

Pengendalian Arus Motor *Brushless* DC (BLDC) Berdasarkan Mode Magnetisasi dan Demagnetisasi

Current Control of a Brushless DC Motor Based on Magnetizing Demagnetizing Modes

Mochamad Dony Firdaus¹, Slamet Riyadi², Gregorius Dwi Perkasa³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, Indonesia

¹*Corresponding author: Firdausdoni808@gmail.com

²riyadi@unika.ac.id, ³Grego.dwi@unika.ac.id

Received on 06-02-2026, accepted on 25-02-2026, published on 31-07-2026

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan strategi kontrol arus motor BLDC berbasis optimalisasi mode magnetisasi dan demagnetisasi untuk mengatasi masalah distorsi arus pada komutasi enam langkah. Urgensi dan keunggulan penelitian ini terletak pada perlunya meminimalkan riak torsi yang sering menyebabkan kegagalan mekanis dan rendahnya efisiensi pada sistem penggerak konvensional. Dengan mengintegrasikan metode *Hysteresis Current Control* (HCC), laju perubahan arus diatur secara presisi untuk mengeliminasi *current lag*. Pengujian dilakukan melalui simulasi perbandingan antara kontrol PWM konvensional dengan metode magnetisasi-demagnetisasi yang diusulkan. Parameter keunggulan diukur berdasarkan nilai *Peak-to-Peak Torque Ripple* dan respon transien arus. Klaim utama penelitian ini adalah bahwa strategi yang diusulkan mampu mereduksi riak torsi hingga 80% dibandingkan metode standar dan mempercepat sinkronisasi arus dengan back-EMF pada frekuensi tinggi. Hasil ini membuktikan bahwa penyederhanaan algoritma kontrol tetap dapat memberikan stabilitas torsi yang optimal pada kondisi tunak.

Kata kunci: Motor BLDC, Kontrol Arus Histeresis (HCC), Mode magnetisasi-demagnetisasi, Riak torsi, Komutasi enam langkah.

Abstract

This study recommends a BLDC motor current control strategy based on the optimization of magnetization and demagnetization modes to overcome the current distortion problem in six-step commutation. The urgency and advantages of this study lies in the need to minimize torque ripple which often causes mechanism failure and low efficiency in conventional drive systems. By integrating the Hysteresis Current Control (HCC) method, the current change rate is precisely regulated to eliminate current lag. Testing is carried out through comparative simulations between conventional PWM control and the proposed magnetization-demagnetization method. The superiority parameters are measured based on the Peak-to-Peak Torque Ripple value and the current transient response. The main claim of this study is that the proposed strategy is able to reduce torque ripple by up to 80% compared to the standard method and accelerate current synchronization with back-EMF at high frequencies. These results prove that the simplification of the control algorithm can still provide optimal torque stability at steady state.

Keywords: BLDC motor, Hysteresis Current Control (HCC), Magnetizing–demagnetizing mode, Torque ripple, Six-step commutation.

I. INTRODUCTION

Motor BLDC (Brushless DC) banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan otomotif karena memiliki efisiensi tinggi, torsi tinggi, dan biaya perawatan rendah karena tidak adanya sikat mekanis [1] [2]. Namun, masalah utamanya adalah munculnya riak arus saat perpindahan fase (komutasi). Jika tidak dikendalikan dengan tepat, riak arus ini akan membuat motor bergetar sangat keras dan berisik, sehingga mesin menjadi tidak stabil. Lebih parah lagi, arus yang tidak teratur ini menyebabkan panas berlebihan (stres termal) pada lilitan kawat di dalam motor. Dalam jangka panjang, panas ini bisa membakar lapisan pelindung kawat dan merusak magnet pada bagian yang berputar (rotor) secara permanen, sehingga motor tidak bisa digunakan lagi [3] [4]. Oleh karena itu, pengendalian arus sangat penting bukan hanya untuk performa, tetapi juga untuk menjaga agar motor tetap awet dan bekerja optimal.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengatasi masalah ini. Salah satu pendekatan yang sering digunakan adalah algoritma cerdas, seperti Single-Input Fuzzy PI Controller [5], Meskipun metode ini menawarkan akurasi tinggi, proses perhitungannya sangat kompleks sehingga membebani sumber daya prosesor dan membutuhkan waktu pemrosesan yang lama, yang sering kali sulit diimplementasikan pada perangkat keras sederhana. Selain itu, peneliti lain mencoba menekan riak dengan memodulasi vektor tegangan untuk memperbaiki bentuk gelombang arus atau dengan memodifikasi tegangan input berdasarkan analisis wilayah freewheeling menggunakan transformasi Laplace [6] [7]. Namun, metode-metode ini cenderung rumit karena membutuhkan strategi pengaturan tegangan yang sangat presisi serta pemodelan matematika yang berat.

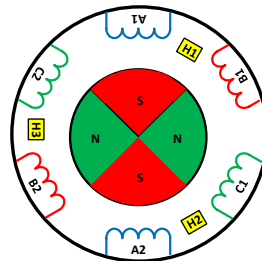
Sebagai solusi, penelitian ini mengusulkan sistem kontrol arus Histeresis (Hysteresis Current Control atau HCC) yang mengintegrasikan mode magnetisasi dan demagnetisasi aktif. Berbeda dengan teknik modulasi konvensional atau metode cerdas seperti Fuzzy Logic Controller yang memerlukan penentuan aturan (rule base) yang kompleks dan beban komputasi yang berat [8]. Penerapan demagnetisasi aktif dalam metode HCC ini terbukti sangat efektif karena dapat mematikan arus sisa pada fasa yang sudah tidak aktif dengan sangat cepat. Dengan transisi fasa yang lebih bersih dan presisi ini, gangguan pada putaran motor dapat diminimalisir sehingga riak torka yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini sangat menguntungkan untuk menjaga kestabilan motor BLDC saat diputar pada kecepatan tinggi.[9].

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menciptakan sistem kontrol yang sederhana namun efektif untuk meningkatkan kelancaran torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh motor BLDC. Dengan mencapai riak arus yang lebih rendah, riak torsi yang dihasilkan akan lebih halus, sehingga meningkatkan efisiensi motor. Untuk membuktikan validitas desain kontrol ini, penelitian dilakukan melalui uji simulasi. Melalui penyajian data simulasi, efektivitas mode magnetisasi dan demagnetisasi dalam menekan riak arus akan dianalisis secara mendalam, sehingga keunggulan metode kontrol sederhana ini dapat diverifikasi secara teknis sebelum diimplementasikan dalam sistem yang lebih luas.

II. RESEARCH METHOD

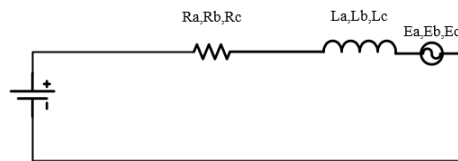
2.1 Prinsip Dasar Motor DC Tanpa Sikat

Motor BLDC bekerja berdasarkan prinsip interaksi gaya magnet, yaitu gaya tarik menarik antara magnet dengan kutub berlawanan dan gaya tolak menarik antara magnet dengan kutub yang sama [10], [11]. Pada motor BLDC, rotor menggunakan magnet permanen sedangkan stator terdiri dari gulungan yang mampu membentuk kutub magnet yang berubah sesuai dengan arah arus yang mengalir di gulungan stator. Struktur motor BLDC diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Motor BLDC

Struktur fisik motor BLDC ditunjukkan pada Gambar 1, yang terdiri dari rotor bermagnet permanen dan stator dengan gulungan tiga fasa yang disusun secara simetris. Setiap fasa stator membentuk dua kutub yang berlawanan untuk menghasilkan medan magnet yang seimbang, sedangkan posisi rotor dipantau oleh tiga sensor Hall Effect (H1, H2, H3) sebagai referensi urutan komutasi arus. Secara elektrik [12] [13], karakteristik motor BLDC direpresentasikan oleh rangkaian ekuivalen pada Gambar 2, di mana setiap fasa dimodelkan sebagai kombinasi resistansi (R), induktansi (L), dan Back Electromotive Force (BEMF) (e). Berdasarkan model tersebut, hubungan antara tegangan masukan dan parameter listrik motor dinyatakan dalam Persamaan (1).

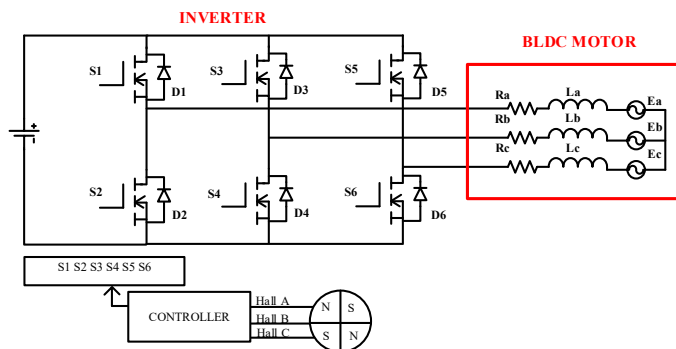


Gambar. 2 Rangkaian Motor BLDC Ekuivalen

Secara matematis, hubungan antara tegangan sumber, parameter internal motor, dan tegangan balik (BEMF) dapat dinyatakan melalui persamaan tegangan fasa berikut:

$$V = I \cdot R + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

Di mana tegangan fasa (V) adalah jumlah dari tegangan resistif ($I \cdot R$), tegangan induktif ($L \frac{di}{dt}$), dan komponen BEMF (e). Dengan memberikan tegangan yang lebih besar melalui inverter, sistem kontrol mencoba mengatasi resistansi induktansi belitan, sehingga arus dapat mencapai nilai referensi lebih cepat [14]. Melalui gambar rangkaian ekuivalen ini pada Gambar 2, dapat dilihat bahwa keberhasilan dalam meminimalkan riak torsi sangat bergantung pada seberapa cepat sistem kontrol mampu memanipulasi parameter arus terhadap konstanta waktu (L) / (R) pada belitan stator. Untuk menggerakkan motor, mekanisme untuk mengubah kutub magnet pada stator dikendalikan oleh Inverter Tiga Fasa pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Skematik Penggerak Motor BLDC

