

Desain dan Implementasi Driver Motor Controller untuk Pengatur Kecepatan Motor BLDC 500W 48V

Lhudchya Imanuela Jerico

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

disyajericooooo@gmail.com

Angga Rusdinar

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

Anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id

Irwan Purnama

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

IrwanP@telkomuniversity.ac.id

Abstrak— Berkembangnya jumlah kendaraan bermotor telah meningkatkan tingkat polusi udara di berbagai kota. Untuk mengatasi permasalahan ini, mobil listrik muncul sebagai solusi yang ramah lingkungan. Kontroler, sebagai otak dari mobil listrik, memainkan peran kunci dalam mengatur kecepatan motor Brushless DC (BLDC), salah satu komponen utama pada mobil listrik. Kontroler ini menggunakan metode six-step commutation untuk mengatur frekuensi dan memastikan bahwa BLDC berputar sesuai dengan input kecepatan yang diinginkan. Penelitian ini menunjukkan bahwa BLDC dapat beralih dari keadaan diam hingga mencapai kecepatan maksimum sebesar 172,9 RPM pada frekuensi 39,5 Hz.

Kata kunci : Kontroler, BLDC, Kecepatan, Frekuensi

1. PENDAHULUAN

Penggunaan berkelanjutan bahan bakar fosil telah menyebabkan peningkatan yang stabil dari konsentrasi CO₂ di atmosfer menjadi 400,26 ppm pada tahun 2015, Sektor transportasi merupakan faktor utama bagi konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca [1]. Peningkatan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia ialah sebesar 7 juta unit tiap tahunnya. Jika peningkatan jumlah kendaraan bermotor berbahan bakar fosil terus meningkat dalam beberapa tahun kedepan hal itu akan menyebabkan makin meningkatnya gas rumah kaca di atmosfer. Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif untuk menggantikan kendaraan bahan bakar fosil yaitu kendaraan listrik. Akan tetapi hal tersebut menimbulkan masalah baru yaitu pada sistem kendali yang berbeda. Dimana kendaraan listrik bergerak menggunakan motor listrik yang di kendalikan oleh sebuah kontroler motor.

Pada masa sekarang motor listrik yang memiliki efisiensi paling tinggi ialah motor BLDC. Tipe motor ini memiliki sistem kendali yang berbeda dengan motor DC

pada umumnya, motor ini menggunakan sistem kendali 3 fasa dimana sistem kendali ini ada untuk mengatur nilai tegangan BEMF. Karena rumitnya sistem kendali 3 fasa yang digunakan oleh motor BLDC, menyebabkan tingginya harga untuk kontroler motor tersebut. Oleh karena itu, peningkatan teknologi kendali untuk kontrol motor BLDC perlu dilakukan agar efisiensi pada motor dapat dimaksimalkan.

Motor BLDC merupakan motor dalam klasifikasi *synchronous AC*, oleh karena itu diperlukan kontrol kecepatan yang mampu menstabilkan kecepatan motor BLDC. Motor BLDC menggunakan 3 fasa yang terhubung ke driver untuk sistem kendalinya maka diperlukan sistem komutasi. Sistem komutasi yang digunakan pada motor BLDC ialah *hall sensor* yang terhubung dengan inverter *six step comutation*. Untuk menunjang performansi komutasi dalam kendali motor, maka diterapkan sistem kendali untuk menghasilkan kinerja kontroler yang sesuai. Penelitian sebelumnya mengenai kendali BLDC menggunakan metode Six-Step telah menghasilkan pemahaman mendalam tentang keunggulan dan keterbatasan metode ini.

Beberapa studi telah fokus pada implementasi Six-Step dalam aplikasi tertentu, seperti sistem otomotif atau peralatan rumah tangga. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Six-Step memberikan solusi yang handal dan ekonomis dalam situasi-situasi di mana tingkat presisi kontrol dan kompleksitas sistem tidak menjadi prioritas utama. Studi terdahulu juga membahas pengoptimalan parameter Six-Step untuk meningkatkan kinerja motor dan efisiensi energi. Pemahaman mendalam terhadap karakteristik motor BLDC saat menggunakan metode ini telah memberikan pandangan yang lebih baik dalam mengimplementasikannya dalam berbagai konteks aplikasi.

