

Field Oriented Control untuk Pengaturan Kecepatan Motor BLDC pada Sepeda Motor Listrik

Zakiah Amalia¹, Achsanul Khabib², Erni Yudaningtyas³, Talifatim Machfuroh⁴,
Fica Aida Nadhifatul Aini⁵, Siti Duratun Nasiqiati Rosady⁶

e-mail: zakiah_amalia@polinema.ac.id, achsanul_khabib@polinema.ac.id, erni@ub.ac.id,
talifatim.machfuroh@polinema.ac.id, fica.aida@polinema.ac.id, sitiduratun@polinema.ac.id

^{1,4,5,6}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

³Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Jalan Veteran Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 14 Mei 2023

Direvisi 22 Mei 2023

Diterbitkan 31 Mei 2023

Kata kunci:

FOC

Sepeda motor listrik

BLDC

ABSTRAK

Ketersediaan bahan bakar fosil berbanding terbalik dengan pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor. Penggunaan kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar fosil seperti minyak juga menyebabkan peningkatan polusi udara oleh emisi gas buangnya. Oleh karena itu, banyak dilakukan pengembangan alat transportasi yang ramah lingkungan. Sepeda motor listrik menjadi salah satu alat transportasi yang banyak dikembangkan. Dengan menggunakan motor *Brushless Direct Current* (BLDC), sepeda motor listrik ini memiliki efisiensi yang tinggi dalam mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Penelitian ini difokuskan pada kontrol kecepatan sepeda motor listrik dengan *Field Oriented Control*, dimana algoritma ini dapat mengendalikan motor BLDC dengan mengontrol torsi dan *flux* secara terpisah sehingga diharapkan efisiensi motor akan lebih baik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan motor dapat dikontrol dengan akurasi lebih dari 99%.

ABSTRACT

The availability of fossil fuels is inversely proportional to the growth in the number of motorized vehicles. The use of motorized vehicles that use fossil fuels such as oil also causes an increase in air pollution by their exhaust emissions. Therefore, a lot of development of environmentally friendly means of transportation is carried out. Electric motorbikes are one of the most developed means of transportation. By using a Brushless Direct Current (BLDC) motor, this electric motorbike has high efficiency in converting electrical energy into mechanical energy. This research is focused on speed control of electric motorbikes with Field Oriented Control, where this algorithm can control BLDC motors by controlling torque and flux separately so that it is expected that the efficiency of the motor will be better. The results showed that the speed of the motor can be controlled with an accuracy of more than 99%.

Keywords:

FOC

Electric motorbike

BLDC

Penulis Korespondensi:

Zakiah Amalia

Jurusan Teknik Mesin

Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang, Jawa Timur, Indonesia, 65141

Email: zakiah_amalia@polinema.ac.id

Nomor HP/WA aktif: +62 852 587 296 82

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



9 772356 053009

1. PENDAHULUAN

Kendaraan bermotor menjadi kebutuhan utama masyarakat saat ini. Tetapi, ketersediaan bahan bakar fosil semakin menipis seiring berjalannya waktu. Pada tahun 2019, tingkat pencemaran udara di kota besar sangat tinggi. Kota Jakarta memiliki *Air Quality Index* (AQI) rata-rata 195 dimana ini merepresentasikan bahwa kualitas udara di kota Jakarta tidak sehat [1]. Semakin tinggi skor AQI pada suatu kota, menandakan bahwa kualitas udara di kota tersebut semakin buruk. Salah satu alternatif untuk mengurangi skor AQI adalah dengan menggunakan kendaraan listrik yang bebas polusi. Sesuai dengan Perpres 55/2019, Menko Maritim dan Investasi menugaskan PLN untuk membangun *charging station* secara bertahap agar masyarakat mudah mengakses fasilitas untuk menunjang kendaraan listrik [2]. Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) banyak digunakan sebagai penggerak pada motor listrik [3-10]. Motor BLDC tidak menggunakan *brush* untuk mengalirkan arus ke rotor sehingga membuat motor ini lebih minim perawatan (*low-maintenance*) [5,11].

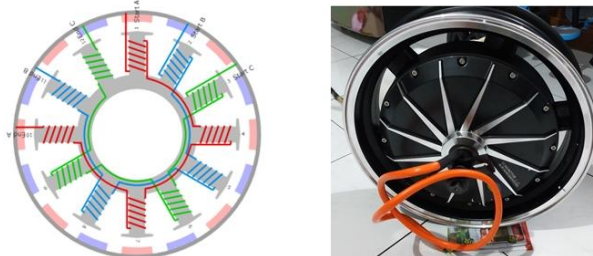
Penggunaan BLDC tidak lepas dari kontroller untuk mengatur torsi dan kecepatan. Pada aplikasinya kontroller yang dipakai belum memiliki metode kontrol yang bagus dan efisien sehingga konsumsi baterai menjadi lebih boros. Metode kontrol FOC (*Field Oriented Control*) merupakan salah satu metode kontrol yang dapat dipakai untuk dapat mengatur torsi dan *flux* secara terpisah sehingga daya yang dikeluarkan oleh baterai akan dirubah menjadi *flux* secara optimal.

Penelitian ini mengusulkan sistem penggerak untuk kendaraan listrik yang mengadopsi metode *Field Oriented Control* (FOC) untuk mencapai optimasi antara kinerja torsi dan *flux*. Berbeda dari algoritma FOC tradisional [12], FOC yang diusulkan sebagai kontroller untuk mengendalikan motor BLDC ini sangat tepat untuk mengontrol torsi dan *flux* secara terpisah sehingga diharapkan efisiensi dari kontroller akan lebih baik karena *flux* yang diproduksi oleh rotor dapat diatur sesuai kebutuhan.

2. BLDC TIPE HUB

BLDC tipe HUB merupakan jenis BLDC *out-runner* yang mana bagian rotor berupa magnet permanen berputar mengelilingi statornya. BLDC jenis ini paling banyak dipakai pada kendaraan listrik khususnya sepeda listrik karena kemudahan instalasi dan sedikitnya bagian mekanik yang perlu diganti karena merupakan jenis BLDC *direct-drive*.

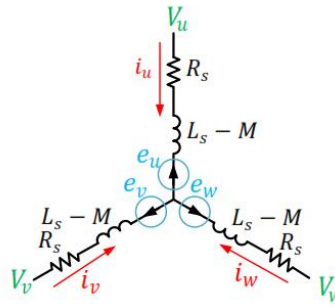
BLDC tipe hub ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur dari BLDC tipe Hub

BLDC dapat dimodelkan sebagai tiga belitan kawat yang disusun secara Y, masing masing belitan mempunyai resistansi. Setiap belitan dari mesin BLDC memiliki nilai induktansi dan resistansi yang sama. Rangkaian persamaan BLDC hub dapat dilihat pada Gambar 3.





Gambar 3. Rangkaian ekuivalen BLDC tipe Hub

Berdasarkan Gambar 3, mesin BLDC dapat dirumuskan menggunakan persamaan hukum kirchoff sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s - M} I_3 \left[\begin{bmatrix} V_{uQ} \\ V_{vQ} \\ V_{wQ} \end{bmatrix} - R_s I_3 \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \right] \quad (1)$$

dimana v_u, v_v, v_w adalah tegangan tiga fasa, i_u, i_v, i_w adalah arus tiga fasa, R_s adalah resistansi internal BLDC, I_3 adalah identitas matriks 3×3 , L_s merupakan induktansi, M adalah induktansi mutual dan e_u, e_v, e_w merupakan gaya gerak listrik.

