

# Perancangan Kontroler Motor BLDC Dengan Kendali Vektor

1<sup>st</sup> Radya Putra Mahersa  
Fakultas Teknik Elektro  
Telkom University

Bandung, Indonesia  
radyaputramhrsa@student.telkomuniversity.ac.id

2<sup>nd</sup> Angga Rusdinar  
Fakultas Teknik Elektro  
Telkom University

Bandung, Indonesia  
anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id

3<sup>rd</sup> Irwan Purnama  
Fakultas Teknik Elektro  
Telkom University

Bandung, Indonesia  
irwanp@telkomuniversity.ac.id

**Abstrak** — Kendaraan listrik semakin populer berkat kebutuhan akan efisiensi energi dan perawatan yang rendah, sehingga motor BLDC menjadi pilihan utama sebagai penggerak. Namun, kendali motor BLDC dengan metode trapezoidal konvensional tidak mampu mengoptimalkan torsi dan efisiensi secara maksimal. Penelitian tugas akhir ini mengusulkan desain kontroler motor BLDC berbasis kendali vektor (Field Oriented Control/FOC) untuk menghasilkan torsi optimal dengan penggunaan arus yang lebih efisien serta meningkatkan kenyamanan operasional melalui pengurangan gangguan dan ripple torsi. Perancangan sistem meliputi pengembangan perangkat keras—dengan pemilihan mikrokontroler STM32G431RB, gate driver DRV8302, dan MOSFET IRFB4110—serta perangkat lunak berbasis algoritma FOC yang menghasilkan sinyal PWM untuk pengendalian inverter 3-fasa. Metode penelitian dilakukan melalui studi literatur, prototyping rangkaian, dan pengujian implementasi sistem pada motor BLDC. Hasil penelitian ini menemukan bahwa kendali vektor menghasilkan kecepatan yang sama pada daya yang lebih rendah (30%) dibanding dengan komutasi *trapezoidal* dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi mencapai efisiensi sebesar 20% pada 100 RPM.

**Kata kunci**— Motor BLDC, Kendali Vektor, Field Oriented Control, Inverter 3-Fasa, Kendaraan Listrik

## I. PENDAHULUAN

Isi Kendaraan listrik merupakan salah satu teknologi yang berkembang pesat saat ini. Dalam kendaraan listrik, penggerak yang biasa digunakan adalah motor Brushless Direct Current (BLDC), ini karena efisiensinya yang tinggi dan kemudahan perawatannya[1]. Karena keunggulannya, BLDC menjadi pilihan populer dalam kendaraan listrik. Namun, motor BLDC membutuhkan kendali yang kompleks karena komutasinya yang bersifat elektrik dan bukan mekanikal.

BLDC membutuhkan rangkaian pembantu serta teknik kendali tertentu untuk bergerak. Pada penelitian sebelumnya, BLDC diputar menggunakan teknik kendali trapezoidal[2]. Kendali trapezoidal memutar BLDC dengan menerima sinyal posisi rotor dan mengeluarkan sinyal listrik sesuai dengan

posisi motor. Namun dengan kendali trapezoidal torsi yang dapat dikeluarkan motor tidak maksimal maka dibutuhkan teknik kendali untuk memaksimalkan torsi dan efisiensi motor.

Dalam menggerak BLDC ada beberapa teknik kendali yang dapat diimplementasi, teknik yang paling sering diimplementasi adalah Field Oriented Control (FOC) atau kendali vektor. Pada FOC, kontroler BLDC akan mengeluarkan tegangan untuk memaksimalkan torsi yang dapat dikeluarkan motor dengan jumlah arus tertentu namun kendali ini membutuhkan perangkat keras tambahan dan kendali yang lebih kompleks[3].

Dengan metode kendali FOC kita dapat memaksimalkan torsi dengan daya yang sama sehingga kita dapat meningkatkan efisiensi motor. Untuk menerapkan FOC yang baik dibutuhkan perangkat keras yang didesain dengan baik serta perangkat lunak yang diuji keefektifannya.

## II. KAJIAN TEORI

### A. Brushless Direct Current Motor (BLDC)

Motor BLDC adalah motor listrik yang menggunakan prinsip elektromagnetik untuk bergerak. Secara konstruksi, motor BLDC memiliki stator yang terdiri atas belitan tembaga berenamel dengan 3 fasa dalam konfigurasi sambungan wye atau delta dan rotor yang terdiri atas magnet permanen. Konstruksi ini sangat mirip dengan motor sinkron magnet permanen (PMSM) AC, namun bedanya adalah dengan bentuk Gaya Gerak Listrik Induksinya, PMSM mempunyai GGL Induksi sinusoidal sedangkan BLDC mempunyai GGL Induksi trapezoidal [4]. Dengan mengeksitasi belitan pada rotor dengan urutan tertentu, kita dapat menghasilkan gerakan dengan memanfaatkan interaksi antara medan magnet yang dihasilkan listrik dalam belitan dan medan magnet dari magnet permanen.

Motor BLDC sering digunakan dalam kendaraan listrik dan aplikasi kecepatan tinggi karena efisiensinya yang tinggi dan keandalannya jika dibanding dengan motor DC bersikat[5]. Ini karena motor BLDC tidak menggunakan sikat untuk komutasi sehingga kebutuhan perawatannya jauh lebih

sedikit. Motor BLDC juga jauh lebih efisien daripada motor DC, karena menghilangkan rugi daya dari gesekan sikat

### B. Prinsip Penggerakan Motor BLDC

Motor BLDC bergerak dengan memanfaatkan gaya tarik menarik antara magnet di rotor dan elektromagnet di stator. Untuk mengetahui pasangan elektromagnet apa yang harus dieksitasi, dibutuhkan cara untuk mengetahui posisi stator magnet. Tanpa umpan balik posisi, elektromagnet dan magnet di stator akan sejajar dan tidak menghasilkan gerakan serta menarik arus besar dari sumber daya. Saat ini ada beberapa solusi untuk mengetahui posisi BLDC seperti enkoder absolut, sensor efek hall, dan berbagai metode sensorless menggunakan GGL Induksi dari motor[6].

Setelah diketahui posisi rotor BLDC, 2 fasa harus dieksitasi sesuai dengan posisi rotor saat itu. Untuk mengeksitasi fasa spesifik dibutuhkan saklar untuk mengarahkan listrik melewati 2 fasa yang benar, saklar tersebut juga harus bisa respon cepat terhadap perubahan posisi rotor. Saklar yang digunakan biasanya saklar semikonduktor yang dikendalikan oleh suatu mikrokontroler, jenis saklar yang digunakan tergantung pada tegangan dan frekuensi pensaklaran yang akan diberi ke motor[7].

Gerakan BLDC adalah hasil interaksi antara magnet permanen pada rotor dan elektromagnet pada stator. Karena kutub magnet pada rotor akan bergerak ke arah kutub lawan yang dihasilkan elektromagnet, setelah waktu tertentu rotor akan berhenti saat kutub utara dan selatan bertemu. Untuk mencegah kondisi ini, belitan yang dieksitasi bisa kita ubah sehingga magnet rotor selalu mengejar magnet yang dihasilkan stator[8].

Untuk mengubah polaritas magnet belitan sehingga magnet permanen pada rotor selalu berputar, kita menggunakan rangkaian yang dapat mengubah arah arus listrik sehingga sesuai dengan posisi rotor yang kita ketahui[9]. Menggunakan saklar semikonduktor kita bisa mengendalikan kapan belitan mempunyai polaritas magnet tertentu dan mengendalikan kuat medan magnet tersebut.

Kendali yang sering digunakan disebut kendali trapezoidal yang menggunakan tabel dengan kombinasi saklar yang sudah terdefinisi, kombinasi yang digunakan akan tergantung pada posisi rotor saat itu. Kelemahan dari teknik gerakan ini adalah adanya riak dari torsi karena posisi magnet yang tidak selalu ideal, medan magnet dari belitan akan konstan sedangkan medan magnet dari rotor akan terus berubah dan perubahan antara langkah komutasi terjadi secara tiba-tiba[10].

### C. Inverter 3-Fasa

Inverter adalah rangkaian elektronik yang berfungsi untuk mengubah listrik DC menjadi bentuk AC 3-Fasa yang masing-masing fasanya terpisah sebesar 120 derajat[11]. Rangkaian inverter 3 fasa terdiri atas 3 pasang rangkaian half-bridge. 3 saklar yang disebut saklar high-side tersambung ke bagian positif tegangan input sedangkan 3 saklar lawannya, saklar low-side tersambung ke bagian negative tegangan input. Dengan menghidupkan saklar high-side dan low-side pada pasangan yang beda, beban yang tersambung pada fasa

tersebut akan mengalami polaritas tegangan yang saling berbalik.

Motor BLDC memanfaatkan rangkaian ini dengan menggunakan kedua polaritas inverter untuk menghasilkan medan magnet yang dibutuhkan untuk memutar rotor BLDC.

### D. Field-Oriented Control

Field Oriented Control atau kendali vektor adalah metode untuk mengendalikan arus yang menghasilkan torsi dan fluks secara memaksimalkan torsi putar yang diproduksi dan mencapai performa yang lebih dinamis[12]. Dalam motor DC yang magnet permanennya dieksitasi secara terpisah, konstruksinya sedemikian rupa dimana fluks medan magnet dan arus pada belitan inti selalu saling 90 derajat.

Ini membuat kendali torsi jauh lebih sederhana, dimana magnitudo dari arus medan dan arus belitan diatur sesuai kebutuhan. Namun, pada motor BLDC hanya stator mempunyai belitan jadi dibutuhkan teknik kendali untuk mengeluarkan arus yang memastikan bahwa medan magnet rotor dan arus pada belitan saling 90 derajat. Karena torsi adalah hasil perkalian cross antara vektor arus  $i$  dan fluks rotor  $\phi$ :

$$T = k |\phi||i| \sin \theta \quad (1)$$

Dapat dilihat kalau sudut 90 derajat adalah sudut antara fluks rotor dan arus belitan yang optimal untuk memaksimalkan torsi karena sinus dari 90 derajat adalah 1[13]. Dalam komutasi trapezoidal, karena arus yang diberi ke belitan akan sesuai dengan tabel komutasi, vektor arus tidak akan selalu berada di posisi 90 derajat dengan medan magnet rotor, ini akan menghasilkan osilasi dalam torsi motor. Pada motor BLDC sudut dari rotor dapat diketahui menggunakan sensor posisi, namun arus yang dialami motor BLDC adalah arus 3 fasa, maka harus diubah menjadi sebuah arus DC bervektor yang dapat dikendali.

Untuk mengkonversi arus AC 3 fasa menjadi arus DC dengan vektornya dibutuhkan transformasi matematis. Pertama kita harus mengubah sistem 3 fasa menjadi 2 fasa, ini karena untuk kendali torsi akan ada 2 arus, arus penghasil torsi dan arus penghasil medan magnet. Transformasi yang digunakan untuk mencapai hal tersebut adalah transformasi Clarke.

Transformasi Clarke mengubah vektor arus 3 fasa ( $a, b, c$ ) menjadi sistem 2 fasa ( $\alpha, \beta$ ). Setiap arus 3 fasa dipecah menjadi komponen  $\alpha$  dan  $\beta$  lalu nilai tersebut akan dijumlah menjadi arus total di axis  $\alpha$  dan axis  $\beta$ , dengan memperhitungkan sudut masing masing arus di diagram fasor[14].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sekarang kita mempunyai 2 vektor arus tetapi nilainya akan berputar mengikuti vektor arus dan tidak mengikuti vektor rotor, maka harus dilakukan transformasi untuk mengubah

vektor arus  $\alpha$  dan  $\beta$ . Transformasi selanjutnya adalah transformasi Park dimana axis d dan axis q akan mengikuti posisi rotor.

