

Perancangan Kontroler Motor *Brushless Dc* Tanpa Sensor Dengan Metode Deteksi Tegangan *Back-Emf*

1st Febrian Maulana Rizqi

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

febrianmaulana@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Angga Rusdinar

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id

3rd Irwan Purnama

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

irwanpurnama@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Motor *Brushless DC* (BLDC) atau motor Sinkron DC magnet permanen semakin populer karena kinerja dan karakteristiknya yang unggul. Namun, kontrol yang efektif pada motor BLDC memerlukan pengetahuan akurat tentang posisi rotor. Metode konvensional menggunakan sensor *hall effect* memiliki keterbatasan, seperti biaya tambahan, kerentanan terhadap suhu tinggi, dan ketidakcocokan untuk lingkungan operasi ekstrem. Oleh karena itu, pengendali motor BLDC tanpa sensor (*sensorless*) yang mengestimasi posisi rotor berdasarkan karakteristik elektrik motor, terutama dengan memanfaatkan *back-EMF* (*electromotive force*), menjadi solusi yang menarik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan algoritma estimasi posisi rotor yang akurat dan efisien untuk motor BLDC 3 fasa 500 Watt tanpa menggunakan sensor fisik. Metode penelitian meliputi studi literatur, perancangan sistem menggunakan mikrokontroler STM32 dan inverter 3 fasa, implementasi prototipe, serta pengujian kinerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem kendali yang dirancang mampu menghasilkan sinyal PWM dengan perbedaan sudut penyulutan 120° antar fasa dan berhasil mendeteksi sinyal *back-EMF* untuk komutasi, sehingga motor dapat berputar dengan lancar. Manfaat penelitian ini meliputi pengurangan biaya produksi, peningkatan keandalan sistem, dan desain yang lebih kompak, yang relevan untuk aplikasi mobil listrik dan otomasi industri.

Kata kunci— motor *blcdc*, *sensorless*, *back-emf*, deteksi *zero crossing*, *stm32*, inverter tiga fasa

I. PENDAHULUAN

Motor *Brushless DC* (BLDC), atau motor Sinkron DC magnet permanen, telah berkembang pesat dalam berbagai aplikasi industri karena kinerjanya yang lebih baik dibandingkan motor konvensional [1]. Efektivitas kontrol motor BLDC sangat bergantung pada akurasi informasi posisi rotor untuk melakukan komutasi [183]. Secara konvensional, deteksi posisi ini dilakukan menggunakan sensor *hall effect*. Namun, penggunaan sensor fisik memiliki berbagai kelemahan, seperti menambah biaya produksi, meningkatkan kompleksitas mekanik, serta rentan terhadap lingkungan operasi ekstrem, misalnya suhu tinggi di atas 75°C yang dapat mengganggu fungsi sensor [2]. Untuk mengatasi keterbatasan ini, dikembangkan metode kontrol tanpa sensor (*sensorless*) yang mengestimasi posisi rotor berdasarkan parameter elektrik motor [186, 187]. Salah satu pendekatan yang paling umum adalah metode deteksi tegangan *back-electromotive force* (*back-EMF*) [3]. Tegangan *back-EMF* yang timbul pada fasa motor yang tidak aktif (*floating*) dapat diukur untuk menentukan momen *zero*

crossing, yang kemudian digunakan untuk menentukan waktu komutasi yang tepat [189, 190]. Meskipun efektif, metode ini memiliki tantangan pada kecepatan rendah karena amplitudo *back-EMF* yang kecil sulit dideteksi. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi algoritma estimasi posisi rotor yang akurat menggunakan deteksi *back-EMF* dan metode *zero crossing*, serta mengembangkan strategi *open-loop starting* untuk menginisiasi putaran motor sebelum sinyal *back-EMF* cukup kuat untuk dideteksi [199, 200]. Tujuannya adalah menciptakan sistem kontrol motor BLDC *sensorless* yang andal, efisien, dan dapat bertransisi secara mulus dari kondisi diam ke mode kontrol *closed-loop*.

II. KAJIAN TEORI

A. Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)

Motor BLDC adalah jenis motor sinkron yang disuplai oleh tegangan DC namun memerlukan tegangan AC tiga fasa untuk menggerakkan rotornya [231]. Komutasinya tidak lagi menggunakan sikat mekanis, melainkan sistem komutasi elektronik yang terdiri dari 6 transistor (MOSFET atau IGBT) [232, 233]. Prinsip kerjanya didasarkan pada gaya tarik-menarik antara medan magnet permanen pada rotor dan medan elektromagnetik yang dihasilkan oleh kumparan pada stator [251]. Dengan mengalirkan arus secara bergantian ke kumparan stator, sebuah medan magnet berputar akan tercipta dan menyebabkan rotor ikut berputar [241, 242].

B. Inverter Tiga Fasa dan Komutasi *Six-Step*

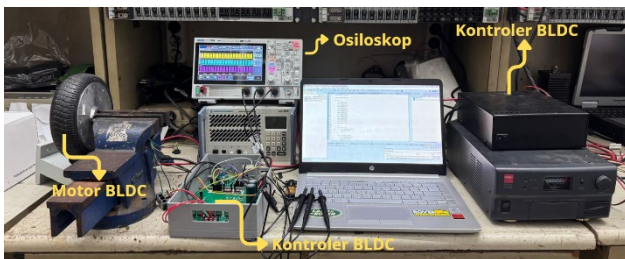
Inverter tiga fasa adalah komponen krusial yang mengubah tegangan DC dari sumber daya menjadi tegangan AC tiga fasa untuk menggerakkan motor BLDC [358]. Inverter ini terdiri dari enam sakelar daya (misalnya MOSFET) yang disusun dalam tiga kaki, di mana setiap kaki terhubung ke satu fasa motor [260, 261]. Pengendalian sakelar ini dilakukan menggunakan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) dari mikrokontroler [264]. Metode komutasi yang umum digunakan adalah *six-step commutation*, di mana pada setiap langkahnya, dua dari tiga fasa motor dialiri arus (satu fasa positif, satu fasa negatif) sementara fasa ketiga dibiarkan mengambang (*floating*) [267, 268, 295]. Siklus ini terdiri dari enam langkah yang menciptakan medan magnet berputar dan menjaga torsi motor [301, 302].

C. Deteksi Posisi Rotor Menggunakan *Back-EMF*

Pada metode *sensorless*, informasi posisi rotor didapatkan dengan mendeteksi tegangan *back-EMF* pada fasa yang sedang *floating* [275]. *Back-EMF* adalah tegangan yang diinduksi pada kumparan stator akibat perputaran rotor, dengan polaritas berlawanan dari tegangan suplai [238]. Momen ketika tegangan *back-EMF* ini melintasi titik nol (*zero crossing point*) menandakan posisi spesifik dari rotor [284]. Titik *zero crossing* ini terjadi 30° sebelum titik komutasi ideal berikutnya. Dengan mendeteksi *zero crossing*, mikrokontroler dapat menghitung waktu tunda yang tepat untuk melakukan komutasi selanjutnya [275, 283]. Karena titik netral motor seringkali tidak dapat diakses, sebuah *virtual neutral point* dibuat menggunakan rangkaian pembagi tegangan untuk menjadi referensi bagi komparator yang mendeteksi *zero crossing* [289, 290].

III. METODE

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi studi literatur, perancangan perangkat keras dan lunak, implementasi, serta pengujian sistem. Batasan masalah pada penelitian ini adalah penggunaan motor BLDC 3 fasa 48V, fokus pada metode deteksi *back-EMF*, implementasi pada mikrokontroler STM32, dan pengujian tanpa beban.



GAMBAR 1

Pengujian Rangkaian Sistem Pengendalian Motor BLDC sensorless

A. Perancangan Sistem

Sistem dirancang untuk mengendalikan motor BLDC 500W tanpa sensor. Sumber daya DC diubah menjadi tegangan AC 3 fasa oleh inverter berbasis MOSFET. Mikrokontroler STM32G431RBT6 berfungsi sebagai unit pemrosesan utama. Tegangan *back-EMF* dari setiap fasa motor dideteksi oleh rangkaian *Zero Crossing Detection* (ZCD). Output digital dari ZCD menjadi masukan bagi mikrokontroler untuk mengatur sinyal PWM yang dikirim ke *gate driver* (DRV8302) untuk mengendalikan inverter. Diagram alur sistem kontrol dimulai dengan *open-loop start* untuk memutar motor pada frekuensi rendah, kemudian beralih ke *closed-loop control* setelah sinyal *back-EMF* stabil dan terdeteksi.

