

SKRIPSI

**SISTEM PENGGERAK BERBASIS FPGA UNTUK MENGATUR
KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT**

Disusun dan diajukan oleh

NURUL HIDAYAT

D041 17 1319



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**SISTEM PENGGERAK BERBASIS FPGA UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR
ARUS SEARAH TANPA SIKAT**

Disusun dan diajukan oleh :

NURUL HIDAYAT

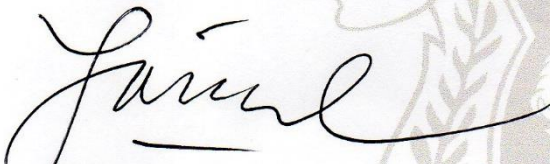
D041 17 1319

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 11 Mei 2022 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr-Ing. Faizal Arya Samman, S.T., M.T.
NIP. 19750605 200212 1 004



Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MSEE.
NIP. 19570906 198203 1 004

Ketua Program Studi



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Nurul Hidayat

NIM : D041171319

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

SISTEM PENGGERAK BERBASIS FPGA UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi/tesis/disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 3 Mei 2022

Yang menyatakan Tanda Tangan



Nurul Hidayat

KATA PENGANTAR

Segala puji hanya milik Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan rahmat, hidayah, taufik dan pertolongan-Nya dalam menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “SISTEM PENGGERAK BERBASIS FPGA UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT” sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan jenjang Sarjana pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu ‘alaihi Wa Sallam, beserta keluarga dan para sahabatnya yang telah membimbing dan menuntun kita dari zaman jahilia menuju zaman yang beradap.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dari berbagai pihak, sangatlah sulit untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karenanya, penulis berterima kasih kepada kedua orang tua yang senantiasa selalu memberikan dukungan moril maupun materil serta doa yang senantiasa terus dipanjatkan. Ucapan terima kasih juga kepada saudara saya yang turut memberikan dukungan dalam bentuk doa dan senda gurau serta semangat agar penulis tetap ceria dan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menghaturkan ucapan terima kasih kepada Bapak **Prof. Dr.-Ing. Faizal Arya Samman, ST., MT** selaku pembimbing I dan Bapak **Dr. Ir. Rhiza S. Sadjad, MSEE.** selaku pembimbing II dalam kesediaannya menyisihkan waktu, tenaga, dan ilmu dalam segala permasalahan dalam penulisan skripsi ini, serta seluruh tim penguji yang banyak memberikan arahan dan kritik yang membangun agar skripsi ini semakin baik.

Penulis tentu tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada teman – teman seperjuangan atas kerjasama dan kekompakannya selama ini, serta teman – teman di Laboratorium *Laboratorium Elektronika dan Divais Departemen Teknik Elektro* yang telah berbaik hati berbagi pengalaman dan masukan. Semoga kedepannya kita tetap menjaga kekompakan ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Dengan demikian, penulis tetap mengharapkan saran dan kritik dengan harapan semoga tulisan ini bisa memberikan manfaat kepada seluruh pihak. Akhir kata penulis mendoakan semoga Allah Subhana Wa Ta'ala terus memberikan taufik dan hidayah – Nya kepada semua pihak untuk dapat terus melakukan terobosan – terobosan dan inovasi baru dalam peningkatan kualitas ilmu pengetahuan. Aamiin ya Rabbal Alamin...

Gowa, 9 Mei 2022

Penulis,

Nurul Hidayat

ABSTRAK

NURUL HIDAYAT, *Sistem penggerak berbasis FPGA untuk Mengatur Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat* “dibimbing oleh Faizal Arya Samman dan Rhiza S. Sadjad”.

Pada penelitian ini dirancang pengendali digital berbasis FPGA untuk mengendalikan kecepatan motor arus searah tanpa sikat (BLDC). Digunakan metode *trapezoid control* atau 6-step komutasi dengan unipolar switching pwm. 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 di tulis menggunakan Verilog HDL (*hardware description language*) dan diverifikasi melalui simulasi menggunakan modelsim-intel. Kemudian, diimplementasikan pada board FPGA terasic DE0-NANO EPCE22. 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. Hasil yang diperoleh yaitu motor BLDC dapat berputar pada kecepatan maksimal masing-masing pada pengujian tanpa beban, dan dengan beban 3 kg yaitu 699 RPM dan 668 RPM baik berputar searah jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam.

Kata Kunci: Motor Arus Searah Tanpa Sikat, *Field Programmable Gate Array* (FPGA), *Trapezoid Control*, *Unipolar Independent PWM Switching*

ABSTRACT

NURUL HIDAYAT, *FPGA Based Digital Control Design for BLDC Motor Control* “supervised by Faizal Arya Samman and Rhiza S. Sadjad”.

This research presents the design of digital control based on FPGA to control the speed of a brushless direct current (BLDC) motor. The control algorithm is using trapezoid control or six-step commutation and unipolar independent PWM switching, the commutation itself depends on 3 built-in hall effect sensors. This method is implemented on FPGA using a state machine model. Besides the speed control algorithm, this paper also presents an algorithm to calculate the speed of the BLDC motor. The speed calculation builds up with a counter to count the electric cycles for one second then the result is stored in the register and look-up table to convert the electric cycles data into revolutions per minute (rpm) data. The speed control and speed calculation are written using Verilog hardware description language (HDL) and verified through simulation using ModelSim-intel, the code is implemented using the FPGA DE0-nano EP4CE22 board provided by terasic. Motor control testing was carried out on a 350 watt 36 v BLDC motor with a three-phase inverter as the driver. The results obtained are that the BLDC motor can rotate at maximum speed respectively in the no-load test, and with a load of 3 kg, namely 699 RPM and 668 RPM, both rotating clockwise and counterclockwise.

Keywords: Brushless Direct Current (BLDC) Motor, Field Programmable Gate Arrey (FPGA), Trepezoid Control, Unipolar Independent PWM Switching

DAFTAR ISI

SKRIPSI.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II DAFTAR PUSTAKA	4
2.1 BLDC Motor	4
2.2 <i>Trapezoid Control</i> atau Blok Komutasi	7
2.3 Metode <i>Switching</i> PWM	9
BAB III PERANCANGAN SISTEM	12
3.1 Perancangan Driver Controller Motor BLDC	13
3.1.1 Gambaran Umum Driver 3 Fasa	13
3.1.2 Mosfet	13
3.1.3 Bus Kapasitor	15
3.1.4 Driver Mosfet.....	16
3.1.5 Filter Sensor Hall Effect.....	17
3.1.6 Pembagi Tegangan	18
3.2 Perancangan Algoritma Controller Motor BLDC	19
3.2.1 Deskripsi sistem	19
3.2.2 Komutasi Menggunakan Sensor Hall Effect.....	20
3.2.3 <i>Serial Peripheral Interface (SPI)</i>	22

3.2.4	PWM Generator dan Switching PWM.....	23
3.2.5	Filter Sensor Hall Effect.....	24
3.2.6	Pengukur Kecepatan.....	25
3.3	Skenario Pengujian.....	26
BAB IV HASIL SIMULASI ALGORITMA KENDALI MOTOR BLDC.....		28
4.1	Modul Dekoder Komutasi.....	28
4.2	Modul SPI Master.....	31
4.3	Modul PWM Generator.....	32
4.4	Modul Edge Detection / filter sensor hall effect.....	35
4.5	Modul Speed Calculation.....	37
4.6	Modul Pengendali Motor BLDC.....	39
BAB V HASIL IMPLEMENTASI KENDALI MOTOR BLDC.....		41
5.1	Hasil Filter hall sensor.....	41
5.2	Tegangan line motor BLDC.....	43
5.3	Perbandingan Hasil Pembacaan Modul Speed Calculation (SC) dan Tachometer.....	45
5.4	Perbandingan Arus berbeban dengan tanpa beban.....	48
5.5	Perbandingan Frekuensi PWM terhadap kecepatan motor BLDC.....	48
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....		50
6.1	Kesimpulan.....	50
6.2	Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....		51
LAMPIRAN.....		53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Cross section</i> Motor DC tanpa sikat	4
Gambar 2. posisi rotor di dalam / <i>Inrunner</i> (kiri), dan posisi rotor di luar/ <i>outrunner</i> (kanan).....	5
Gambar 3. Perbedaan antara kecepatan sudut mekanik dan kecepatan sudut elektrik pada motor 4 kutub	6
Gambar 4. Inverter tiga fasa.....	7
Gambar 5. Bentuk gelombang kotak yang dihasilkan oleh <i>trapezoid control</i>	8
Gambar 6. posisi komutasi sensor hall efek pada motor dan rotasi motor berdasarkan komutasi hall sensor dan fasa pada Gambar 5.....	9
Gambar 7. Bagian kiri merupakan metode switching bipolar dan bagian kanan merupakan metode switching unipolar	11
Gambar 8. Diagram block sistem pengendalian motor BLDC	12
Gambar 9. Driver 3 Fasa	13
Gambar 10. Simbol Mosfet N-Channel	14
Gambar 11. Rangkaian mosfet.....	15
Gambar 12. Paralel Mosfet	15
Gambar 13. Rangkaian bus kapasitor pada driver controller.....	16
Gambar 14. Rangkaian Mosfet driver dan half bridge.....	17
Gambar 15. Rangkaian <i>active low pass filter</i>	17
Gambar 16. Filter Sensor Hall Effect.....	18
Gambar 17. Rangkaian pembagi tegangan.....	19
Gambar 18. Diagram block modul-modul algoritma kendali motor BLDC.....	19
Gambar 19. Diagram mesin keadaan komutasi 6 langkah.....	20
Gambar 20. Interface komunikasi SPI	22
Gambar 21. Diagram waktu pada komunikasi serial dengan ADC128S022.....	23
Gambar 22. <i>Flowchart</i> PWM Generator.....	23
Gambar 23. <i>Unipolar Independent PWM Switching</i>	24
Gambar 24. Diagram mesin keadaan transisi '0' ke '1' dan '1' ke '0'.....	25
Gambar 25. Pola hall sensor.....	25
Gambar 26. Pembebanan	27
Gambar 27. <i>Netlist viewer</i> modul komutasi.....	28
Gambar 28. Diagram mesin keadaan modul komutasi terjemahan <i>compiler</i> Quartus Prime 18.1	29
Gambar 29. Urutan keadaan berikutnya berdasarkan sensor hall efek	30
Gambar 30. <i>waveforms</i> hasil simulasi modul komutasi.....	31
Gambar 31. <i>Netlist viewer</i> modul SPI Master.....	32
Gambar 32. <i>Waveforms</i> hasil simulasi modul SPI Master.....	32
Gambar 33. <i>Netlist viewer</i> modul PWM generator	33
Gambar 34. <i>Waveforms</i> hasil simulasi modul PWM generator	35
Gambar 35. <i>Netlist viewer</i> modul edge detection	36

Gambar 36. diagram mesin keadaan modul edge detection terjemahaan <i>compiler</i> Quartus Prime 18.1	36
Gambar 37. <i>Waveforms</i> hasil simulasi modul edge detection	37
Gambar 38. <i>Netlist viewer</i> modul speed calculation wrapper.....	37
Gambar 39. <i>Netlist viewer</i> modul speed calculation.....	38
Gambar 40. <i>Netlist viewer</i> modul divider/pembagi	38
Gambar 41. <i>Waveforms</i> hasil simulasi modul speed calculation	39
Gambar 42. <i>Netlist viewer</i> modul pengendali Motor BLDC	39
Gambar 43. <i>Waveforms</i> hasil simulasi pengendali motor BLDC	40
Gambar 44. <i>Experiment set-up</i>	41
Gambar 45. Sensor hall efek pada kecepatan 173 rpm tanpa <i>active low pass filter</i>	42
Gambar 46. sensor hall efek pada kecepatan 173 rpm dengan <i>active low pass filter</i>	42
Gambar 47. Sensor hall efek pada kecepatan maksimum 696 rpm tanpa <i>active low pass filter</i>	43
Gambar 48. Sensor hall efek pada kecepatan maksimum 690 rpm dengan <i>active low pass filter</i>	43
Gambar 49. tegangan line motor BLDC	45
Gambar 50. Grafik kecepatan berbeban dan tanpa beban menggunakan modul SC	46
Gambar 51. Grafik kecepatan berbeban dan tanpa beban menggunakan Tachometer.....	46
Gambar 52. Grafik kecepatan tanpa beban menggunakan speed SC dan tachometer	47
Gambar 53. grafik kecepatan berbeban menggunakan modul SC dan tachometer.....	48
Gambar 54. grafik perbandingan arus beban dan tanpa beban	48

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi Mosfet.....	14
Tabel 2. Komutasi searah jarum jam.....	21
Tabel 3. Komutasi berlawanan arah jarum jam	21
Tabel 4. Pengujian.....	26
Tabel 5. Frekuensi PWM terhadap kecepatan motor BLDC	49

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan *Field Programmable Logic Array (FPGA)* dalam aplikasi motor control meningkat belakangan tahun terakhir, ditunjukkan pada publikasi [1] [2] [3] [4], hal ini dipengaruhi karena pemrogramannya yang fleksibel. Selain itu, dalam mengontrol motor diperlukan *high-speed switching* dengan alasan tersebut fpga digunakan [5]. Sebagai tambahan, fitur yang paling penting adalah bahwa FPGA memungkinkan untuk mengembangkan algoritma yang kompleks dan dapat melakukan proses secara parallel (*concerrent*) [6]. 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 saat motor DC brushless dioperasikan pada kecepatan rendah, getaran kecil terjadi selama putaran kecepatan rendah. Namun, getaran berkurang pada kecepatan tinggi.

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.

Metode yang digunakan untuk mengontrol motor BLDC ialah metode enam step komutasi (*6-step commutation*) dengan menggunakan *unipolar switching PWM*. Komutasi motor BLDC berdasarkan pada 3 sensor hall efek yang tertanam dalam motor. metode enam step komutasi ini digunakan untuk mengontrol Inverter tiga fasa/Driver motor BLDC dalam enam rangkaian pensaklaran. Dalam metode 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. Terakhir metode tersebut akan didesain dan diimplementasikan pada board FPGA pada penelitian/skripsi ini yang berjudul “SISTEM PENGGERAK BERBASIS FPGA UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR ARUS SEARAH TANPA SIKAT”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka pokok permasalahan yang akan dipecahkan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang kendali untuk mengatur kecepatan motor BLDC dengan *trapezoid control* pada FPGA?
2. Bagaimana merancang modul pengukur kecepatan motor BLDC dengan sensor hall efek pada FPGA?
3. Bagaimana karakteristik kecepatan motor BLDC terhadap referensi kecepatan (potensiometer) dengan metode *trapezoid control*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini ialah:

1. Merancang kendali untuk mengatur kecepatan motor BLDC dengan menggunakan metode *trapezoid control* pada FPGA.

2. Merancang modul pengukur kecepatan motor BLDC dengan sensor hall efek pada FPGA.
3. Menentukan karakteristik kecepatan motor BLDC terhadap referensi kecepatan (potensiometer) dengan metode *trapezoid control*?

1.4 Batasan Masalah

Dalam melaksanakan penelitian ini, permasalahan yang akan dibahas dibatasi dengan ketentuan berikut:

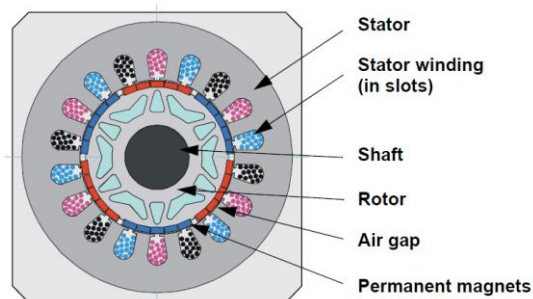
1. Algoritma trapezoid control, dan modul speed computation didesain dengan menggunakan *Verilog HDL (hardware description language)* beserta dengan modul-modul pendukung lainnya dan diimplementasikan pada FPGA.
2. Implementasi berfokus pada karakteristik kecepatan motor BLDC terhadap nilai ADC, dan Arus terhadap kecepatan putar motor BLDC.

BAB II

DAFTAR PUSTAKA

2.1 BLDC Motor

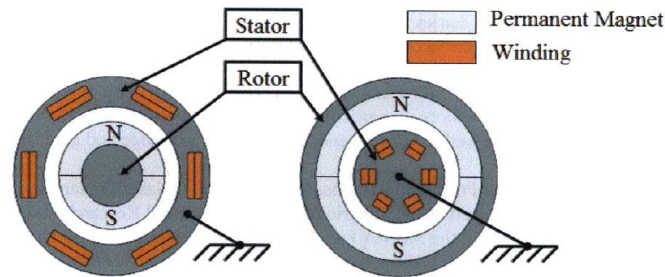
Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) merupakan jenis *permanent magnet motor*. Motor BLDC memiliki *back electromotive force* (*back emf*) yang berbentuk trapezoid berbeda dengan motor AC sinkron yang memiliki *back EMF* berbentuk sinusoidal [7], tetapi kedua motor ini dapat dikendalikan dengan metode 6 step komutasi. Adapun perbedaan antara motor DC sikat dengan motor DC tanpa sikat yaitu Motor DC tanpa sikat menggunakan komutator elektronik daripada komutator mekanik, dengan ini BLDC memiliki keuntungan yaitu biaya perawatan yang rendah dan noise (suara bising) yang dihasilkan lebih rendah. Seperti disebutkan pada [8], motor BLDC lebih cocok digunakan pada kendaraan listrik karena ukuran dan efisiensinya dibandingkan dengan Motor DC dan Motor Induksi.



Gambar 1. *Cross section* Motor DC tanpa sikat

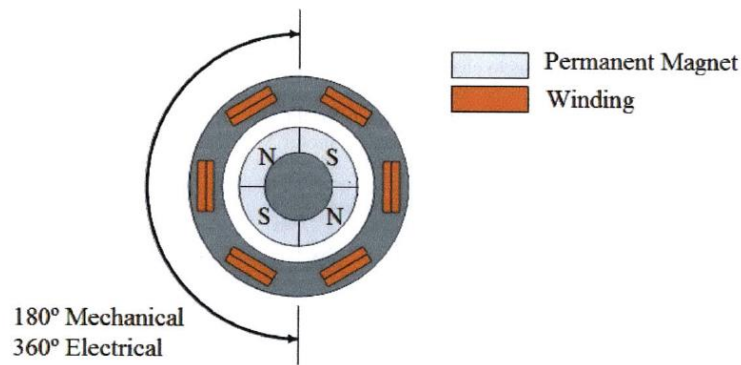
Motor DC tanpa sikat terdiri atas bagian yang diam yang disebut stator dan bagian yang bergerak disebut rotor. Ruang antara stator dan rotor disebut celah udara (*air gap*) Gambar 1, pada stator terdiri atas belitan yang terhubung dengan konfigurasi star ataupun konfigurasi delta sedangkan pada rotor terdapat magnet permanen. Penempatan rotor pada motor DC tanpa sikat pada umumnya ada dua yaitu rotor di dalam (*Inrunner*) dan rotor di luar (*Outrunner*) ditunjukkan pada Gambar 2. 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 rotor eksternal memiliki keunggulan untuk aplikasi yang diproduksi secara massal, karena dapat diproduksi dengan lebih murah [9]



Gambar 2. posisi rotor di dalam /Inrunner (kiri), dan posisi rotor di luar/outrunner (kanan)

Fasa adalah kumpulan individu dari belitan dengan terminal tunggal yang dapat diakses dari luar motor. Kebanyakan motor brushless adalah tiga fase. 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. Perbedaan ini diilustrasikan dengan motor 4 kutub atau 2 pasang kutub pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbedaan antara kecepatan sudut mekanik dan kecepatan sudut elektrik pada motor 4 kutub

persamaan sederhana untuk menghitung kecepatan sudut electric dan mekanik untuk motor 4 kutub 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 mekanik.

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

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

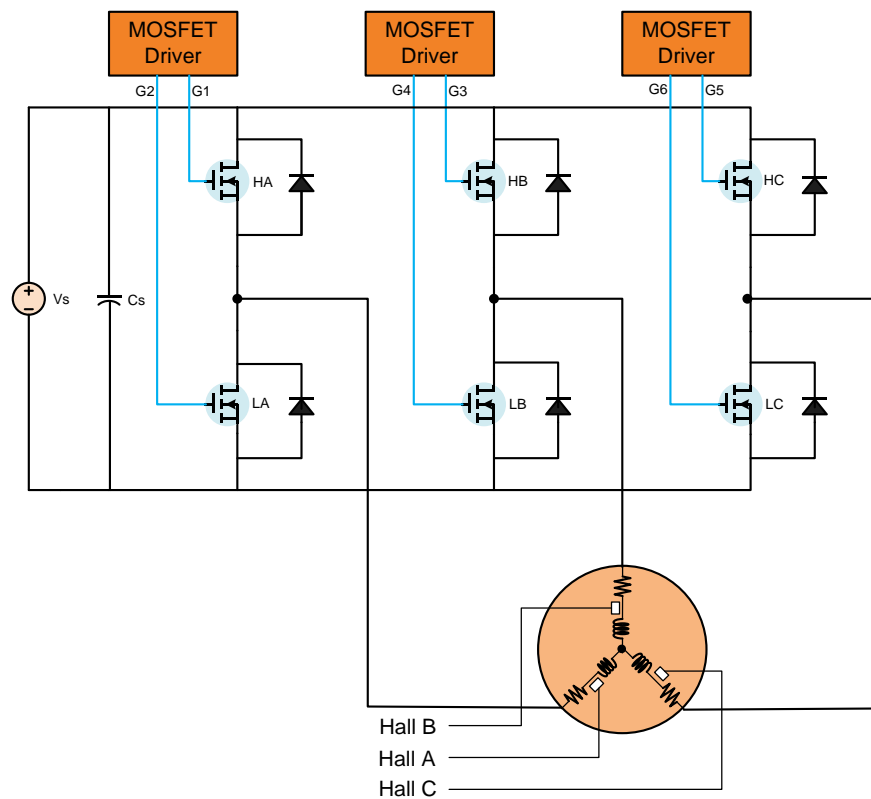
$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

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

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa komutasi motor BLDC dikendalikan secara elektronik. Untuk memutar motor BLDC, 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 [10] [11].

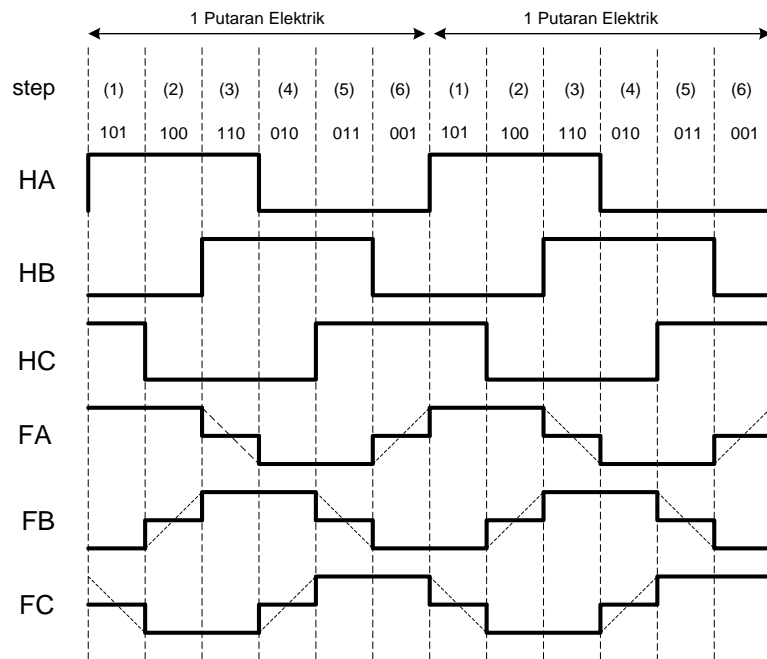
2.2 Trapezoid Control atau Blok Komutasi



