

RANCANG BANGUN *ELECTROMAGNETIC BOOTSTRAP* SEBAGAI *GATE DRIVER* PADA *MOSFET*

Wahyudi Budi Pramono

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta
e-mail: wahyudi_budi_p@uii.ac.id; fanrido@gmail.com

Muhammad Fanriadho

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta
e-mail: wahyudi_budi_p@uii.ac.id; fanrido@gmail.com

Abstrak

Gate driver (kemudi gerbang) merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi untuk menerjemahkan sinyal bertegangan rendah dari sumber sinyal diskrit untuk diumpankan ke MOSFET sebagai saklar daya sehingga dapat beroperasi sesuai parameternya. Permasalahan yang sering terjadi adalah adanya keterlambatan proses pensaklaran pada MOSFET karena tidak tersedianya tegangan yang cukup untuk mendrive MOSFET tersebut. Ketersediaan tegangan tersebut dipengaruhi oleh proses pengisian kapasitor bootstrap. Penelitian ini, rangkaian gate driver memiliki saklar pengisian berupa relay elektromagnetik dengan impedansi tinggi antar terminalnya sehingga mampu memberikan kemampuan isolasi tegangan yang baik. Kapasitor backup menjaga agar proses pengisian muatan kapasitor bootstrap tidak mengganggu proses pensaklaran MOSFET utama. Sinyal diskrit dari mikroprosesor ataupun sinyal yang masuk dari sumber dapat diproses seutuhnya tanpa terganggu proses pengisian kapasitor seperti pada conventional bootstrap. Dari hasil pengujian tersebut, electromagnetic bootstrap mampu memberikan sinyal kendali ke gate yang sesuai dengan kebutuhan MOSFET yaitu 12-15V dengan referensi tegangan gate terhadap source serta mampu menjaga ketersediaan tegangan yang digunakan untuk melakukan proses pensaklaran pada MOSFET utama.

Kata Kunci: *Gate Driver, Bootstrap, Electromagnetic Bootstrap.*

Abstract

Gate driver is an electronic circuit that serves to translate the low-voltage signal from the source signal to be fed to discrete MOSFET as a power switch so that it can operate according to its parameters. The problem that often happens is the delay of the switching process on the MOSFET because of the unavailability of a sufficient voltage to drive the MOSFET. In this study, the gate driver circuit has a charging switch in the form of mechanical relays with high impedance between its terminals so as to provide good voltage isolation capability. Backup capacitor keeps the bootstrap capacitor charging process does not interfere with the main MOSFET switching process. Discrete signals from the controller can be processed completely undisturbed process of charging the capacitor as in the conventional bootstrap. From the test results, electromagnetic bootstrap able to provide the appropriate control signals to the MOSFET gate is the gate voltage 12-15V with reference to the source and be able to maintain sufficient voltage is used to make the process of switching on the main MOSFET.

Keywords: *Gate Driver, Bootstrap, Mechanics Bootstrap.*

PENDAHULUAN

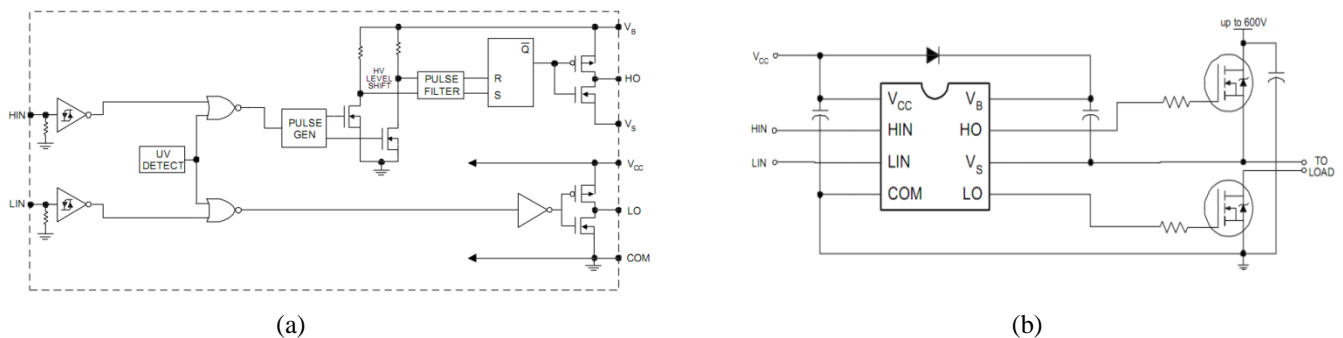
Pulse width modulation (PWM) sebagai salah satu metode untuk pengendalian three level neutral point clamped (NPC) dalam kecepatan operasi yang rendah. Penggunaan PWM ini dipadukan dengan rangkaian gate driver dengan bootstrap. Kelemahan utama dari penggunaan bootstrap ini adalah ketidakmampuan IC bootstrap menghasilkan sinyal ke IGBT untuk kecepatan operasi yang rendah. Hal ini disebabkan tegangan di kapasitor mengalami penurunan yang cepat di bawah ambang batas yang diinginkan. (J. H. Jung dkk,2014: 297-302)

