TUGAS AKHIR –TE 141599

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN INVERTER SETENGAH JEMBATAN GANDA UNTUK PEMANFAATAN KOMPOR INDUKSI MENGGUNAKAN PENGATURAN FASA-BERGESER

Galih Yulianto Firmansyah
NRP 2212 100 029

Dosen Pembimbing
1. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
2. Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT-TE 141599

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DUAL HALF BRIDGE INVERTER FOR INDUCTION COOKING APPLICATION USING PHASE-SHITED CONTROL

Galih Yulianto Firmansyah
NRP 2212 100 029

Lecturer Adviser
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN
TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **"Perancangan dan Pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk Pemanfaatan Kompor Induksi Menggunakan Pengaturan Fasa-Bergeser"** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, 23 Juni 2016

Galih Yulianto Firmansyah
NRP. 2212 100 029

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN INVERTER SETENGAH JEMBATAN GANDA UNTUK PEMANFAATAN KOMPOR INDUKSI MENGGUNAKAN PENGATURAN FASA-BERGESER

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1	Dosen Pembimbing 2
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.	**Ir. Sjamsjul Anam, M.T.**
NIP. 198006032006041003	**NIP. 196307251990031002**

SURABAYA
JUNI, 2016

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN INVERTER SETENGAH JEMBATAN GANDA UNTUK PEMANFAATAN KOMPOR INDUKSI MENGGUNAKAN PENGATURAN FASA-BERGESER

Nama : Galih Yulianto Firmansyah
Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

ABSTRAK

Pemanas Induksi merupakan teknologi klasik yang saat ini masih terus berkembang di masyarakat industri ataupun domestik. Salah satu aplikasinya ialah kompor induksi. Tugas akhir ini bertujuan untuk merancang dan membuat Inverter Setengah Jembatan Ganda dengan menggunakan pengaturan fasa-bergeser untuk pemanfaatan kompor induksi. Inverter ini mampu mengubah masukan tegangan searah DC menjadi tegangan bolak-balik AC dengan frekuensi yang tinggi dan kemudian disalurkan menuju kumparan beban kompor induksi. Ketika kumparan tersebut dilewati oleh arus bolak-balik dengan frekuensi tinggi akan menghasilkan medan elektromagnetik. Medan yang timbul akan diinduksikan menuju ke bahan logam yang berada diatas kumparan beban induksi dan menghasilkan kenaikan panas pada logam tersebut. Topologi inverter ini memiliki dua unit inverter setengah jembatan, yang terdiri dari empat buah saklar dengan metode penyaklaran serupa dengan inverter setengah jembatan. Inverter ini mampu menghasilkan arus yang tinggi disebabkan frekuensi penyaklaran yang tinggi hingga orde kilohertz. Pada umumnya, untuk menghasilkan daya keluaran yang bervariasi pada inverter frekuensi tinggi, digunakan pengaturan nilai frekuensi penyaklaran yang bervariasi. Namun pada tugas akhir ini, pengaturan daya keluarannya diperoleh dengan mengatur pergeseran fasa dari PWM antar dua unit inverter setengah jembatan. Kelebihan metode pengaturan Fasa-Bergeser ialah untuk menjangkau daya keluran inverter yang luas dan juga bisa mengurangi rugi-rugi penyaklaran pada inverter dengan frekuensi tinggi.

Kata Kunci: Kompor (Pemanas) Induksi, Inverter Setengah Jembatan Ganda, Pengaturan Fasa-Bergeser, PWM.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION DUAL HALF BRIDGE INVERTER FOR INDUCTION COOKING APPLICATION USING PHASE-SHIFTED CONTROL

Galih Yulianto Firmansyah
2212 100 029

1st Lecturer Adviser : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
2nd Lecturer Adviser : Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

ABSTRACT

Induction heating is a classic technology which is currently still growing in the industrial and domestic society. One application is used in induction cooking. Purpose of this final project is to design and implementat a dual half-bridge inverter using phase-shift control for induction cooking application. This inverter is able to change the direction of the direct input voltage into an high frequency alternating output voltage and then passed through induction cooker coil load. When the coil is passed by high frequency alternating current will generate an electromagnetic field. The field that arise will be induced towards metallic materials above the induction coil load and resulting heat rise in the metal. Topology of this inverter has two half-bridge inverter unit, which has four switches with switching method as well as the half-bridge inverter. This inverter is able to produce high currents caused by high-frequency switching to the order of kilohertz. In general, to produce varying output power at high frequency inverter, setting values used by varying frequency. But in this final project, setting the output power is obtained by adjusting the phase shift between the two units of PWM half-bridge inverter. Advantage of using phase-shift control method is to reach a comprehensive inverter output power and could also reduce the switching losses in high frequency inverter.

Keywords: *Dual Half Bridge Inverter, Induction Cooking, Phase-Shift Control, PWM.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR KEASLIAN TUGAS AKHIR v
LEMBAR PENGESAHAN vii
ABSTRAK ix
ABSTRACT xi
KATA PENGANTAR. xiii
DAFTAR ISI xv
DAFTAR GAMBAR xvii
DAFTAR TABEL xix
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Permasalahan 2
1.3 Tujuan 2
1.4 Metodologi 3
1.5 Sistematika Penulisan 4
1.6 Relevansi 5
BAB 2 TEORI PENUNJANG. 7
2.1 Prinsip Pemanas Induksi 7
2.2 Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk Pemanfaatan Kompor Induksi 10
2.3 Metode Penyalaan Inverter 12
2.4 Analisa Kondisi *Steady State* 13
2.5 Analisa Pengaturan Daya Keluaran Berdasarkan Rangkaian Ekuivalen Inverter 18
BAB 3 PERANCANGAN DAN PEMBUATAN RANGKAIAN INVERTER SETENGAH JEMBATAN GANDA BESERTA METODE PENYAKLARANNYA 21
3.1 Diagram Blok Sistem 21
3.2 Perancangan Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk Pemanfaatan Kompor Induksi 22
3.2.1 Desain Beban Kompor Induksi 22
3.2.2 Perhitungan Nilai Induktor Resonan 24
3.2.3 Penentuan Nilai Kapasitor Output 25
3.2.3 Penentuan Nilai Kapasitor *Snubber* 25
3.3 Perancangan Simulasi 26
3.3.1 PWM Fasa-Bergeser 26
3.3.2 Simulasi Inverter Setengah Jembatan Ganda 27

3.4 Pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda Untuk Pemanfaatan Kompor Induksi 29
3.4.1 Pembuatan Kumparan Kompor Induksi 30
3.4.2 Pembuatan Kapasitor Output Resonan 31
3.4.3 Pembuatan Induktor Resonan 32
3.4.4 Pemilihan Komponen Kontrol dan Penyaklar Elektronik 33
BAB 4 HASIL UJICOBA DAN ANALISIS DATA 37
4.1 Pengujian Sinyal PWM Fasa-Bergeser pada Pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda..... 38
4.1.1 Pengujian Sinyal PWM Fasa-Bergeser Keluaran dari ArduinoMEGA 2560 38
4.1.2 Pengujian Sinyal PWM Fasa-Bergeser Keluaran dari Driver IGBT 40
4.2 Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran Pada Pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda 41
4.2.1 Pengujian Bentuk Gelombang Inverter Setengah Jembatan Ganda Saat Beban Penuh Atau $\phi = 0°$ 42
4.2.2 Pengujian Inverter Setengah Jembatan Ganda Pada Saat $\phi = 50°$ 43
4.3 Pengujian Tegangan Antara Terminal Collector-Emitter, VCE, Pada IGBT Akibat Pemberian Kapasitor *Snubber* 45
4.4.4 Pengujian Inverter Setengah Jembatan Ganda Menggunakan Pengaturan Fasa-Bergeser dengan adanya Perubahan Fasa PWM antar Unit Inverter .. 47
BAB 5 PENUTUP 51
5.1 Kesimpulan 51
5.2 Saran 51
DAFTAR PUSTAKA..... 53
LAMPIRAN 55
RIWAYAT HIDUP PENULIS 59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema dari ekuivalen transformer pada pemanas induksi..... 8
Gambar 2.2 Pemodelan beban pemanas induksi. 10
Gambar 2.3 Topologi Inverter Setengah Jembatan Ganda dengan tanki resonan..... 11
Gambar 2.4 Ilustrasi pensaklaran dengan menggunakan metode pengaturan Fasa-Bergeser..... 12
Gambar 2.5 Mode operasi Inverter Setengah Jembatan Ganda [3] 16
Gambar 2.6 Bentuk gelombang mode operasi Inverter Setengah Jembatan Ganda [3]..... 17
Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen dari Inverter Setengah Jembatan Ganda dalam domain frekuensi 18
Gambar 2.8 Pemodelan analisa rangkaian inverter 19
Gambar 3.1 Diagram blok sistem Inverter Setengah Jembatan Ganda .. 21
Gambar 3.2 Desain pembangkit sinyal PWM Fasa-Bergeser..... 27
Gambar 3.3 Hasil simulasi sinyal PWM Fasa-Bergeser..... 27
Gambar 3.4 Topologi simulasi Inverter Setengah Jembatan Ganda..... 28
Gambar 3.5 Bentuk gelombang hasil simulasi Inverter Setengah Jembatan Ganda..... .....… 29
Gambar 3.6 Hasil pembuatan kumparan kompor induksi …….....31
Gambar 3.7 Hasil pembuatan kapasitor output resonan 31
Gambar 3.8 Hasil pembuatan dua buah induktor resonan 33
Gambar 3.9 IGBT FGL60N100 [12]..... 34
Gambar 3.10 Arduino MEGA 2560..... 34
Gambar 3.11 Rangkaian *dual edge delay* untuk menggeser fasa PWM dari ArduinoMEGA..... 35
Gambar 3.12 Konfigurasi TLP250 [11]..... 36
Gambar 4.1 Hasil pembuatan rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk pemanfaatan kompor induksi 37
Gambar 4.2 Bentuk gelombang keluaran sinyal PWM fasa-bergeser dari ArduinoMEGA..... 38
Gambar 4.3 *Dead time* antara sinyal PWM Q1 dan Q2 keluaran dari arduinoMEGA.. 39
Gambar 4.4 Bentuk gelombang keluaran sinyal *driver* IGBT pada Q1, Q2,Q3,Q4..... 40

Gambar 4.5 *Dead time* keluaran sinyal *driver* IGBT Pada Q1, Q2, Q3,Q4. 41
Gambar 4.6 Bentuk gelombang keluaran hasil pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda saat beban penuh..... 42
Gambar 4.7 Bentuk gelombang keluaran hasil pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda saat beda fasa 50°. 44
Gambar 4.8 Perbedaan tegangan terminal *collector-emitter*,V_{CE}, pada Q1 dan Q2. 45
Gambar 4.9 Tegangan V_{CE} Pada Q3 dan Q4 akibat adanya ZVS..... 46
Gambar 4.10 Bentuk gelombang tegangan VCE pada Q3 dan Q4 saat beda fasa 50 derajat. 46
Gambar 4.11 Grafik arus keluaran, Ioutput, dari hasil perhitungan, simulasi, dan implementasi terhadap perbedaan fasa antara dua unit inverter pada rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda..... 49
Gambar 4.12 Grafik tegangan keluaran, Voutput dari hasil perhitungan, simulasi, dan implementasi terhadap perbedaan fasa antara dua unit inverter pada rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda..... 49
Gambar 4.13 Grafik perubahan beda fasa terhadap daya input Inverter Setengah Jembatan Ganda. 50
Gambar 4.14 Perbedaan suhu air pada panci saat pengujian Inverter Setengah Jembatan Ganda dalam waktu 4 menit. 50
Gambar 6 Pengukuran daya output menggunakan osiloskop. 55

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter penentuan perancangan inverter	22
Tabel 3.2	Karakteristik bahan logam metalik	23
Tabel 3.3	Hasil pengukuran untuk beban kompor induksi	24
Tabel 3.4	Hasil parameter perancangan Inverter Setengah Jembatan Ganda	26
Tabel 3.5	Perbandingan nilai parameter perhitungan dan simulasi.	30
Tabel 4.1	Parameter pengujian rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda..	41
Tabel 4.2	Pengaruh arus dan tegangan keluaran Inverter Setengah Jembatan Ganda terhadap pergeseran fasa dua unit inverter..	47

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan teknologi pemanas induksi sudah banyak digunakan pada masa perang dunia kedua [1]. Awalnya teknologi ini digunakan untuk pembuatan senjata-senjata perang negara barat. Dimana besi yang dipakai untuk bahan baku pembuatan senjata terlebih dahulu dileburkan menggunakan pemanas induksi. Namun seiring semakin cepatnya inovasi perkembangan teknologi elektronik, pemanas induksi dapat digunakan dengan teknologi yang sederhana dan lebih murah. Salah satunya bisa dilihat pada pemanfaatan kompor induksi.

Saat ini, teknologi kompor induksi masih terus dikembangkan diberbagai negara-negara maju untuk memperoleh hasil yang maksimal dan efisien. Untuk menghasilkan panas induksi yang berasal dari masukan daya listrik, teknologi ini membutuhkan topologi inverter dengan frekuensi kerja yang tinggi.

Dalam beberapa tahun terakhir, pengembangan inverter yang beroperasi pada frekuensi tinggi (*High Frequency Inverter*) untuk pemanfaatan pemanas induksi pada panci logam yang dibuat dari resistivitas rendah dan bahan permeabilitas rendah seperti aluminium dan tembaga masih terus dilakukan oleh peneiliti. Ditambah lagi dengan adanya isu pemansan global untuk menggunakan produk dengan zat/gas emisi yang rendah dan memiliki efisisensi yang tinggi, membuat perkembangan kompor induksi saat ini menjadi banyak perhatian [1]. Khusunya yang menjadi perhatian ialah membuat inverter yang bisa beroperasi pada frekuensi tinggi dengan efisiensi yang tinggi pula dan dapat meminimalisir rugi-rugi penyaklaran.

Berkurangnya rugi-rugi penyakalaran (*switching loss*), rendahnya *Electro-Magnetic Interference* (EMI), dan kerapatan daya yang tinggi merupakan contoh karakteristik inverter dengan efisiensi yang tinggi. Supaya rugi-rugi penyaklaran bisa berkurang, muncul suatu metode *soft-switching* yang diaplikasikan pada inverter frekuensi tinggi. Metode *soft-switching* pada inverter frekuensi tinggi telah dikembangkan lebih jauh dan mempunyai beberapa keuntungan seperti, biaya yang lebih murah dan pengaturan yang sederhana. Pada inverter berbasis pengaturan *Pulse-Frequency Modulation* (PFM) memiliki beberapa kelemahan yaitu keterbatasan frekuensi switching pada saat inverter

berkerja dengan daya keluaran yang rendah sampai menengah [2]. Oleh karena itu, pengaturan daya dengan jangkauan yang lebar untuk beban pemanas induksi tidak bisa dicapai. Selain itu, tingkat kerapatan daya pada inverter tersebut masih rendah jika dioperasikan dengan skema pengaturan daya yang sederhana. Sehingga memerlukan topologi pengaturan daya yang kompleks untuk bisa menjangkau pengaturan daya yang lebih jauh.

Dari beberapa permintaan dan kelemahan inverter frekuensi tinggi untuk pemanfaatan pemanas induksi, telah ditemukan inovasi baru seperti yang akan dibahas pada tugas akhir ini. Inverter yang diusulkan dapat bekerja untuk mencapai jangkauan daya keluaran yang lebar dengan cara mengubah pergeseran fasa PWM antar dua buah unit inverter setengah jembatan. Dengan adanya metode ini diharapkan rugi-rugi penyaklaran bisa dikurangi walaupun inverter beroperasi pada jangkauan daya keluaran yang lebar.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini meliputi :

1. Bagaimana cara kerja dari pemanas induksi khususnya untuk pemanfaatan kompor induksi?
2. Bagaimana cara kerja Inverter Setengah Jembatan Ganda yang bisa diaplikasikan pada kompor induksi menggunakan pengaturan fasa-bergeser ?
3. Bagaimana cara merancang dan mengimplementasikan inverter setengah jembatan ganda menggunakan pengaturan fasa-bergeser untuk pemanfaatan kompor induksi ?
4. Bagaimana perbandingan antara hasil bentuk gelombang simulasi perancangan inverter dengan hasil implementasi ?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan yang ingin dicapai melalui penelitian pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui cara kerja pemanas induksi yang diaplikasikan pada kompor induksi.
2. Mengetahui hal-hal yang berkaitan dengan Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan fasa-bergeser.
3. Merancang dan mengimplementasikan Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan fasa-bergeser sampai batas daya keluaran maksimum 250 watt.

4. Membandingkan dan menganalisa hasil implementasi Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan fasa-bergeser dengan hasil dari desain dan simulasi pada perangkat lunak.

