
pinMode(PWM_OUT_2, OUTPUT);         // PWM output /
frequency output
pinMode(PWM_OUT_3, OUTPUT);         // PWM output /
frequency output

// 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 = 40;
    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("MODULATION :");
lcd.print("92 %");

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

```

```

// LCD print parameter row 3
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("SWITCH FREQ :");
lcd.print(float(2*refclk/1000));
lcd.print("kHz");

//LCD print parameter row 4
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("OUTPUT FREQ : 50");
//lcd.print(int(dfreq));
lcd.print(" Hz");

}

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

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

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

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

```

RIWAYAT HIDUP



Penulis buku penelitian berjudul “**Desain Dan Implementasi *Switched Coupled Inductor Quasi-Z-Source Inverter* Tiga Fasa dengan Metode *Simple Boost Control* untuk Suplai Motor Induksi**” bernama Dhiya Irfano Azmi. Penulis yang akrab disapa irfan ini, lahir di Surabaya pada 10 Desember 1996. Penulis hidup sederhana di Cipondoh, Tangerang, Banten bersama dengan kedua orang tua dan 2 saudara. Penulis tumbuh besar di Tangerang hingga meneruskan kuliah dan merantau di Surabaya. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDIT Asy-Syukriyyah pada tahun 2008, pendidikan tingkat menengah di SMPIT Asy-Syukriyyah pada tahun 2011, pendidikan tingkat lanjut di SMA PU Al-Bayyan Sukabumi pada tahun 2014 dan pendidikan tingkat tinggi di Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2018. Selama masa perkuliahan, penulis aktif di beberapa organisasi dan kepanitiaan, lomba karya ilmiah dan aktif sebagai Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik. Penulis mempunyai motto hidup “*fainnama'al usri yusro, innama'al usri yusro*”. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan.