

Perancangan Kendali Digital Berbasis FPGA untuk Mengendalikan Motor BLDC

Nurul Hidayat
Department Electrical Engineering
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
hidayatn17d@student.unhas.ac.id

Faizal Arya Samman
Department Electrical Engineering
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
faizalas@unhas.ac.id

Rhiza S. Sadjad
Department. Electrical Engineering
Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia
rhizass@unhas.ac.id

Abstrak— Pada penelitian ini dirancang pengendali digital berbasis FPGA untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC (*brushless direct current*). Digunakan metode *trapezoid control* atau *6-step* komutasi dengan *unipolar independent pwm switching*. Metode komutasi motor bldc berdasarkan sensor hall efek yang tertanam dalam motor bldc. metode ini diimplementasikan dengan menggunakan model mesin keadaan. Selain metode control, didesain pula modul untuk mengukur kecepatan motor bldc. Pengukur kecepatan menggunakan *counter* untuk menghitung siklus *electric motor* dan *look-up* tabel untuk menyimpan hasil perhitungan revolusi per menit motor. Algoritma control dan pengukur kecepatan ditulis menggunakan Verilog HDL (*hardware description language*) dan diverifikasi melalui simulasi menggunakan modelsim-intel. Kemudian, diimplementasikan pada board FPGA terasic DE0-NANO EP4CE22. Semua sistem dibangun berdasarkan *base clock* FPGA 50 MHz. Pengujian kendali motor dilakukan pada motor BLDC 350 watt 36 v dengan inverter tiga fasa sebagai drivernya.

Keywords—BLDC motor, FPGA, Trapezoid Control, Unipolar Independent PWM Switching

I. PENDAHULUAN

Pengunaan *Field Programmable Logic Array* (FPGA) dalam aplikasi motor control meningkat belakangan tahun terakhir, ditunjukkan pada publikasi [1]–[3], hal ini dipengaruhi karena pemrogramannya yang fleksibel. Selain itu, dalam mengontrol motor diperlukan *high-speed switching* dengan alasan tersebut FPGA digunakan[4]. Sebagai tambahan, fitur yang paling penting adalah bahwa FPGA memungkinkan untuk mengembangkan algoritma yang kompleks dan dapat melakukan proses secara parallel (*concerrent*) [5]. Adapun untuk memrogram pada FPGA diperlukan pengetahuan sistem digital dan HDL (*hardware description language*).

Dalam penelitian ini digunakan motor BLDC tiga fasa, motor ini memiliki beberapa keuntungan, seperti harganya yang relatif lebih murah, biaya perawatan yang rendah, dan menghasilkan noise (suara bising) yang rendah disebabkan oleh tidak adanya komutator mekanik melainkan menggunakan komutator elektronik. Selain keuntungan tersebut motor BLDC juga memiliki beberapa kekurangan yaitu karakteristik yang tidak linear membuat motor ini sulit di control untuk mendapatkan hasil yang diharapkan [6].

Motor DC tanpa sikat terdiri atas bagian yang diam yang disebut stator dan bagian yang bergerak disebut rotor. Ruang antara stator dan rotor disebut celah udara (*air gap*), pada stator sendiri terdiri atas belitan yang terhubung dengan konfigurasi star ataupun konfigurasi delta sedangkan pada rotor terdapat magnet permanen. penempatan rotor pada motor DC tanpa sikat pada umumnya ada dua yaitu rotor di

dalam (*Inrunner*) dan rotor di luar (*Outrunner*). Keuntungan motor BLDC rotor internal terletak pada inersia rotornya yang rendah dan pembuangan panas lebih baik. Sebaliknya, untuk motor rotor eksternal, kumparan penghasil panas diisolasi dari lingkungannya oleh rumah rotor dan magnet. Motor dengan rotor eksternal memiliki keunggulan untuk aplikasi yang diproduksi secara massal, karena dapat diproduksi dengan lebih murah.

Fasa adalah kumpulan individu dari belitan dengan terminal tunggal yang dapat diakses dari luar motor. Kebanyakan motor *brushless* adalah tiga fasa. Setiap loop individu dari kawat membentuk fasa lilitan disebut belokan (*turn*). Kutub merupakan kutub magnet permanen tunggal, baik utara atau selatan. Jumlah kutub minimum adalah dua, tetapi motor dapat memiliki jumlah kutub yang genap. Motor yang lebih besar cenderung memiliki kutub yang lebih banyak. Jumlah kutub tidak berhubungan langsung dengan jumlah slot, meskipun terdapat kombinasi umum antara slot dan jumlah kutub agar performa motor bekerja lebih baik. Pada motor dengan lebih dari dua kutub, penting untuk menentukan perbedaan antara kecepatan sudut mekanis dan kecepatan sudut elektrik. Kecepatan sudut mekanis adalah kecepatan fisik yang diukur dengan busur derajat atau tachometer. kecepatan sudut listrik mewakili posisi relatif dalam satu periode magnet, yang membentang di dua kutub.

persamaan sederhana untuk menghitung kecepatan sudut electric dan mekanik yaitu:

$$\omega_e = p\omega_m \quad (1)$$

Dimana ω_e merupakan kecepatan sudut elektrik, p merupakan jumlah pasang kutub, dan ω_m merupakan kecepatan sudut elektrik, misalkan motor adalah 4 kutub:

$$\omega_e = 2 \times 180^\circ \quad (2)$$

Berarti dalam setegah putaran mekanik sama dengan 360° putaran elektrik dan pada 1 putaran mekanik penuh sama dengan 720° putaran elektrik. Jika hasil dari kecepatan sudut dikonversi ke dalam satuan frekuensi maka digunakan persamaan 3, hasil dari persamaan ini akan digunakan untuk menghitung kecepatan putaran motor dalam RPM.

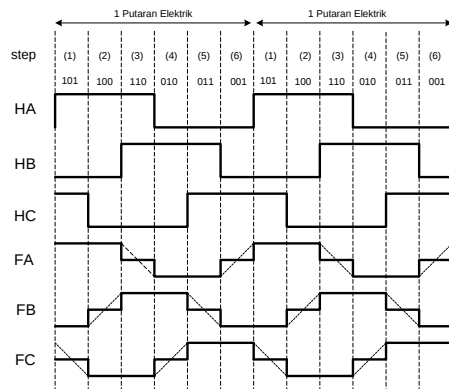
$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

Dimana, f merupakan frekuensi atau biasa juga disimbolkan dengan huruf v .

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa komutasi motor BLDC dikendalikan secara elektronik. Agar dapat berputar,

gulungan stator harus diberi energi secara berurutan. Penting untuk mengetahui posisi rotor untuk memahami belitan mana yang akan diberi *energize* mengikuti urutan komutasi. Posisi rotor dideteksi menggunakan sensor hall efek yang tertanam ke dalam stator. Prinsip kerja dari sensor hall efek ialah akan mengeluarkan logika 1 (high) jika mendeteksi atau berada didekat medan magnet. Biasanya, tiga sensor hall efek dipindahkan (*displaced*) pada 120 derajat listrik. Setiap Sensor menghasilkan nilai 1 (high) untuk 180 derajat putaran listrik dan nilai 0 (low) untuk 180 derajat putaran listrik[7][8].

Trapezoid control juga dikenal sebagai *six-step control*, metode ini digunakan untuk mengontrol Inverter tiga fasa/Driver motor BLDC (gambar 3) dalam enam rangkaian pensaklaran. Dalam teknik ini hanya dua fasa motor BLDC yang diberi energy (*energized*) pada setiap urutan pensaklaran sedangkan fase lainnya tidak aktif. Pembalikan urutan *switching* mengubah arah putaran motor. Kecepatan motor berbanding lurus dengan lebar sinyal sensor hall effect. Tegangan EMF balik, sinyal pergantian, arus fasa dan pola *switching* enam langkah dari motor BLDC tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 1 [9].



Gambar 1. Bentuk gelombang kotak yang dihasilkan oleh *trapezoid control*

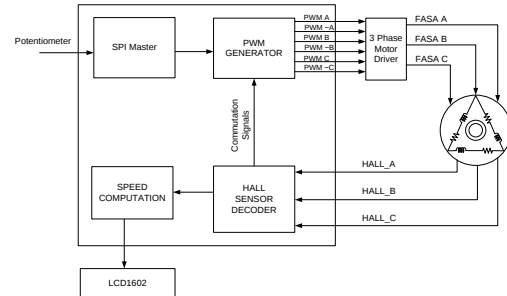
Kecepatan motor BLDC berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan ke stator. Kecepatan di mana rotor dipaksa ke posisi berikutnya ditentukan oleh kekuatan gaya magnet, hal ini ditentukan oleh tegangan yang diberikan pada belitan stator. Dengan menggunakan PWM dengan frekuensi yang lebih tinggi dari pada frekuensi komutasi, besarnya tegangan yang diberikan pada stator dapat dengan mudah dikontrol, sehingga kecepatan motor dapat dikontrol.

Kontroler PWM enam langkah tipikal menggunakan salah satu dari dua teknik PWM[10] yaitu : *Unipolar (soft) PWM Switching* merupakan Teknik ini mengacu pada fasa motor yang dialihkan sedemikian rupa sehingga salah satu fasa mengembalikan arus sementara modulasi PWM terjadi di fasa lain, atau dengan kata lain hanya mosfet bagian atas saja yang di drive dengan sinyal pwm, untuk mosfet bagian bawah berupa switch on dan off saja. *Bipolar (hard) PWM Switching* merupakan Teknik ini mengacu pada tegangan yang melewati dua fasa sebagai dimodulasi dengan PWM, baik input maupun output arus sedang dimodulasi. Maksudnya ialah baik mosfet bagian atas maupun bagian bawah di drive dengan sinyal pwm

II. DESKRIPSI SISTEM

Sistem kendali motor BLDC yang dirancang terbagi menjadi 2 bagian yaitu Sistem perangkat keras (*Hardware*) dan Perangkat lunak (*Software*). Bagian perangkat keras berupa Driver Tiga Fasa yang terdiri atas mosfet, bus

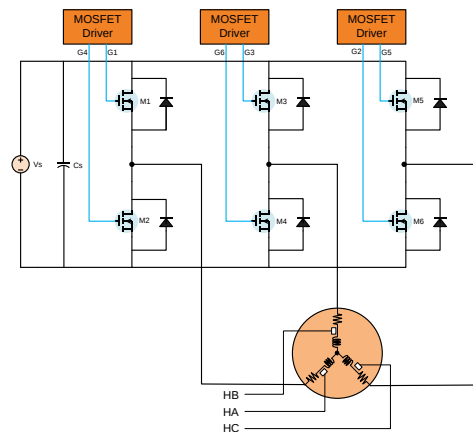
kapasitor, driver mosfet, filter hall sensor, dan pembagi tegangan. Sedangkan software berupa modul modul yang ditulis dalam Verilog HDL (Hardware Description Language) yang akan diimplementasikan pada Terasic DE0-NANO board yang di dukung dengan chip FPGA Intel/Altera cyclone-iv dengan seri EP4CE22F17C6. Secara abstrak sistem yang dirancang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram block sistem pengendalian motor BLDC

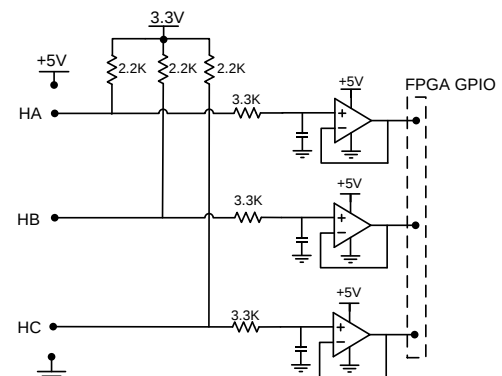
A. Inverter Tiga Fasa

Pada penelitian ini driver motor bldc menggunakan inverter tiga fasa dengan mosfet IRFB3607 sebagai saklar semikonduktor. Gambar 3 menunjukkan rangkaian inverter tiga fasa. Pengoperasian saklar semikonduktor tidak dapat dioperasikan pada lengan yang sama untuk menghindari hubungan pendek pada rangkaian.



Gambar 3. Rangkaian inverter tiga fasa

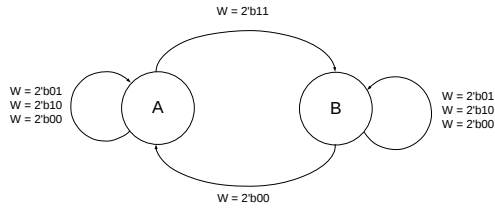
B. Filter Sensor Hall Efek



Gambar 4. Rangkaian Active low pass filter

Filter sensor hall efek menggunakan filter analog dan digital. Pertama filter analog, rangkaian filter ini menggunakan pull-up resistor dengan resistor bernilai 2.2K

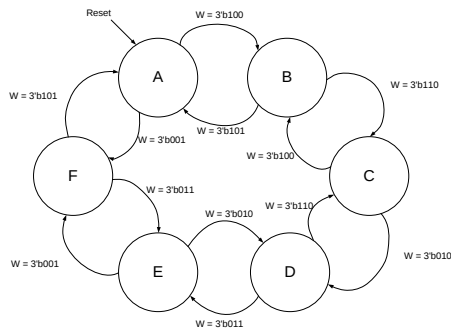
ohm yang terhubung dengan sumber 3.3V dan active low fass filter dengan menggunakan resistor 3.3K ohm yang parallel dengan capacitor yang terhubung dengan pin non-inverting op-amp. Kedua, filter secara digital diimplementasikan dalam code Verilog, filter ini didesain dengan menggunakan mesin keadaan dan register geser. Register geser digunakan untuk menyampel data sensor hall effect hingga n bit data dengan clock 10MHz.



Gambar 5. Mesin keadaan filter digital sensor hall efek

C. Komutasi Menggunakan Sensor Hall Effect

Algoritma 6-step komutasi di desain dengan menggunakan model mesin keadaan yang ditunjukkan pada gambar 6. struktur code Verilog mesin keadaan terbagi menjadi tiga yaitu program mendefinisikan keadaan berikutnya, mendefinisikan output, dan mendefinisikan blok sekuensial.



Gambar 6. Diagram mesin keadaan komutasi 6 langkah

Hasil dari mesin keadaan ini berupa 6 sinyal yang digunakan untuk mengaktifkan mosfet, dengan 2 sinyal bernilai 1 secara bersamaan yaitu 1 dari mosfet atas dan 1 lagi dari mosfet bagian bawah ditunjukkan pada gambar 7. Konfigurasi ini berlangsung secara terus menerus berdasarkan tabel komputasi menggunakan sensor hall effect yang ditunjukkan pada tabel 1 dan tabel 2

D. PWM Generator dan Switching PWM

Dalam FPGA, PWM didesain secara digital dengan menggunakan counter dan comparator, dengan input nilai data dari ADC sebanyak 8 bit. Pertama counter menghitung dari nilai 0 hingga 255 dengan referensi clock 25 MHz, kemudian hasil counter setiap clock sebagai input dari comparator. Selanjutnya, comparator membandingkan nilai dari counter dan nilai ADC dengan clock yang sama dengan counter, jika nilai ADC lebih besar daripada nilai counter maka comparator akan bernilai '1' jika sebaliknya akan bernilai '0'. Untuk frekuensi pwm yang didesain di uraikan pada persamaan dibawah

$$f(pwm) = (Base\ clock)/2^n \quad (4)$$

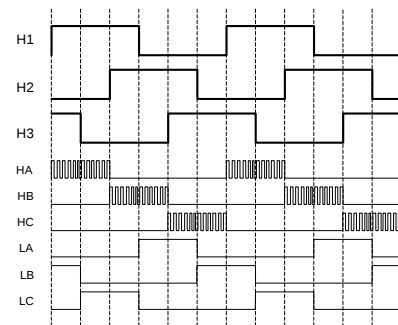
TABEL I. POLA KOMUTASI SEARAH JARUM JAM

Step	Sensor hall efek			Fasa		
	Ha	Hb	Hc	A	B	C
1	1	0	1	DC+	DC-	Off
2	1	0	0	DC+	Off	DC-
3	1	1	0	Off	DC+	DC-
4	0	1	0	DC-	DC+	Off
5	0	1	1	DC-	Off	DC+
6	0	0	1	Off	DC-	DC+

TABEL II. POLA KOMUTASI BERLAWANAN ARAH JARUM JAM

Step	Sensor hall efek			Fasa		
	Ha	Hb	Hc	A	B	C
6	0	0	1	Off	DC+	DC-
5	0	1	1	DC+	Off	DC-
4	0	1	0	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	Off	DC-	DC+
2	1	0	0	DC-	Off	DC+
1	1	0	1	DC-	DC+	Off

Dimana n adalah jumlah bit data ADC. Yang perlu diperhatikan dalam mendesain PWM ialah frekuensi sinyal PWM setidaknya 10 kali lebih cepat dari maksimum frekuensi motor (electrical)[11]. dan terakhir switching PWM menggunakan metode Unipolar Independent PWM Switching ditunjukkan pada Gambar 7.

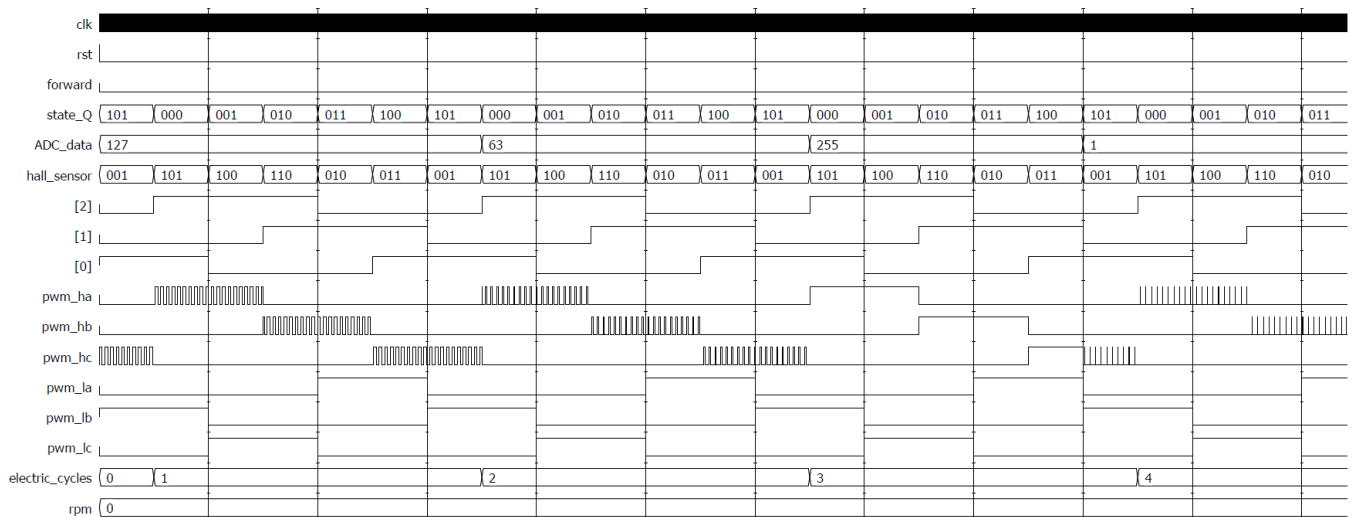


Gambar 7. Unipolar Independent PWM Switching

E. Pengukur Kecepatan

Pengukur kecepatan menggunakan input dari hall sensor. pada gambar 1 menggambarkan bahwa 6 pola komutasi dari 3 hall sensor menghasilkan 1 putaran secara elektrik, untuk mencapai satu putaran mekanik penuh diperlukan putaran elektrik sebanyak jumlah pasang kutub motor. modul penghitung kecepatan motor terdiri atas counter, flip flop D, dan lookup table. Counter digunakan untuk menghitung putaran elektrik dari motor berdasarkan input hall sensor, flip flop D digunakan untuk menyimpan nilai kecepatan sebelumnya selama kurang lebih 1 detik, dan lookup table digunakan untuk menyimpan hasil perhitungan dari persamaan 5

$$RPM = \frac{60}{pairs\ of\ poles} \times f \quad (5)$$



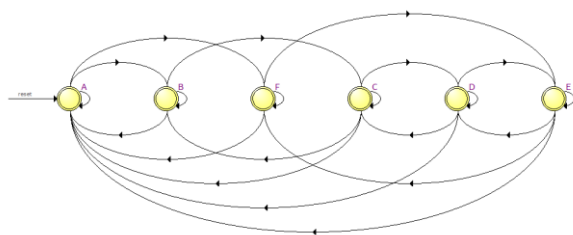
Gambar 8. Modelsim-Altera Simulation

dimana f merupakan banyaknya putaran elektrik dalam satu detik (Hz). Lookup table menyimpan data rpm untuk setiap nilai f, selain itu untuk mendapatkan hasil perhitungan kecepatan yang lebih presisi digunakan 3 modul pengukur kecepatan untuk masing masing sensor hall effect kemudian dijumlahkan dan dihitung rata-ratanya dengan menggunakan modul divider. Adapun sensor hall effect yang digunakan telah difilter oleh modul filter sensor hall effect agar pembacaan sensor hall lebih tepat sehingga perhitungan lebih presisi.

III. HASIL SIMULASI ALGORIMA KENDALI MOTOR BLDC

Simulasi dilakukan menggunakan Modelsim-Intel FPGA Starter Edition 10.5b, dan program dibuat pada Quartus Prime 18.1 Lite Edition untuk memudahkan mengecek error atau melihat hasil rtl dari kode Verilog yang dibuat. Tujuan dari simulasi ialah untuk memastikan code yang dibuat berfungsi dengan output yang sesuai selain itu, untuk mengoptimalkan kinerja sistem dan mengurangi kerugian sebelum diimplementasikan pada perangkat keras.