1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1.4.1 Desain sistem

Mendesain rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda dengan memperhitungkan besarnya parameter-parameter dan nilai komponen yang dibutuhkan. Berikut merupakan parameter dan nilai komponen yang dibutuhkan dalam mendesain Inverter Setengah Jembatan Ganda adalah sebagai berikut :

1. Tegangan Masukan (V_{in})
2. Arus Masukan (V_{in})
3. Frekuensi penyaklaran (f_{sw})
4. Daya keluaran (*Po*)
5. Arus keluaran (*Io*)
6. Induktor (L)
7. Kapasitor (C)

1.4.2 Simulasi

Dengan menggunakan hasil perhitungan dari desain sistem dan pemodelan Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan fasa-bergeser dilakukan prosedur simulasi menggunakan software PSIM 9. Kemudian dari simulasi dapat ketahui tegangan keluaran (*Vo*), tegangan masukan (*Vi*), arus keluaran (*Io*), arus masukan (*Ii*) lalu dibandingkan dengan hasil yang didapat pada desain sistem. Diharapkan hasil dari desain sistem sama atau mendekati dengan hasil yang diperoleh saat simulasi.

1.4.3 Implementasi

Setelah hasil dari desain sistem yang didapat sama atau mendekati dengan hasil simulasi, maka dilakukan perancangan dan pembuatan alat. Pembuatan alat ini meliputi merangkai rangkaian yang sebelumnya berhasil dilakukan pada waktu simulasi dalam bentuk nyata menggunakan komponen elektronika. Setelah semua komponen dirangkai menjadi kesatuan system maka selanjutnya ialah melakukan

pengujian atau eksperimen alat yang telah dibuat. Metode eksperimen yang digunakan ialah dengan memeberikan tegangan masukan pada rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan fasa-bergeser. Keluaran dari inverter tersebut dihubungkan dengan beban kumparan induksi, sehingga terjadi penyaluran dan konversi energi listrik menjadi energi panas. Untuk aplikasi kompor induksi, dibutuhkan perangkat memasak berupa panci dengan dimensi umum yang ada dipasaran. Dari implementasi akan dilakukan pengukuran dan mendapatkan nilai tegangan keluaran (*Vo*), tegangan masukan (*Vi*), arus keluaran (*Io*), arus masukan (*Ii*), kemudian hasil dari implementasi ini dibandingkan dengan hasil yang didapat pada sistem desain dan simulasi. Diharapkan hasil dari implementasi sama atau mendekati dengan hasil yang diperoleh saat simulasi.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan buku Tugas Akhir ini sistematika penulisan yang digunakan adalah sebagai berikut:

BAB 1 : Pendahuluan

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi dari penelitian yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini.

BAB 2 : Teori Penunjang

Bab ini berisi tentang dasar teori mengenai Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan Fasa-Bergeser dan juga perhitungan menentukan komponen Inverter.

BAB 3 : Perancangan dan Implementasi Sistem

Bab ini berisi tentang perancangan, simulasi dan implementasi dari Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan Fasa-Bergeser

BAB 4 : Pengujian Sistem dan Analisis Data

Bab ini berisi tentang pengujian sistem baik saat menjadi satu sistem maupun saat terpisah-pisah. Selain itu pada bab ini juga berisi tentang analisis data antara data hasil simulasi pada perangkat lunak dengan data hasil pengujian rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan Fasa-Bergeser

BAB 5 : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari proses perancangan dan implementasi semua peralatan yang berkenaan dengan topologi Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan

Fasa-Bergeser. Selain itu, pada bab ini juga berisi tentang saran-saran, Sehingga bisa didapatkan performa sistem yang lebih baik lagi.

1.6 Relevansi

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

1. Dapat diaplikasikan pada kehidupan sehari-hari sebagai alat pemasak buatan dalam negeri nantinya.
2. Dapat digunakan menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk meningkatkan efisiensi dari topologi inverter tersebut terhadap perubahan daya output.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah yang serupa untuk Tugas Akhir-nya.

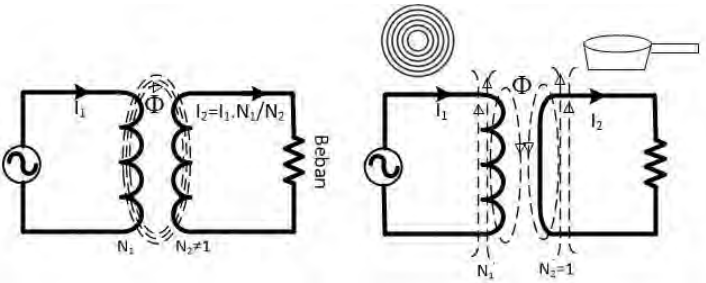
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II
TEORI PENUNJANG

2.1 Prinsip Pemanas Induksi

Pemanasan induksi *(Induction Heating)* pada prinsipnya dapat dijelaskan dengan prinsip kerja transformator. Transformator bekerja karena adanya fenomena induksi elektromagnetik antara kumparan primer yang dihubugkan denga suatu sumber tegangan dan kumparan sekunder yang biasanya dihubungkan dengan beban. Fenomena terbentuknya medan magnet diawali, ketika ada arus bolak-balik yang mengalir pada suatu kawat penghantar maka akan timbul medan magnet disekitar kawat penghantar tersebut. Intetnsitas magnetik yang timbul pada kawat berarus bisa direpresentasikan pada persamaan 2.1 atau disebut Hukum *Ampere*. Intesitas medan magnet yang dihasilkan oleh kawat berarus dan berada pada ruangan hampa dapat menghasilkan kerapatan *flux* magnet, **B**. Jika suatu permukaan yang memiliki luas penampang tertentu, ***A*** didekatkan pada suatu kumparan yang menghasilkan kerapatn magnetik, maka akan timbul fluks magnetik pada permukaan tersebut yang dapat dirumuskan pada persamaan 2.2. Misalkan, jika permukaan tersebut diganti dengan suatu kumparan yang memiliki lilitan tertentu, *N*, dan membentuk suatu rangkaian *loop* tertutup, maka akan timbul perubahan fluks antar kedua kumparan dan menyebabkan terjadinya tegangan terinduksi dari kumparan 1 ke kumparan 2. Akibatnya mengalirlah arus yang arahnya berlawanan akibat adanya induksi elektromagnetik dari kumparan yang menghasilkan medan magnet. Seperti yang terjadi pada transformator, medan elektromagnetik (pada kumparan primer) yang berubah-ubah tersebut mempengaruhi kumparan sekunder dan pada kumparan sekunder, sehingga timbul ggl induksi dan mengalir arus AC jika kumparan sekunder merupakan rangkaian tertutup.

Besarnya arus pada kumparan sekunder ditentukan dari besarnya arus pada kumparan primer dan perbandingan lilitan antara kumparan primer dan skunder (N1/N2). Ketika kumparan sekunder kita ganti dengan 1 kawat (N2=1) dan dijadikan rangkaian tertutup, maka kita akan mendapatkan nilai perbandingan lilitan yang besar dari kumparan primer dan sekunder dan akan menimbulkan arus sekunder (I2) yang besar. Prinsip inilah yang digunakan oleh pakar dan peneliti untuk menghasilkan pemanasan induksi.



Gambar 2. 1 Skema dari ekuivalen transformer pada pemanas induksi.

Persamaan dari hasil induksi medan magnet pada suatu kumparan dapat direpresantikan sebagai berikut:

$$\oint \boldsymbol{H}.\boldsymbol{dl} = \sum \boldsymbol{i} \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{\phi} = \iint_{\boldsymbol{A}} \boldsymbol{B}\,.\boldsymbol{dA} \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{N}\,.\frac{\boldsymbol{d\phi}}{\boldsymbol{dt}} \tag{2.3}$$

Dimana:
H = intensitas medan magnet (A/m)
dl = perubahan panjang kabel (m)
i = besarnya arus yang mengalir pada konduktor (A)
B = kerapatan flux (Wb/m^2)
μ_0 = permeabilitas dalam ruang hampa
μ_r = permeabilitas bahan relatif
e = Gaya gerak listrik (volt)
ϕ = fluks magnet (Weber)
dA = Luas permukaan (m2)

Jika sebuah logam didekatkan atau ditempatkan dalam suatu kumparan yang telah dialiri arus AC, maka akan timbul ggl (gaya gerak listrik) induksi pada logam tersebut. Di dalam logam tersebut terdapat banyak jalur konduksi yang terdiri dari aliran gaya gerak listrik induksi dalam jalur tertutup. Arus induksi dalam jalur tertutup ini dinamakan arus pusar (*Eddy Current*). Jika tegangan yang diinduksikan pada kumparan lilitan pemanas induksi nilainya besar, maka arus induksi

yang berputar pada permukaan logam akan juga semakin besar. Sehingga arus *eddy* yang mengalir pada permukaan logam ikut besar.

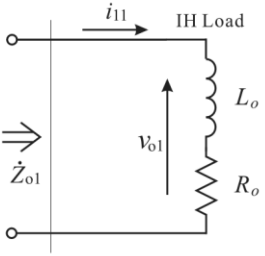
Ketika arus bolak-balik mengalir dalam suatu konduktor, distribusi arus induksi pada konduktor menjadi tidak seragam. Tetapi distribusi arus tersebut memeiliki kecenderungan mengalir terutama pada permukaan konduktor dengan kedalaman berdasarkan frekuensi dari arus induksi. Semakin tinggi frekuensi arus diberikan pada kumparan, yang lebih intensif adalah arus induksi mengalir di sekitar permukaan beban. Kepadatan arus induksi berkurang ketika mengalir lebih dekat ke pusat, Ini disebut "efek kulit" atau *"skin depth."* Hal ini dapat dibuktikan melalui persamaan:

$$\delta = \sqrt{\frac{2.\rho}{\omega.\mu}} \tag{2.4}$$

Dimana δ menyatakan nilai efek kulit, ρ menyatakan resistivitas dari konduktor, ω menyatakan frekuensi angular dari arus, dan μ menyatakan permeabilitas magnetik dari konduktor. Efek kulit yang disebabkan oleh sirkulasi arus *eddy* meniadakan arus mengalir menuju ke pusat tengah konduktor. Dengan demikian arus akan diperkuat hanya pada permukaan konduktor saja.

Sesuai dengan hukum panas joule, dimana jika ada arus yang mengalir pada suatu hambatan maka akan timbul daya yang terdisipasi menjadi panas dan dapat dinyatakan dengan persamaan $P = I^2R$. Setiap benda logam memiliki nilai resistansi yang bermacam-macam tergantung pada jenis bahan penyusun dari logam tersebut. Ketika benda logam yang telah dialiri arus *eddy* akibat terjadinya ggl induksi memiliki nilai resistansi tertentu, akan menghasilkan daya disipasi panas yang terbuang. Seiring dengan lamanya waktu, akan dihasilkan kenaikan panas pada bahan logam.

Secara ringkas, kumparan dan panci pada beban pemanas induksi dapat dimodelkan seperti pada gambar 2.2. *Ro* menunjukkan nilai hambatan ekivalen antara hambatan lilitan kumparan yang diseri dengan resistivitas bahan pada panci beban pemanas induksi. Yang mana sebagian besar, nilai hambatan dipengaruhi oleh kehadiran jenis bahan pada panci pemanas induksi. Sedangkan nilai *Lo* merepresentasikan nilai induktansi ekivalen pada lilitan kumparan beban induksi. Dimana semakin besar nilai induktansi pada lilitan, maka semakin besar pula daya yang diserap oleh lilitan sehingga ggl induksi yang ditimbulkan juga semakin besar.



Gambar 2. 2 Pemodelan beban pemanas induksi.

2.2 Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk Pemanfaatan Kompor Induksi

Topologi Inverter Setengah Jembatan Ganda tersusun atas dua buah unit rangkaian *half bridge* inverter. Rangkaian ini terdiri dari empat buah saklar elektronik yang metode penyalaannya dinyalakan secara bergantian. Inverter pada tugas akhir kali ini merupakan gabungan dari dua asimetris *half-bridge* inverter yang saling membagi beban kumparan induksi. Maksud dari membagi beban ini ialah, dua saklar yang posisinya sejajar dinyalakan secara bersamaan sehingga arah arus akan mengalir kedua saklar yang sejajar menuju beban kumparan induksi. Sehingga daya keluaran yang dihasilkan akan lebih maksimal.

Pada topologi Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk aplikasi kompor induksi diperlukan tambahan berupa komponen resonan sebgagai penghasil resonansi pada rangkaian yang dalam hal ini yaitu kombinasi dua buah induktor resonan dan sebuah kapasitor. Proses resonansi pada rangkaian digunakan untuk mengurangi rugi-rugi penyaklaran pada saklar yant terdapat pada inverter berfrekuensi tinggi. Frekuensi resonansi pada inverter biasaya berkisar antara orde 10 kHz – 100 kHz. Sesuai dengan prinsip dari pemanas induksi, yaitu dengan menghasilkan gelombang tegangan/arus bolak-balik berfrekuensi tinggi pada beban kumparan induksi, akan mengalirkan arus eddy yang lebih besar pada logam dan *"skin depth"* yang ditimbulkan lebih lebar. Sehingga panas yang dihasilkan semakin cepat dan merata.

Dengan meningkatkan nilai frekuensi switching pada rangkaian resonan akan diperoleh nilai induktansi dan kapasitansi dari sebuah induktor dan kapasitor yang lebih kecil pada suatu konverter. Konverter yang memanfaatkan frekuensi tinggi sebagai mode operasinya sering disebut *resonant converter*. Konverter resonan menggabungkan tangki

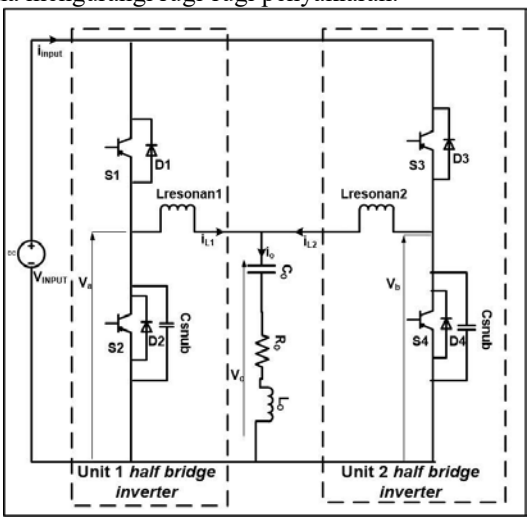
resonansi dalam konverter untuk membuat osilasi (biasanya sinusoidal) bentuk gelombang tegangan dan atau arus sehingga *zero voltage switching* (ZVS) atau *zero current switching* (ZCS) dapat terjadi pada saklar elektronik. Keuntungan utama dari konverter resonan adalah bahwa mereka dapat bekerja di berbagai frekuensi switching sangat tinggi dengan kerugian daya yang sangat rendah. Frekuensi resonan,$\boldsymbol{f_r}$ dari topologi rangkaian resonan inverter setengah jembatan ganda ini bisa dirumuskan sesuai dengan persamaan:

$$\boldsymbol{f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}} \tag{2.5}$$

dimana nilai L didapatkan menggunakan rumus:

$$\boldsymbol{L = L_O + \frac{L_r}{2}} \tag{2.6}$$

Dengan mengetahui nilai frekuensi resonan pada inverter, maka frekuensi switching pada saklar elektronik bisa divariasikan sesuai dengan karakteristik dari topologi rangkaian. Untuk rangkaian inverter setengah jembatan ganda ini, frekuensi switching yang diberikan pada switch harus lebih besar nilainya daripada frekuensi resonan dikarenakan untuk mencapai kondisi *Zero Voltage Switching* (ZVS) yang berguna mengurangi rugi-rugi penyaklaran.



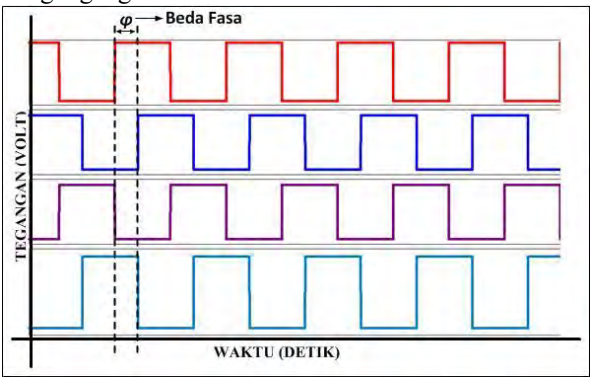
Gambar 2. 3 Topologi Inverter Setengah Jembatan Ganda dengan tanki resonan.

2.3 Metode Penyalaan Inverter

Seperti yang kita ketahui bersama, Metode PWM atau *Pulse Width Modulation* merupakan teknik pengaturan saklar elektronik yang sering digunakan dalam aplikasi topologi rangkaian pencacah. Untuk mengubah bentuk gelombang pada masukan suatu konverter digunakan metode penyaklaran dengan memanfaatkan periode waktu *on* dan waktu *off*. Hal inilah yang dilakukan metode PWM yaitu dengan mengatur periode waktu *on* dan waktu *off* suatu gelombang kotak.