Conventional Bootstrap

Rangkaian *gate driver* berfungsi sebagai penghubung antara sinyal pengendali tegangan titik G terhadap S pada MOSFET. Tegangan tersebut bernama *voltage gate to source* (V_{GS}). Secara umum metode yang sering digunakan adalah metode *bootstrap*. Gambar 1 (a) menunjukkan rangkaian *internal* yang ada pada IC *bootstrap* seri IR2101. Blok diagram memperlihatkan bagian akhir keluaran pin yaitu HO dan LO merupakan rangkaian *push-pull*. Rangkaian tersebut berfungsi untuk mensaklarakan kaki G terhadap S. Jika MOSFET diinginkan menyala maka rangkaian akan melakukan fungsi *push* sehingga kaki G dan S terhubung ke sumber tegangan,

sedangkan jika diinginkan MOSFET mati maka rangkaian akan melakukan fungsi *pull* sehingga kaki G dan S terhubung singkat melalui transistor *pull* di dalam IC tersebut. Referensi dari V_{GS} keluaran LO adalah *ground* sehingga V_{GS} yang keluar di kaki LO sebenarnya bisa tegangan yang sama dengan yang digunakan untuk menyalakan IC.

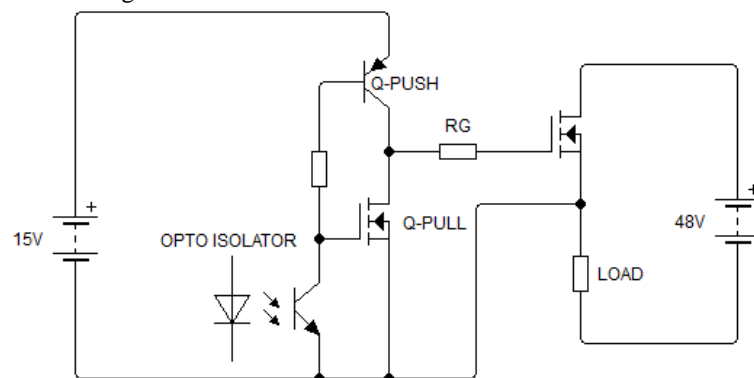
Kapasitor *bootstrap* diisi dengan cara mematikan MOSFET sisi atas pada topologi *half bridge* lalu menyalakan MOSFET sisi bawah sebagaimana ditunjukkan Gambar 1 (b). Arus akan mengalir dari sumber V_{CC} menuju kapasitor *bootstrap* lalu ke *ground* lewat *drain* MOSFET sisi bawah. Saat MOSFET atas menyala dan MOSFET bawah mati, maka muatan yang ada di kapasitor didorong ke pin gerbang MOSFET sedangkan bagian negatif kapasitor terhubung permanen ke S sehingga muatan yang tersimpan pada kapasitor *bootstrap* akan menjadi sumber V_{GS} ketika MOSFET atas menyala. Metode *bootstrap* seperti ini memiliki kelemahan yaitu MOSFET sisi atas tidak bisa selamanya menyala melainkan harus dimatikan sesekali, hal itu karena muatan yang ada pada kapasitor bisa habis dan sesekali harus diisi dengan cara mematikan MOSFET atas dan menyalakan MOSFET bawah. (Grbovic P.J, Arpierelle, M, 2009:1-10)



Gambar 1. (a) *Block diagram* internal IC *bootstrap* IR2101 dan (b) Rangkaian *bootstrap* MOSFET setengah jembatan (Kiralay, 2001)

Isolated Gate Driver

Metode *isolated gate driver* memungkinkan suplai V_{GS} diberikan tanpa perlu mematikan salah satu MOSFET. Kelebihan lainnya adalah MOSFET bisa dinyalakan lebih lama dari metode *conventional bootstrap* karena sumber tegangan V_{GS} selalu tersedia selama tidak hilang atau dimatikan, selain itu metode ini memungkinkan performa yang lebih cepat dalam pensaklaran karena tidak perlu menunggu kapasitor penuh seperti metode *conventional bootstrap*. Gambar 2 menunjukkan bagaimana metode *isolated gate driver* digunakan untuk kemudi MOSFET kanal N dengan beban disisi *source*.