Dengan mengambil posisi rotor  $\theta$ , kita dapat melihat arus  $\alpha$  dan  $\beta$  dengan rangka acuan posisi rotor. Output dari transformasi Park adalah dua vektor, vektor arus d yang sejajar dengan vektor posisi rotor dan vektor arus q yang tegak lurus dengan vektor posisi rotor[15]:

$$i_d = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \quad (3)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \quad (4)$$

Sekarang kita bisa mengendalikan arus pada axis q untuk menghasilkan torsi yang kami inginkan karena arus yang dihasilkan transformasi adalah arus DC yang dapat dikendali secara digital. Karena arus tidak bisa dikendali secara langsung, kita harus mengendalikan tegangan yang masuk ke masing masing belitan, ini dapat kita capai dengan menggunakan PWM untuk memodulasi tegangan pada setiap fasa.

#### E. Kendali PI

Kendali PI atau Proportional – Integral Control adalah sebuah mekanisme kendali dengan umpan balik yang dapat meregulasi sebuah output dengan mengubah nilai input. Sebuah Controller PI terdiri atas 2 elemen, elemen proporsional adalah elemen yang berfungsi untuk melihat nilai galat yang ada pada sistem pada suatu saat dan melaksanakan koreksi dan elemen integral adalah elemen yang melihat galat yang telah diakumulasi oleh sistem dan melakukan koreksi[16].

$$u = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5)$$

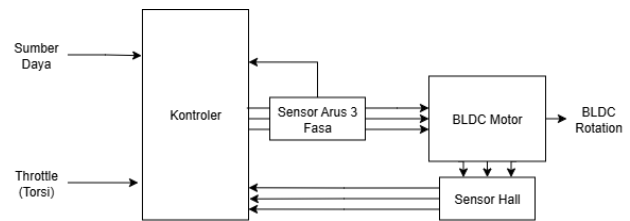
Pada bidang elektronika daya, kontroler PI ada kelebihan dibanding dengan kontroler PID, yaitu kestabilan di keadaan tunak. Ini karena pada konverter daya, galat kecil dalam bentuk riak di output adalah hal yang sering ditemukan, aksi derivatif dari kontroler PID akan terlalu sensitif terhadap riak dan menghasilkan output yang tidak stabil dan menurunkan efisiensi konverter[17][18].

### III. METODE

Kontroler BLDC terdiri atas beberapa bagian yang diperlukan untuk menjalankan algoritma FOC, mikrokontroler untuk menjalankan transformasi dan algoritma yang akan mengeluarkan tegangan PWM yang dibutuhkan oleh motor, sensor hall untuk mengetahui sudut rotor dan sensor arus tiga fasa berbasis resistor shunt untuk mengambil data arus.

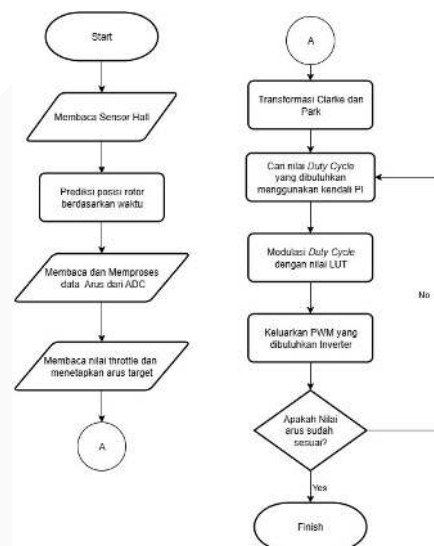
Data posisi dari hall sensor merupakan nilai digital dari 3 buah sensor yang memiliki 6 kemungkinan sudut, karena hall sensor hanya memiliki 6 kemungkinan akurasi dari nilai sudut tersebut tidak cukup untuk menjalankan algoritma FOC sehingga mikrokontroler harus mengukur jumlah waktu rata-rata antara perubahan sudut hall untuk mendapat nilai sudut yang mendekati nilai yang nyata. Dengan data yang sudah diolah ini kontroler dapat melaksanakan transformasi yang lebih akurat.

Mikrokontroler juga menerima data arus dari sensor arus 3-fasa, karena arus 3-fasa tersebut adalah arus AC maka dibutuhkan sensor eksternal yang dapat mengubah sinyal AC tersebut menjadi nilai DC yang dapat dibaca oleh mikrokontroler. Data arus tersebut selanjutnya akan ditransformasi menjadi variabel yang lebih mudah dikendali.