Terdapat berbagai macam jenis modulasi PWM. Salah satu metode penyaklaran PWM yang digunakan untuk mengatur penyaklaran pada Inverter Setengah Jembatan Ganda adalah menggeser fasa PWM. Yang dimaksud pergeseran fasa PWM ini ialah terdapat perbedaan penyalaan antar kedua PWM. Dimana satu PWM digolongkan sebagai PWM dengan penyalaan normal, sedangkan satu PWM yang lain baru bisa dinyalakan setelah beberapa detik dari penyalaan PWM yang pertama. Contoh ilustrasi penyalaannya bisa dilihat pada gambar 2.4. Metode pergeseran fasa PWM ini tidak mengubah nilai frekuensi dan perbandingan waktu *on* dan *off* dari sinyal PWM. Hanya saja waktu penyalaan PWM yang satu dengan yang lain berbeda beberapa detik, atau dapat dikatakan terdapat waktu *delay* antara kedua PWM.

Metode *Phase-Shift* PWM ini cocok untuk digunakan pada Inverter Setengah Jembatan Ganda, karena bisa menambah kerapatan daya keluaran pada inverter. Selain itu juga dapat mengurangi rugi-rugi pada bentuk gelombang tegangan keluaran inverter.



Gambar 2.4 Ilustrasi pensaklaran dengan menggunakan metode pengaturan Fasa-Bergeser.

2.4 Analisa Kondisi *Steady State*

Pada topologi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda yang menggunakan pergeseran fasa PWM sebagai metode pengaturan daya keluarannya, dapat diperoleh dengan merubah nilai beda fasa antar PWM, sebesar $t_{\phi,}$ yang dapat didefinisikan seperti pada persamaan 2.7.

$$\emptyset = \frac{t_{\emptyset}}{T}\, x\, 360 \tag{2.7}$$

Dimana *T* merupakan periode waktu *switching* dalam detik dan $t_{\emptyset}$ merupakan waktu beda fasa dalam satuan detik. Mode transisi penyaklarannya dapat dibagi menjadi dua belas sub mode, yang akan dideskripsikan sebagai berikut:

a) Mode 1: saat $t_0 < t < t_1$ [setengah siklus positif]

Arus resonan i_{L1} dan i_{L2} mengalir dari sumber tegangan masukan DC menuju beban pemanas induksi melalui S1/Q1 dan S3/Q3

b) Mode 2 : saat $t_1 < t < t_2$ [S1/Q1 dalam mode ZVS *off*]

Tegangan Vge pada S1/Q1 bernilai nol saat $t=t_1$. Kemudian tegangan Vce pada Q1 meningkat berangsur-angsur seiring terjadinya proses *charging* pada Cs1. Namun tegangan Vce pada S2/Q2 berkurang melandai dari Vinput. Jadi pada mode ZVS *off* ini dimulai pada S1/Q1. Selama mode ini, energi induktif disimpan dalam induktor resonan, Lr1, yang mana nilainya akan lebih besar daripada energi kapasitif dari Cs1 untuk menlengkapi kerja ZVS yang disebabkan oleh resonansi tepi pada L1 dan Cs1. Jadi kondisi ZVS pada S1/Q1 dan S2/Q2 didefinisikan sebagai :

$$\frac{1}{2} L_1 i_{L1}(t_1) > \frac{1}{2}\, C_{s1}\, {V_{in}}^2 \tag{2.8}$$

Selanjutnya, tegangan Vce pada S1/Q1 selama waktu transisi penyalaan dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} V_{q1}(t) &= Z_{q1} i_{L1}\,(t_1) \sin \omega_{q1}\,\,(t - t_1) \\ &= \boldsymbol{Z_{q1} i_{L1}\,(t_1)(t - t_1)} \end{aligned} \tag{2.9}$$

Dimana $Z_{q1} = \sqrt{\frac{L_1}{C_{s1}}}\; dan\; \omega_{q1} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_{s1}}}$

c) Mode 3 : saat $t_2 < t < t_3$ [S2/Q2 dalam mode ZVZCS *on*]

Tegangan Vce pada S1/Q1 bernilai sama dengan Vin dan operasi mode ZVS on pada S1/Q1 menyilang bersamaan pada $t = t_2$, ketika tegangan Vce pada S2/Q2 menurun ke nol.

Kemudian *freewheeling* diode pada S2/Q2 dalam keadaan *forward-bias*, sehingga mode on ZVZCS terjadi pada S2/Q2.

d) Mode 4 : saat $t_3 < t < t_4$ [arus resonan L_{r1} dalam mode *reverse*]

Arus melalui S2/Q2 berganti dari D2 ke S2 pada $t = t_3$, disebabkan oleh resonansi pada inverter unit 2. Oleh karena itu, arus resonan iL1 pada inverter unit 1 berbalik melewati L1, S2/Q2, Co, dan beban. Dalam transisi ini, arus iL1 dan iL2 berada pada arah yang terbalik satu sama lain. Sehingga terjadi perbedaan nilai arus output yang menyebabkan penurunan daya output pada inverter.

e) Mode 5 : saat $t_4 < t < t_5$ [S3/Q3 dalam mode ZVS *off*]

Tegangan Vge pada S3/Q3 bernilai nol saat $t=t_4$. Kemudian tegangan Vce pada S3/Q3 meningkat berangsur-angsur seiring terjadinya proses charging pada Cs2. Namun tegangan Vce pada S4/Q4 berkurang melandai dari tegangan pada sumber. Jadi pada mode ZVS *off* dimulai pada S3/Q3. Kondisi ZVS pada S1/Q1 dan S2/Q2 didefinisikan sebagai :

$$\frac{1}{2} L_2 i_{L2}(t_4) > \frac{1}{2} C_{s2} {V_{in}}^2 \tag{2.10}$$

Selanjutnya, tegangan Vce pada S3/Q3 selama waktu transisi penyalaan dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} V_{q3}(t) &= Z_{q2} i_{L2}(t_4) \sin \omega_{q2} (t - t_4) \\ &= Z_{q2} i_{L2}(t_4)(t - t_4) \end{aligned} \tag{2.11}$$

Dimana $Z_{q2} = \sqrt{\frac{L_2}{C_{s2}}}$ *dan* $\omega_{q2} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{s2}}}$

f) Mode 6 : saat $t_5 < t < t_6$ [S4/Q4 dalam mode ZVZCS *on*]

Tegangan Vce pada S3/Q3 bernilai sama dengan Vin dan operasi mode ZVS pada S3/Q3 telah selesai pada $t = t_5$, ketika tegangan Vce pada Q4 menurun ke nol. Kemudian *freewheeling* diode D4 pada S4/Q4 dalam keadaan *forward-bias*, sehingga mode on ZVZCS terjadi pada S4/Q4.

g) Mode 7 : saat $t_6 < t < t_7$ [setengah siklus negatif]

Arus resonan i_{L2} pada inverter unit 2 secara alami berganti dari D4 menuju S4/Q4 pada $t = t_6$. Kemudian dua arus resonan i_{L1} dan i_{L2}, mengalir menuju beban pemanas induksi melalui S2/Q2 dan S4/Q4

h) Mode 8 :saat $t_7 < t < t_8$ [Q2 dalam mode ZVS *off*]

Tegangan Vge pada S2/Q2 bernilai nol saat $t=t_7$. Kemudian tegangan Vce pada S2/Q2 meningkat berangsur-angsur seiring terjadinya proses charging pada Cs1. Namun tegangan Vce pada S1/Q1 berkurang melandai dari Vinput. Jadi pada mode ZVS off ini dimulai pada S2/Q2. Jadi kondisi ZVS disebabkan resonansi tepi pada L1 dan Cs1 didefinisikan sebagai :

$$\frac{1}{2} L_1 i_{L1}(t_1) > \frac{1}{2}\, C_{s1}\, {V_{in}}^2 \tag{2.12}$$

Selanjutnya, tegangan Vce pada S3/Q3 selama waktu transisi penyalaan dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} V_{q2}(t) &= Z_{q1} i_{L1}\,(t_7) \sin \omega_{q1}\,\,(t - t_7) \\ &= Z_{q1} i_{L1}\,(t_7)(t - t_7) \end{aligned} \tag{2.13}$$

i) Mode 9 : saat $t_8 < t < t_9$ [ZVZCS dalam mode *on*]

Tegangan Vce pada S2/Q2 bernilai sama dengan Vin pada saat $t = t_8$ dan operasi mode ZVS *off* telah selesai pada S2/Q2. Seiring dengan terjadinya ZVS mode off, tegangan Vce pada S1/Q1 menurun ke nol. Kemudian *freewheeling* diode pada S1/Q1 dalam keadaan *forward-bias*, sehingga mode on ZVZCS terjadi pada S1/Q1.

j) Mode 10: saat $t_9 < t < t_{10}$ [arus resonan L_{r2} dalam mode *reverse*]

Arus melalui S1/Q1 berganti dari D1 ke S1 pada $t = t_9$, disebabkan oleh resonansi pada inverter unit 1. Sesuai dengan itu, daya mulai disalurkan menuju ke beban melalui L_{r1}, ketika arus resonan iL2 pada inverter unit 2 berbalik melewati L_{r2}, S4, Co dan beban. Dalam transisi ini, arus iL1 dan iL2 berada pada arah yang terbalik satu sama lain. Sehingga terjadi perbedaan nilai arus output yang menyebabkan penurunan daya output pada inverter.

k) Mode 11 :saat $t_{10} < t < t_{11}$ [S4/Q4 dalam mode ZVS *off*]

Tegangan Vge pada S4/Q4 bernilai nol saat $t=t_{10}$. Kemudian tegangan Vce pada S4/Q4 meningkat berangsur-angsur seiring terjadinya proses charging pada Cs2. Namun tegangan Vce pada S3/Q3 berkurang melandai dari Vinput. Jadi mode ZVS off dimulai pada S4/Q4. Kondisi ZVS disebabkan resonansi tepi pada L2 dan Cs2 didefinisikan sebagai :

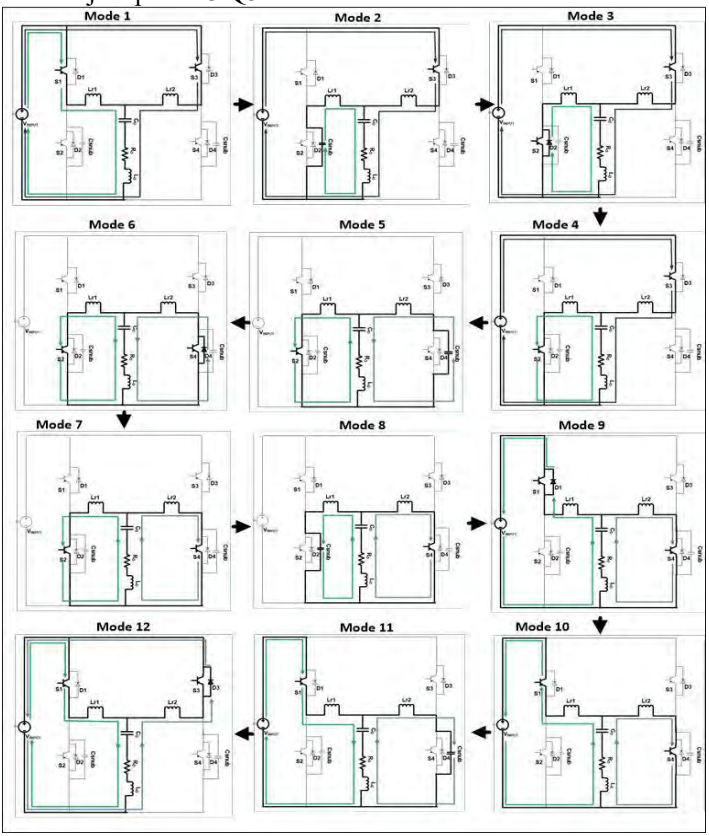
$$\frac{1}{2} L_2 i_{L2}(t_{10}) > \frac{1}{2}\, C_{s2}\, {V_{in}}^2 \tag{2.14}$$

Selanjutnya, tegangan Vce pada Q4 selama waktu transisi pemadaman dapat dirumuskan:

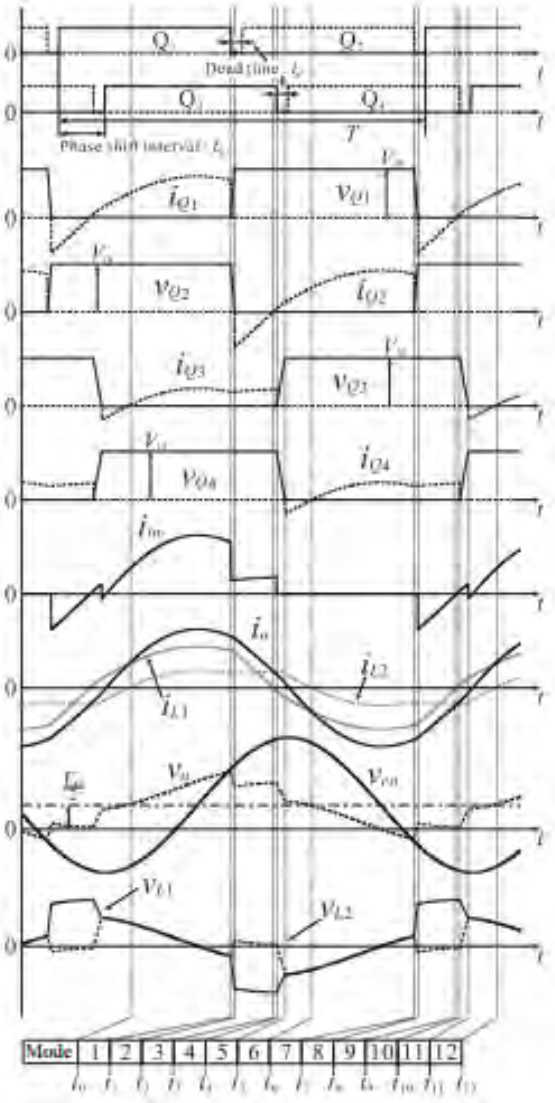
$$V_{q4}(t) = Z_{q2} i_{L2}\,(t_{10}) \sin \omega_{q2}\,(t - t_{10})$$
$$= \boldsymbol{Z_{q2} i_{L2}\,(t_{10})(t - t_{10})} \qquad (2.15)$$

l) Mode 12 : saat $t_{11} < t < t_{12}$ [ZVZCS dalam mode *on*]

Tegangan Vce pada S4/Q4 bernilai sama dengan Vin pada saat $t = t_{11}$ dan operasi mode ZVS *off* telah selesai pada S4/Q4. Seiring dengan terjadinya ZVS mode off, tegangan Vce pada S3/Q3 menurun ke nol. Kemudian *freewheeling* diode padaS3/ Q3 dalam keadaan *forward-bias*, sehingga mode on ZVZCS terjadi pada S3/Q3.



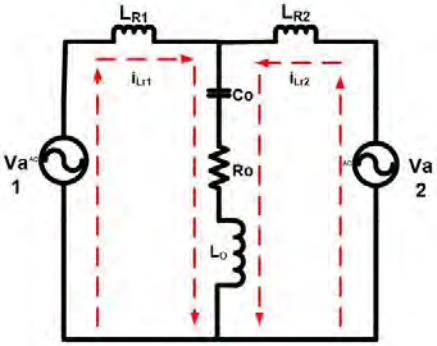
Gambar 2.5 Mode operasi Inverter Setengah Jembatan Ganda [3].



Gambar 2.6 Bentuk gelombang mode operasi Inverter Setengah Jembatan Ganda [3].

2.5 Analisa Pengaturan Daya Keluaran Berdasarkan Rangkaian Ekuivalen Inverter

Topologi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda dapat direpresentasikan dalam dua buah unit Inverter Setengah Jembatan (*dual half bridge inverter*) yang menyuplai suatu beban kompor induksi berupa lilitan kumparan dan panci untuk memasak. Rangkaian ekuivalen dari Inverter Setengah Jembatan Ganda yang direpresentasikan dalam domain frekuensi dapat digambarkan sebagai dua buah sumber tegangan ac dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi *switching* inverter seperti yang terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen dari Inverter Setengah Jembatan Ganda dalam domain frekuensi.

Vektor tegangan kompleks, $\dot{V_{a1}}$ dan $\dot{V_{a2}}$ menunjukkan komponen dasar dari $\frac{Vin}{2}$. Nilai tegangan rms dari vektor tegangan $\dot{V_{a1}}$ dan $\dot{V_{a2}}$ dapat didefinisikan dengan penjabaran menggunakan deret *Fourier*, yang secara ringkas menghasilkan perumusan:

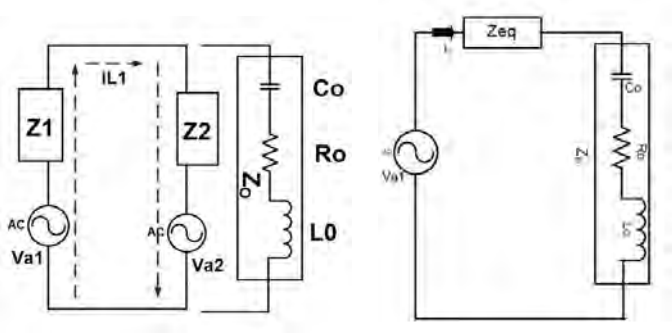
$$V = \frac{\sqrt{2}\, V_{in}}{\pi} \tag{2.16}$$

Kemudian vektor tegangan kompleks, $\dot{V_{a1}}$ dan $\dot{V_{a2}}$ dengan menggunakan pengaturan fasa-bergeser dapat dirumuskan menjadi persamaan:

$$\dot{V_{a1}} = V \tag{2.17}$$

$$\dot{V_{a2}} = Ve^{-j\emptyset} \tag{2.2}$$

Dari rangkaian ekuivalen frekuensi fundamental dapat dipecah lagi menjadi model rangkaian *Thevenin* dan prinsip *Superposisi* supaya memudahkan untuk analisa perhitungan. Permodelannya dapat dilihat pada gambar 2.8.



(a) (b)

Gambar 2.8 Pemodelan analisa rangkaian inverter. (a) Permodelan superposisi; (b)Permodelan teorema thevenin.

Menggunakan pemodelan pada gambar 2.8, maka persamaan untuk mencari arus pada induktor resonan 1 dan 2 dapat diperoleh :

$$i_{L1} = \frac{\dot{V_{a1}}}{Z_{AB}} - \frac{Z_p}{Z_{AB} + 2Z_p} . (\dot{V_{a1}} + \dot{V_{a2}}) \tag{2.19}$$

$$i_{L2} = \frac{\dot{V_{a2}}}{Z_{AB}} - \frac{Z_p}{Z_{AB} + 2Z_p} . (\dot{V_{a1}} + \dot{V_{a2}}) \tag{2.20}$$

Perhitungan pada persamaan 2.19 dan 2.20 berlaku jika, Nilai $Z_{AB} = Z_1 = Z_2$dan $Z_p = R_O + Z_{LO} + Z_{CO}$.

Dimana,

$Z_1 = \omega L_1$, Impedansi pada induktor resonan 1
$Z_2 = \omega L_2$, Impedansi pada induktor resonan 2
$Z_{CO} = \frac{1}{\omega C_O}$, Impedansi pada kapasitor output
$Z_{LO} = \omega L_O$, Impedansi pada induktor output
Z_p , Impedansi seri antara kapasitor output dan beban
Z_{AB} , Impedansi pada Induktor resonan
$\dot{V_{a1}}$, Vektor tegangan kompleks pada unit inverter 1

$\dot{V_{a2}}$, Vektor tegangan kompleks pada unit inverter 2

Setelah didapati nilai arus induktor resonan pada L1 dan L2, berdasarkan hukum *Kirchoff* 1, yaitu bahwa arus total yang masuk melalui suatu titik percabangan dalam suatu rangkaian listrik sama dengan arus total yang keluar dari titik percabangan. Selanjutnya, didapati nilai arus output yang mengalir menuju beban kompor induksi merupakan penjumlahan dari arus induktor L1 dan L2 yaitu

$$\dot{\imath_O} = \dot{\imath_{L1}} + \dot{\imath_{L2}} \tag{2.21}$$

Atau dengan mengasumsikan $i_{L1} = i_{L2}$ dan berdasarkan pemodelan teorema *Thevenin* diperoleh persamaan arus output:

$$\dot{I_O} = \frac{\dot{V_{Zo}}}{Z_p} \tag{2.22}$$

$$\dot{I_O} = \frac{Z_{AB}}{Z_{AB} + 2Z_p} . (\dot{V_{a1}} + \dot{V_{a2}}) \tag{2.23}$$

Dimana, $\dot{V_{Zo}}$ merupakan tegangan output pada impedansi seri antara kapasitor output dan beban kompor induksi

Berdasarkan persamaan arus output diatas, menandakan bahwa arus yang mengalir menuju ke beban kompor induksi dapat diatur dengan mengubah tegangan pada saklar elektronik. Sedangkan tegangan saklar tersebut dapat dicapai dengan memodulasi tegangan input sumber DC, Vin atau dengan menggeser fasa penyaklaran. Pada topologi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda ini, satu unit inverter dioperasikan dengan penyalaan normal, sedangkan unit yang lain dioperasikan dengan penyalaan dengan pergeseran fasa terhadap unit utama. Besarnya pergeseran fasa, ϕ, menentukan pula besar kecilnya arus output yang dihasilkan.

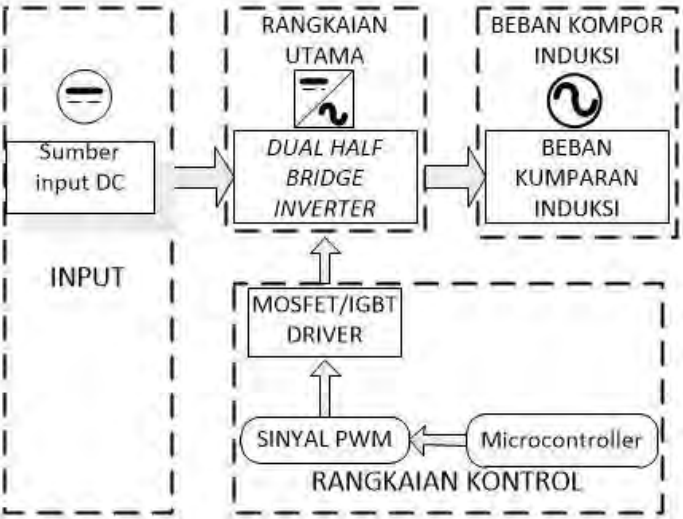
Pada model rangakaian Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan teorema *Thevenin*, dimana tegangan dua buah sumber ac diparalelkan yaitu antara $\dot{V_{a1}}$dan $\dot{V_{a2}}$, dapat dimodelkan hanya dengan sebuah sumber AC saja, $\dot{V_O}$. persamaannya dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$\dot{\boldsymbol{V_O}} = \frac{(\mathbf{1}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{j}\emptyset}).\boldsymbol{V}}{\mathbf{2}} \text{, dalam satuan volt} \tag{2.24}$$

BAB 3
PERANCANGAN DAN PEMBUATAN RANGKAIAN INVERTER SETENGAH JEMBATAN GANDA BESERTA METODE PENYAKLARANNYA

3.1. Diagram Blok Sistem

Untuk perancangan topologi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda terdiri dari empat blok sistem yaitu, sumber masukan, rangkaian utama inverter, rangkaian kontrol, dan beban kumparan induksi. Pada gambar 3.1 menunjukkan keseluruhan sistem Inverter Setengah Jembatan Ganda yang akan direaliasikan. Inverter ini bekerja dengan pengaturan sinyal PWM dari *chip microcontroller* yang selanjutnya dikuatkan sinyalnya menggunakan rangkaian IGBT *driver*. Hal ini supaya sinyal PWM dari *microcontroller* bisa digunakan untuk menyalakan saklar elektronik dalam hal ini IGBT yang ada pada rangkaian.



Gambar 3. 1 Diagram blok sistem Inverter Setengah Jembatan Ganda.

Dari sistem blok sistem gambar 3.1, menunjukkan terjadi perubahan bentuk gelombang tegangan dari tegangan searah dari sumber input menjadi tegangan bolak balik dengan nilai frekuensi keluaran

sama dengan nilai frekuensi *switching*. Sehingga dihasilkan bentuk gelombang tegangan dan arus dengan frekuensi tinggi yang kemudian dialirkan menuju ke beban pemanas induksi. Sesuai dengan prinsip dari pemanas induksi, frekuensi tinggi yang didapatkan dari inverter akan menghasilkan tegangan induksi yang lebih kuat dan arus *eddy* yang mengalir pada panci pemanas induksi lebih besar, sehingga panas dapat dihasilkan secara cepat dan maksimal.

Topologi inverter ini bekerja dengan sistem *open loop* atau sistem lingkar terbuka sehingga tidak diperlukan suatu umpan balik/*feedback* sebagai kontrolnya. Kinerja dari inverter ini sangat ditentukan dari proses pensaklarannya yang dalam hal ini menggunakan PWM dengan pengaturan fasa bergeser.

3.2. Perancangan Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk Pemanfaatan Kompor Induksi

Dalam merancang Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk pemanfaatan kompor induksi dibutuhkan perhitungan parameter komponen elektronika yang akan digunakan, supaya dapat sesuai dengan rancangan yang diinginkan. Tetapi ada beberapa parameter yang harus ditentukan terlebih dahulu tanpa melalui proses perhitungan seperti yang tertera pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter penentuan perancangan inverter.

Parameter	Nilai
Tegangan masukan (Vin)	150 volt
Frekuensi resonansi	15 kHz
Frekuensi switching	21 kHz

3.2.1. Desain Beban Kompor Induksi

Pertama yang perlu dilakukan untuk merancang suatu sistem pemanas induksi ialah menentukan seberapa besar beban dari pemanas induksi yang ingin dibuat. Hal ini dikarenakan nilai parameter beban akan berdampak pada nilai resonansi dari rangkaian inverter resonan. Nilai resonansi ini berdampak pada perhitungan parameter komponen pasif penimbul terjadinya resonansi seperti induktor dan kapasitor resonan.

Pada bab sebelumnya telah dijelaskan bahwa prinsip pemanas induksi terjadi ketika ada perubahan fluks akibat arus bolak balik dengan frekuensi tinggi yang mengalir pada kumparan beban kompor

induksi. Induksi elektromagnetik dari kumparan akan mengenai permukaan logam panci dan menghasilkan arus *eddy* sehingga terjadi kenaikan panas pada permukaan logam. Logam yang digunakan sebagai beban untuk kompor induksi tidak boleh sembarangan, dikarenakan setiap logam memiliki nilai resistansi seri ekivalen (ESR) dan permeabilitas magnetik bahan logam, μ_r, yang berbeda beda. Secara umum logam yang digunakan dalam pemanfaatan kompor induksi ialah logam besi, *stainless steel*, dan alumunium. Bahan logam tersebut dipilih karena sering ditemukan pada bahan penyusun panci pemasak. Logam besi memiliki nilai permeabilitas magnetik bahan yang paling tinggi, dibandingkan dengan dengan yang lain [4].

Pada implementasi kompor induksi kali ini dipilih panci berbahan logam *stainless steel* yang masih sangat umum dipasaran dan menurut banyak penelitian, nilai permeabilitas magnetiknya yang lebih rendah dari besi tetapi resistivitasnya bagus. Hal ini dibuktikan seperti pada tabel 3.2. Diameter panci *stainless steel* yang dipilih ialah 22cm, dikarenakan dianggap ideal untuk memasak.

Tabel 3.2 Karakteristik bahan logam metalik [4].

Material / Physical value	Iron	Non-magnetic stainless steel	Aluminum	Copper
Resistivity ρ ($\mu\Omega$m)	0.17	0.7	0.027	0.017
Relative permeability μ_s	200	1	1	1
Conventional IH cooktop	O	O	×	×
Newly developed IH cooktop	O	O	O	O

Remark; O applicable × Not applicable

Kemudian untuk perancangan lilitan beban induksi.nya digunakan desain *planar winding*. Yang dimaksud *planar winding* ialah lilitan yang dililit memutar mengelilingi tiap hasil putaran. Desain untuk kumparan kompor induksi yang digunakan untuk rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda ini, terbuat dari *magnetic wire* yang biasa digunakan untuk melilit kumparan trafo dengan spesifikasi sebagai berikut:

Diameter kabel	0.5 mm
Banyak lilitan kumparan	20 lilitan kabel

Diameter lilitan	3 mm
Panjang lilitan	10 meter

Supaya kumparan beban kompor induksi ini dapat menghasilkan induksi elektromagnetik yang maksimal dan tahan terhadap panas akibat adanya *Joule Effect*, maka diperlukan bahan penyususn tambahan kumparan induksi. Diantaranya ialah batang ferrit dan isolasi kumparan seperti yang dikutip pada referensi[5].

Setelah kumparan telah dibuat, maka untuk mengetahui nilai ekuivalen resistansi dan induktansi beban kompor induksi ini dilakukan pengukuran menggunakan LCR Sanwa 700. Pengukuran parameter resistansi dan induktansi ini dilakukan dengan menaruh panci *stainless steel* di atas kumparan induksi yang telah diberi isolasi. Metode pengukuran ini didasarkan pada nilai estimasi resistansi R_O dan induktansi L_O ekuivalen beban kompor induksi. Berdasarkan teori yang ada bahwa induksi elektromagnetik pada pemanas induksi disebabkan dari repersentasi transformator antara kumparan pemanas induksi dan panci berbahan logam. Dari hasil pengukuran didapatkan nilai induktansi dan resistansi ekuivalen seperti pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Hasil pengukuran untuk beban kompor induksi.

Parameter Ekuivalen	Frekuensi Pengukuran	
	10 kHz	100 kHz
Resistansi/ESR (Ω)	2,15	7,942
Induktansi (μH)	59,23	27,51

Berdasarkan data pengukuran diatas, dipilih data nilai resistansi dan induktansi ekivalen yang mendekati nilai frekuensi resonan inverter. Dengan demikian, dipilihlah pengukuran pada frekuensi 10 kHZ dan didapatkan nilai resistansi dan induktansi ekuivalen masing-masing, R_O = 2,15 Ω dan L_O = 59,23 μH.

3.2.2. Perhitungan Nilai Induktor Resonan

Pada topologi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda, nilai induktor resonan pada masing-masing keluaran dua buah unit inverter dapat dihitung melalui persamaan 2.6. Dimana nilai kedua induktor resonan adalah sama. Persamaan tersebut diperoleh menggunakan penurunan rumus frekuensi resonan yang kemudian diperoleh nilai induktor sebagai berikut:

$$Lr = 2\left(\frac{1}{\omega_r{}^2 C_O} - 1\right) \quad (3.1)$$

$$L_r = 2\left(\frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_o} - 1\right)$$

$$L_r = 100uH$$

3.2.3. Perhitungan Nilai Kapasitor Output

Kapasitor output pada topologi Inverter Setengah Jembatan Ganda memiliki fungsi utama yaitu untuk mengatur nilai resonansi pada rangkaian. Selain itu kapasitor ini juga bisa difungsikan untuk mengurangi adanya tegangan *spike* dan menambah kompensasi daya aktif akibat daya reaktif berlebih dari kumparan pemanas induksi. Nilai kapasitansi pada kapasitor dapat dihitung berdasarkan nilai frekuensi *switching* (f_s) dan nilai induktor beban induksi seperti pada persamaan 3.2. Sehingga didapat nilai kapasitor sebagai berikut:

$$C_O = \frac{1}{\omega_s{}^2 . L_O} \quad (3.2)$$

$$C_O = \frac{1}{2.\pi.f_s.L_o}$$

$$C_o = 788\ uF$$

3.2.4. Perhitungan Nilai Kapasitor *Snubber*

Topologi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda ini dilengkapi dengan kapasitor *snubber* yang berfungsi untuk mengurangi rugi-rugi *switching* pada saklar elektronik. Yang dalam hal ini digunakan metode *Zero Voltage Soft-switching* (*ZVS*). Metode ZVS ini terjadi apabila energi yang terserap pada komponen induktor resonan harus lebih besar daripada energi yang terserap pada kapasitor. Sehingga perumusan untuk mencari nilai kapasitor *snubber* dapat dilihat pada persamaan 2.9.

Dengan mengasumsikan inverter beroperasi pada daya output maksimal, maka nilai arus pada induktor resonan dapat dihitung sebagai berikut, Pada saat daya output maksimum nilai $\dot{V_{a1}} = \dot{V_{a2}} = V$, sehingga,

$$V = \frac{\sqrt{2}\, V_{in}}{\pi} = 90{,}0316\ volt$$

Mencari impedansi rangkaian induktor resonan dan parallel resonan:

$$Z_{AB} = Z_{L1} = j\omega L_1 = j19{,}79\ ohm$$

$$Z_p = R_O + Z_{LO} + Z_{CO} = \ 2.1500 \ - \ j2.6119$$

Maka nilai arus induktor pada t=t_1 ialah:

$$i_{L1}(t_1) = 5{,}9272 \ amperes$$

Kemudian perbandingan energi induktor dan kapasitor dapat dihitung :

$$\frac{1}{2}100uH.(5{,}9272)^2 > \frac{1}{2}C_{s1}\ 200^2$$

$$0.0031 > C_{s1}20000$$

$$15nF > C_{s1}$$

Maka diasumsikan nilai C_{s1} seperti pada [5] yaitu bernilai sebesar 10 nF. Parameter yang telah dihitung nilainya dapat diringkas pada tabel 3.4.