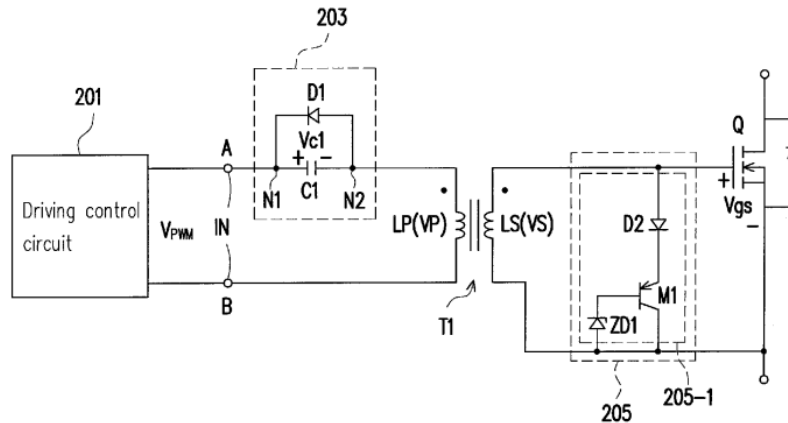


Gambar 2. Rangkaian *Isolated Gate Driver* (Xu Ming dkk., 2013)

Metode *Isolated Gate Driver* memiliki kelemahan diantaranya harus menggunakan suplai terpisah sehingga membutuhkan suplai tambahan dari luar, suplai tersebut dapat diperoleh dari *adaptor* atau dari baterai tambahan. Suplai tegangan berupa tegangan DC dengan besar tidak melebihi batas kemampuan V_{GS} dari MOSFET. Karena sumber suplai V_{GS} adalah sumber terpisah maka terminal negatif dari sumber utama tidak boleh bertemu dengan terminal negatif sumber terpisah lainnya. Untuk mengatasi hal itu sinyal kendali juga terpisah referensi *ground*nya dari rangkaian kemudi sehingga dibutuhkan komponen *opto isolator* yang akan memisahkan referensi *ground*

sinyal kendali dengan *ground* rangkaian kemudi. Kondisi ini berlaku jika terdapat lebih dari satu sumber suplai terpisah menyuplai masing-masing MOSFET.

Isolated gate driver memiliki beberapa pendekatan pada cara pengisolasian tegangan, salah satunya adalah menggunakan trafo isolasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Trafo isolasi memiliki gulungan primer dan sekunder (Xu Ming dkk., 2013). Keduanya terpisah secara kelistrikan namun terhubung secara induksi elektromagnetik, sisi primer dilengkapi rangkaian *driver* pengubah DC ke AC sedangkan di sisi sekunder terdapat rangkaian pengubah AC ke DC serta penyetabil tegangan.



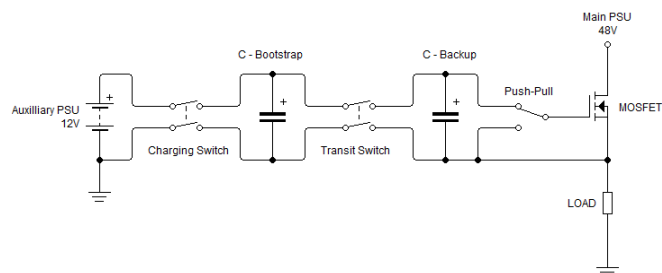
Gambar 3. *Isolated Gate Driver* Menggunakan Trafo Isolasi

Penelitian ini akan mengembangkan suatu topologi *gate driver* dengan pendekatan secara elektromagnetik yang diharapkan bisa menyempurnakan kekurangan dari *conventional bootstrap* dan *isolated gate driver*. *Electromagnetic bootstrap* merupakan hasil penyempurnaan dari kedua metode sebelumnya, dimana perbaikan dilakukan terhadap metode pengisian dan pengosongan kapasitor *bootstrap*. Proses pengisian dalam metode *electromagnetic bootstrap* ini tidak mempengaruhi pensaklaran MOSFET utama, hal ini mungkin tidak jauh berbeda dengan metode *isolated gate driver*. Metode *electromagnetic bootstrap* mengandalkan relay sebagai saklar elektromagnetik dengan nilai impedansi yang sangat tinggi antara terminal NO, NC, dan COM.

Rangkaian *electromagnetic bootstrap*, terdapat blok rangkaian utama diantaranya adalah kapasitor *bootstrap*, kapasitor *backup*, saklar pengisian, osilator lokal, dan *push-pull*. Kapasitor *bootstrap* merupakan kapasitor utama pada rangkaian yang berfungsi sebagai penyimpan muatan dari rangkaian catu daya yang nantinya diarahkan menuju rangkaian *push-pull*, kapasitor *backup* berfungsi sebagai suplai cadangan saat kapasitor *bootstrap* sedang melakukan pengisian sehingga *push-pull* tetap mendapatkan suplai tegangan yang tidak terputus, *push-pull* berfungsi sebagai saklar yang mengirimkan muatan menuju MOSFET utama ataupun mengambil muatan untuk mematikan MOSFET utama, osilator lokal merupakan osilator yang menjadi satu dengan papan rangkaian *electromagnetic bootstrap*, osilator ini berfungsi sebagai pembangkit sinyal pengisian kapasitor *bootstrap* pada rangkaian.