3. FIELD ORIENTED CONTROL (FOC)

Dalam teknik kontrol, *Field Oriented Control* (FOC) dikenal dengan jenis kontrol umpan balik dengan cara mengontrol medan *flux* pada motor. Teknik kontroler ini dilakukan dengan mencari perbedaan sudut antara medan magnet rotor dan medan magnet stator. Jika sudut dua medan magnet ini tidak sembilan puluh derajat satu sama lain, maka akan ada sudut *offset* antara *back* EMF dan arus. Adanya *offset* fasa dari torsi dan input daya yang diberikan akan menyebabkan efisiensi menjadi buruk. Untuk dapat mengatasi masalah ini maka controller FOC diperlukan untuk mengatur pembangkitan torsi yang sebanding dengan sinus θ dengan mengatur logika kontrol pada sudut pergantian menjadi 90° sehingga torsi yang dihasilkan dari motor BLDC menjadi maksimal [14–17]. Keunggulan controller FOC dapat mengurangi getaran yang dihasilkan oleh motor yang disebabkan oleh penggunaan PWM *switching*, selain itu dengan menggunakan controller FOC, konsumsi daya yang diserap oleh motor menjadi efisien [18]. FOC bekerja dengan cara menggerakkan motor dengan torsi penuh, dan memantau posisi sudut rotor, kemudian mengubah tegangan tiga fasa sedemikian rupa sehingga *back* EMF pada jangkar selalu tetap 90° terpisah dari fluks rotor. FOC ini akan sangat sederhana dan lurus ke depan hanya dengan mengukur posisi sudut rotor dan menambahkan 90° di dalamnya untuk perhitungan tegangan tiga fasa menggunakan persamaan berikut untuk menghasilkan 90° beda fasa nya.

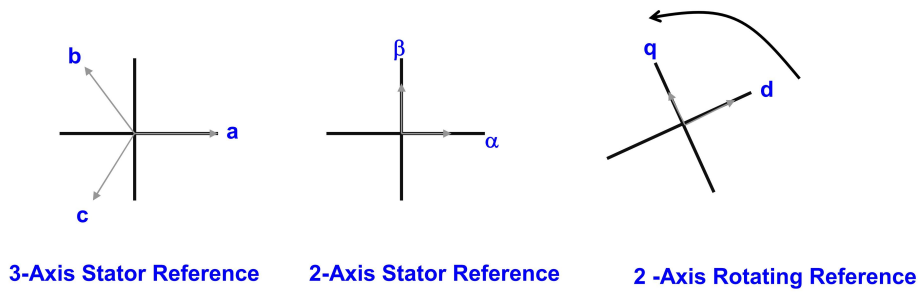
$$P = S + I + RV_u = V_m \sin \theta \quad (2)$$

$$V_w = V_m (\sin \theta - 120^\circ) \quad (3)$$

$$V_w = V_m (\sin \theta - 240^\circ) \quad (4)$$

Algoritma FOC membangkitkan tegangan 3 fasa sebagai vektor untuk mengontrol arus stator 3 fasa. Dengan mengubah arus fisik menjadi vektor rotasi menggunakan transformasi, komponen torsi dan fluks menjadi *time-invariant* memungkinkan penerapan teknik kontrol konvensional seperti pengontrol Proporsional Integral (PI), seperti pada motor DC. Gambar 4 menunjukkan sistem koordinat sistem 3 axis menjadi 2 axis yang di putar menjadi dq axis.

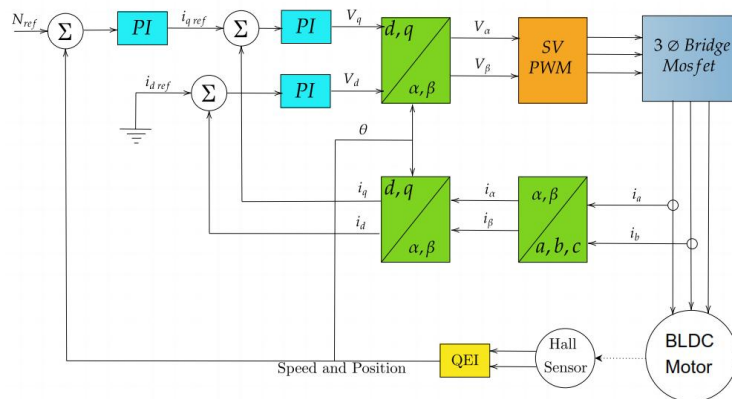




Gambar 4. Sistem koordinat sistem 3 axis menjadi 2 axis yang di putar menjadi dq axis.

Pada motor DC *brushed*, fluks stator dan fluks rotor dijaga pada 90° satu sama lain, sehingga menghasilkan torsi maksimum. Dengan menggunakan teknik FOC, arus motor diubah menjadi vektor 2 sumbu, seperti yang terlihat pada motor DC. Proses dimulai dengan mengukur arus motor tiga fasa. Dalam praktiknya, karena jumlah seketika dari tiga nilai arus akan menjadi nol, dengan mengukur hanya dua dari tiga arus, nilai yang ketiga dapat ditentukan. Selanjutnya, ada pengurangan biaya perangkat keras karena hanya dua sensor arus yang diperlukan.

Proses algoritma FOC diilustrasikan dalam diagram blok yang berisi transformasi koordinat, iterasi PI, transformasi kembali dan pembangkitan PWM. Diagram blok ini juga menjelaskan fungsi yang diperlukan untuk kontrol FOC. Sinyal error dari i_d , i_q dan nilai referensi digunakan untuk Referensi i_d yang mengontrol fluks magnetisasi rotor. Vektor fluks harus dijaga sejajar dengan kutub magnet rotor, sehingga motor dapat menghasilkan torsi maksimum. Hal ini dicapai dengan referensi fluks nol. Perlu diingat bahwa i_d dan i_q (mewakili torsi dan fluks). Referensi i_q mengontrol output torsi motor. Keluaran dari pengontrol PI memberikan v_d dan v_q , yang merupakan vektor tegangan yang dikirim ke motor BLDC. Sudut transformasi koordinat baru dihitung berdasarkan kecepatan motor, konstanta waktu pada tegangan rotor, i_d dan i_q . Usulan algoritma FOC dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Usulan algoritma FOC

FOC bekerja dengan menggunakan sudut baru untuk menempatkan vektor tegangan berikutnya, menghasilkan torsi yang dibutuhkan untuk menjaga rotor berputar. Nilai output V_d dan V_q dari pengontrol PI diputar kembali ke kerangka referensi stasioner, menggunakan sudut baru. Perhitungan ini memberikan nilai tegangan kuadratur v_α dan v_β . Selanjutnya nilai v_α dan v_β ditransformasikan kembali menjadi nilai 3 fasa V_a , V_b dan V_c . Nilai tegangan 3 fasa digunakan untuk menghitung siklus nilai PWM baru yang menghasilkan vektor tegangan yang diinginkan. Sudut transformasi, θ , dan kecepatan motor berasal dari *hall* sensor pada poros motor.

4. IMPLEMENTASI

Gambar 6 menunjukkan Modifikasi ICE (*Internal Combustion Engine*) menjadi EV (*Electric Vehicle*). Modifikasi dilakukan dengan mengganti penggerak sepeda motor Yamaha MIO 125cc berbahan bakar bensin menjadi *battery lithium ion* dengan kapasitas 2 KWh atau 20 Seri 30 Ah yang terdiri dari 4 *pack battery ninebot Max* yang dipasang seri dan paralel. Sebagai penggerak, Mesin BLDC tipe HUB dengan kapasitas 1500Watt dipasang



untuk menggantikan penggerak aslinya. Spesifikasi Modifikasi ICE (Internal Combustion Engine) menjadi EV (Electric Vehicle) dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 6. Hasil Modifikasi ICE (*Internal Combustion Engine*) menjadi EV (*Electric Vehicle*)