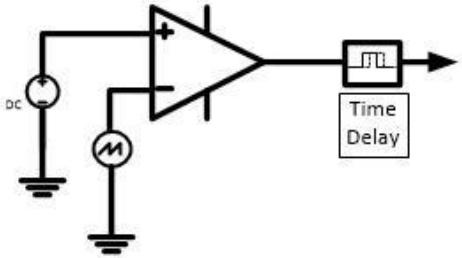
Tabel 3.4 Hasil parameter perancangan rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda.

Parameter	Nilai
Induktor Output L_O	59,2 µH
Resistansi Output R_O	2,15 ohm
Induktor Resonan *Lr*	100 µH
Kapasitor Output *Co*	788 µF
Kapasitor Snubber C_{s1}	10 nF

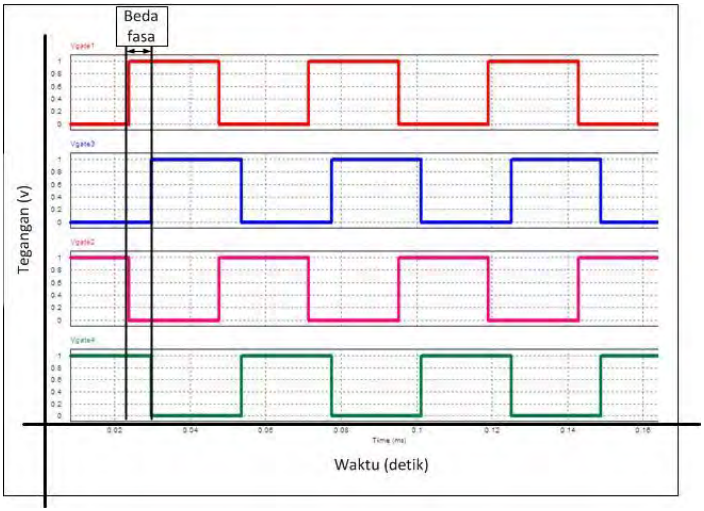
3.3. Perancangan Simulasi

3.3.1 PWM Fasa-Bergeser

Pada umumnya modulasi menggunakan PWM Fasa-Bergeser atau *Phase-Shift* PWM sama halnya menggunakan PWM biasa. Dimana dengan membandingkan sinyal referensi berupa sumber tegangan DC dan sinyal *carrier* berupa sumber tegangan gigi-gergaji atau segitiga menggunakan *comparator*, maka akan dihasilkan sebuah gelombang kotak yang dalam hal ini disebut sinyal PWM. Frekuensi yang dibangkitkan berdasarkan nilai frekuensi gelombang segitiga, sedangkan *duty cycle* dapat diatur menggunakan pengaturan tegangan referensi DC. Kemudian dengan menambahkan rangkaian *time delay* pada keluaran *comparator,* maka akan didapat bentuk gelombang PWM yang waktu nyala dan mati.nya bisa diatur menggunakan lama waktu *delay* dari rangkaian *time delay.* Satu sinyal PWM ini bisa mengendalikan sampai dua buah saklar elektronik pada inverter setangah jembatan ganda.



Gambar 3. 2 Desain pembangkit sinyal PWM Fasa-Bergeser.

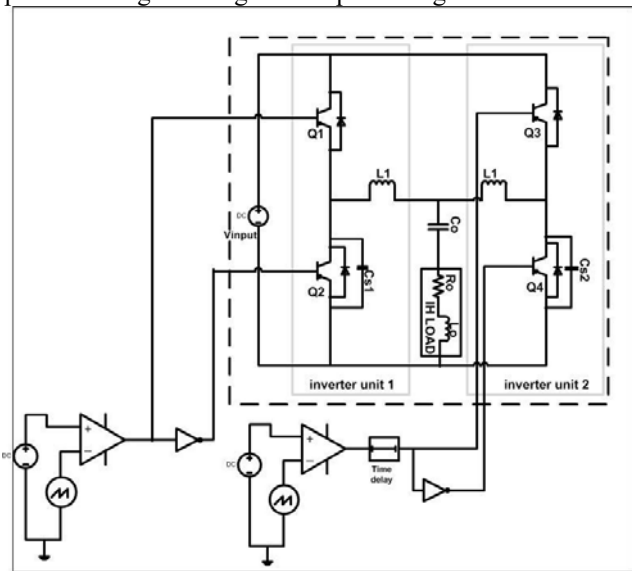


Gambar 3.3 Hasil simulasi sinyal PWM Fasa-Bergeser.

3.3.2 Simulasi Inverter Setengah Jembatan Ganda

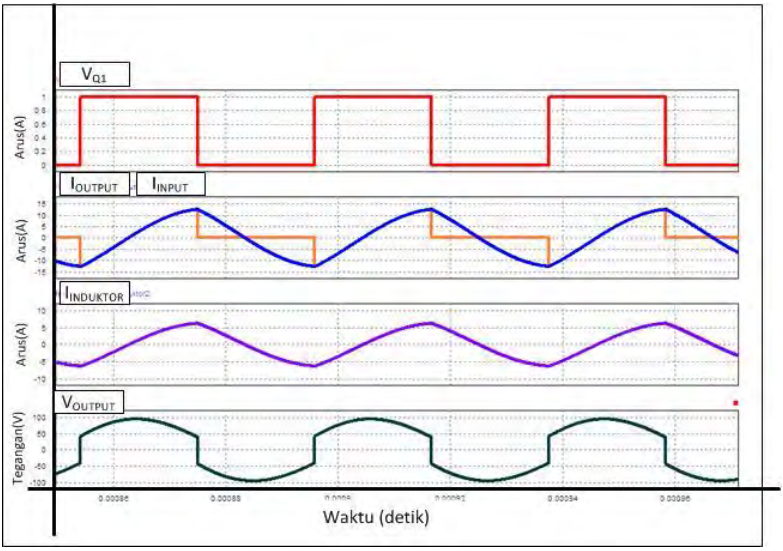
Pada gambar 3.4 menunjukkan rangkaian simulasi inverter setengah jembatan ganda dengan menggunakan seluruh parameter komponen hasil perhitungan disertai dengan *phase-shift* PWM untuk mengatur daya keluaran dari inverter. Simulasi ini digunakan untuk mendapatkan bentuk gelombang komponen inverter setengah jembatan ganda agar dapat dibandingkan dengan bentuk gelombang secara teori yang sudah dijelaskan pada bab 2. Selain itu, simulasi ini juga

digunakan untuk menunjukkan parameter masukan dan keluaran agar juga dapat dibandingkan dengan hasil perancangan.



Gambar 3.4 Topologi simulasi Inverter Setengah Jembatan Ganda.

Gambar 3.5 menunjukkan bentuk gelombang komponen konverter hasil simulasi. Dengan membandingkan hasil bentuk gelombang secara teori pada gambar 2.6 di bab 2 dengan bentuk gelombang hasil simulasi, diperoleh bahwa seluruh bentuk gelombang inverter setengah jembatan ganda hasil simulasi menyerupai bentuk geombang secara teori. Dengan demikian secara umum hasil simulasi dengan parameter perancangan sudah benar secara teori. Dari gambar 3.5 diperoleh sinyal tegangan PWM berbentuk kotak. Hal serupa juga terjadi pada sinyal tegangan saklar. Namun, kedua sinyal saling berlawanan dimana saat tegangan PWM *high,* maka tegangan saklar *low.* Selain itu, juga diperoleh sinyal arus induktor berbentuk segitiga yang menunjukkan kondisi *charge* dan *discharge.* Kedua keadaan tersebut sudah sesuai dengan kondisi dari sinyal PWM. Saat sinyal PWM *high,* maka induktor mengalami *charging.* Sementara itu, saat PWM *low,* induktor mengalami kondisi *discharging* dengan ditunjukkan arus induktor yang turun.



Gambar 3.5 Bentuk gelombang hasil simulasi Inverter Setengah Jembatan Ganda

Pada Tabel 3.5 menunjukkan perbandingan antara tegangan keluaran dan arus keluaran perhitungan dengan tegangan keluaran dan arus keluaran hasil simulasi. Perhitungan dan simulasi pada tabel tersebut berada pada kondisi keluaran daya pada inverter setengah jembatan ganda maksimal atau beda fasa antara kedua unit inverter sama dengan 0 sampai dengan beda fasa antara dua unit inverter 50 derajat. Dari data tersebut diketahui bahwa diperoleh *error* untuk tegangan dan arus antara simulasi dengan perhitungan kurang dari 2 persen. Dengan demikian, simulasi inverter setengah jembatan ganda sudah sesuai dengan perancangan yang dibuat. Maka bisa dilakukan tahap selanjutnya yaitu tahap implementasi inverter.

3.4 Pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda Untuk Pemanfaatan Kompor Induksi

Setelah hasil simulasi menunjukkan kesesuaian dengan teori, maka langkah selanjutnya yaitu implementasi konverter. Dalam implementasinya, semua nilai parameter komponen implementasi

dibuat sedekat mungkin dengan nilai hasil perhitungan agar unjuk kerja konverter dapat diperoleh sebaik mungkin sesuai dengan teori.

Tabel 3.5 Perbandingan nilai parameter perhitungan dan simulasi.

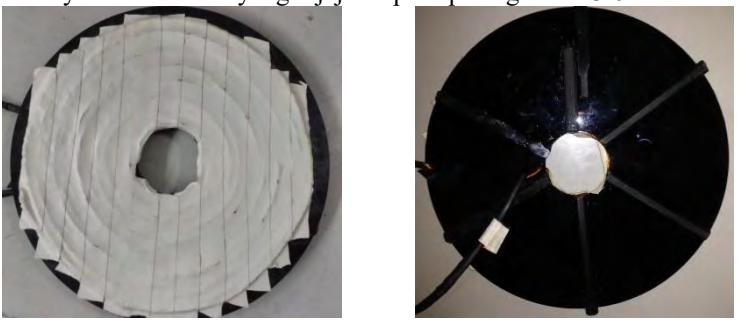
	Perhitungan		Simulasi		Error	
Beda Fasa (derajat)	I_O (A)	V_O(V)	I_O (A)	V_O(V)	I_O (%)	V_O(%)
0	13.11	104.86	13.15	106.48	0.27	1.54
10	13.06	104.47	13.09	105.68	0.25	1.16
20	12.91	103.27	12.94	104.16	0.21	0.86
30	12.66	101.29	12.69	102.03	0.24	0.72
40	12.32	98.54	12.35	99.13	0.20	0.60
50	11.88	95.04	11.90	95.56	0.17	0.55

3.4.1 Pembuatan Kumparan Kompor Induksi

Dalam pembuatan kumparan kompor induksi, nilai parameter lilitan yang sudah dirancang didasarkan pada [5]. Dimana diameter kabel tembaga kumparan yang digunakan 0,5 mm. Kemudian kabel tembaga sebanyak 20 kabel dililit menjadi satu hingga diameter lilitan mencapai 3 mm. Tujuan daripada melilit banyak kabel ini ialah, supaya arus yang dapat disalurkan melalui kumparan induksi dapat tersebar merata keseluruh kabel atau dengan kata lain menghindari adanya fenomena "efek kulit" pada konduktor kabel. Sehingga induksi elektromagnetik yang dihasilkan juga maksimal. Bila mengacu pada tabel kapasitas daya hantar arus pada kabel tembaga, untuk ukuran diameter kabel 3 mm atau AWG 10 dapat menghantarkan arus 21 ampere.

Pada bagian atas kumparan kompor induksi diberikan isolasi tahan panas seperti pada gambar 3.6 a. Hal ini berguna supaya ketika ada panci yang ditaruh diatas kumparan, dan natinya akan digunakan untuk memasak, maka kumparan induksi tidak ikut panas. Bila hal ini terjadi maka akan dapat merusak isolasi kawat dan bisa terjadi hubung singkat antar lilitan kabel kumparan induksi. Sedangkan pada bagian bawah kumparan kompor induksi diberi pembatas berupa *acrylic* ukuran 3 mm sebagai alas antara kumparan dan benda dibawahnya. Untuk menambah nilai resistansi dan induktansi yang stabil pada kumparan kompor

induksi, maka pada bagian bawah lapisan acrilyc diberi batang *ferrit* sebanyak enam buah yang dijajar seperti pada gambar 3.6 b

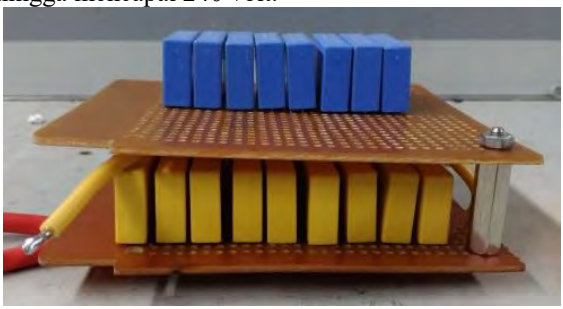


(a) (b)

Gambar 3.6 Hasil pembuatan kumparan kompor induksi, (a) tampak atas; (b) tampak bawah.

3.4.2 Pembuatan Kapasitor Output Resonan

Parameter yang diperhitungkan selain menentukan nilai kapasitansi kapasitor ialah tegangan rating kapasitor. Tegangan rating pada kapasitor ini menunjukkan kapasitas kapasitor untuk mampu menahan lonjakan tegangan yang akan dipasang pada suatu rangkaian. Jika nilai lonjakan tegangan ini melebihi batas rating kapasitor, maka dapat diprediksi akan terjadi menyebabkan kerusakan dan ledakan pada kapasitor. Untuk itu, dalam implementasi inverter perlu dilakukan pengecekan lonjakan tegangan yang timbul pada rangkaian dikarenakan beban yang digunakan pada rangkaian ini ialah beban induktif. Setelah dilakukan simulasi pada program PSIM, ternyata terdapat lonjakan tegangan hingga mencapai 240 volt.



Gambar 3.7 Hasil pembutan kapasitor output resonan.

Dari hasil perhitungan penentuan nilai kapasitansi kapasitor resonan rangkaian inverter setengah jembatan ganda, akan dipilih bahan dielektrik kapasitor yang tepat untuk topologi inverter tersebut Terdapat banyak jenis bahan dielektrik kapasitor dipasaran. Pada tugas akhir ini dipilih kapasitor dengan jenis bahan dielektrik *Metallized Polypropylene* atau dipasaran sering disebut kapasitor MKP. Alasan dipilihnya kapasitor jenis ini ialah karena kestabilannya dalam melewatkan arus bolak-balik dengan frekuensi tinggi dan rugi-rugi yang dihasilkan juga rendah sehingga cocok untuk rangkaian filter. Nilai tegangan rating pada kapasitor ini juga lumayan besar hingga mencapai 1 kV yang dalam hal ini cocok untuk mengatasi lonjakan tegangan.

Metode yang kedua untuk mengatasi lonjakan teganagan pada kapasitor ialah dengan membagi nilai kapasitansi antar kapasitor yang telah diparalel dengan nilai kapasitansi kapasitor yang rendah hingga mencapai nilai kapasitansi kapasitor yang dikehendaki. Untuk desain inverter pada tugas akhir ini diparalelkan kapasitor sebanyak 26 buah kapasitor dengan rincian kapasitor 15 nF sebanyak 20 buah dan kapasitor 82 nF sebanyak 6 buah. Sehingga nilai kapasitansi kapasitor total hasil implementasi ialah 792 nF. Nilai ini merupakan nilai yang paling mendekati nilai kapasitor hasil perhitungan yaitu 788 nF.

3.4.3 Pembuatan Induktor Resonan

Dalam pembuatan induktor resonan untuk aplikasi inverter frekuensi tinggi diperlukan permeabilitas bahan inti magnetik yang tahan ketika dilewatkan arus bolak-balik frekuensi tinggi dengan *magnitude* yang besar untuk menyuplai beban kumparan induksi. Maka dari itu dipilih, inti *ferrite* yang digunakan adalah tipe ETD49. Langkah pertama yang dilakukan yaitu menghitung nilai Q sesuai persamaan 3.3.

$$Q = LI_{Lb}{}^2 \tag{3.3}$$

dimana :

Q : energi (milijoule)
L : induktansi induktor (mH)
I_{Lb} : arus melewati induktor (A)

$$Q = 100.10^6(9.5)^2 = 1.64\ milijoules$$

Dari perhitungan yang telah dilakukan telah didapatkan nilai induktansi sebesar 100 µH. Setelah itu dicari jumlah lilitan yang dibutuhkan dengan memasukkan nilai dari L = 100 µH, arus puncak yang melewati induktor itu sebesar I_{pk} = 9,5 A, nilai kerapatan medan

magnet untuk material inti ferrit B_{maks} = 0,3 weber, dan luasan core (A_e) = 2,13 cm^2. Berikut perhitungan untuk mencari jumlah lilitan.