METODE

Perancangan *Electromagnetic Bootstrap*



Gambar 4. Blok Rangkaian *Electromagnetic Bootstrap*

Gambar 4 menunjukkan blok diagram sederhana dari sistem kerja *electromagnetic bootstrap*. Ketika *charging switch* terhubung maka muatan akan mengalir dari *Power Supply Unit* (PSU) 12V menuju kapasitor *bootstrap*. Ketika *charging switch* terbuka maka kapasitor *bootstrap* akan terisolasi dari PSU 12V. Ketika *transit switch* terhubung, maka muatan akan berpindah dari kapasitor *bootstrap* ke kapasitor *backup* dan ketika *transit switch* terbuka maka kapasitor *backup* akan terisolasi dari kapasitor *bootstrap*. Proses pembukaan dan penutupan *charging switch* dan dapat dikendalikan secara otomatis menggunakan rangkaian osilator. Muatan yang ada di dalam kapasitor *backup* dapat disalurkan menuju MOSFET berdasarkan sinyal yang diberikan melalui rangkaian *push-pull*. *Electromagnetic bootstrap* dianggap berfungsi normal jika tegangan keluarannya berada dalam rentang 12 – 15 V.

Perancangan Oscillator

Saklar elektromagnetik dalam melakukan tugasnya membutuhkan sinyal detak yang berasal dari *oscillator*. Jenis *oscillator* yang digunakan adalah *multivibrator astable* yang dibuat menggunakan komponen IC NE555 dan tambahan komponen eksternal untuk menghasilkan frekuensi tertentu.

Penentuan frekuensi detak yang diinginkan akan dipengaruhi nilai R_A , R_B , dan C . Nilai C ditetapkan sebagai konstanta karena lebih mudah mencari variasi nilai resistor daripada nilai kapasitor (Abdillah, 2009). Gambar 5 (a), merupakan rangkaian *tank negative multivibrator astabil* IC555 dengan dua resistor dan sebuah kapasitor. Kapasitor akan termuati melalui R_A dan R_B , ketika sumber tegangan pertama kali dihubungkan. Ketika tegangan pada pin 6 naik di atas $2/3 V_{CC}$, maka terjadi perubahan kondisi komparator yang akan me-reset *flip-flop* sehingga keluarannya akan berubah menjadi positif. Keluaran (pin 3) berubah *low* dan basis Q1 mendapat bias maju. Rangkaian osilator dianggap berfungsi dengan baik jika dapat menghasilkan frekuensi gelombang kotak dan daur tugas (*duty cycle*) sesuai yang diperhitungkan.

Ketika tegangan pada kapasitor C turun sampai di bawah $1/3 V_{CC}$ maka tegangan ini akan diberikan ke komparator dua. Antara *trigger* (pin 2) dan pin 6 masih terhubung bersama. Komparator 2 menyebabkan tegangan positif pada *input set* dari flip-flop dan memberikan *output negative*. *Output* (pin 3) akan berubah ke nilai $+V_{CC}$ dan terjadi proses pengosongan melalui (pin7). Kemudian C mulai terisi lagi ke nilai V_{CC} melalui R_A dan R_B . Kapasitor C akan terisi dengan tegangan berkisar antara $1/3$ dan $2/3 V_{CC}$. Penjelasan secara grafis sebagaimana Gambar 5 (b).

Waktu pengisian kapasitor ditunjukkan oleh jarak t_1 dan t_3 , sedangkan waktu pengosongannya diberikan oleh t_2 dan t_4 . Frekuensi kerja *astable multivibrator* dengan IC 555 diatas dapat dirumuskan secara matematis sebagai berikut:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (1)$$

dengan:

f = frekuensi yang dihasilkan

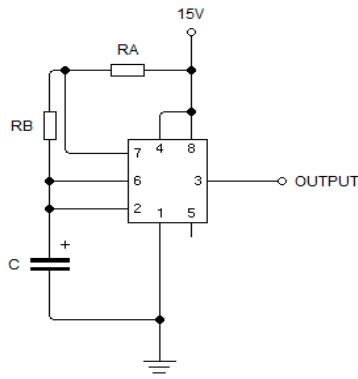
T = Periode gelombang

C = Nilai kapasitor yang digunakan

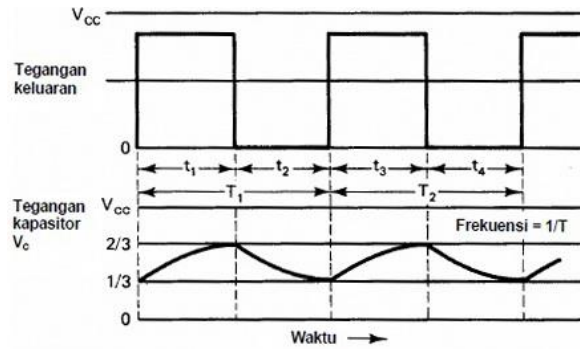
R_A dan R_B = Nilai resistor yang terlibat

Selain frekuensi terdapat pula daur tugas dari pulsa keluaran *oscillator*, hal yang perlu diperhatikan adalah nilai daur tugas tidak terlalu kecil dan tidak terlalu besar karena akan berpengaruh pada pergerakan jangkar *relay*. Nilai daur tugas yang paling sesuai adalah berkisaran 50% dari total periode keseluruhan. Besarnya daur tugas (*dutycycle*) dapat dihitung dengan persamaan (2).

$$\text{Dutycycle} = \frac{R_A + R_B}{(R_A + 2R_B)} \times 100 \quad (2)$$



(a)



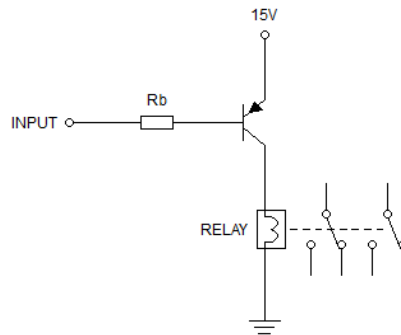
(b)

Gambar 5 (a). NE555 Multivibrator astable (b) Timing Diagram Multivibrator Astable

Perancangan Charging Switch

Perbedaan utama *conventional bootstrap* dan *electromagnetic bootstrap* adalah penggunaan saklar pengisian. *Relay* DPDT dipilih karena selain harganya murah juga memiliki kemampuan pensaklaran arus rendah yang baik tanpa rugi-rugi pensaklaran yang besar di bagian kontakannya, selain itu relay memiliki impedansi yang sangat tinggi dalam mengisolasi tegangan antar terminalnya.

Pengaktifkan kumparan relay dilakukan oleh transistor yang berfungsi sebagai saklar elektronik, sehingga *relay* dapat bekerja sesuai pulsa yang dikirim dari osilator. Gambar 6 memperlihatkan rangkaian untuk memenuhi fungsi tersebut digunakan transistor BJT berjenis PNP sebagai saklar elektronik.



Gambar 6. Transistor PNP Sebagai Penggerak Relay

Transistor PNP yang digunakan untuk mensuplai beban adalah kaki kolektornya. Untuk mengalirkan arus yang cukup dari kaki kolektor ke beban maka transistor PNP membutuhkan aliran arus sekitar 2 mA dari emitor ke basisnya. Arus yang mengalir ditentukan oleh besarnya R_b . *Transistor* yang digunakan adalah MPSA92, berdasarkan *datasheet* untuk menyalakan kolektor dibutuhkan arus sebesar 2 mA dari emitor ke basis sedangkan besarnya V_{eb} saat saturasi adalah maksimum 900 mV. Arus yang mengalir dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$I_b = \frac{V_{cc} - V_{eb}}{R_b} \quad (3)$$

dengan:

I_b : Arus basis

R_b : Resistor pada basis

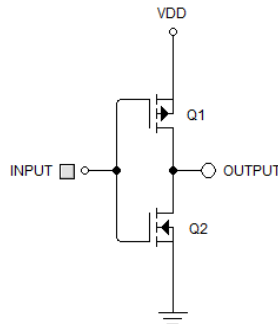
V_{cc} : Tegangan suplai

V_{eb} : Tegangan *drop* emiter terhadap basis

Persamaan (3) dapat digunakan untuk mencari besarnya nilai resistor R_b , dengan tegangan suplai sebesar 15V, tegangan *drop emiter* terhadap basis sebesar 0,9V dan nilai arus basis sebesar 2 mA maka nilai resistor yang dibutuhkan sebesar 7.050 ohm.