Hasil penelitian ini dapat memberikan panduan berharga bagi pengembang sistem dan insinyur dalam memilih metode kendali yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi mereka, terutama dalam hal keseimbangan antara kinerja dan biaya implementasi.

2. KAJIAN TEORI

2.1 Teori

A. Motor BLDC (*Brushless Direct Current*)

Motor BLDC (Brushless DC) adalah jenis motor listrik yang menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan medan magnet yang memutar rotor. Berbeda dengan motor DC tradisional, motor BLDC tidak memiliki sikat (brush) yang menyebabkan gesekan dan keausan. Penggantian sikat dengan kontrol elektronik memungkinkan motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi dan umumnya memiliki keandalan yang lebih baik. Sistem motor BLDC menggambarkan suatu konsep sistem penggerak yang responsif dan efisien dalam hal energi. Sistem ini dikonstruksi dengan mengintegrasikan elemen-elemen elektromekanik, rangkaian elektronika, sistem sensor, dan logika kendali mikro dalam satu kesatuan[2]. Motor ini bekerja dengan prinsip komutasi elektronik, yang mengarah pada operasi yang lebih bersih dan minim gesekan mekanis. Motor BLDC sering digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk kendaraan listrik, perangkat rumah tangga, dan sistem otomatisasi industri. Keunggulan utamanya meliputi keandalan yang tinggi, efisiensi energi, dan kurangnya keausan sikat, membuatnya menjadi pilihan yang populer untuk aplikasi yang memerlukan kontrol kecepatan dan efisiensi yang tinggi. Motor BLDC dapat diintegrasikan dengan sistem kontrol yang canggih untuk memenuhi berbagai kebutuhan aplikasi.

B. Six-Step Commutation

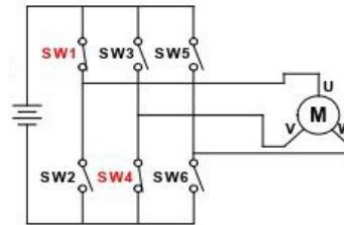
Six-step commutation adalah suatu metode pengendalian atau komutasi yang digunakan dalam motor Brushless DC (BLDC). Metode ini digunakan untuk mengatur urutan pengaktifan fase motor BLDC sesuai dengan posisi rotor, sehingga menghasilkan putaran yang lancar dan efisien.

Pada motor BLDC, rotor dilengkapi dengan magnet permanen, dan stator memiliki tiga fase yang masing-masing memiliki dua buah transistor. Metode Six Step digunakan untuk mengubah tegangan melalui suatu rangkaian inverter dengan menggunakan sinyal input dari port output Arduino Uno. Input ini diberikan dalam bentuk pulsa dengan kondisi high dan low. Gelombang trapezoid dihasilkan dengan menerapkan tiga algoritma six step yang memiliki interval sudut 60 derajat. Saklar MOSFET Q1 dan Q4 aktif secara bergantian, yang diikuti oleh aktivasi bergantian saklar Q3 dan Q5, serta Q2

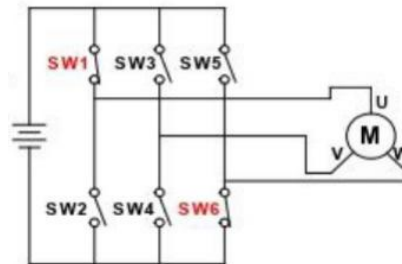
dan Q6. Proses ini memastikan konversi efisien tegangan dengan memanfaatkan algoritma six step untuk mengatur dengan tepat saklar-saklar MOSFET pada interval sudut tertentu[3].

Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

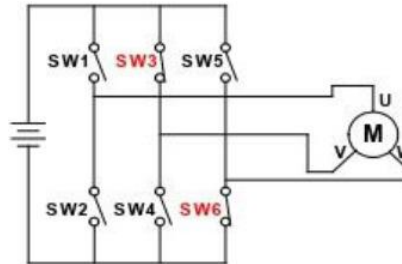
1. Kondisi ke-1 : S1 dan S4 ON, Fasa yang aktif adalah Fasa A dan Fasa B



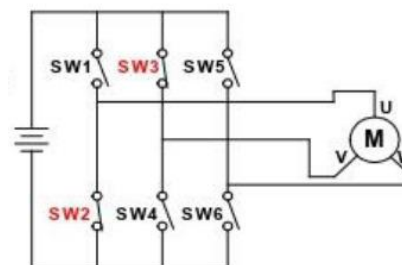
2. Kondisi ke-2 : S1 dan S6 ON, Fasa yang aktif adalah Fasa A dan Fasa C



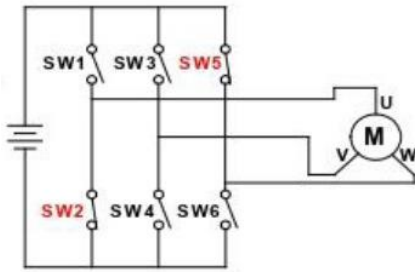
3. Kondisi ke-3 : S3 dan S6 ON, Fasa yang aktif adalah Fasa B dan Fasa C



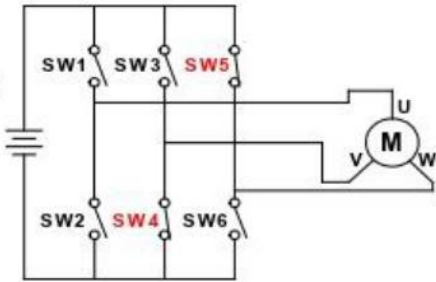
4. Kondisi ke-4 : S3 dan S2 ON, Fasa yang aktif adalah Fasa C dan Fasa A



5. Kondisi ke-5 : S5 dan S2 ON, Fasa yang aktif adalah Fasa A dan Fasa B



6. Kondisi ke-6 : S5 dan S4 ON, Fasa yang aktif adalah Fasa C dan Fasa B



C. Sensor Hall

Sensor Hall adalah perangkat deteksi yang menggunakan prinsip efek Hall untuk mengukur medan magnet. Perangkat ini terdiri dari sensor semikonduktor khusus yang menghasilkan tegangan output berdasarkan perubahan medan magnet yang melaluinya. Ketika sensor Hall terpapar oleh medan magnet eksternal, muatan listrik dalam sensor mengalami defleksi, menghasilkan tegangan yang sebanding dengan kekuatan medan magnet. Sensor Hall banyak digunakan dalam aplikasi pengukuran posisi, kecepatan, dan arah, terutama dalam perangkat elektronik dan kendaraan listrik. Kelebihan utamanya meliputi keakuratan, keandalan, dan kemampuan bekerja tanpa kontak fisik dengan objek yang diukur.

D. Kontrol Frekuensi

Metode ini mengendalikan kecepatan motor dengan mengubah frekuensi pulsa yang diberikan ke fase motor BLDC. Frekuensi pulsa diatur sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.

E. Proteksi Listrik

Proteksi listrik yang menggunakan MCB (Miniature Circuit Breaker) Schneider 50A adalah suatu konfigurasi perlindungan elektrikal yang memanfaatkan MCB Schneider dengan kapasitas arus 50A. MCB adalah perangkat perlindungan yang dirancang untuk memutuskan aliran listrik jika terjadi kelebihan arus atau gangguan pada sirkuit listrik. Komponen ini memberikan lapisan keamanan yang efektif dalam menghadapi situasi kelebihan arus, sehingga melindungi peralatan dan orang-orang di sekitarnya dari potensi bahaya listrik.