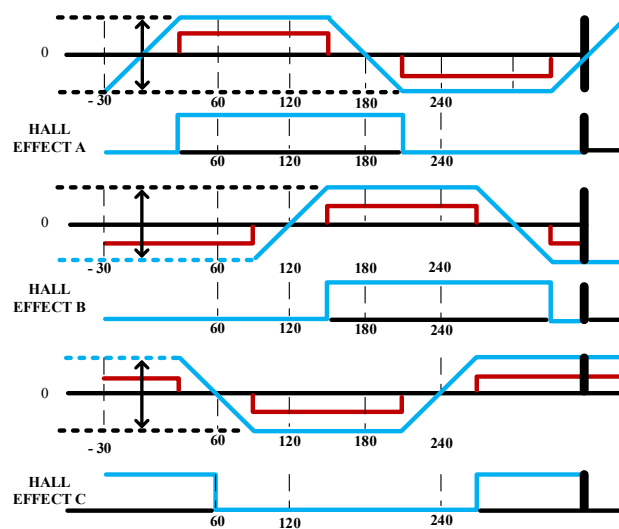
Pada Gambar 3 inverter ini bertindak sebagai jembatan daya yang memproses arus DC menjadi AC melalui urutan tertentu sesuai dengan posisi rotor. Sistem kontrol pada motor BLDC dirancang dengan metode konduksi 120° listrik, di mana setiap fasa pada stator hanya dialiri arus selama sepertiga dari total siklus elektrik untuk menghasilkan torsi yang optimal [15]. Cara kerjanya cukup sederhana: pada setiap tahap, inverter hanya akan menghidupkan dua sakelar secara bersamaan untuk mengalirkan listrik ke dua gulungan motor, sementara satu gulungan dimatikan. Pembangkitan medan magnet pada stator yang sinkron dengan pergerakan rotor merupakan kunci utama untuk memastikan motor BLDC beroperasi dengan stabilitas tinggi dan efisiensi energi yang optimal. Untuk mengetahui kapan saatnya beralih, sensor Hall Effect bekerja untuk mendeteksi posisi motor dengan sangat akurat. Sensor ini kemudian mengirimkan

kode sinyal ke inverter untuk menentukan pasangan sakelar mana yang harus segera dihidupkan sesuai dengan pedoman pada Tabel 1.

Table. 1 Pengaturan Pada Inverter Tiga Fasa Yang Berfungsi Sebagai Penggerak motor BLDC.

STEP	HALL EFFECT	CURRENT (+)	CURRENT (-)
1	1 0 0	I_a	I_c
2	1 1 0	I_b	I_c
3	0 1 0	I_b	I_a
4	0 1 1	I_c	I_a
5	0 0 1	I_c	I_b
6	1 0 1	I_a	I_b

Berdasarkan posisi ini, sakelar inverter akan melakukan proses komutasi dengan mengaktifkan dua fasa stator secara bergantian, sementara fasa lainnya tetap dalam kondisi tidak aktif. Interaksi dinamis antara BEMF pada Gambar 4. Pengaturan aliran arus pada belitan stator melalui urutan peralihan fasa yang sinkron dengan posisi rotor sangat krusial untuk memastikan kontinuitas putaran motor dan menghasilkan output torsi yang konsisten [16]. Dalam penelitian ini, kontrol arus pada setiap sakelar akan dimodifikasi menggunakan mode magnetisasi dan demagnetisasi untuk mengoptimalkan transisi arus ketika sakelar inverter diaktifkan, sehingga riak arus yang terjadi selama proses komutasi dapat diminimalkan.



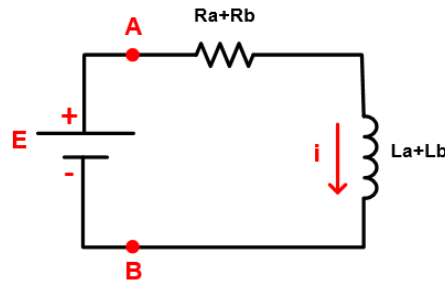
Gambar 4. Diagram pewaktuan Back-EMF (biru), arus fasa (merah), dan sinyal sensor efek Hall (biru).

BEMF merupakan tegangan induksi yang timbul pada kumparan stator akibat pergerakan magnet permanen rotor, sehingga motor BLDC secara prinsip juga bekerja sebagai generator [17] [18]. Tegangan ini memiliki polaritas yang berlawanan dengan tegangan inverter dan berperan penting dalam proses komutasi. Hubungan antara sinyal sensor efek Hall, arus fasa, dan BEMF ditunjukkan pada diagram waktu Gambar 4. Pada motor BLDC, Karakteristik utama motor BLDC adalah bentuk gelombang BEMF yang bersifat trapesium, di mana fase gelombang tersebut harus selaras dengan posisi rotor untuk menghasilkan torsi yang optimal [19] [20]. Untuk menghasilkan torsi yang kecil, arus fasa harus diterapkan pada interval ketika BEMF berada pada nilai maksimumnya. Ketidaktepatan waktu pemberian arus, seperti keterlambatan transisi atau tumpang tindih antar fasa, akan menimbulkan riak torsi. Oleh karena itu,

penerapan mode magnetisasi dan demagnetisasi memungkinkan arus naik dan turun lebih cepat sehingga tetap sinkron dengan jendela waktu BEMF, yang pada akhirnya menghasilkan putaran motor yang lebih halus.

2.2 Magnetisasi and Demagnetisasi

Pada motor BLDC, fase suplai energi listrik dari sumber tegangan ke kumparan stator (E) bertujuan untuk menghasilkan medan elektromagnetik yang berinteraksi dengan magnet permanen rotor guna menghasilkan torsi [21]. Berdasarkan rangkaian ekivalen pada Gambar 5, proses ini terjadi ketika arus (I) mengalir masuk melalui terminal A dan keluar melalui terminal B. Dalam kondisi ini, arus mengalir dari sumber melalui resistansi kumparan total ($R_a + R_b$) dan induktansi kumparan ($L_a + L_b$). Secara teknis, jalur ini dibentuk melalui koordinasi pengalihan Inverter 3-Fase (Gambar 3) yang mengikuti urutan komutasi 6 langkah. Misalnya, mengacu pada Tabel 1.