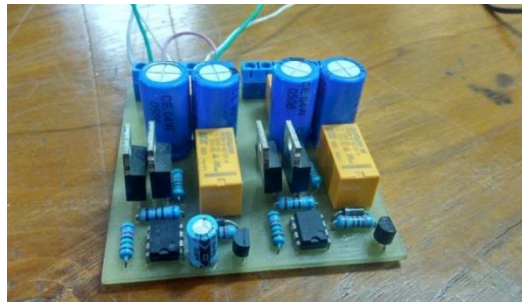
Perancangan Rangkaian *Push-Pull*

Gambar 7 merupakan rangkaian *push-pull*, ketika *input* berlogika 1 maka Q1 akan *off* dan Q2 akan *on* sehingga tegangan *output* akan di *pull down* mendekati *ground*. Ketika *input* berlogika 0 maka Q2 akan *off* dan Q1 akan *on* sehingga tegangan *output* akan di *pull up* mendekati V_{DD} . Jika diperhatikan hubungan antara logika *input* terhadap *output*, konfigurasi jenis ini menghasilkan nilai *output* yang berkebalikan terhadap nilai *input*nya.



Gambar 7. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

Pembuatan *Electromagnetic Bootstrap*



1.

Gambar 8. Dua *Electromagnetic Bootstrap* dalam satu PCB

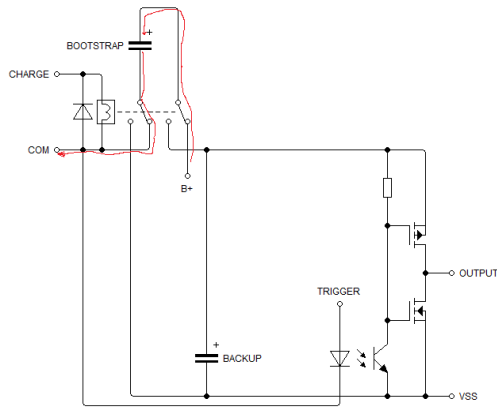
Rangkaian *electromagnetic bootstrap* sebagaimana pada Gambar 8. Rangkaian tersebut merupakan dua buah *electromagnetic bootstrap* dalam satu PCB. Masing masing *electromagnetic bootstrap* terdiri dari kapasitor *backup* dan kapasitor *bootstrap* serta saklar elektromagnetik berupa relay.

HASIL DAN PEMBAHASAN

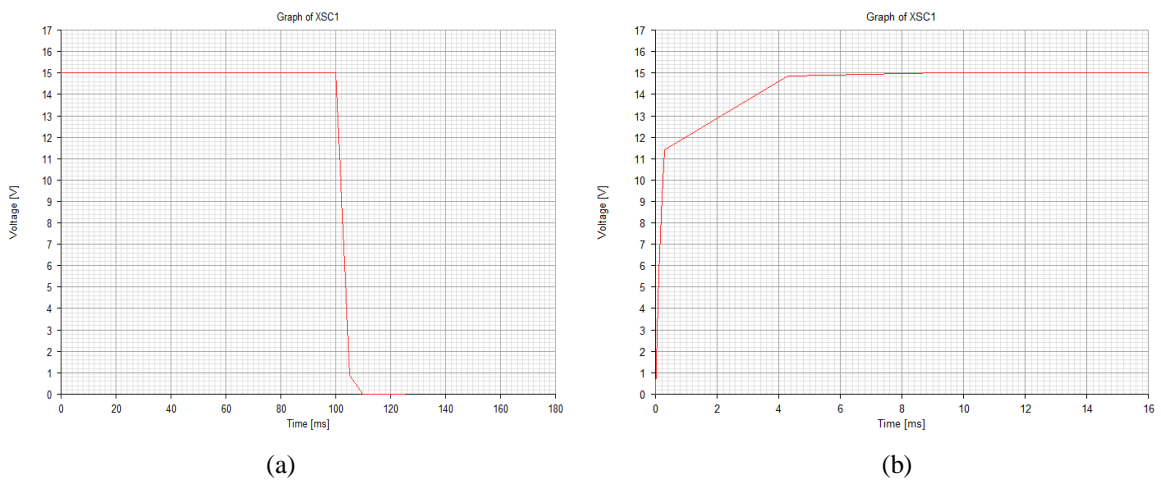
Pengujian dan analisis dilakukan pada setiap blok.

Pengujian Kapasitor *Bootstrap*

Kapasitor *bootstrap* adalah kapasitor yang berfungsi untuk memberikan muatan kepada rangkaian *push-pull* dimana muatan tersebut nantinya akan dikirim sebagai sinyal kendali untuk menyalakan MOSFET. Saat sedang menyuplai rangkaian *push-pull*, titik referensi 0 dari kapasitor *bootstrap* tidak terhubung dengan referensi catu daya utama sehingga kapasitor harus bergantian antara proses pengisian dan pengosongan.