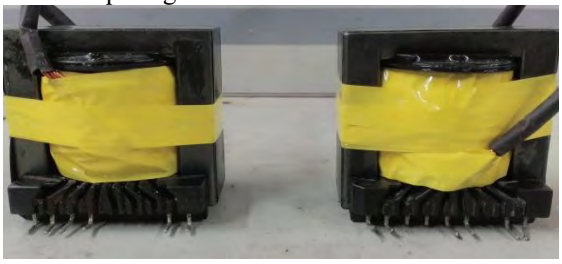
$$N = \frac{LI_{max}.10^4}{B_{max}\,A_c}$$

$$N = \frac{100\times10^{-6}\times9{,}5\times10^4}{0{,}25\times2{,}13}$$

$$N = \frac{95}{0{,}532}$$

$$N = 16{,}0337 \cong 16\ belitan$$

Pada kenyataannya, setelah dilakukan proses melilit kumparan induktor resonan, jumlah belitan yang dibuat melebihi dari jumlah belitan menurut perhitungan, yaitu sebanyak 22 kali putaran belit yang seharusnya hanya 16 kali belit. Hal ini membuat, nilai induktansi yang diinginkan perlu disesuaikan dengan induktansi setelah terjadi proses lilit. Sehingga nilai induktansi induktor tidak persis sama antara L1 dan L2. Didapati hasil setelah dilakukan dengan LCR Sanwa700, nilai induktor resonan 1 = 100,05 µH dan nilai induktor resonan 2 = 105,08 µH pada frekuensi 10 kHZ. Hasil pembuatan dari dua buah induktor resonan bisa dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Hasil pembuatan dua buah induktor resonan.

3.4.4 Pemilihan Komponen Kontrol dan Penyaklar Elektronik

3.4.4.1 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan empat buah saklar elektronik. Saklar elektronik tersebut menggunakan transistor dengan tipe IGBT dimana IGBT merupakan gabungan karakteristik antara MOSFET dan BJT, sehingga IGBT mampu untuk menyalurkan daya yang besar dan cocok untuk aplikasi *high power circuit*. IGBT yang digunakan adalah tipe FGL60N100. IGBT ini memiliki kemampuan menahan beda tegangan antara *collector* dan *emitter*-nya (V_{CE}) maksimumnya 1000 V dengan arus *emitter*

maksimum sebesar 60A pada suhu 25 derajat celcius. Tegangan yang diberikan pada *gate* dan emitter-nya (V_{GS}) maksimum sebesar 20 V. Besar tegangan dan arus yang melewati IGBT masih di bawah nilai spesifikasi yang diberikan oleh IGBT dengan begitu penggunaan IGBT FGL60N100 masih bisa digunakan pada rangkaian inverter ini. IGBT FGL60N100 ditunjukkan pada gambar 3.9.

Gambar 3.9 IGBT FGL60N100 [12].

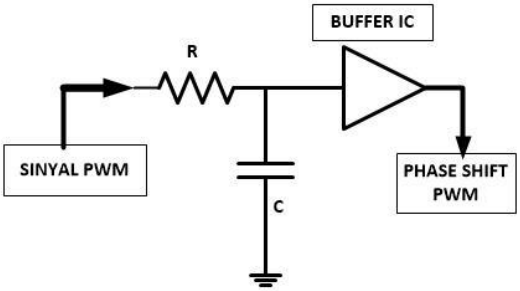
3.4.4.2 Arduino Mega 2560

Arduino Mega2560 adalah papan mikrokontroler berbasiskan ATmega2560 (datasheet ATmega2560). Arduino Mega2560 memiliki 54 pin digital input/output, dimana 15 pin dapat digunakan sebagai output PWM, 16 pin sebagai input analog, dan 4 pin sebagai UART (port serial hardware), 16 MHz kristal osilator, koneksi USB, jack power, header ICSP, dan tombol reset. Ini semua yang diperlukan untuk mendukung mikrokontroler. Cukup dengan menghubungkannya ke komputer melalui kabel USB atau power dihubungkan dengan adaptor AC-DC atau baterai untuk mulai mengaktifkannya. Arduino Mega2560 adalah versi terbaru yang menggantikan versi Arduino Mega.

Gambar 3.10 Arduino MEGA 2560.

3.4.4.3 Rangkaian Dual Edge Delay

Untuk menghasilkan gelombang PWM yang bisa bergeser fasa dari waktu PWM referensi, diperlukan rangkaian untuk *time delay*. Skematik rangkaian *time delay* ini dapat dilihat pada gambar 3.11. Rangkaian ini menghasilkan waktu *delay* menggunakan perbandingan waktu *charging* dan *discharghing* pada kapasitor yang dikombinasikan dengan sebuah resistor sebagai pembatas arus. Sehingga sinyal masukan normal PWM yang masuk pada rangkaian ini akan terjadi penundaan atau *delay* penyalaan sebanding dengan besarnya nilai resistor dan kapasitor. Kelemahan dari rangkaian ini ialah waktu tunda yang dihasilkan hanya berkisar 7µs saja untuk *duty cycle* PWM yang tetap. Akan tetapi setelah lebih dari 7µs terjadi penundaan waktu dan juga pengurangan *duty cycle* dari masukan PWM semula. Keuntungan menggunakan rangkaian ini ialah karena topologi yang yang sederhana dan mudah didapat dipasaran.

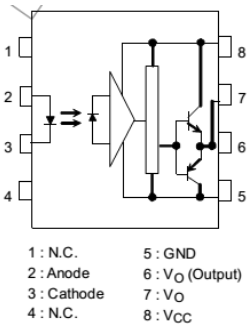


Gambar 3.11 Rangkaian *dual edge delay* untuk menggeser fasa PWM dari ArduinoMEGA.

3.4.4.4 Pemilihan Driver Penyaklar Elektronik (Optocoupler TLP250)

Sinyal PWM akan mengendalikan IGBT/MOSFET melaui *driver.* Dalam sistem PWM ini, *driver* saklar yang digunakan adalah *optocoupler* TLP250. *Optocoupler* TLP250 adalah IC yang secara khusus dirancang untuk saklar daya jenis IGBT dan MOSFET. Konstruksi TLP250 terdiri dari rangkaian sensor cahaya yaitu sebuah diode led sebagai pengkode informasi sinyal masukan dari rangkaian kontrol dan sebuah photodetector sebagai penerima masukan dari sinyal

LED. Rangkaian sensor ini berguna mengisolasi antara rangkaian PWM dan rangkaian utama konverter/inverter yang secara nyata masih tetap terhubung. Selain itu, pada bagian keluaran yang terhubung dengan rangkaian daya terdiri dari dua kombinasi 2 buah transistor NPN sebagai jalan masuk arus menuju rangkaian daya dan transistor PNP sebagai pembuang muatan daya dari rangkaian daya menuju *ground.* Selain berfungsi sebagai *driver* saklar, TLP250 juga berfungsi sebagai pengaman untuk mikrokontroler dari hubung singkat pada konverter karena titik *ground* Gambar 3.16 menunjukkan konfigurasi TLP250.

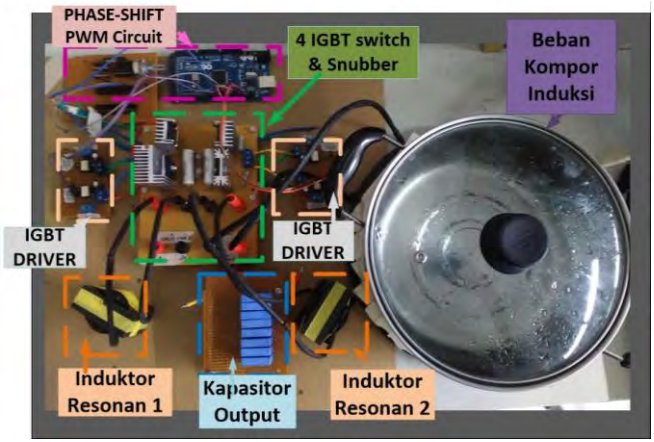


Gambar 3.12 Konfigurasi TLP250 [11].

BAB 4
HASIL UJICOBA DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan membahas mengenai hasil ujicoba dan analisis data dari pengimplementasian rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan fasa bergeser. Hasil yang didapatkan nantinya akan dibandingkan dengan hasil simulasi dan hasil perhitungan pada bab sebelumnya. Gambar 4.1 merupakan implementasi dari rangkaian konverter ini.

Gambar 4.1 terdiri dari rangkaian kontrol *phase-shift* PWM, rangkaian IGBT *drive*, rangkaian utama Inverter Setengah Jembatan Ganda yang terdiri dari kapasitor resonan, induktor resonan, dan komponen saklar elektronik. Terpisah dari rangkaian utama, terdapat rangkaian tambahan untuk mensuplai daya pada driver mosfet dan arduino yang disebut rangkaian *power supply*. *Power supply* ini memiliki tegangan masukan sebesar 220 volt AC dan tegangan keluaran sebesar 5 volt DC untuk suplai arduinomega dan 18 volt DC untuk suplai dari driver IGBT.



Gambar 4.1 Hasil pembuatan rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda untuk pemanfaatan kompor induksi.

Pembahasan pada bab ini diawali dengan hasil pengujian sinyal PWM fasa-bergeser. Kemudian dilanjutkan analisa mengenai hasil pengujian rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda. Hasil pengujian ini berupa bentuk gelombang beberapa komponen utama inverter.

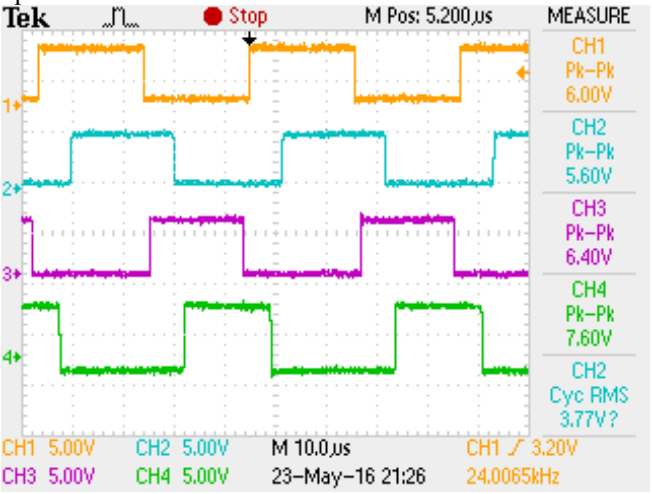
Setelah itu dilanjutkan analisa mengenai perubahan daya output akibat perubahan pergeseran fasa PWM. Hal ini untuk membuktikan bahwa alat yang telah dibuat sesuai atau tidak dengan analisa teori dan simulasinya.

4.1 Pengujian Sinyal PWM Fasa-Bergeser pada Pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda

4.1.1 Pengujian Sinyal PWM Fasa-Bergeser Keluaran dari ArduinoMEGA 2560

Pengujian sinyal PWM fasa-bergeser perlu dilakukan supaya sebelum sinyal tersebut men-*trigger* IGBT pada rangkaian inverter tidak terjadi kesalahan. Hasil pengujian PWM fasa-bergeser dari implementasi alat dilakukan pada sinyal keluaran mikrokontroller dan *driver* IGBT. Pengamatan pengujian ini dilihat menggunakan osiloskop digital. Kemudian perlu juga melihat waktu mati (*dead time*) sinyal PWM untuk IGBT sisi atas dan sisi bawah rangkaian inverter.

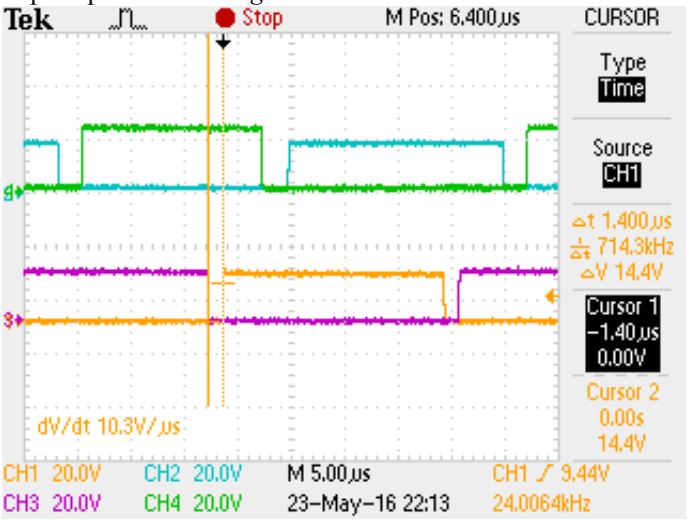
Hasil pengujian empat buah sinyal PWM fasa-bergeser, dimana dua buah sinyal berasal dari ArduinoMEGA 2560 dan sisanya berasal dari rangkaian *dual edge delay*, dapat diamati bentuknya dalam osiloskop.



Gambar 4.2 Bentuk gelombang keluaran sinyal PWM fasa-bergeser dari ArduinoMEGA.

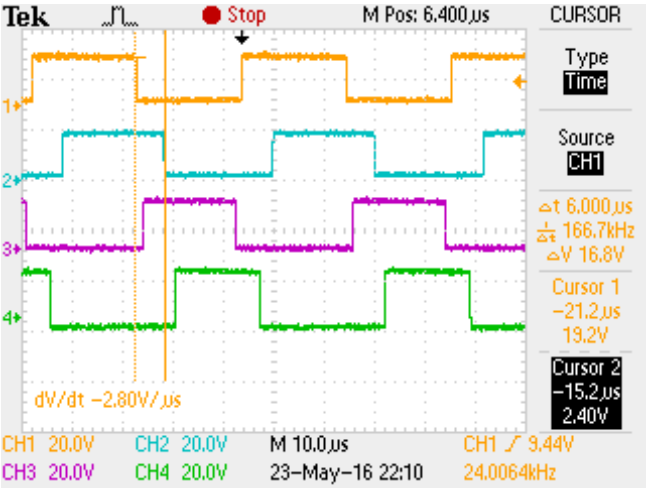
Pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa antara sinyal PWM Q1 dan PWM Q3 terjadi pergeseran fasa, begitu juga pada PWM Q2 dan PWM Q4. Kemudian antara sinyal PWM Q1 dan sinyal PWM Q2 waktu penyalaannya berkebalikan seperti pada prinsip modulasi sinyal PWM *half-bridge* inverter. Frekuensi semua sinyal PWM memiliki nilai yang sama yaitu 24 kHZ. Besar nilai tegangan *peak to peak* dari keluaran keempat buah sinyal PWM arduino adalah rata-rata 6 volt.

Selanjutnya ialah pengamatan sinyal PWM antara Q1 dengan Q2 dan Q3 dengan Q4 terhadap besarnya waktu *dead time* kedua sinyal. *Dead time* merupakan waktu mati yang diberikan pada dua buah sinyal PWM supaya tidak terjadi *short circuit* antara Q1 dengan Q2 dan Q3 dengan Q4 saat terjadi proses pergantian *switching* antar komponen saklar elektronik dengan konfigurasi seperti pada *half-bridge* inverter. Besarnya *dead time* pada gambar 4.3 adalah sebesar 1,4 us. Pertimbangan untuk memilih nilai *dead time* pada Sinyal PWM didasarkan pada nilai karakteristik *rise time* dan *fall time* dari IGBT. Pada *datasheet* IGBT FGL60N100 disebutkan bahwa nilai *rise time* IGBT sebesar 320 ns dan *fall time* sebesar 180 ns [12]. Dengan begitu nilai *deadtime sebesar* 1,4µs adalah cukup untuk menghindari *short circuit* pada proses *switching*.



Gambar 4.3 *Dead time* antara sinyal PWM Q1 dan Q2 keluaran dari arduinoMEGA.

4.1.2 Pengujian Sinyal PWM Fasa-Bergeser Keluaran dari *Driver* IGBT

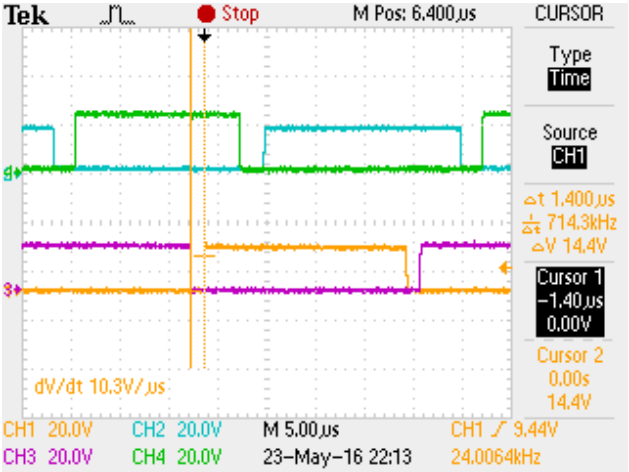


Gambar 4.4 Bentuk gelombang keluaran sinyal *driver* IGBT pada Q1, Q2, Q3, Q4**.**

Pengujian sinyal PWM setelah dimasukkan ke dalam rangkaian *driver* IGBT dilakukan untuk memastikan sinyal masukan yang akan menuju kaki *gate* IGBT sudah benar. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan referensi. Tegangan referensi ini didapatkan dari keluaran rangkaian *power supply* 18 volt. Gambar 4.4 menunjukkan gelombang sinyal PWM dimana sinyal terssebut merupakan keluaran dari *driver* IGBT. Seperti yang terlihat pada gambar keluaran diosiloskop, bahwa pergeseran fasa antara sinyal *driver* Q1 dan Q2 sebesar 50 derajat. Sedangkan nilai dari tegangan peak to peak sinyal driver yang terukur pada osiloskop rata-rata memiliki nilai 20 volt. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa driver IGBT yang digunakan berfungsi secara benar dan siap untuk digunakan mengatur penyalaan IGBT.