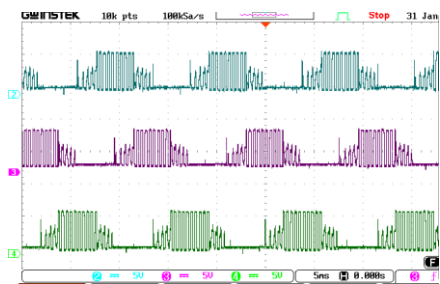
Algoritma 6-step komutasi dirancang berdasarkan state mechine. Diagram state mechine ditunjukkan pada gambar 9, terdiri dari 6 keadaan yaitu keadaan A, B, C, D, E, dan F. Masing-masing keadaan direpresentasikan dalam tiga bit parameter secara berurutan yaitu "000", "001", "010", "011", "100", "101". Urutan keadaan untuk putaran CW (clockwise) atau setara jarum jam ialah A-B-C-D-E-F, sedangkan keadaan untuk putaran CCW (counterclockwise) atau berlawanan arah jarum jam ialah F-E-D-C-B-A arah putaran ini diatur oleh sinyal "forward". Nilai sensor hall efek dari MSB ke LSB merupakan gabungan dari sensor hall efek 1, 2, dan 3 secara berurutan.



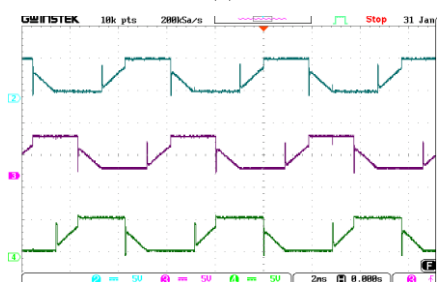
Gambar 9. Diagram state machine modul komutasi

Output mesin keadaan di tunjukkan pada gambar 8 yaitu 6 sinyal komutasi berupa sinyal ha, hb, hc, la, lb, lc. ha dan lb merepresentasikan sinyal untuk mosfet fasa A high side dan low secara berurutan, begitupun hb, dan lb untuk mosfet fasa B, dan hc dan lc untuk mosfet fasa C. dengan metode unipolar independent PWM switching, hanya output high side ha, hb, dan hc sinyal pwm. Duty cycle pwm diatur oleh counter dan comparator berdasarkan 8 bit data ADC.

Pada penelitian ini juga dibuat modul speed calculation, Pertama, modul speed calculation digunakan untuk menghitung siklus putaran elektrik motor bldc. Untuk menghitung siklus digunakan sinyal input dari 3 hall sensor yang telah di filter, satu gelombang sinyal hall sensor menandakan satu putaran elektrik ditunjukkan pada gambar 8 melalui sinyal electric_cycles. Dengan counter dihitung banyaknya siklus hall sensor selama satu detik. Hasil dari counter tersebut selanjutnya disimpan kedalam register, dan counter di reset ke nilai '0' dengan menggunakan asinkronous reset untuk menghitung siklus selanjutnya. output dari modul speed calculation merupakan frekuensi elektrik motor yang direpresentasikan dengan sinyal rpm 10 bit.



(a)



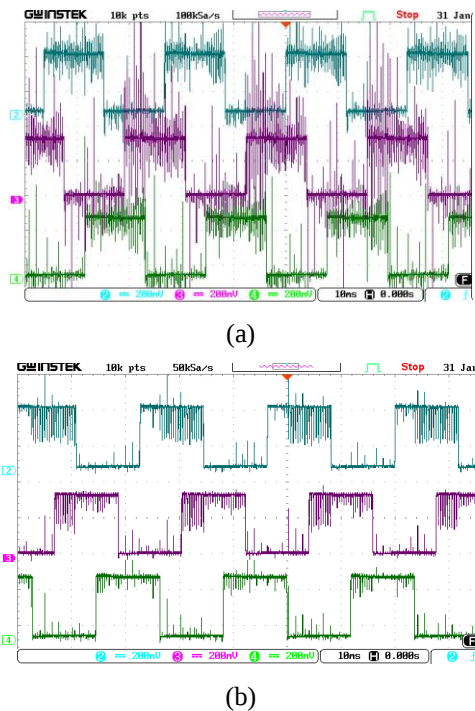
(b)