2.2 Komponen

A. IRFB4110[4]

IRFB4110 memiliki $V_{DS} = 180V$ yang membuat kontroler masih bisa beroperasi sesuai tegangan operasionalnya yaitu 48V. Kemudian, dengan $R_{DS(on)} = 4,5m\Omega$ yang lebih rendah membuat MOSFET akan mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan efisiensi kontroler itu sendiri. IRFB4110 memiliki switching MOSFET yang tinggi, dilihat dari IRFB4110 yang memiliki $rise\ time\ (t_r) = 67ns$ dan $fall\ time\ (t_f) = 88ns$ yang cepat. Hal ini berarti, MOSFET dapat dengan cepat mengendalikan aliran arus melalui *channel*-nya. Semakin cepat MOSFET melakukan *switching*, semakin rendah kehilangan daya *switching*-nya. Hal ini membantu meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

B. IR2101[5]

IR2101 adalah sebuah driver yang dirancang khusus untuk mengendalikan MOSFET dan IGBT pada aplikasi inverter dan konverter. Perangkat ini sering digunakan dalam sistem daya untuk menggerakkan switch-daya tinggi dengan efisiensi yang baik. Karena tegangan IR2101 memiliki kapasitas hingga 600V, driver ini sesuai untuk mengoperasikan IRFB4110. Selain itu, IR2101 memiliki kemampuan *switching* yang cepat dengan $rise\ time\ (t_r) = 80ns-120ns$ dan $fall\ time\ (t_f) = 40ns-70ns$

Driver ini dilengkapi dengan dua bagian utama: low-side dan high-side. Bagian low-side digunakan untuk mengendalikan transistor daya pada jalur tanah (ground), sementara bagian high-side digunakan untuk mengendalikan transistor daya pada jalur tegangan tinggi.

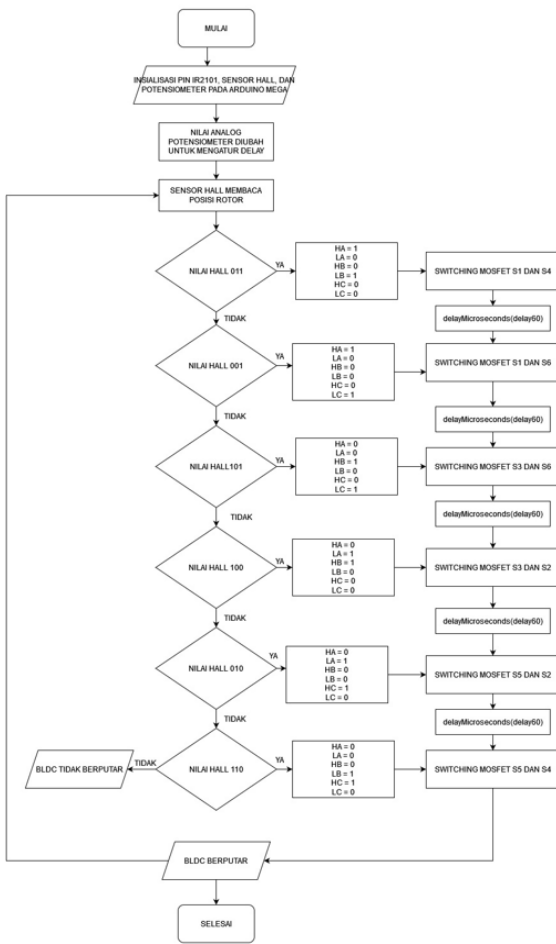
IR2101 dilengkapi dengan berbagai fitur perlindungan seperti UVLO (Undervoltage Lockout), Shutdown, dan fitur dead time. UVLO melindungi perangkat dari kerusakan karena tegangan rendah, sementara fitur Shutdown mematikan driver secara keseluruhan untuk menghemat daya ketika tidak diperlukan. Fitur dead time memastikan bahwa transistor low-side dan high-side tidak mengalir bersamaan, menghindari kemungkinan short circuit.