Gambar 9. Arah Muatan Pengisian Kapasitor *Bootstrap*



Gambar 10. (a) Kurva pengisian dan (b) pengosongan kapasitor *bootstrap*

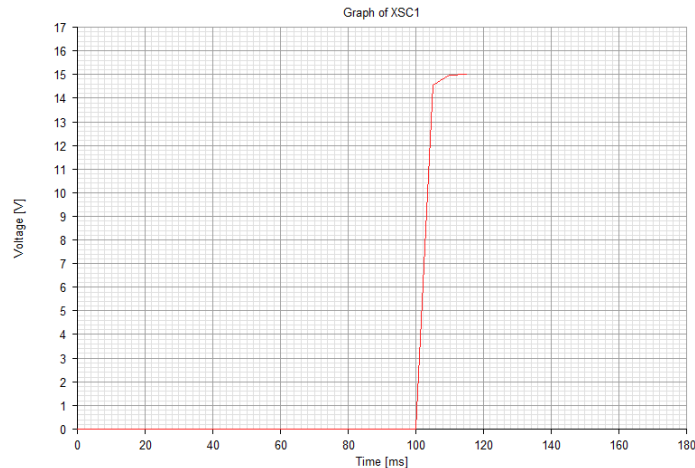
Gambar 9 memperlihatkan saklar pengisian mengarahkan terminal kapasitor *bootstrap* ke terminal catu daya, hal ini mengakibatkan sejumlah muatan dialirkan dari catu daya ke kapasitor, besarnya tegangan yang dihasilkan akan sama dengan tegangan catu daya, sedangkan banyaknya muatan yang disimpan ditentukan dari kapasitansi kapasitor. Dalam penelitian ini dipilih nilai kapasitor 1000 μF dengan alasan mudah mendapatkannya dan proses pengisian tidak terlalu lama dengan arus catu daya yang disediakan. Proses *charging* dapat dilihat pada Gambar 10 (a).

Meskipun jalur pengosongan memiliki resistansi yang lebih kecil tetapi kecepatan *switch* berpindah dari posisi pengisian ke posisi pengosongan memerlukan waktu sekitar kurang lebih diatas 90 ms sehingga proses pengosongan baru terjadi ketika *switch* sudah berpindah terminal. Hal tersebut dibuktikan oleh Gambar 10 (b), dimana terjadi *delay* sebelum pengosongan terjadi.

Pengujian Kapasitor *Backup*

Kapasitor *backup* adalah bagian kapasitor yang berfungsi sebagai catu daya cadangan yang mensuplai rangkaian *push-pull*, saat kapasitor *bootstrap* dalam keadaan pengisian, jangkar saklar pengisian terputus dari rangkaian *push-pull* sehingga rangkaian akan kehilangan catu daya dan tidak bisa mempertahankan sinyal kendali *gate* yang dihasilkan, akibatnya MOSFET utama akan mati disaat diinginkan menyala.

Muatan yang masuk ke kapasitor *backup* berasal dari muatan kapasitor *bootstrap*, kecepatan pemindahan muatan dari kapasitor *bootstrap* menuju kapasitor *backup* ditentukan dari tanggapan alamiahnya dengan nilai resistansi berupa jalur pengisian kapasitor *backup* sebagaimana Gambar 11.



Gambar 11. Kurva Pengisian Kapasitor Backup

Proses pelepasan muatan kapasitor *backup* akan berakhir di jalur *push-pull* yang memiliki kecepatan pensaklaran yang tinggi sehingga tidak terjadi *delay* dalam proses pensaklaran, hal itu terjadi karena *push-pull* merupakan saklar jenis *solid state* dan tidak memiliki *moving part* yang menyebabkan jeda pengosongan yang berarti. Karena kapasitor *backup* selalu dalam keadaan terisi diakibatkan saklar pengisian yang bergerak kontinyu, maka *output* dari kapasitor *backup* akan selalu bertegangan sebagaimana Gambar 12, garis biru merupakan bentuk sinyal yang diinginkan sedangkan garis merah adalah nilai ketersediaan muatan untuk melakukan proses pensaklaran sehingga bisa membentuk sinyal yang diinginkan. Hal tersebut membuktikan bahwa proses pengisian tidak mempengaruhi pensaklaran sinyal.



Gambar 12. Bentuk sinyal pensaklaran input terhadap ketersediaan muatan

Pengujian Pensaklaran *Push-Pull*

Pensaklaran pada MOSFET yang baik adalah proses pensaklaran yang menghasilkan bentuk gelombang kotak sempurna, hal tersebut menandakan bahwa tidak terjadi respon *transient* yang terlalu lama saat transisi pensaklaran dilakukan. Sangat penting diketahui bahwa semakin panjang respon *transient* suatu pensaklaran maka disipasi daya yang terjadi semakin besar yang artinya daya tidak tersalurkan sepenuhnya ke beban melainkan hilang sebagian menjadi panas.