Selanjutnya ialah melakukan pengamatan *dead time* antara sinyal *driver* IGBT Q1 dengan Q2 dan Q3 dengan Q4 yang bisa dilihat pada gambar 4.5. Pada osiloskop tercatat bahwa dead time antara Q1 dengan

Q2 begitu juga Q3 dengan Q4 adalah sama nilainya pada saat sinyal PWM bearasal dari ArduinoMEGA 2560.



Gambar 4.5 *Dead time* keluaran sinyal driver IGBT pada Q1, Q2, Q3,Q4.

4.2 Pengujian Bentuk Gelombang Keluaran Pada Pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda

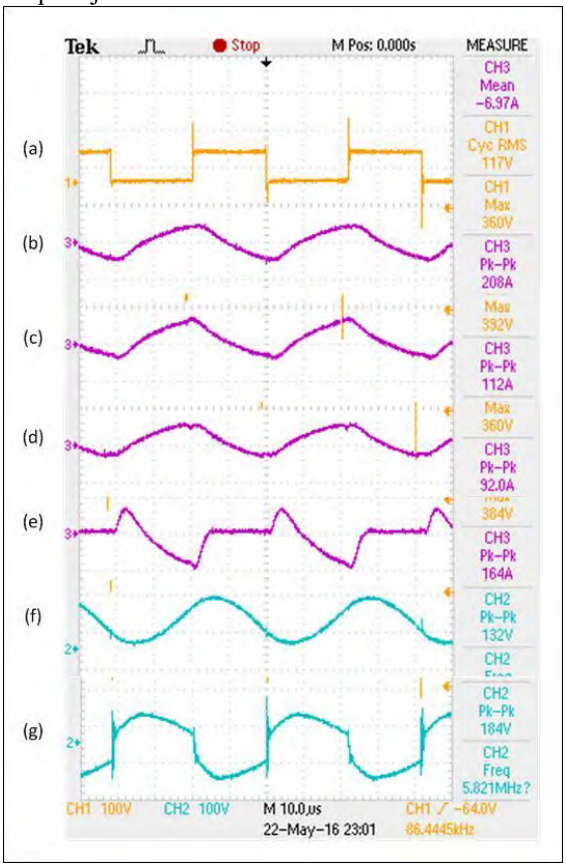
Pengujian bentuk gelombang pada pada inverter setengah jembatan ganda ini dibagi menjadi dua yaitu pada saat kondisi beban penuh atau beda fasa antar unit inverter nol derajat dan saat kondisi beda fasa antar unit inverter limapuluh derajat. Proses pengujian inverter setengah jembatan ganda ini dilakukan berdasarkan beberapa parameter seperti pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter pengujian rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda.

Parameter	Nilai
Tegangan masukan	150 volt
Frekuensi *switching*	21 kHz
Arus masukan	2,02 Ampere
Daya masukan	300 Watt

4.2.1 Pengujian Bentuk Gelombang Inverter Setengah Jembatan Ganda Saat Beban Penuh Atau $\phi = 0°$

Pada tahap ini dilakukan pengujian bentuk gelombang komponen dari implementasi Inverter Setengah Jembatan Ganda. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah implementasi inveter sudah bekerja sesuai dengan prinsip kerja dalam teori dan simulasi.

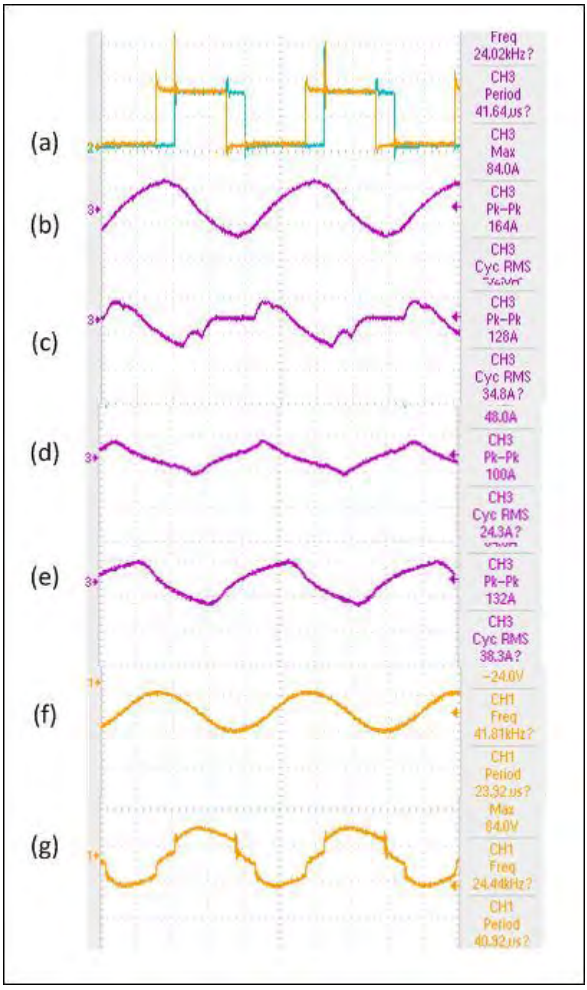


Gambar 4.6 Bentuk gelombang keluaran hasil pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda saat beban penuh. (a) Sinyal PWM Q1 danQ2 ; (b) Arus beban kompor Induksi (*Io*); (c) Arus induktor 1(I_{L1}); (d) Arus induktor 2 (I_{L2}); (e) Arus input (*Iin*); (f) Tegangan pada Kapasitor (V_{CO}); (g) Tegangan beban kompor induksi (V_O).

Gambar 4.6 menunjukkan gelombang komponen dari implementasi inverter pada saat inverter beroperasi pada beban penuh atau beda fasa inverter 0°. Kemudian bentuk gelombang dari implementasi dibandingan dengan bentuk gelombang dari simulasi yang ditunjukkan pada gambar 3.8 pada bab 3 sebelumnya. Dari hasil perbandingan tersebut dapat diketahui bahwa setiap bentuk gelombang komponen sudah menyerupai. Dengan demikian, implementasi Inverter Setengah Jembatan Ganda sudah bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Pada bagian gelombang tegangan saklar terlihat bahwa terjadi lonjakan tegangan. Namun, lonjakan tegangan yang terjadi masih diberada pada kemampuan dari saklar elektronik yang digunakan. Hal ini seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Pada pengujian ini, lonjakan tegangan yang terjadi pada saklar IGBT mencapai 340 VDC. Namun karena lonjakan tegangan tersebut masih berada pada daerah kemampuan saklar MOSFET, maka pada saklar ini tidak membutuhkan rangkaian *snubber* untuk memotong lonjakan tegangan yang timbul.

4.2.2 Pengujian Inverter Setengah Jembatan Ganda Pada Saat $\phi = 50°$

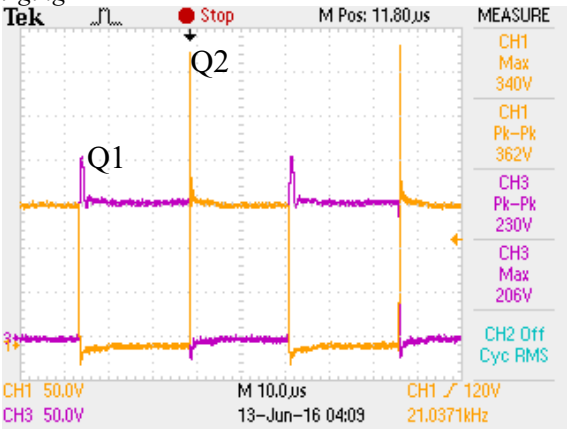
Pada pengujian kali ini, inverter diatur pada penyalaan dengan beda fasa antara unit inverter 1 dengan unit inverter dua sebesar 50 derajat. Gelombang keluaran pada inverter bisa dilihat pada gambar 4.9. Berdasarkan hasil pengujian dengan adanya beda fasa sinyal PWM antara inverter unit 1 dengan inverter unit 2, didapatkan bentuk gelombang arus dan tegangan output yang berbeda dibandingkan pada saat inverter dinyalakan pada kondisi beda fasa nol derajat. Hal ini disebabkan waktu *on* dan *off* dari kedua unit inverter mengalami perbedaan, sehingga terjadi perbedaan fasa arus yang mengalir ke beban. Diawali perbedaan arus antara arus induktor unit inverter 1 dan arus induktor unit inverter 2 akibat adanya perbedaan komponen kompleks yang mengakibatkan nilai arus pada induktor resonan 1 lebih besar dibandingkan dengan nilai induktor resonan 2. Perbedaan arus ini akan menyebabkan arus menyilang dari induktor 1 dan induktor dua yang mana arus ini mengalir tidak langsung menuju ke beban akan tetapi terlebih dahulu disimpan pada kapasitor snubber pada unit inverter 1. Sehingga terjadi mode ZVS off terjadi yang berguna untuk mereduksi arus memutar pada rangkaian yang bisa membuat IGBT pada rangkaian panas. Dari sinilah kemudian metode *Zero Voltage Switching* bekerja untuk mengurangi rugi-rugi *switching* pada rangkaian.



Gambar 4.7 Bentuk gelombang keluaran hasil pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda saat beda fasa 50°; (a) Sinyal PWM Q1 danQ2; (b) Arus beban kompor Induksi (*Io*); (c) Arus input (*Iin*); (d) Arus induktor 1(I_{L1}); (e) Arus induktor 2 (I_{L2}); (f) Tegangan pada Kapasitor (V_{CO}); (g) Tegangan beban kompor induksi (V_O).

4.3 Pengujian Tegangan Antara Terminal Collector-Emitter, V_{CE}, Pada IGBT Akibat Pemberian Kapasitor *Snubber*

Pada saat pengujian beban penuh, tegangan V_{CE} pada Q1 dan Q2 rangkaian inverter setengah jembatan ganda, dapat dilihat pada gambar 4.6. Seperti yang dapat dilihat pada osiloskop, gelombang sinyal penyaklaran IGBT tidak sepenuhnya berbentuk gelombang persegi. Terdapat noise gelombang berupa garis lurus pada saat IGBT memulai penyalaannya yang dalam hal ini disebut fenomena *spike* tegangan. Dimana *spike* tegangan ini merupakan salah satu bentuk rugi-rugi *switching* yang dihasilkan pada Inverter Setengah Jembatan Ganda. Nilai dari *spike* tegangan dari inverter mencapai 340 volt tegangan DC dengan rating tegangan normal hanya 150 volt DC. Artinya *spike* tegangan pada IGBT mencapai 2.5 kali tegangan switch masukan. Lonjakan tegangan yang besar ini disebabkan oleh beban pada inverter yang sangat induktif. Dimana pada saat *switch* akan melakukan penyaklaran tiap periode, proses arus *charging* pada beban belum selesai, sehingga tegangan yang disalurkan akan terus bertambah sampai proses *charging* tersebut selesai.

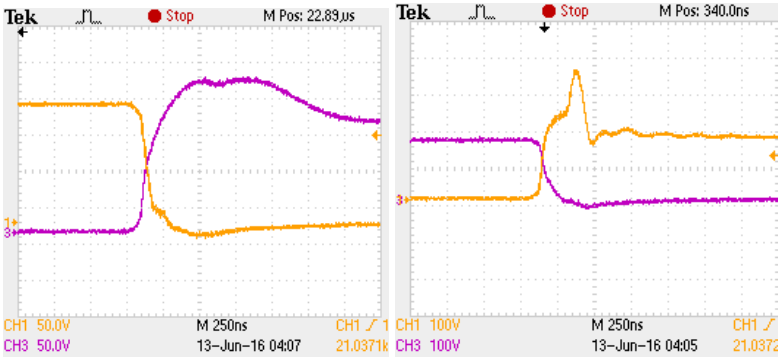


Gambar 4.8 Perbedaan tegangan terminal *collector-emitter*, $V_{CE,}$ pada Q1 dan Q2.

Dengan memperhatikan spesifikasi IGBT yang digunakan diketahui bahwa V_{DS} maksimal yang mampu ditangani IGBT FGL60N100 adalah 1000 V. Dengan demikian, V_{DS} spikes yang terjadi masih berada pada kemampuan IGBT sehingga masih aman. Setelah pengujian tahap ini selesai, maka selanjutnya yaitu tahap pengambilan

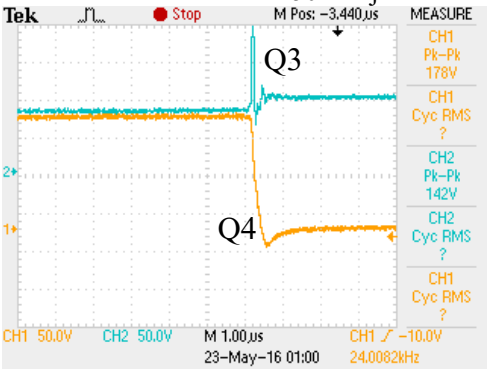
data dari Inverter Setengah Jembatan Ganda.. sehingga tidak diperlukan rangkaian snubber untuk mengurangi lonjakan tegangan tersebut.

Pada topologi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda ini digunakan metode ZVS *soft switching* untuk mengurangi rugi-rugi penyaklaran pada inverter. Gambar 4.7 merupakan bentuk gelombang tegangan Q2 akibat menggunakan metode ZVS dibandingkan dengan tegangan pada Q1. Pengaruh ini disebabkan oleh adanya kapasitor snubber yang berguna untuk menghendaki terjadinya ZVS pada saklar. Dimana terlihat osilasi pada Q1 jarang terjadi dibanding pada Q2.



Gambar 4.9 Tegangan V_{CE} pada Q1 dan Q2 akibat adanya ZVS.

Pada gambar 4.10 bisa terlihat gelombang *soft switching* pada Q3 dan Q4 saat beda fasa antar unit inverter 50 derajat.



Gambar 4.10 Bentuk gelombang tegangan V_{CE} pada Q3 dan Q4 saat beda fasa 50 derajat.

4.4 Pengujian Inverter Setengah Jembatan Ganda Menggunakan Pengaturan Fasa-Bergeser dengan Adanya Perubahan Fasa PWM Antar Unit Inverter

Hasil pengujian pembuatan rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda ialah berupa nilai arus dan tegangan keluaran yang dapat dilihat pada tabel 4.2. Pada tabel tersebut dibandingkan tegangan dan arus keluaran pada perhitungan teori, simulasi, dan hasil implementasi terhadap perubahan perbedaan fasa.

Tabel 4.2. Pengaruh arus dan tegangan keluaran Inverter Setengah Jembatan Ganda terhadap pergeseran fasa dua unit inverter.

	Perhitungan		Simulasi		Implementasi		Error	
Beda Fasa (°)	I_O (A)	V_O (V)	I_O (A)	V_O (V)	I_O (A)	V_O (V)	I_O (%)	V_O (%)
0	13.11	104.86	13.15	106.48	16.05	84.00	22.42	19.90
10	13.06	104.47	13.09	105.68	15.80	82.00	20.97	21.51
20	12.91	103.27	12.94	104.16	15.60	81.00	20.82	21.57
30	12.66	101.29	12.69	102.03	14.80	79.00	16.87	22.01
40	12.32	98.54	12.35	99.13	14.40	76.00	16.88	22.87
50	11.88	95.04	11.90	95.56	13.00	74.00	9.41	22.14

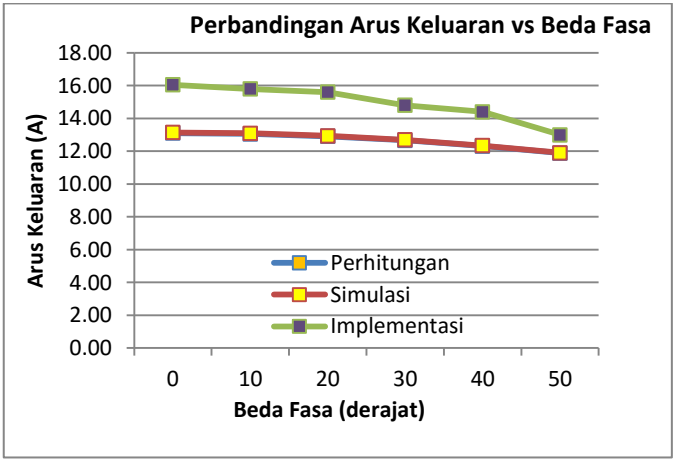
Pada tabel 4.2 diperlihatkan pengaruh pergeseran fasa PWM terhadap hasil dari implementasi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda. Parameter yang diubah pada pengujian ini adalah pergeseran fasa dari dua buah unit inverter, dimana pada unit inverter satu dijadikan sebagai fasa tetap/referensi. Sedangkan pada unit inverter dua sinyal PWM dari arduino dimasukkan terlebih dahulu ke rangkaian *dual edge delay* kemudian dikuatkan dengan rangkaian driver IGBT dan masuk ke saklar IGBT, sehingga terjadi penundaan sinyal PWM dibandingkan pada unit inverter satu sebesar nol hingga lima puluh derajat. Untuk parameter yang lain seperti tegangan input dan frekuensi switching dijaga konstan. Pengujian ini bertujuan untuk melihat pengaruh pergeseran fasa PWM terhadap arus dan tegangan keluaran dari inverter tersebut.