Gambar 10. (a) duty cycle 50%, (b) duty cycle 100%

IV. HASIL IMPLEMENTASI

Pengendali motor bldc di implementasikan pada motor BLDC dengan spesifikasi yaitu daya 350 watt, tegangan 36 volt. Adapun untuk mengetahui jumlah pasang kutub dari motor BLDC yang digunakan dilakukan secara manual dengan board FPGA dan sensor hall effect sebagai input terhubung dengan GPIO FPGA kemudian jika sensor hall effect bernilai logika '1' atau tegangan sekitar 3.3 volt maka LED akan menyala, dari hasil pengamatan tersebut di peroleh bahwa jumlah pasang kutub adalah 15. Jumlah pasang kutub ini digunakan untuk menghitung kecepatan motor. Hasil experiment diperoleh gambar 10 (a), menunjukkan tegangan emf motor BLDC pada duty cycle 50 % dengan kecepatan motor sekitar 350 rpm tanpa beban, dan 10 (b) pada duty cycle 100% dengan kecepatan motor maksimum 696 rpm.

Selain itu, output hasil filter hall sensor ditunjukkan pada gambar 11(b) pada kecepatan 173 rpm. jika dibandingkan dengan gambar 11(a) dengan tanpa active low pass filter terlihat bahwa rangkaian active low pass filter berkerja walaupun masih ada frekuensi tinggi yang dilewatkan. Pada kecepatan maksimum yaitu sekitar 696 rpm sinyal sensor hall efek cenderung lebih baik walaupun tanpa active low pass filter.

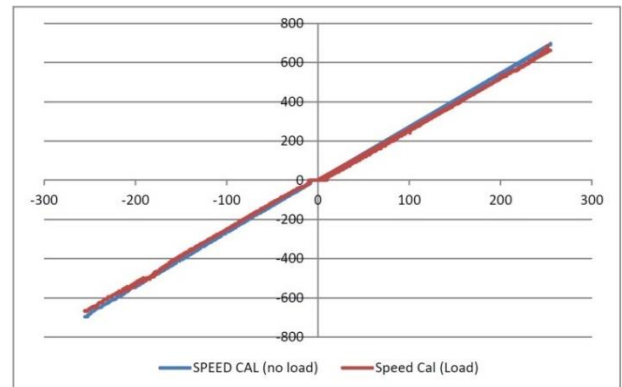


Gambar 11. (a) hall sensor tanpa filter, (b) hall sensor dengan active low pass filter

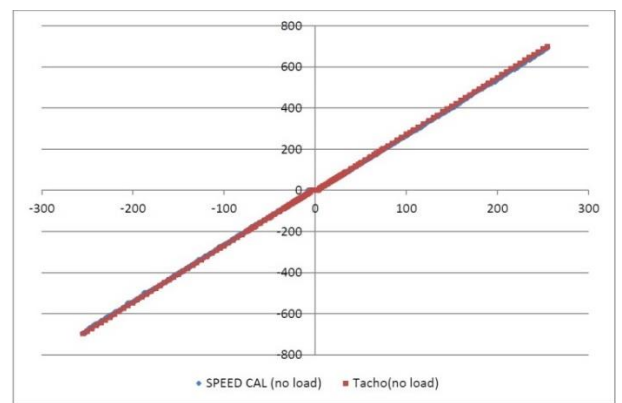
Hasil perbandingan kecepatan dengan menggunakan modul speed calculation diperoleh grafik pada gambar 12, sumbu x merupakan nilai ADC dan sumbu y merupakan nilai kecepatan. Berdasarkan grafik tersebut maksimum kecepatan pada duty cycle 100% jika tanpa beban ialah 696 RPM baik berputar searah jarum jam maupun berlawanan dan dengan beban maksimum kecepatan ialah 667 RPM berlaku untuk CW maupun CCW.

Selanjutnya untuk memverifikasi ketepatan pembacaan modul SC dilakukan perbandingan antara hasil pembacaan modul SC dengan Tachometer diperoleh grafik gambar 13. Terakhir, Perbandingan arus dengan dan tanpa beban di tunjukkan pada grafik gambar 14, sumbu x merupakan nilai

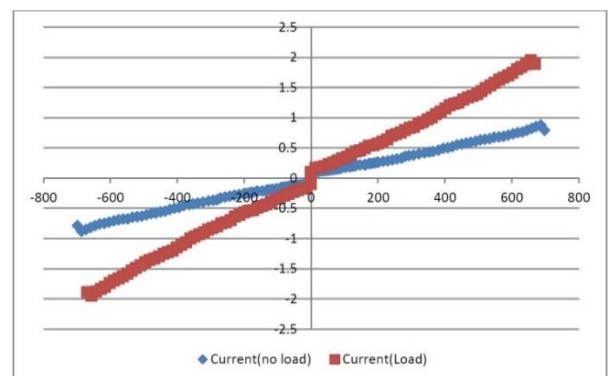
kecepatan dan sumbu y merupakan nilai arus. Maksimum arus yang mengalir ke motor pada tanpa beban ialah 0.88 A dan maksimum arus yang mengalir ke motor pada saat berbeban ialah 1.90 A.