Gambar. 5 Mode Magnetisasi Dari A Ke B Pada Motor BLDC

Ketika fasa berada dalam kondisi magnetisasi, tegangan dari sumber (E) akan terbagi menjadi dua komponen utama, yaitu tegangan pada resistansi (V_{Res}) dan tegangan pada induktansi (V_{ind}). Berdasarkan Hukum Kirchhoff yang ditunjukkan pada Persamaan (2a) dan (2b), hubungan tersebut menjadi:

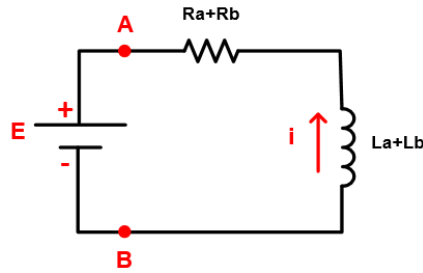
$$E = V_{Res} + V_{ind} \quad (2a)$$

Jika komponen-komponen tersebut dijelaskan lebih rinci menggunakan karakteristik fisik lilitan, maka persamaannya menjadi:

$$E = I.R + L \frac{di}{dt} \quad (2b)$$

Tegangan resistif ($I.R$) menunjukkan rugi daya akibat pemanasan pada resistansi kumparan stator, sedangkan komponen induktif ($L \frac{di}{dt}$) menunjukkan pengaruh induktansi yang menahan perubahan arus secara cepat. Persamaan (2b) memperlihatkan bahwa laju kenaikan arus selama proses magnetisasi ditentukan oleh tegangan inverter dan nilai induktansi stator, di mana tegangan yang lebih besar menghasilkan peningkatan arus yang lebih cepat. Dalam penelitian ini, proses magnetisasi dikendalikan secara aktif menggunakan kontrol arus histeresis sehingga arus fasa tetap berada dalam batas yang diinginkan dan sesuai dengan kebutuhan torka selama interval konduksi.

Proses pelepasan energi magnetik atau demagnetisasi pada kumparan stator saat perpindahan sektor komutasi harus dikelola dengan tepat. Hal ini karena reaksi armatur yang tidak terkendali selama proses tersebut dapat memicu terjadinya demagnetisasi ireversibel pada magnet permanen motor [22] [23]. Fenomena ini jika tidak dikontrol dengan baik dapat mempengaruhi fluks magnetik dan berpotensi memicu kerusakan demagnetisasi pada magnet permanen rotor dalam jangka Panjang. Proses ini terjadi selama interval transisi komutasi enam langkah seperti yang dirangkum dalam Tabel 2, di mana arus stator tidak dapat berhenti seketika karena induktansi kumparan. Oleh karena itu, hal ini menyebabkan penurunan arus secara bertahap dan pelepasan fluks magnetik stator.



Gambar 6. Mode Demagnetisasi Dari Fasa A Ke Fasa B Pada Motor BLDC

Berdasarkan Gambar 6 proses demagnetisasi dari fasa A ke fasa B terjadi ketika sakelar inverter yang sebelumnya mengalirkan arus magnetisasi dimatikan, sehingga arus stator dialirkan melalui dioda sebagai jalur pelepasan energi induktif. Pada kondisi ini, arus mengalir melalui kumparan fasa A dan B serta dioda inverter, menyebabkan fluks magnetik stator berkurang secara bertahap. Mekanisme ini memungkinkan perpindahan komutasi berlangsung secara halus tanpa lonjakan arus yang signifikan. Untuk menganalisis dinamika arus selama demagnetisasi, motor BLDC dimodelkan menggunakan rangkaian ekuivalen yang terdiri dari resistansi total ($R_a + R_b$) dan induktansi total ($L_a + L_b$). Tegangan antar fasa memiliki polaritas berlawanan dengan kondisi magnetisasi, sehingga arus stator menurun sesuai dengan persamaan demagnetisasi yang diperoleh dari hukum tegangan Kirchhoff. Persamaan demagnetisasi dapat dinyatakan sebagai:

$$-E = V_{Res} + V_{ind} \quad (3a)$$

Jika komponen-komponen tersebut dijelaskan lebih rinci menggunakan karakteristik fisik lilitan, maka persamaannya menjadi:

$$-E = V_{Res} + V_{ind} \quad (3b)$$

Persamaan (3a) menunjukkan bahwa laju penurunan arus selama proses demagnetisasi ditentukan oleh tegangan efektif dan induktansi kumparan stator, dengan tanda negatif menandakan arah penurunan arus. Tabel 2 memperlihatkan keterkaitan antara sinyal sensor Hall, pasangan sakelar inverter aktif, serta jalur arus fasa pada setiap langkah komutasi motor BLDC. Proses magnetisasi dan demagnetisasi berlangsung secara bergantian sesuai dengan posisi rotor dan pola pensaklaran inverter. Namun, sifat induktif kumparan stator menyebabkan dinamika arus selama transisi komutasi masih berpotensi menimbulkan ketidakteraturan arus. Oleh karena itu, kontrol arus histeresis diterapkan untuk mengatur laju perubahan arus agar tetap berada di sekitar arus referensi selama proses magnetisasi dan demagnetisasi

Tabel. 2 Pengaturan sakelar pada inverter tiga fasa yang berfungsi sebagai penggerak motor BLDC.