TABEL 1: Spesifikasi Modifikasi ICE (*Internal Combustion Engine*) menjadi EV (*Electric Vehicle*)

Jenis Rangka	Yamaha MIO 125cc tahun 2009
Motor Penggerak	BLDC Yuma Motor 1500 Watt – <i>Peak Power</i> 4500 Watt
Baterai	72 Volt 30Ah (Baterai Ninebot Max G30S 2S 2P)
Kontroller BLDC	VESC 75/100 (75 Volt, 100 Ampere)
<i>Throttle Control</i>	<i>Hall Sensor</i>



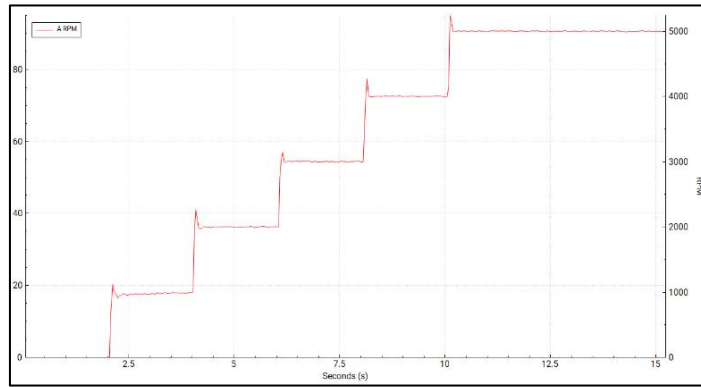
Gambar 7. *Controller BLDC Flipsky 75/100*

Rangkaian *converter* ditunjukkan pada Gambar 7. *Converter* ini bisa menjadi driver untuk menggerakkan BLDC tipe hub. Dalam penelitian ini sistem baterai yang digunakan adalah 72 Volt atau 20S lithium. Untuk meningkatkan optimasi dalam *converter* ini penggunaan mosfet dengan rating Arus yang tinggi dan R_{ds} yang rendah digunakan sebagai pilihan, selain itu *dead-time* juga ditambahkan agar tidak terjadi *cross-conduction* saat *driving* atau *braking*.

5. HASIL

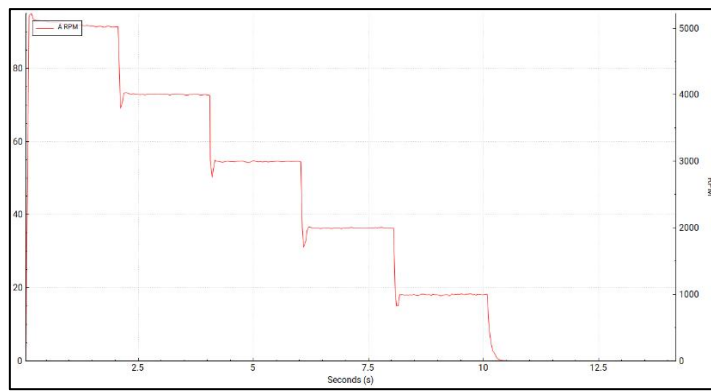
Gambar 8 menunjukkan hasil pengujian akselerasi pada motor BLDC. Pengujian dilakukan dengan menambahkan kecepatan sebesar 1000 rpm setiap 3 detik. Pada pengujian akselerasi ini terjadi *overshoot* rata-rata sebesar 5 %.