C. ARDUINO MEGA

Arduino Mega adalah papan pengembangan mikrokontroler yang berbasis ATmega2560, menyediakan lebih banyak pin I/O dan sumber daya dibandingkan dengan model Arduino lainnya. Dengan 54 pin digital I/O, 16 pin analog input, dan kapasitas pemrograman yang besar, Arduino Mega cocok untuk proyek-proyek yang membutuhkan koneksi dan kontrol yang kompleks. Board ini digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi, termasuk otomatisasi, robotika, dan sistem kontrol.

D. DIODA 1N4148[6]

Dioda 1N4148 adalah dioda semikonduktor yang sering digunakan untuk aplikasi umum di dalam rangkaian elektronika. Dengan cepatnya waktu pemulihan dan tegangan



Gambar 3.6 Flowchart Kinerja Kontrol Kecepatan BLDC 500W 48V

Kontroler yang digunakan untuk menggerakkan BLDC 500W 48V, awalnya dilakukan inisialisasi pin MOSFET, sensor *Hall*, dan potensiometer yang dihubungkan dengan arduino mega. *Input* potensiometer menghasilkan nilai analog yang diubah menjadi nilai *delay per step* komutasi. Dengan, sensor *Hall* yang ada pada motor akan mendeteksi letak pergerakan rotor, data hasil pendeteksian tersebut akan dikirimkan ke arduino mega untuk dilakukan proses *six step commutation*. Nilai *delay per step* komutasi yang didapatkan berdasarkan putaran potensiometer inilah yang akan menentukan kecepatan perputaran motor BLDC.

D

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Desain Sistem

4.1.1 Menentukan Tegangan Kerja

Sebelum merancang kontroler BLDC untuk mengendalikan kecepatan motor dengan beralih MOSFET 3 fasa yang diatur oleh mikrokontroler Arduino Mega, kita perlu menetapkan tegangan DC kerja maksimum sesuai dengan spesifikasi MOSFET yang mencapai hingga 100 Vdc, dan kemampuan arusnya maksimal adalah 180A. Tegangan operasional dari

kontroler yang sedang dibuat, dirancang agar kompatibel dengan motor BLDC dalam kisaran 36V hingga 48VDC.

4.1.2 Merancang Switching MOSFET 3 Fasa

Sebelum, merancang switching MOSFET 3 fasa, kita perlu mengetahui urutan logika Hall berdasarkan pergerakan motor. Hal ini dapat dilakukan dengan menghubungkan sensor Hall BLDC dengan Arduino Mega untuk dilakukan pembacaan pada serial monitor atau membaca tegangan pada jalur rangkaian sensor Hall. Ketika berlogika 1 akan terbaca tegangan sebesar 3,3V-5V dan ketika berlogika 0 akan terbaca tegangan sebesar 0V.

Urutan	Hall A (Kuning)	Hall B (Hijau)	Hall C (Biru)
1	0	1	1
2	0	0	1
3	1	0	1
4	1	0	0
5	1	1	0
6	0	1	0

Tabel 4.1 Urutan Pergerakan BLDC Sesuai Input Sensor Hall

Kemudian, kita akan menentukan urutan MOSFET yang aktif agar MOSFET tidak dalam kondisi ON secara bersamaan pada fasa yang sama.

KONDISI KE-	PENSAKELARAN DRIVER BLDC								
	HA	LA	HB	LB	HC	LC	FASA A	FASA B	FASA C
1	1	0	0	1	0	0	+VDC	-VDC	0
2	1	0	0	0	0	1	+VDC	0	-VDC
3	0	0	1	0	0	1	0	+VDC	-VDC
4	0	1	1	0	0	0	-VDC	+VDC	0
5	0	1	0	0	1	0	-VDC	0	+VDC
6	0	0	0	1	1	0	0	-VDC	+VDC

Tabel 4.2 Urutan Jalur MOSFET Aktif

4.1.3 Merancang Rangkaian Booststrap

Untuk menghitung Rangkaian *Bootstrap*, diperlukan data-data sebagai berikut berdasarkan *datasheet* tiap komponen :

-) MOSFET IRFB4110

- $Q_{GATE} = 2,1 \times 10^{-7} C$ (Maksimum)
- $I_{LKGS} = I_{GSSF} = 1 \times 10^{-7} A$ (Maksimum)
- $V_{GS(MIN)} = 2 V$