GAMBAR 1  
Desain Sistem

Perangkat lunak yang dijalankan berfungsi untuk memberi kendali torsi yang presisi melalui Algoritma FOC, pada bagian perangkat lunak program akan memproses data input dari Hall Sensor, Sensor Arus, dan input manusia dalam bentuk throttle. Data tersebut akan diproses dan dilalui transformasi sehingga menjadi bentuk yang dapat dikendali, setelah itu data tersebut akan digunakan untuk mengendalikan nilai PWM yang dapat dikeluarkan oleh mikrokontroler:

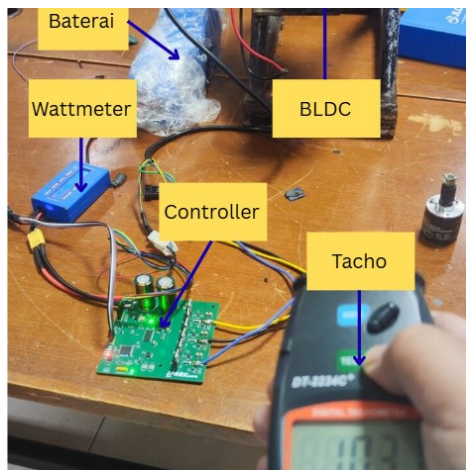


GAMBAR 2  
Flowchart

Untuk mengukur performa kendali *trapezoidal* dan kendali vektor secara mekanis, kita bisa mengukur kecepatan motor dalam bentuk RPM (*Rotations Per Minute*) dengan beban yang sama. Secara teori, kendali vektor akan menghasilkan torsi yang lebih besar karena kendali vektor memanfaatkan semua fasa sedangkan kendali *trapezoidal* hanya memanfaatkan 2 fasa kontroler.

Untuk mengukur RPM motor, sebuah tachometer digital digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3, kita bisa mengetahui metode komutasi dengan melihat lampu yang hidup pada kontroler:





GAMBAR 3

Pengujian kecepatan Motor BLDC  
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karena kedua metode kendali ini mempunyai profil arus yang berbeda, konsumsi arus DC yang dirasakan sistem juga akan berbeda. Dengan membanding kedua metode kendali dengan kecepatan yang sama, kita dapat mengamati konsumsi daya listrik kedua metode untuk mengeluarkan gerakan mekanis yang sama.

Pada pengujian ini kedua metode akan dievaluasi di kecepatan 100 RPM dengan beban Motor DC yang terminalnya disambung, ini akan memastikan kedua metode menanggung beban yang sama:

TABEL 1  
PENGUJIAN DAYA DI 100 RPM

Percobaan Ke-	Daya Trapezoid (W)	Daya FOC (W)
1	65.2	57.6
2	66.3	55.5
3	67.8	53.4
4	67.3	57.1
5	66.7	57.1
6	65.7	54.5
7	67.8	56.5
8	66.7	53.9
9	65.7	54.4
10	65.6	52.9
Rata-Rata	<b>66.48</b>	<b>55.29</b>

Dari data yang diperoleh bisa disimpulkan kalau kendali FOC lebih efisien jika dibanding dengan kendali trapezoidal pada kecepatan yang sama, kendali FOC hanya membutuhkan 83,16% dari daya yang dibutuhkan kendali trapezoidal atau sekitar 20% lebih efisien, ini karena vektor arus yang dihasilkan oleh PWM menghasilkan torsi yang optimal, sehingga butuh daya total yang lebih sedikit

sedangkan pada kendali trapezoidal vektor arusnya statis sehingga torsi yang dihasilkan tidak akan selalu optimal untuk memutar motor.