Kemampuan *electromagnetic bootstrap* dalam mereplika gelombang kotak yang masuk, merupakan indikator frekuensi nominal sehingga diharapkan tidak digunakan untuk frekuensi yang melebihi dari frekuensi nominalnya. Garis biru pada *oscilloscope* adalah sinyal *input* sedangkan garis kuning adalah sinyal *output*.



Gambar 13. (a) Sinyal pensaklaran pada frekuensi 1kHz dan (b) frekuensi 1,8 kHz

Gambar 13 (a) memperlihatkan *input* frekuensi sebesar 1kHz pada *electromagnetic bootstrap* akan memberikan *distorsi* pada sinyal keluaran. Hal tersebut terjadi karena melesetnya hasil perhitungan pada komponen yang digunakan dirangkaian *push-pull*.

Gambar 13 (b) memperlihatkan, apabila rangkaian diberi sinyal *input* frekuensi sebesar 1,8 kHz dengan bentuk gelombang kotak, maka terjadi kecacatan sinyal semakin membesar dari sinyal aslinya. Hal tersebut kemungkinan diakibatkan oleh rangkaian *push-pull* yang sinyal keluarannya sudah tidak mampu mengikuti pensaklaran sinyal masukannya.

Gambar 14, apabila rangkaian diberi *input* frekuensi sebesar 3,3 kHz namun karena rangkaian tidak mampu lagi mempertahankan bentuk sinyal maka terjadi kecacatan sinyal hingga frekuensi yang terbaca mencapai hampir 3,4kHz meleset dari sinyal masukan yang diinginkan. Dengan kondisi bentuk sinyal demikian maka rangkaian dinyatakan tidak layak beroperasi pada frekuensi 3,3 kHz bahkan pada beban kecil sekalipun. Kemungkinan alat yang dioperasikan tetap terlihat dapat berfungsi dengan normal, namun jika diukur lebih dalam, telah terjadi disipasi daya yang cukup besar sehingga menurunkan efisiensi kerja saat alat beroperasi.



Gambar 14. Sinyal Pensaklaran Pada Frekuensi 3,3kHz

Dari analisa hasil pengujian tersebut maka dapat diambil kesimpulan bahwa rangkaian *push-pull* pada *electromagnetic bootstrap* yang dirancang hanya mampu beroperasi maksimal pada frekuensi 1 kHz, selain itu pada nilai tersebut terjadi sedikit kecacatan sehingga disarankan untuk menggunakan sinyal dengan frekuensi dibawah 1kHz. Jika dipaksakan menggunakan sinyal 1kHz terlalu lama kemungkinan MOSFET utama akan panas saat beroperasi. Hal tersebut terjadi karena jika sinyal keluaran tidak gelombang kotak sempurna menandakan ada respon *transient* yang cukup lama yang menyebabkan disipasi daya terakumulasi menjadi panas.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada uji coba *electromagnetic bootstrap* sebagai *gate driver* pada MOSFET dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. *Electromagnetic bootstrap* mampu memberikan sinyal kendali *gate* yang sesuai kepada MOSFET yaitu 12 – 15 V dengan referensi tegangan *gate* terhadap *source*.
2. Pendekatan secara elektromagnetik memungkinkan saklar pengisian memiliki impedansi yang sangat tinggi antara kondisi pengisian dan pengosongan sehingga tidak terjadi arus bocor ketika salah satu kondisi sedang dilakukan.

3. *Electromagnetic bootstrap* mampu menjaga ketersediaan tegangan yang digunakan untuk melakukan proses pensaklaran pada MOSFET utama.
4. *Gate driver electromagnetic bootstrap* mampu mengoperasikan MOSFET secara aman menggunakan sinyal bertegangan rendah yang berasal dari pengendali.

Saran

Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperbaiki dan mengoptimalkan waktu *switching* dari *electromagnetic relay* nya agar umurnya dapat lebih panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah Eddy Gatot. 2009. *Tugas Akhir Jam Digital*. Universitas Mercubuana. Jakarta.
- Grbovic P.J, Arpilliere M., 2009, *IGBT cross Conduction Phenomenom – Origin and Simple Protection Gatedriving Technique*, Power Electronics and Applications Conference, Bercelona
- J. H. Jung, H. G. Ku, W. S. Im and J. M. Kim, 2014, *A PWM control strategy for low-speed operation of three-level NPC inverter based on bootstrap gate drive circuit*, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC*.
- Kiraly Laszlo. *Simple High Side Drive Provides Fast Switching and Continuous On-Time*. International Rectifier, Germany
- Xu Ming, Zhu Jing-Peng, Sun Ju-Lu, Nan Zhang-He. 2013. *Isolated Gate Driver Adapted for PWM-Based Switching Power Supply*. Patent - US2013/0076406 (A1)