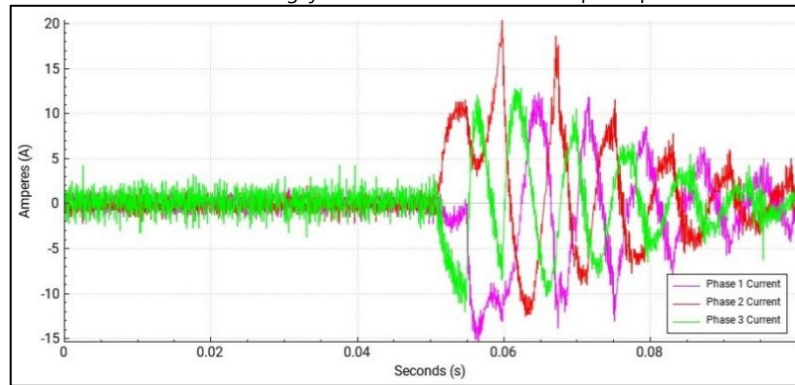


Gambar 8. Pengujian akselerasi dari 0 sampai 5000 rpm

Gambar 9 menunjukkan hasil pengujian deselerasi pada motor BLDC. Pengujian dilakukan dengan menurunkan kecepatan sebesar 1000 rpm setiap 3 detik. Pada pengujian deselerasi ini terjadi *undershoot* rata-rata sebesar 5 %.



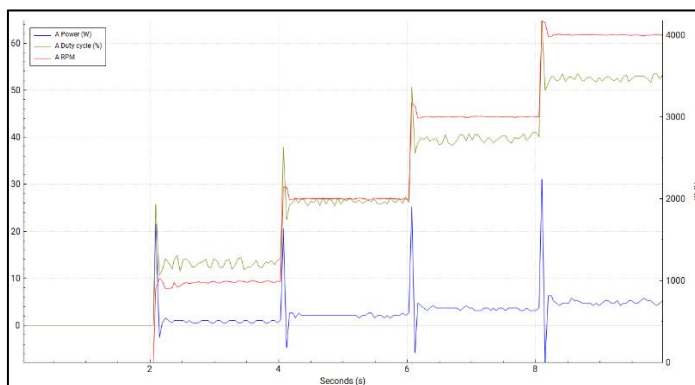
Gambar 9. Pengujian deselerasi dari 5000 sampai 0 rpm



Gambar 10. Tampilan hasil filter arus Phase pada 0-5000 rpm

Gambar 10 menunjukkan perubahan arus fasa saat motor mulai berputar saat berhenti diplot pada grafik. Dapat diamati bahwa arus diukur secara akurat dengan *noise* rendah ketika MJ-VESC digunakan pada keadaan berhenti <0,05 detik. Sensor arus ini sangat penting untuk mendeteksi arus pada motor BLDC ketika berputar. Jika pembacaan sensor arus ini bagus dan sedikit *ripple* maka akurasi pembacaan komutasi pada motor BLDC juga baik.





Gambar 12. Grafik Daya, Duty Cycle dan rpm pada 0-4000rpm

Gambar 12 menunjukkan hasil perbandingan antara daya, *duty cycle* dan rpm pada rentang 0-4000 rpm dengan kenaikan sebesar 1000 rpm.

TABEL 2: Data hasil pengukuran kecepatan tanpa beban.

Target kecepatan (rpm)	Rata rata kecepatan (rpm)	Akurasi (%)
0	0	100
1000	998	99.80
2000	1998	99.90
3000	2993	99.77
4000	3998	99.95

Tabel 2 menunjukkan data hasil pengukuran kecepatan tanpa beban. Berdasarkan tabel 2 diatas dapat dilihat bahwa hasil rata-rata kecepatan hampir mencapai target kecepatan dengan akurasi lebih dari 99%.

6. KESIMPULAN

Penggunaan algoritma FOC telah diimplementasikan pada motor BLDC tipe HUB yang telah dipasang pada kendaraan modifikasi. Dalam penelitian ini pengujian dilakukan dengan mengambil *log data* dari controller VESC menggunakan komunikasi BLE (*Bluetooth Low Energy*). Dari hasil pengujian diperoleh hasil pengujian kecepatan dengan menggunakan algoritma FOC sesuai target *set point* dengan akurasi lebih dari 99%.