Gambar 4. Inverter tiga fasa

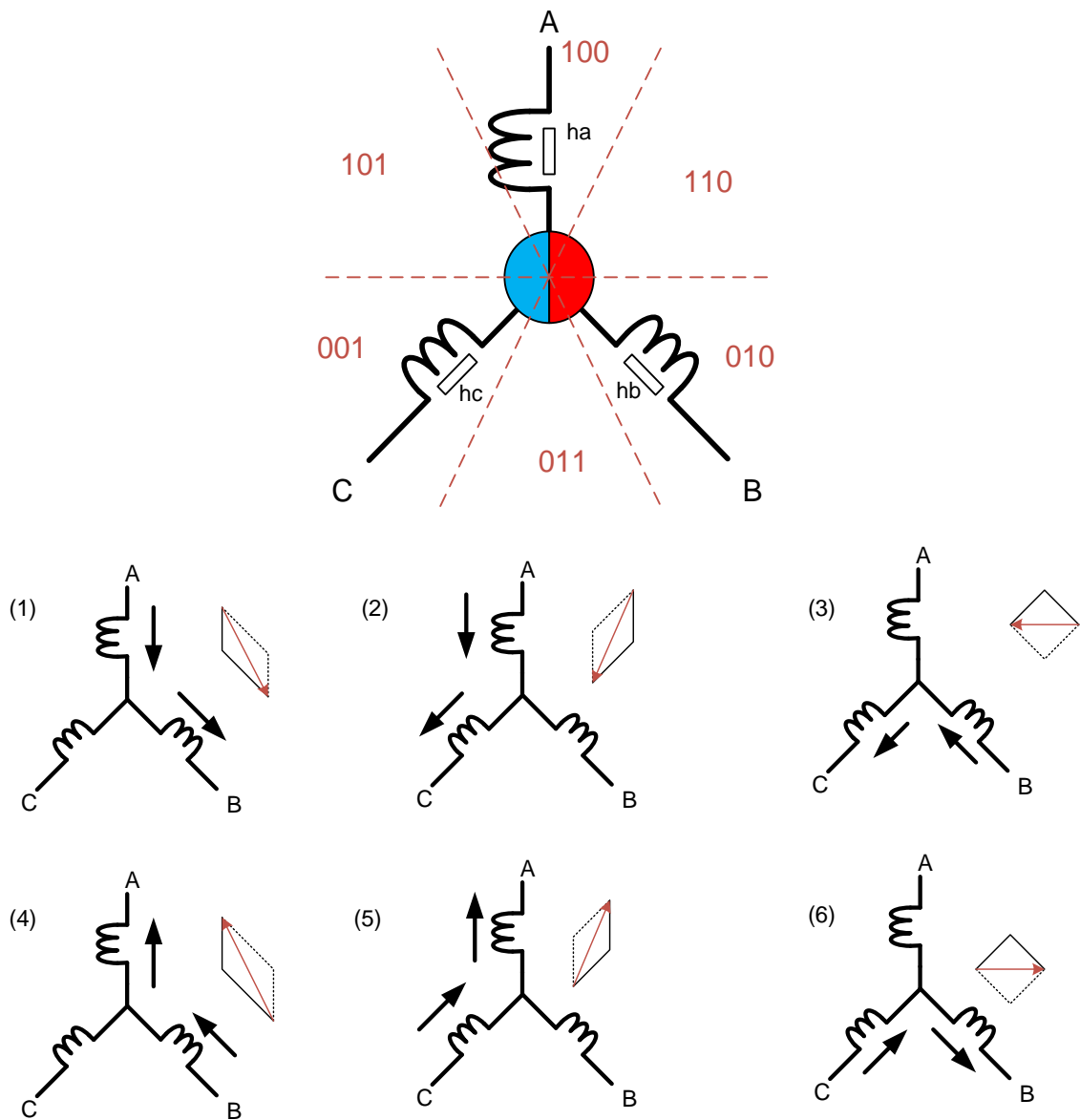
Juga dikenal sebagai *six-step control*, Teknik komutasi enam langkah digunakan untuk mengontrol Inverter tiga fasa (Gambar 4) / Driver motor BLDC dalam enam rangkaian pensaklaran. Dalam teknik ini hanya dua fasa motor BLDC yang diberi energy (*energized*) pada setiap urutan pensaklaran sedangkan fasa 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 5 [12]. *Trapezoid control* adalah algoritma yang paling sederhana. Metode ini menghasilkan riak torsi tinggi, yang menyebabkan getaran, kebisingan, dan kinerja yang lebih buruk dibandingkan dengan algoritma lain.