STEP	HALL EFFECT	ON STAGE		CURRENT (+)	CURRENT (-)
		MAGNETIZING	DEMAGNETIZING		
1	1 0 0	S1-S6	D5-D2	I_a	I_c
2	1 1 0	S3-S6	D5-D4	I_b	I_c
3	0 1 0	S3-S2	D1-D4	I_b	I_a
4	0 1 1	S5-S2	D1-D6	I_c	I_a
5	0 0 1	S5-S4	D3-D6	I_c	I_b
6	1 0 1	S1-S4	D3-D2	I_a	I_b

Meskipun urutan pensaklaran inverter telah ditetapkan melalui tabel logika posisi, perpindahan antara mode magnetisasi dan demagnetisasi ditentukan oleh selisih arus (ΔI) antara arus aktual (I_{act}) dan arus referensi (I_{ref}). Kontrol arus histeresis diterapkan untuk memastikan arus aktual motor tetap berada dalam batas pita toleransi (*hysteresis band*) yang telah ditentukan di sekitar nilai referensinya(kumar). Pengaturan arus melalui strategi magnetisasi–demagnetisasi tidak hanya berperan pada sisi listrik, tetapi juga secara langsung memengaruhi kinerja mekanik motor. Torsi elektromagnetik pada motor BLDC dihasilkan dari konversi energi listrik menjadi mekanik, yang secara matematis ditentukan oleh jumlah perkalian arus stator dengan tegangan induksi BEMF pada setiap fasa, dibagi dengan kecepatan sudut rotor [23]. Oleh karena itu, pengendalian magnetisasi dan demagnetisasi yang tepat mampu menekan variasi torka elektromagnetik, menghasilkan torka yang lebih kecil, dan meminimalkan getaran mekanis. Secara matematis, torka elektromagnetik motor BLDC dirumuskan pada Persamaan (4) sebagai:

$$\tau_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (4)$$

Secara teoritis, dalam kondisi ideal, bentuk gelombang arus fasa dan BEMF diasumsikan berbentuk persegi sempurna dan sinkron satu sama lain di setiap sektor komutasi listrik 60° . Untuk menyederhanakan analisis, kita menggunakan karakteristik operasi mode konduksi 120° di mana pada setiap interval waktu hanya ada dua fasa yang secara aktif membawa arus secara bersamaan (seperti fasa A dan fasa B). Jika diasumsikan bahwa tegangan BEMF adalah ($k \cdot \omega$) dan arusnya adalah (I), maka daya sesaat menjadi:

$$P_{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c} = (e \cdot I) + (-e \cdot -I) = 2 \cdot e \cdot I \quad (5)$$

$$P_{tot} = 2 \cdot (k \cdot \omega) \cdot I \quad (6)$$

Karena $\left(\frac{P_{tot}}{\omega}\right)$ maka substitusi persamaan daya di atas menghasilkan:

$$\tau_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (7)$$

Dengan menghilangkan variabel (ω) dan mengganti konstanta (k) dengan konstanta torsi (K_t), torsi yang dihasilkan seharusnya konstan dan linier terhadap arus. Namun, dalam implementasi nyata yang menggunakan kontrol histeresis, arus tidak dapat sepenuhnya datar. Penggunaan switching pada inverter tiga fasa untuk memaksa arus tetap berada dalam rentang toleransi (Δh) pasti akan menyebabkan riak arus yang bergerigi atau bergelombang (ΔI). Merujuk pada hubungan linier di atas, keberadaan riak arus ini secara otomatis akan menimbulkan riak torsi ($\Delta \tau$) yang besarnya adalah:

$$\Delta \tau = K_t \cdot \Delta I \quad (8)$$

2.3 Proposed Control Strategy

Tujuan utama penerapan strategi Magnetisasi-Demagnetisasi adalah untuk menjaga stabilitas transisi arus listrik pada kumparan stator. Dengan mengatur laju pengisian dan pengosongan energi secara tepat, lonjakan arus yang tajam dapat dihindari sehingga nilai riak arus (ΔI) tetap minimal. Untuk mengukur efektivitas strategi ini dalam meminimalkan getaran mekanis, parameter persentase riak torsi ($\% \tau_{ripple}$) digunakan sebagai indikator validasi. Nilai ini diperoleh dengan membandingkan perbedaan antara nilai torsi maksimum dan minimum dengan nilai rata-ratanya selama operasi. Melalui perhitungan ini, dapat dibuktikan secara kuantitatif sejauh mana kontrol histeresis mampu meningkatkan kualitas rotasi motor.