Penelitian di masa mendatang difokuskan pengujian menggunakan *dynotest* untuk menguji kecepatan dengan menggunakan beban agar kecepatan aktual dapat diukur. Selain itu kontrol torsi juga akan dilakukan agar dapat diperoleh formula yang tepat antara kontrol kecepatan dan kontrol torsi sehingga performa dari motor BLDC menjadi lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] phub, "Kendaraan listrik masa depan transportasi indonesia," <http://dephub.go.id/post/read/kendaraan-listrik-masa-depan-transportasi-indonesia>, 2021.
- [2] Perpres, "Peraturan presiden republik indonesia nomor 55 tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (battery electric vehicle) untuk transportasi jalan," Presiden Republik Indonesia, 2019.
- [3] C. Chan, "An overview of electric vehicle technology," *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 9, pp. 1202–1213, 1993.
- [4] R. Ramachandran, D. Ganeshaperumal, and B. Subathra, "Closed-loop control of BLDC motor in electric vehicle applications," in 2019 IEEE International Conference on Clean Energy and Energy Efficient Electronics Circuit for Sustainable Development (INCCES). IEEE, dec 2019.
- [5] W. Khan-Ngern, W. Keyoonwong, N. Chatsiriwech, P. Sangnopparat, P. Mattayaboon, and P. Worawalai, "High performance BLDC motor control for electric vehicle," in 2018 International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST). IEEE, jul 2018.
- [6] M. A. Hassanin, F. E. Abdel-Kader, S. I. Amer, and A. E. Abu-Moubarka, "Operation of brushless DC motor to drive the electric vehicle," in 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, dec 2018.
- [7] N. Pothirasan and M. P. Rajasekaran, "Regenerative e-vehicle using BLDC motor," in 2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT). IEEE, oct 2016.



- [8] P. V. Sidharthan and Y. Kashyap, "Brushless DC hub motor drive control for electric vehicle applications," in 2020 First International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). IEEE, jan 2020.
- [9] R. K. Behera, R. Kumar, S. M. Bellala, and P. Raviteja, "Analysis of electric vehicle stability effectiveness on wheel force with BLDC motor drive," in 2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES). IEEE, jan 2018.
- [10] A. Nikam and H. T. Jadhav, "Modelling & simulation of three phases BLDC motor for electric braking," in 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT). IEEE, jul 2019.
- [11] S. S. Rauth and B. Samanta, "Comparative analysis of IM/BLDC/PMSM drives for electric vehicle traction applications using ANN-based FOC," in 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON). IEEE, dec 2020.
- [12] F. Genduso, R. Miceli, C. Rando, and G. R. Galluzzo, "Back EMF sensorless-control algorithm for highdynamic performance PMSM," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 6, pp. 2092–2100, jun 2010.
- [13] J. Jiang and J. Holtz, "An efficient braking method for controlled AC drives with a diode rectifier front end," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, pp. 1299–1307, 2001.
- [14] E. Yesilbag and L. T. Ergene, "Field oriented control of permanent magnet synchronous motors used in washers," in 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. IEEE, sep 2014.
- [15] F. Yusivar, N. Hidayat, R. Gunawan, and A. Halim, "Implementation of field oriented control for permanentmagnet synchronous motor," in 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS). IEEE, nov 2014.
- [16] A. Saghafinia, H. Ping, and M. Uddin, "Sensored field oriented control of a robust induction motor drive using a novel boundary layer fuzzy controller," Sensors, vol. 13, no. 12, pp. 17 025–17 056, dec 2013.
- [17] S.-M. Liu, C.-H. Tu, C.-L. Lin, and V.-T. Liu, "Field-oriented driving/braking control for electric vehicles," Electronics, vol. 9, no. 9, p. 1484, sep 2020.
- [18] F. Golesorkhie, F. Yang, L. Vlacic, and G. Tansley, "Field oriented control-based reduction of the vibration and power consumption of a blood pump," Energies, vol. 13, no. 15, p. 3907, jul 2020.