-) Driver MOSFET IR2101

- $I_{QBS} = 5,5 \times 10^{-5} A$ (Maksimum)
- $I_{LK} = 5 \times 10^{-5} A$ (Maksimum)
- $Q_{LS} = 3 \times 10^{-9} C$

-) Kapasitor 1uF 50V

- $I_{LKCAP} = 3 \mu A = 3 \times 10^{-6} A$

-) Dioda 1N4148

- Bootstrap Diode = 1N4007
- $I_{LKDIODE} = 2,5 \times 10^{-8} A$ (Maksimum)
- $V_F = 1 V$

4.1.3.1 Kapasitor Bootstrap

Nilai dari kapasitor *bootstrap* dihitung berdasarkan rumus berikut :

$$C_{BOOT} = \frac{Q_{TOTAL}}{V_{BOOT}} \quad (4.1)$$

Keterangan :

Q_{TOTAL} = Jumlah total muatan yang disuplai oleh kapasitor *bootstrap* (Coulomb)

ΔV_{BOOT} = Penurunan tegangan maksimum yang diperbolehkan (Volt), bergantung dari minimum voltase driver MOSFET untuk dipertahankan (Volt).

-) Jumlah total muatan yang disuplai oleh kapasitor *bootstrap* dihitung dengan :

$$Q_{TOTAL} = Q_{GATE} + (I_{LK_CAP} + I_{LKGS} + I_{QBS} + I_{LK} + I_{LK_DIODE}) \times (t_{ON} + Q_{LS}) \quad (4.2)$$

Keterangan :

Q_{GATE} = Total gate charge (Coulomb) (*Datasheet* MOSFET).

I_{LK_CAP} = Bootstrap capacitor leakage current (Ampere) (*Datasheet* Kapasitor Elektrolit).

* Bootstrap capacitor leakage current hanya di input nilainya jika kapasitor elektrolit digunakan. Jika tidak, hal ini dapat diabaikan ($I_{LK_CAP}=0$). Parameter ini dapat ditemukan di *datasheet* kapasitor, namun dapat diabaikan jika jenis kapasitor lain digunakan.

I_{LKGS} = Switch gate-source leakage current (Ampere) (*Datasheet* MOSFET)

* $I_{LKGS} = I_{GSSF}$ (Gate to source forward leakage (Ampere) (*Datasheet* MOSFET)

I_{QBS} = Bootstrap circuit quiescent current (Ampere) (*Datasheet* Driver MOSFET)

I_{LK} = Bootstrap circuit leakage current (Ampere) (*Datasheet* Driver MOSFET)

$t_{ON} = t_H$ = High-side switch on time (Second)

I_{LK_DIODE} = Bootstrap diode leakage current (Ampere) (*Datasheet* Dioda)

* Bootstrap diode leakage current hanya diinput nilainya jika menggunakan eksternal dioda. Jika tidak, hal ini dapat diabaikan ($I_{LK_DIODE}=0$).

Q_{LS} = Charge required by the internal level shifter, yang diatur pada 3nC ($3 \times 10^{-9}C$) untuk semua tegangan tinggi Driver MOSFET.

-) Penurunan tegangan maksimum yang diperbolehkan (V_{BOOT}) dihitung dengan :

$$V_{BOOT} = V_{DD} - V_F - V_{GS(MIN)} \quad (4.3)$$

Keterangan :

V_{DD} = Supply voltage of gate driver (Volt)

V_F = Bootstrap diode forward voltage drop (Volt)

$V_{GS(MIN)} = V_{GS_TH(MIN)}$ = Minimum gate threshold voltage (Volt)