Perhitungan ini dilakukan dengan membandingkan perbedaan antara nilai torsi maksimum dan minimum dengan nilai rata-ratanya.

$$\% \tau_{ripple} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{avg}} \times 100 \quad (9)$$

Nilai riak torsi yang rendah menunjukkan kestabilan putaran motor dan kinerja sistem kendali yang baik. Sesuai dengan Persamaan (9), penurunan riak torsi dicapai dengan menjaga arus fasa tetap stabil dan meminimalkan perubahan arus (ΔI). Untuk itu, digunakan kontrol arus histeresis yang dikombinasikan dengan teknik magnetisasi–demagnetisasi, sehingga arus dapat mengikuti referensi secara cepat. Pengontrol histeresis menjaga arus aktual berada dalam pita toleransi yang ditetapkan, di mana lebar pita memengaruhi kualitas arus dan frekuensi switching: pita yang lebih sempit menghasilkan riak arus lebih kecil namun memengaruhi kualitas arus dan frekuensi switching. Secara matematis, batas pita histeresis dinyatakan sebagai:

$$i_{upp}(t) = i_{ref}(t) + h \quad (10)$$

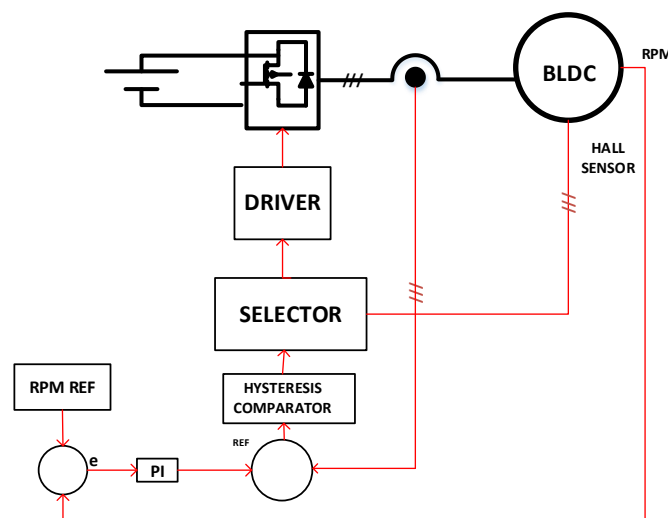
$$i_{low}(t) = i_{ref}(t) - h \quad (11)$$

Berdasarkan persamaan di atas, logika kontrol arus histeresis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Jika } i(t) > i_{upp}(t) \Rightarrow S_{upper} = OFF, S_{low} = ON \quad (12)$$

$$\text{Jika } i(t) < i_{low}(t) \Rightarrow S_{upper} = ON, S_{low} = OFF \quad (13)$$

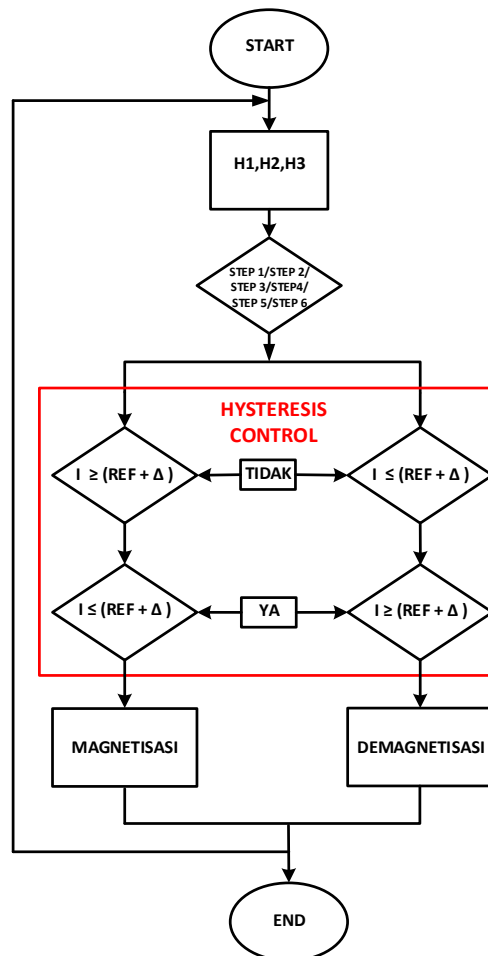
Ketika arus aktual melebihi batas atas pita histeresis, tegangan di seluruh kumparan stator dibalik, menyebabkan gradien arus menjadi negatif, dan arus mulai menurun. Sebaliknya, ketika arus turun di bawah batas bawah pita histeresis, tegangan kumparan dinaikkan kembali untuk meningkatkan arus agar sesuai dengan nilai referensi.



Gambar 7. Prinsip Pengontrol Arus Histeresis

Pada loop luar, pengontrol PI memproses perbedaan antara kecepatan referensi dan kecepatan motor aktual untuk menghasilkan arus referensi utama (I_{ref}). Nilai ini mewakili amplitudo arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan torsi elektromagnetik sesuai dengan kebutuhan sistem. Selanjutnya, informasi amplitudo arus digabungkan dengan sinyal posisi rotor yang diperoleh dari sensor efek Hall untuk membentuk referensi arus fasa yang sesuai dengan urutan komutasi enam langkah. Proses penggabungan dilakukan oleh blok Selector, yang memetakan sinyal Hall gabungan ke dalam tiga referensi arus fasa (i_a , i_b , dan i_c). Pada setiap sektor komutasi, satu fasa diberi referensi arus positif ($+I_{ref}$) satu fasa diberi referensi arus negatif ($-I_{ref}$) sebagai jalur balik arus, sedangkan fasa ketiga berada dalam keadaan tidak aktif dengan referensi arus nol.