Gambar 5. Bentuk gelombang kotak yang dihasilkan oleh *trapezoid control*

Dari komutasi pada Gambar 5 diatas, berikut gambar yang menunjukkan putaran motor berdasarkan pola komutasinya.



Gambar 6. posisi komutasi sensor hall efek pada motor dan rotasi motor berdasarkan komutasi hall sensor dan fasa pada Gambar 5

2.3 Metode Switching PWM

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

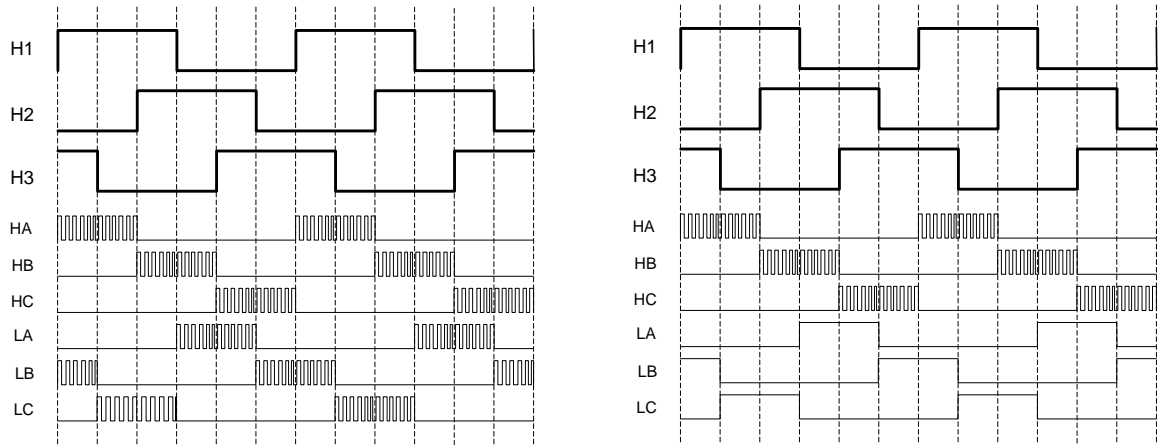
tegangan yang diberikan pada stator dapat dengan mudah dikontrol, sehingga kecepatan motor dapat dikontrol.

Kontroler PWM enam langkah tipikal menggunakan salah satu dari dua teknik [13]:

Unipolar (soft) PWM Switching merupakan Teknik ini mengacu pada fase motor yang dialihkan sedemikian rupa sehingga salah satu fase mengembalikan arus sementara modulasi PWM terjadi di fase 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 fase 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

Metode *switching unipolar* dan *bipolar* memiliki keunggulan spesifik. *Switching* secara unipolar mengurangi kebisingan elektromagnetik dan riak DC karena ada lebih sedikit *switching*. *Switching* bipolar lebih cocok untuk pendekatan tanpa sensor di mana perlu untuk merasakan gaya elektromagnetik balik (BEMF). Pendekatan bipolar memiliki titik voltase nol pada siklus kerja 50%, oleh karena itu ada lebih banyak waktu untuk merasakan BEMF. Baik pendekatan unipolar dan bipolar dapat bersifat independen atau komplementer. Pendekatan unipolar dan bipolar mengacu pada hubungan dua fase. Pendekatan komplementer mengacu pada hubungan dua sinyal yang mengendalikan satu fase. Pendekatan independen berlaku untuk PWM hanya di satu sisi fase.



Gambar 7. Bagian kiri merupakan metode switching bipolar dan bagian kanan merupakan metode swithing unipolar