Berdasarkan rumus (4.1), (4.2), dan (4.3) didapatkan :

$$Q_{Total} = (2,1 \times 10^{-7}) + ((3 \times 10^{-6}) + (1 \times 10^{-7}) + (5,5 \times 10^{-5}) + (5 \times 10^{-5}) + (2,5 \times 10^{-8})) \times ((1 \times 10^{-2}) + (3 \times 10^{-9})) = 1,29 \times 10^{-6}C$$

$$V_{BOOT} = 15 - 1 - 2 = 12V$$

$$C_{BOOT} = (1,29 \times 10^{-6}) / (12) = 1,075 \times 10^{-7} F = 0,1075\mu F$$

Maka, dipilih kapasitor *bootstrap* jenis kapasitor elektrolit > 0,1075F yaitu 1uF menyesuaikan ketersediaan komponen di pasaran. Untuk menghitung banyaknya arus yang dibutuhkan oleh C_{BOOT} dalam menampung Q_{TOTAL} sebagai berikut:

$$D_{MIN} = T_{OFF} / T_{CYC} \quad (4.4)$$

Keterangan :

D_{MIN} = Parameter duty cycle minimum

T_{OFF} = Waktu *high* saat Q2 ON (Second)

T_{CYC} = Waktu yang diperlukan untuk untuk 1 cycle (Second)

Maka, berdasarkan rumus (4.8) didapatkan $T_{OFF} = D_{MIN} \times T_{CYC} = 0,5 \times (2 \times 10^{-2}) = 1 \times 10^{-2} s$.

Sehingga, arus yang dibutuhkan oleh C_{BOOT} dalam menampung Q_{TOTAL} adalah:

$$I_{CHRG} = Q_{Total} / T_{OFF} \quad (4.5)$$

$$= 1,29 \times 10^{-6} / 0,02$$

$$= 6,45 \times 10^{-5}A$$

Sehingga, dibutuhkan 0,0645mA untuk C_{BOOT} dapat menampung Q_{TOTAL} .

4.1.3.2 $R_{G(external)}$ (Resistor eksternal pada kaki *gate* MOSFET)

Untuk menghitung nilai resistor eksternal, dilakukan perhitungan sebagai berikut:

-) Menghitung *peak current* (arus yang melewati kaki *gate* MOSFET)

$$i_G = \frac{\Delta V_{GS,datasheet}}{R_{G,datasheet} + R_{G,internal}} \quad (4.6)$$

Keterangan :

i_G = Arus yang melewati kaki *Gate* MOSFET

ΔV_{GS} = Tegangan *Gate to Source* ($\Delta V_{GS} = V_{cc}$, jika tidak diketahui $V_{GS(on)}$ dan $V_{GS(off)}$ pada *datasheet*)

R_G = Nilai resistor *Gate* saat pengkondisian pada MOSFET sesuai *datasheet*)

$R_{G(internal mosfet)}$ = Nilai resistor internal MOSFET (asumsi sama dengan nol saat tidak diketahui pada *datasheet*)

Berdasarkan *datasheet* MOSFET didapatkan :

$$R_G = 2,6\Omega$$

$$R_{G(\text{internal mosfet})} = 1,3\Omega$$

$$\Delta V_{GS} = 15V$$

Maka, berdasarkan rumus (4.6) didapatkan *peak current* sebesar :

$$i_G = 15 / (2,6 + 1,3) = 3,84A$$

-) Aplikasi pada rangkaian

Dengan berdasarkan *datasheet* MOSFET didapatkan $\Delta V_{GS} = 15V$, maka berdasarkan rumus (4.6) didapatkan $R_{G_{\text{external}}}$ sebesar :

$$R_{G_{\text{external}}} = \frac{\Delta V_{GS, \text{datasheet}}}{i_G} - R_{G, \text{int}} \quad (4.7)$$

$$R_{G_{\text{external}}} = (15 / 3,84) - 1,3 = 2,6\Omega$$

Pemilihan $R_{G_{\text{external}}}$ diharuskan $2,6\Omega \leq R_{G_{\text{external}}}$ untuk menghindari *turn on rise time* dan *turn off fall time* yang tidak boleh semakin lambat atau semakin cepat untuk melakukan *switching*. Oleh karena itu, penulis memilih $R_{G_{\text{external}}}$ sebesar 20Ω .