Setelah referensi arus fasa ditetapkan, sistem memasuki loop arus sebagai loop dalam. Pada tahap ini, perbedaan antara arus referensi dan arus aktual setiap fasa diproses oleh Komparator Histeresis. Komparator histeresis menghasilkan sinyal switching berdasarkan posisi arus aktual terhadap pita histeresis yang telah ditentukan, sehingga arus fasa dapat dipertahankan dalam batas toleransi yang diinginkan. Sinyal switching yang dihasilkan kemudian diteruskan ke blok Logika Komutasi dan Penggerak Inverter, yang mengontrol sakelar daya inverter untuk memaksa arus stator mengikuti referensi dengan respons dinamis yang cepat. Berdasarkan arsitektur kontrol ini, kinerja strategi magnetisasi-demagnetisasi yang diusulkan divalidasi melalui simulasi, dengan fokus pada evaluasi kualitas arus fasa, torsi elektromagnetik kecil, dan efektivitas pengurangan riak torsi.



Gambar 8. Algoritma Mengusulkan Strategi Kontrol Arus

Algoritma kontrol pada Gambar 8 bekerja dengan mengolah sinyal posisi rotor dari sensor Hall untuk menentukan fasa konduksi yang sesuai pada motor BLDC. Arus referensi yang ditetapkan dibandingkan dengan arus aktual guna menjaga kestabilan torsi. Selisih atau *error* arus tersebut kemudian diproses melalui blok Hysteresis Control yang menggunakan batas toleransi atas dan bawah (Δ) sebagai acuan pengambilan keputusan.

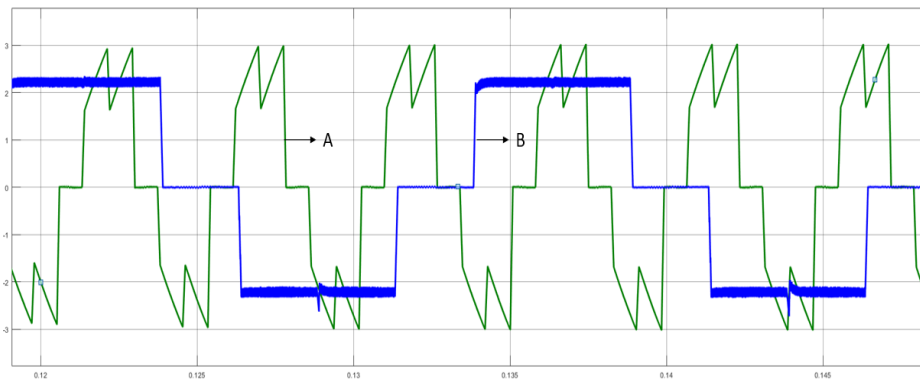
Sistem secara kontinu memantau kondisi arus terhadap pita histeresis ini. Jika kondisi arus menyentuh atau melewati batas bawah ($I \leq (REF + \Delta)$), sistem memberikan respons YA untuk mengaktifkan mode Magnetisasi agar arus naik kembali ke titik referensi. Sebaliknya, jika arus meningkat hingga mencapai batas atas ($I \geq (REF + \Delta)$), sistem memberikan respons YA untuk beralih ke mode Demagnetisasi guna menurunkan arus. Selama arus berada di antara kedua batas tersebut, kondisi dianggap tidak terpenuhi atau TIDAK, sehingga sistem mempertahankan status operasinya tanpa perubahan. Mekanisme ini memastikan arus fasa tetap terjaga di sekitar nilai target, yang secara efektif meminimalkan riak arus (*current ripple*) dan riak torsi guna menghasilkan putaran motor yang lebih halus.

III. RESULT AND DISCUSSION

Tabel 3. Penentuan Parameter Simulasi pada Sistem Penggerak Motor BLDC

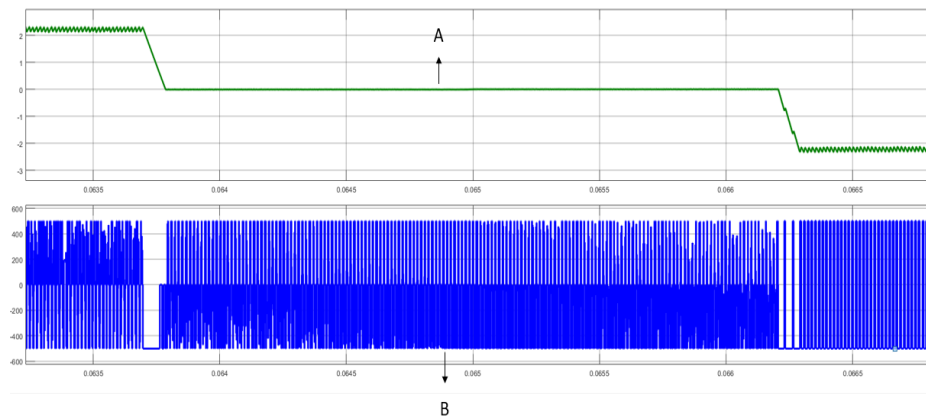
Parameter Simbol Nilai Satuan	Parameter Simbol Nilai Satuan	Parameter Simbol Nilai Satuan	Parameter Simbol Nilai Satuan
Tegangan Link DC	V_{DC}	500	V
Kecepatan Referensi	ω_{ref}	1000	RPM
Resistansi Stator	R_s	2,875	Ω
Induktansi Stator	L_s	8.5	mH
Inersia Rotor	J	8	kg·m ²
Jumlah Pasangan Kutub	P	4	-
Pita Histeresis	H B	0.1	A
Frekuensi Pengambilan Sampel	F_s	1	MHz