Gambar 12. Grafik kecepatan tanpa beban dengan modul SC



Gambar 13. Grafik kecepatan modul SC vs Tachometer



Gambar 14. Grafik arus berbeban dan tanpa beban

V. KESIMPULAN

Pertama, Metode six-step komutasi untuk mengendalikan motor bldc diimplementasikan pada fpga menggunakan algoritma mesin keadaan, dengan pwm generator kecepatan motor bldc dapat diatur berdasarkan potensio meter. Kelebihan menggunakan mesin keadaan ialah kecepatan motor dapat dengan mudah diatur baik pada kecepatan rendah maupun kecepatan tinggi. Motor dapat berputar dengan kecepatan paling rendah pada 5 rpm tanpa beban dan 12 rpm dengan beban, dengan kecepatan maksimum 696 rpm tanpa beban dan 668 rpm dengan beban.

Kedua, modul speed calculation yang dirancang dapat menghitung kecepatan putar motor bldc dengan ketepatan hingga 98%.

ACKNOWLEDGMENT (Heading 5)

The preferred spelling of the word “acknowledgment” in America is without an “e” after the “g”. Avoid the stilted expression “one of us (R. B. G.) thanks ...”. Instead, try “R. B. G. thanks...”. Put sponsor acknowledgments in the unnumbered footnote on the first page.

REFERENCES

- [1] P. Mishra, A. Banerjee, and M. Ghosh, “FPGA-Based Real-Time Implementation of Quadral-Duty Digital-PWM-Controlled Permanent Magnet BLDC Drive,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 3, pp. 1456–1467, Jun. 2020, doi: 10.1109/TMECH.2020.2977859.
- [2] M. Gavrilas, Institutul Politehnic din Iași. Faculty of Electrical Engineering, IEEE Romania Section, Institutul Politehnic din Iași. Societății Absolvenților Facultății de Electrotehnică din Iași, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *EPE 2018 : proceedings of the 2018 International Conference and Expositions on Electrical and Power Engineering*.
- [3] Texas A & M University and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC) : date: February 06-February 07, 2020 : location: Memorial Student Center at Texas A&M University, 275 Joe Routt Blvd #2240, College Station, TX, USA*.
- [4] C. Buccella, C. Cecati, and H. Latafat, “Digital control of power converters - A survey,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 3, pp. 437–447, 2012. doi: 10.1109/TII.2012.2192280.
- [5] IEEE Power Electronics Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers, and Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, *Proceedings of the 2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP): Camino Real Hotel, Guanajuato, Gto., Mexico, June 20-23, 2016*.
- [6] I. Ferdiansyah *et al.*, “Design of PID Controllers for Speed Control of Three Phase Induction Motor Based on Direct-Axis Current (Id) Coordinate Using IFOC.”
- [7] G. Scelba, G. de Donato, M. Pulvirenti, F. G. Capponi, and G. Scarcella, “Hall-Effect Sensor Fault Detection, Identification, and Compensation in Brushless DC Drives,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1542–1554, Mar. 2016, doi: 10.1109/TIA.2015.2506139.
- [8] Q. IEEE Industrial Electronics Society. Conference (38th : 2012 : Montréal, Institute of Electrical and Electronics Engineers, and IEEE Industrial Electronics Society, *Proceedings, IECON 2012 : 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society : École de Technologie Supérieure de Montréal, Université du Québec, Montreal, Canada, 25-28 October, 2012*. IEEE, 2012.
- [9] Annual IEEE Computer Conference, IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems 11 2015.06.09-12 Sydney, PEDS 11 2015.06.09-12 Sydney, and IEEE PEDS Conference 11 2015.06.09-12 Sydney, *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) 9-12 June 2015, Sydney, Australia*.
- [10] F. Semiconductor, “AN4058, BLDC Motor Control with Hall Effect Sensors Using the 9S08MP - Application Notes,” 2009. [Online]. Available: www.freescale.com.
- [11] “AN885.”