4.1.3.3 Dioda Bootstrap

Dipilih dioda IN4007 yang memiliki *reverse recovery time* tercepat yaitu sebesar maksimal 4ns berdasarkan isi dari *datasheet* komponen.

4.2 Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengukur RPM BLDC. Data yang didapatkan adalah sebagai berikut:

NO	DUTY CYCLE + (%)	DUTY CYCLE - (%)	FREKUENSI (Hz)	ADC (μs)	RPM	KONDISI
1	45,45	54,55	39,5	4.500	172,9	Sangat cepat
2	50	50	33,3	5.000	156,6	Sangat cepat
3	60	40	30,3	5.500	133	Lebih cepat
4	43,69	56,31	27,7	6.000	124,9	Lebih cepat
5	59,82	40,18	25,6	6.500	103,9	Lebih cepat
6	50	50	23,8	7.000	96,8	Lebih cepat
7	50	50	22,2	7.500	92,2	Melambat
8	59,95	40,05	29,83	8.000	87,5	Melambat
9	57,52	42,48	19,6	8.500	79,1	Melambat
10	49,82	50,18	18,2	9.000	74,4	Lebih lambat
11	50,17	49,83	17,3	9.500	69	Lebih lambat

Tabel 4.3 Hasil Pengujian RPM

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa perubahan nilai ADC mempengaruhi nilai duty cycle yang diatur secara default 50%:50% dengan tingkat perbedaan sebesar 6,31%-10%. Seiring bertambahnya nilai ADC yang dihasilkan oleh perputaran potensiometer pula, frekuensi yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai ADC yang merupakan nilai delay gelombang kotak per step komutasinya, berkebalikan dengan nilai frekuensi sesuai

dengan perhitungan yang didapatkan dari $T = 1 / f$. Besarnya frekuensi berdampak pada kinerja motor yaitu RPM. Terlihat bahwa RPM BLDC akan sangat cepat apabila frekuensinya besar dan berputar dengan sangat lambat apabila frekuensi yang dihasilkan kecil.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- (1) Ada beberapa faktor yang mempengaruhi RPM BLDC yaitu pertama, semakin besar frekuensi, semakin besar pula RPM yang dihasilkan. Kedua, semakin besar nilai ADC yang dihasilkan oleh potensiometer berpengaruh terhadap periode gelombang kotak yang dihasilkan. Ketiga, semakin lebar gelombang, kinerja motor akan semakin melambat. Sedangkan, semakin sempit lebar gelombang, kinerja motor akan semakin cepat.
- (2) Kontroler yang digunakan untuk BLDC 500W 48V dapat mengatur kecepatan motor dari keadaan diam hingga bergerak dengan kecepatan maksimum sebesar 172,9 RPM pada frekuensi 39,5 Hz.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tulus, V., & Sidabutar, P. (2020). Kajian pengembangan kendaraan listrik di Indonesia: prospek dan hambatannya. In *Jurnal Paradigma Ekonomika* (Vol. 15, Issue 1).
- [2] Hidayat. 2014. Pengembangan Hybrid PID-ANFIS (Proportional Integral Derivative Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems) sebagai Pengendali Kecepatan Mesin Arus Searah Tanpa Sikat (MASTS). Desertasi: Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- [3] R. J. Andika, A. Rusdinar, and A. S. Wibowo, "Perancangan dan Implementasi Driver Motor Tiga Fasa untuk Pengendali Kecepatan Motor BLDC Berbasis PWM pada Mobil Listrik," e-proceeding Eng., vol. 5, no. 1, pp. 48–54, 2018.
- [4] IOR. Datasheet IRFB4110. Diakses pada 6 Februari 2024 dari <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/131924/IRF/IRFB4110PBF.html>
- [5] IOR. Datasheet IR2101. Diakses pada 6 Februari 2024 dari <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/68056/IRF/IR2101.html>
- [6] VVTE. Datasheet IN4148. Diakses pada 6 Februari 2024 dari <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/190208/WTE/IN4148.html>