B. Perangkat Keras

Perangkat keras utama yang digunakan meliputi:

- **Motor BLDC:** Tipe *Brushless Gear Hub Motor* dengan spesifikasi 48V, 500W, dan torsi 40 N.m.
- **Inverter Tiga Fasa:** Menggunakan 6 buah MOSFET IRFB4110 yang berfungsi sebagai saklar elektronik untuk mengalirkan arus ke fasa-fasa motor.
- **Gate Driver:** Menggunakan IC DRV8302 untuk menguatkan sinyal PWM dari mikrokontroler dan mengendalikan gerbang MOSFET, serta menyediakan fitur proteksi.
- **Mikrokontroler:** STM32G431RBT6 dipilih karena memiliki fitur DSP dan peripheral yang mendukung kontrol motor.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan untuk memverifikasi fungsionalitas setiap bagian dari sistem kontroler, mulai dari pembangkitan sinyal PWM, deteksi *back-EMF*, hingga output tegangan inverter.

A. Pengujian Sinyal PWM

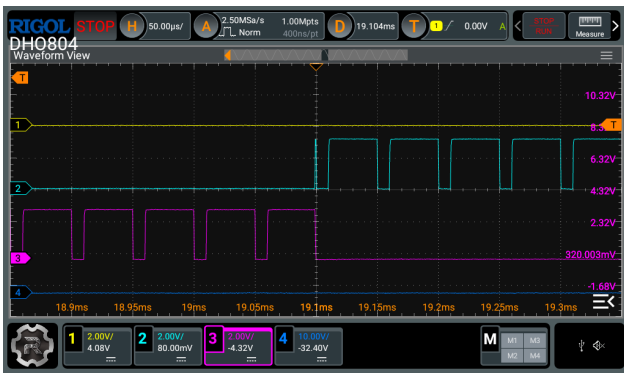
Sinyal PWM dibangkitkan oleh mikrokontroler untuk setiap fasa (U, V, W) pada sisi *high* dan *low* dari inverter.



GAMBAR 2
Output PWM High (U, V, W)



GAMBAR 3
Output PWM High (U dan V)



GAMBAR 4
Output PWM High (V dan W)



GAMBAR 7
Back-emf Fasa A Terhadap Tiga Fasa



GAMBAR 5
Output PWM Low (U, V, W)



GAMBAR 8
Back-emf Fasa B Terhadap Tiga Fasa



GAMBAR 6
Output PWM Low (U, V, W)



GAMBAR 9
Back-emf Fasa C Terhadap Tiga Fasa

Hasil pengukuran osiloskop menunjukkan bahwa sinyal PWM berhasil dibangkitkan dengan benar, di mana terdapat perbedaan fasa sebesar 120° antara sinyal PWM untuk fasa yang berbeda. Pemberian *deadtime* juga berhasil diimplementasikan untuk mencegah terjadinya hubung singkat (*short circuit*) pada kaki inverter.

B. Pengujian Deteksi Back-EMF dan Output Inverter

Pengujian pada rangkaian pendeteksi menunjukkan bahwa sinyal *back-EMF* dari ketiga fasa berhasil dideteksi, di mana kondisi *floating* terjadi secara bergantian setiap 60° . Tegangan balik yang terdeteksi ini memiliki polaritas berlawanan dengan tegangan sumber, sesuai dengan teori. Selanjutnya, pengujian pada output inverter tiga fasa dengan suplai DC 48V menunjukkan bentuk gelombang yang sesuai dengan metode *six-step commutation*. Terlihat jelas bahwa konduksi antar fasa memiliki perbedaan sudut 120° , yang memastikan motor BLDC dapat berputar dengan lancar.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan implementasi, dapat disimpulkan bahwa sistem kontroler motor BLDC tanpa sensor berhasil dirancang. Kontroler mampu membangkitkan sinyal PWM dengan perbedaan sudut penyulutan 120° antar fasa dan berhasil mendeteksi tegangan *back-EMF* untuk menentukan waktu komutasi secara akurat. Perbedaan sudut antar fasa yang presisi ini memungkinkan motor BLDC untuk berputar dengan lancar dan stabil tanpa memerlukan sensor posisi fisik. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan untuk menggunakan komponen SMD agar desain lebih ringkas serta mempertimbangkan pemilihan komponen dengan resistansi internal yang lebih rendah untuk mengurangi rugi-rugi daya.