## V. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian komutasi trapezoidal dan kendali vektor kita dapat menarik kesimpulan bahwa komutasi sinusoidal lebih kuat dibanding komutasi trapezoidal, dengan penggunaan daya yang lebih kecil pada RPM yang sama, contohnya di 100 RPM kendali vektor hanya menggunakan 83% daya yang dibutuhkan oleh kendali trapezoidal, selain itu kendali vektor lebih efisien dalam penghasilan torsi, dengan efisiensi 20% jika dibanding dengan kendali trapezoidal

## REFERENSI

- [1] P. Millet, "Brushless vs. Brushed DC Motors: When and Why to Choose One Over the Other," Oct. 2022. Accessed: Oct. 05, 2024. [Online]. Available: monolithicpower.com
- [2] D. Yudha Pratama, A. Rizal Miftah Awali Sofyan, and L. Imanuela Jerico, "Perancangan Kontroler Motor BLDC 500 Watt untuk Prototipe Kendaraan Listrik di Laboratorium INACOS," Telkom University, 2023.
- [3] S. Lee, T. Lemley, and G. Keohane, "A Comparison Study Of The Commutation Methods For The Three-Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor."
- [4] K. Hee Nam, "AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications Second Edition."
- [5] S. Derammalaere, M. Haemers, J. De Viene, F. Verbelen, and K. Stockman, "A quantitative comparison between BLDC, PMSM, Brushed DC and Stepping Motor Technologies," in 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Nov. 2016.
- [6] K. Kolano, "Determining the Position of the Brushless DC Motor Rotor," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 7, p. 1607, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13071607.
- [7] S.-H. Kim, "Pulse width modulation inverters," in *Electric Motor Control*, Elsevier, 2017, pp. 265–340. doi: 10.1016/B978-0-12-812138-2.00007-6.
- [8] S.-H. Kim, "Brushless direct current motors," in *Electric Motor Control*, Elsevier, 2017, pp. 389–416. doi: 10.1016/B978-0-12-812138-2.00010-6.
- [9] C. Andrews, M. Soltero, and M. Mesganaw, "Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors," 2023. [Online]. Available: www.ti.com
- [10] W. A. Salah, D. Ishak, and K. J. Hammadi, "Minimization of torque ripples in BLDC motors due to phase commutation-a review," *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2011.
- [11] Ned. Mohan, T. M. . Undeland, and W. P. . Robbins, *Power electronics : converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2003.
- [12] R. T. Ramamoorthy, B. Larimore, and M. Bhardwaj, "Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors Using TMS320F2837x," 2021. [Online]. Available: www.ti.com
- [13] S.-H. Kim, "Vector control of alternating current motors," in *Electric Motor Control*, Elsevier, 2017, pp. 203–246. doi: 10.1016/B978-0-12-812138-2.00005-2.
- [14] P. Krause, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley, 2013. doi: 10.1002/9781118524336.
- [15] M. Bhardwaj, "Application Report Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors," 2013. [Online]. Available: www.ti.com
- [16] W. Y. Svrcek, D. P. Mahoney, and B. R. Young, *A Real-Time Approach to Process Control*. Wiley, 2006. doi: 10.1002/9780470029558.
- [17] R. Das, H. Rashid, and I. U. Ahmed, "A comparative analysis of PI and PID controlled bidirectional DC-DC converter with conventional bidirectional DC-DC

- converter,” in 2017 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), IEEE, Dec. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/EICT.2017.8275149.
- [18] I. El Haji, K. Mustapha, A. Elhasnaoui, and S. Sahbani, “Design and Implementation of PI and PID Controller for symmetrical multilevel boost Converter,” EPJ Web Conf, vol. 330, p. 01006, Jun. 2025, doi: 10.1051/epjconf/202533001006.
- [19] A. A. Obed and A. K. Kadhim, “Speed and Current Limiting Control Strategies for BLDC Motor Drive System: A Comparative Study,” International Journal of Advanced Engineering Research and Science, vol. 5, no. 2, pp. 119–130, 2018, doi: 10.22161/ijaers.5.2.16.
- [20] K. S. S. Kumar, Electric Circuit Analysis, 1st ed. Noida: Pearson, 2013.
- [21] D. Lin, P. Zhou, and Z. J. Cendes, “In-Depth Study of the Torque Constant for Permanent-Magnet Machines,” IEEE Trans Magn, vol. 45, no. 12, pp. 5383–5387, Dec. 2009, doi: 10.1109/TMAG.2009.2026043.
- [22] C. Choi, “Integral Control and Anti-Windup Experiments,” International Journal of Engineering Pedagogy (IJEP), vol. 9, no. 1, pp. 113–125, Feb. 2019, doi: 10.3991/ijep.v9i1.10056.