Pada tabel 4.2 terdapat *error* nilai arus dan tegangan pada hasil pengujian inverter yang telah dibuat. *Error* yang terjadi pada

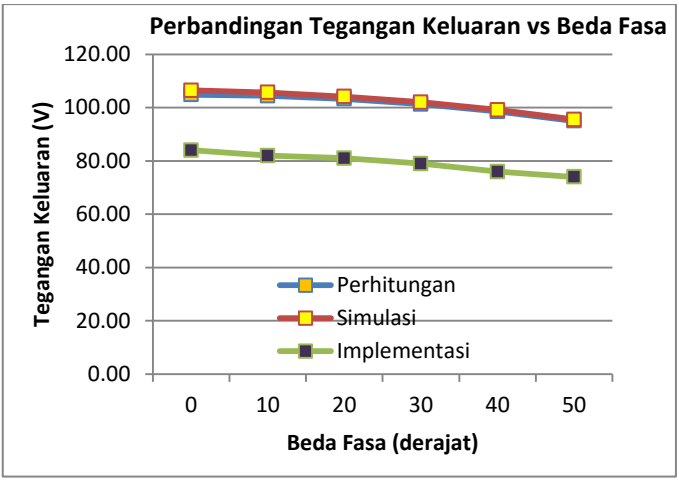
pengimplementasian alat ini memiliki nilai hingga mencapai 22 persen. Hal ini dikarenakan pada kondisi real terdapat rugi rugi pada tiap komponen dan kurang sempurnanya sinyal kotak yang dibangkitkan oleh PWM. Terutama pada saat melakukan pergeseran fasa PWM menggunakan rangkaian *dual edge delay,* nilai delay yang dihasilkan tidak sama persis dengan delay yang diiginkan. Rata-rata waktu *delay* hasil implementasi terjadi perubahan kurang lebih 0,2 μs. Sedangkan pada kondisi simulasi ataupun perhitungan secara teori, semua komponen pada kondisi tersebut berada pada kondisi ideal. Kondisi ideal yang dimaksud ialah tidak memperhitungkan rugi-rugi tiap komponen dari peralatan dan sinyal PWM yang dihasilkan memiliki nilai yang sesuai seperti yang diinginkan. Kemudian jika mengacu pada simulasi dan perhitungan, nilai ekivalen dari beban pemanas induksi didasari oleh hasil pengukuran menggunakan LCR pada saat frekuensi LCR 10 kHZ. Sedangkan pada saat pengimplementasian inverter, frekuensi switching yang digunakan ialah 21 kHZ sehingga pasti terjadi perubahan nilai induktansi dan resistansi ekivalen pada beban kompor induksi seperti yang telah dipaparkan pada [5]. Dimana disebutkan bahwa nilai induktansi pada beban kumparan kompor induksi akan menurun seiring dengan bertambahnya frekuensi arus bolak-balik yang mengalir didalamnya. Sebaliknya, nilai resistansi ekivalen kumparan kompor induksi akan meningkat seiring dengan bertambahnya frekuensi arus bolak-balik yang diberikan. Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan grafik perbedaan nilai tegangan keluaran dibandingkan antara hasil dari perhitungan teori, simulasi dan implementasi.

Jika dibandingkan antara pergeseran fasa unit inverter dengan daya input DC pada inverter maka akan terlihat seperti pada gambar 4.13. grafik tersebut menunjukkan bahwa pergeseran fasa antar unit inverter menyebabkan penurunan daya input masukan inverter. Sehingga daya output pada lilitan beban kompor induksi juga pasti menurun. Dalam beberapa percobaan pengujian inverter ini, untuk mendapatkan hasil pengukuran daya output inverter tidak bisa dilakukan. Dikarenakan alat ukur pada laboratorium tidak mampu untuk mendeteksi perubahan fasa tegangan dan arus output inverter dengan frekuensi tinggi yang memiliki bentuk gelombang tegangan/arus dinamis seperti yang tampak pada lampiran gambar 6. Sehingga pada laporan tugas akhir ini tidak didapatkan hasil pengukuran daya output dan efisiensi inverter. Namun akhir dari pembuatan Inverter Setengah Jembatan Ganda ini bisa menaikkan suhu 200 ml air sebesar 30° pada panci berukuran 22 cm

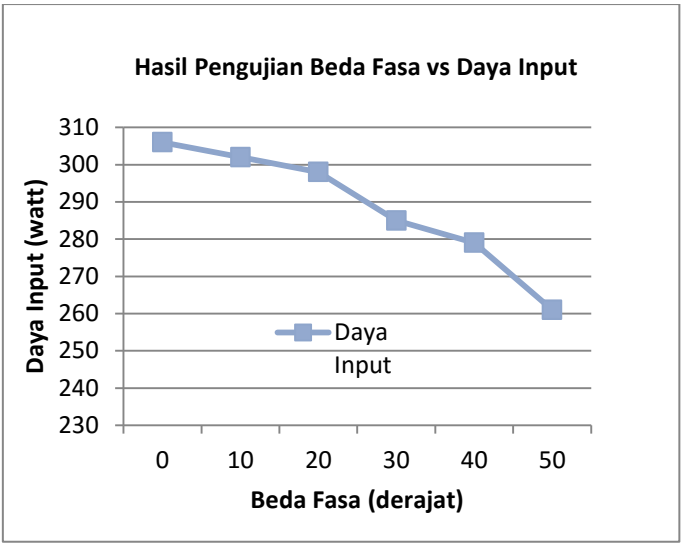
dalam waktu sekitar 4 menit seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.14.



Gambar 4.11 Grafik arus keluaran, I_{output} , dari hasil perhitungan, simulasi, dan implementasi terhadap perbedaan fasa antara dua unit inverter pada rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda.



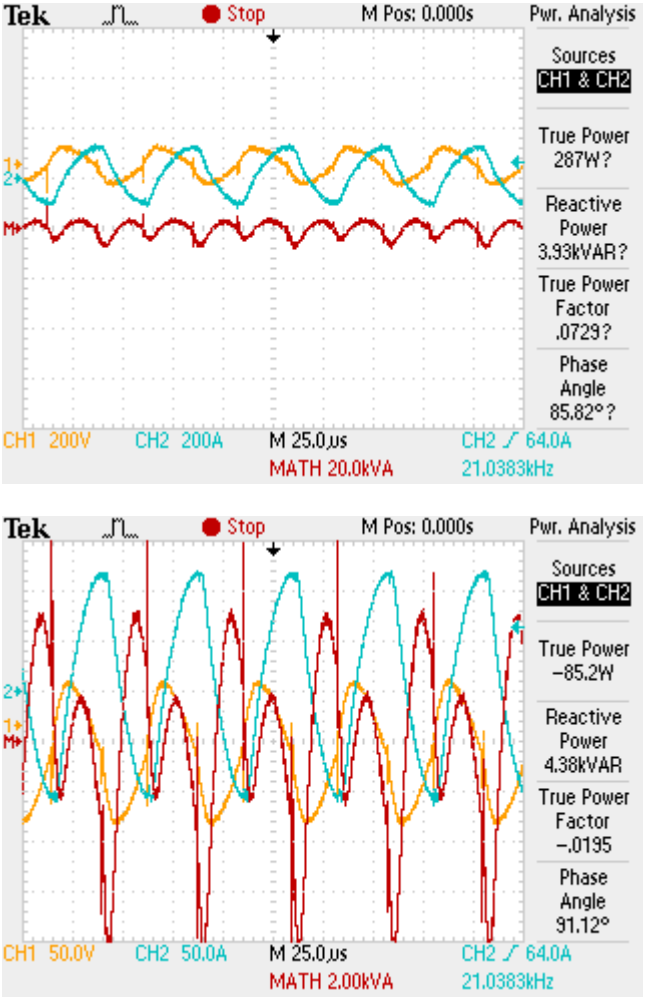
Gambar 4.12 Grafik tegangan keluaran, Voutput, dari hasil perhitungan, simulasi, dan implementasi terhadap perbedaan fasa antara dua unit inverter pada rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda.



Gambar 4.13 Grafik perubahan beda fasa terhadap daya input Inverter Setengah Jembatan Ganda.

Gambar 4.14 Perbedaan suhu air pada panci saat pengujian Inverter Setengah Jembatan Ganda dalam waktu 4 menit.

LAMPIRAN



Gambar 6 Pengukuran daya output menggunakan osiloskop.

Daftar skema program PWM pada ArduinoMEGA:

```
#define F_CPU  16000000UL
#define FOUT2  21000

void setup ()

 {// untuk Timer0 memakai phase correct PWM
  //dengan nilai TOP=ICR1 dan pengubah duty cycle dengan set
OCR1A/OCR1B/OCR3A/OCR3B/OCR4A/OCR4B
  TCCR4A = 0b10110010;
  TCCR4B = 0b00010001;
  TCCR3A = 0b10110010;
  TCCR3B = 0b00010001;
  TCCR5A = 0b10110010;
  TCCR5B = 0b00010001;
  ICR4   = 0;
  OCR4A  = 0;
  OCR4B  = 0;
  ICR3   = 0;
  OCR3A  = 0;
  OCR3B  = 0;
  ICR5   = 0;
  OCR5A  = 0;
  OCR5B  = 0;
  pinMode(11, OUTPUT); //OC1A
  pinMode(12, OUTPUT); //0C1B
  pinMode (7, OUTPUT); //OC4B
  pinMode (6, OUTPUT); //OC4A
  pinMode (5, OUTPUT); //OC3A
  pinMode (2, OUTPUT); //OC3B
  pinMode (46, OUTPUT); //OC5A
  pinMode (45, OUTPUT); //OC5B
}
void pwm2(void)
{
unsigned long FPWM1 = (F_CPU/FOUT2)/2 ;
ICR4  = FPWM1;
OCR4A = ICR4/2;
OCR4B = 210;
```

```
}
void pwm1(void)
{unsigned long FPWM2 = (F_CPU/FOUT2)/2;
 ICR3  = FPWM2;
 OCR3A = ICR3/2;
 OCR3B = 210;
}
void pwm3(void)
{unsigned long FPWM3 = (F_CPU/FOUT2)/2;
 ICR5  = FPWM3;
 OCR5A = 170;
 OCR5B = ICR5/2;
}
void loop ()
   {  pwm1();
      pwm2();
      pwm3();     //TODO:: Please write your application code
   }
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

\

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap simulasi maupun implementasi rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda dapat disimpulkan menjadi beberapa hal sebagai berikut:

1. Rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda dapat digunakan untuk menghasilkan gelombang AC frekuensi tinggi sesuai dengan frekuensi *switching* saklar elektronik.
2. Metode pengaturan Fasa-Bergeser yang diaplikasikan pada Rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda dapat menurunkan arus keluaran inverter dengan cara menaikkan nilai beda fasa antar unit inverter.
3. Hasil dari simulasi dan implementasi alat telah sesuai dengan teori yang telah dibuat. Hal ini ditunjukkan melalui pengujian yang telah dilakukan.
4. Rangkaian Inverter Setengah Jembatan Ganda menggunakan pengaturan Fasa-Bergeser ini bisa diaplikasikan untuk kompor induksi seperti yang telah dibuktikan dengan adanya kenaikan suhu panci pada saat pengujian.

5.2 Saran

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah.

1. Tugas akhir ini dapat dilanjutkan dengan memodifikasi rangkaian menjadi rangkaian *loop tertutup* dengan menambahkan kontroller PI konvensional untuk menstabilkan arus keluaran inverter akibat perubahan daya output inverter
2. Tugas akhir ini dapat dilanjutkan dengan menggunakan rangkaian pengaturan daya keluaran inverter yang lain seperti pengaturan PWM asimetris, modulasi frekuensi PWM (*Pulse Frequency Modulation*), atau *Pulse Density Modulation (PDM)* supaya efisiensi inverter ketika daya keluaran rendah meningkat dan topologi rangkaian kontrolnya menjadi lebih mudah sesuai dengan yang ada pada [6],[7].
3. Untuk pengukuran daya keluaran arus bolak-balik berfrekuensi tinggi pada inverter menggunakan alat ukur yang bisa mendeteksi

dengan frekuensi tinggi juga supaya hasil yang diperoleh lebih akurat.

4. Penggunaan komponen yang memiliki efisiensi yang tinggi untuk hasil yang lebih maksimal dari konverter tersebut.
5. Diperlukan ilmu yang lebih mendalam tentang bahasa pemrograman mikrokontroler untuk mendukung kelancaran pengerjaan tugas akhir ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, J. M. Burdio, Mei 2014. "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges," *IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 61, no. 5*.

[2] H. Sarnago, O. Luc´ıa, A. Mediano, and J.M. Burd´ıo, Mei 2013."Modulation Scheme for Improved Operation of an RB-IGBT-Based Resonant Inverter Applied to Domestic Induction Heating," *IEEE Trans. Ind. Electron., vol.60, no.5, pp.2066-2073*.

[3] T. Mishima, C. Takami, and M. Nakaoka, Mei 2014. "A New Current Phasor Controlled ZVS Twin Half-Bridge High-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating," *IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 5, pp. 2531–2545*.

[4] A.Fujita, H.Sadakata, I.Hirota, H.Omori, M.Nakaoka, 2009. " Latest Developments of High-Frequency Series Load Resonant Inverter Type Built-In Cooktops for Induction Heated All Metallic Appliances," *Proc. IEEE 6th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, *pp. 2537-2544*.

[5] J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdío, L. A. Barragán and D. Puyal, 2006. "Frequency-dependent Resistance in Litz-wire Planar Windings for Domestic Induction Heating Appliances", *IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 4, pp. 856-866*.

[6] T. Mishima, M. Nakaoka, Augustus 2014. "A Load-Power Adaptive Dual Pulse Modulated Current Phasor-Controlled ZVS High-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating Applications," *IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 29. No. 8., pp. 3864-3880*.

[7] T. Mishima , C. Takami and M. Nakaoka, 2012. "A New ZVS Phase-Shifted High-Frequency Resonant Inverter Incorporating Asymmetrical PWM-Based Unit Control for Induction Heating" , *Proc. 38th Annu. IEEE IECON , pp.3256 -3261*.

[8] C. Carretero, O. Acero and J.M. Burdio, Maret 2011. " Phase-Shift Control of Dual Half-Bridge Inverter Feeding Coupled Loads for Induction Heating Purposes " ,*ELECTRONICS LETTERS, vo1.47, no.ll, pp.670-671*.

[9] Marian K. Kazimieczuk, Dariusz Czarkowski., 2010. *Resonant Power Converter*, John Wiley & Sons, inc.

[10] Application Note, “AN9012: *Induction Heating System Topology Review*”, Fairchild, July 2000.
[11] Datasheet, “*TLP250 Photocoupler*”, Toshiba. 2007.
[12] Datasheet, “*FGL60N100BNTD 1000 V, 60 A NPT Trench IGBT*”, Fairchild. Maret 2014.

RIWAYAT HIDUP PENULIS

Penulis adalah seorang pemuda yang dilahirkan di kabupaten Gresik yang terkenal dengan kawasan industrinya. Dilahirkan pada tanggal 07 Juli 1994 yang bertepatan hari kamis menjelang malam jumat. Pendidikan dasar selama enam tahun penulis dimulai dari SD Muhammadiyah 1 GKB Gresik. Kemudian dilanjukan ke SMPN 1 Gresik lalu ke SMAN 1 Manyar, Gresik. Setelah lulus dari tingkat menengah atas, penulis diberi kesempatan untuk melanjutkan pendidikan di salah satu institut terbesar di Indonesia yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya tepatnya di jurusan teknik elektro.