REFERENSI

- [1] J. C. Gamazo-Real, E. Vázquez-Sánchez, and J. Gómez-Gil, "Position and speed control of brushless dc motors using sensorless techniques and application trends," *Sensors*, vol. 10, no. 7, pp. 6901–6947, Jul. 2010, doi: 10.3390/s100706901.
- [2] T. Wahono and T. Sutikno, "Skema Pengendali Motor BLDC Tanpa Sensor Posisi Rotor dengan Metode Deteksi Back EMF Berbasis Mikrokontroler Arduino," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, vol. 2, no. 2, p. 69, Dec. 2016, doi: 10.26555/jiteki.v2i2.5372.
- [3] S. Wanto *et al.*, "Peredaman Noise pada Deteksi BEMF Motor BLDC Sensorless Menggunakan Digital Filter," *Jurnal Inovtek Seri Elektro*, vol. 3, no. 3, p. 2021.
- [4] A. R. Hakim, "Desain dan Implementasi Inverter Tiga Fasa dalam Pengendalian Motor Brushless DC Sensorless dengan Metode Deteksi Tegangan Back-EMF pada Pesawat Tanpa Awak," Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.
- [5] M. H. A. As-Salaf, "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC menggunakan Software PSIM," *Journal MIND Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 103–117, 2021, doi: 10.26760/mindjournal.v6i1.103.
- [6] E. Fullbridge *et al.*, "ESC Fullbridge 3 Fasa Motor BLDC Berdaya Besar Menggunakan Kontroler Arduino," vol. 5, pp. 35–40, Jul. 2022.
- [7] A. Sikora and M. Woźniak, "Impact of current pulsation on BLDC motor parameters," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 2, pp. 1–18, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21020587.
- [8] J. Zhao and Y. Yu, "Brushless DC Motor Fundamentals," Application Note, Monolithic Power Systems, 2011. [Online]. Available: www.MonolithicPower.com
- [9] Y. Guo, Y. Zhang, and X. Li, "Position Correction Control of Permanent-Magnet Brushless Motor Based on Commutation-Interval Current Symmetry," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 5, May 2024, doi: 10.3390/wevj15050203.
- [10] A. Mohammad, A. Abedin, and Z. R. Khan, "Implementation of a three phase inverter for BLDC motor drive," in *Proc. 9th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. (ICECE)*, 2016, pp. 337–340, doi: 10.1109/ICECE.2016.7853925.
- [11] I. Sholikhah *et al.*, "Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Sensorless Menggunakan FOC," *JURNAL PENGEMBANGAN ELEKTRONIKA*, vol. 11, 2022.
- [12] R. Abdurrahman, N. A. Windarko, and B. Sumantri, "Estimasi Kecepatan Motor Brushless DC dengan Menggunakan Metode Sliding Mode Observer," *Jurnal Brilliant*, doi: 10.28926/briliant.
- [13] S. Gowtham, G. Sreenath, G. Sushanth, R. Suba, and M. Balaji, "Switch fault diagnosis using S-transform on three phase inverter for BLDC drive," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 58–65, Jul. 2019, doi: 10.35940/ijrte.B1014.0782S519.
- [14] C. L. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*. John Wiley & Sons, 2012, doi: 10.1002/9781118188537.
- [15] P. Kumar, R. K. Behera, and D. V. Bhaskar, "Novel closed loop speed control of permanent magnet brushless DC motor drive," in *Proc. Int. Conf. Technol. Smart City Energy Secur. Power (ICSESP)*, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICSESP.2018.8376725.
- [16] K. Vinida and M. Chacko, "Sensorless Control of Brushless DC motors and H_∞ Control Theory Applications-A Literature Review," *International Journal of Engineering Research and*, vol. 11, no. 1, pp. 19–25, doi: 10.9790/1676-11141925.
- [17] P. M. Krishna, T. Srinu, and A. Professor, "Analysis of Closed Loop Current Controlled BLDC Motor Drive," *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 2024, doi: 10.55041/IJSREM35689.
- [18] L. Prokop, "3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x," *Application Note, Freescale Semiconductor*.
- [19] M. Topal, I. Iskender, and N. Genc, "Sensorless Speed Control of a BLDC Motor Using Improved Sliding Mode Observer Technique," *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, vol. 11, no. 38, pp. 1–9, Mar. 2019. [Online]. Available: www.ijotpe.com