Untuk memvalidasi efektivitas algoritma yang diusulkan, simulasi dilakukan dengan mengacu pada parameter teknis motor BLDC yang terperinci dalam Tabel 3. Pengujian ini menggunakan tegangan *DC-link* sebesar 500 V dengan target kecepatan referensi pada 1000 RPM. Karakteristik internal motor, yang memiliki resistansi stator sebesar 2,875 Ω dan induktansi stator 8,5 mH, menunjukkan sifat beban yang dominan induktif sehingga memerlukan respon kontrol arus yang sangat cepat saat terjadi komutasi. Oleh karena itu, sistem dikonfigurasi dengan frekuensi pengambilan sampel sebesar 1 MHz dan pita histeresis yang sangat sempit, yaitu 0,1 A. Spesifikasi frekuensi tinggi dan pita yang ketat ini merupakan prasyarat teknis utama agar fitur demagnetisasi aktif dapat bekerja secara presisi dalam 'memaksa' peluruhan arus fasa non-aktif. Selain itu, dengan dukungan inersia rotor sebesar 8 kg·m² dan konfigurasi 4 pasang kutub, parameter ini secara kolektif memastikan bahwa hasil simulasi mampu merepresentasikan dinamika torsi yang realistis untuk aplikasi industri presisi tinggi.



Gambar 9 Arus motor BLDC dengan penerapan kontrol arus histeresis, yang menunjukkan perbandingan arus fasa sebelum kontrol (A) dan setelah kontrol histeresis (B).

Berdasarkan hasil simulasi, Gambar 9 menunjukkan perbandingan karakteristik arus fasa motor BLDC antara kondisi sebelum dan sesudah diterapkannya sistem kendali. Pada Grafik A, arus fasa tanpa kendali memperlihatkan bentuk gelombang yang tidak beraturan dengan lonjakan riak yang sangat lebar dan tidak terkendali. Sebaliknya, pada Grafik B, penerapan kontrol arus Histeresis berhasil memperbaiki bentuk gelombang menjadi trapesium yang lebih stabil. Dengan menggunakan parameter pita histeresis sebesar 0,1 A dan frekuensi pengambilan sampel 1 MHz sebagaimana tercantum pada Tabel 3, riak arus pada Grafik B dapat dijaga tetap rapat dan konsisten di sekitar nilai referensinya. Hal ini membuktikan bahwa algoritma yang diusulkan mampu menekan fluktuasi arus fasa secara signifikan dibandingkan dengan sistem tanpa kendali.



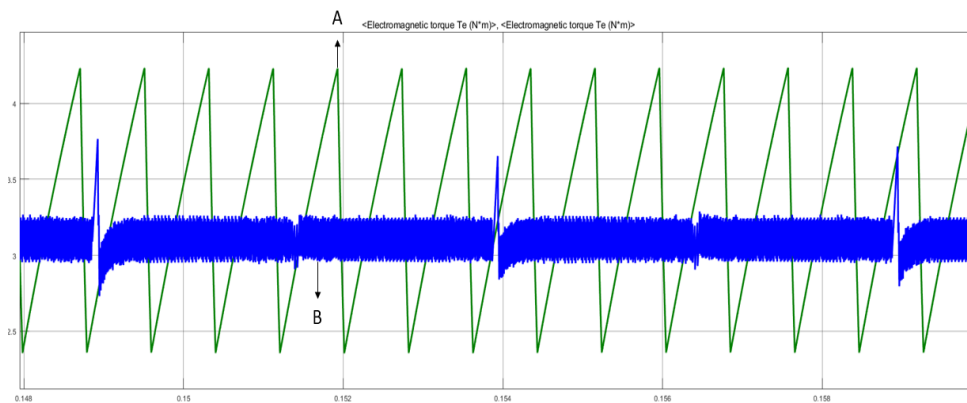
Gambar 10. Grafik A (merah) Menunjukkan Karakteristik Arus Stator (I_a) Selama Proses Magnetisasi Dan Demagnetisasi, Sedangkan Grafik B (biru) Mewakili Sinyal PWM (V_{ab}) Sebagai Sinyal Kontrol Switching

Gambar 10 memberikan visualisasi teknis mengenai bagaimana energi pada kumparan stator dikelola selama siklus komutasi berlangsung. Pada Grafik A, terlihat bahwa saat sistem berpindah dari fase aktif ke non-aktif, arus stator mampu menanggapi perintah kendali dengan sangat cepat, di mana arus langsung turun drastis hingga benar-benar habis atau nol. Kecepatan transisi yang sangat responsif ini merupakan indikator utama keberhasilan mode demagnetisasi aktif dalam mengatasi inersia elektromagnetik yang tersimpan pada induktansi stator sebesar 8,5 mH. Pergerakan arus tersebut dikendalikan sepenuhnya oleh strategi kendali pada Grafik B yang bekerja berdasarkan logika *switching* inverter.

Grafik A menampilkan respon arus aktual yang dihasilkan dari proses tersebut. Ketika sistem mendeteksi kebutuhan untuk membangun arus sesuai dengan kondisi pada Persamaan (13). Grafik B secara spesifik menunjukkan proses magnetisasi dan demagnetizing melalui pola sinyal PWM yang dikirimkan ke inverter, inverter memberikan tegangan penuh sebesar +500 V untuk mendorong arus fasa mencapai nilai referensi dengan cepat. Aktivitas magnetisasi ini ditunjukkan oleh Grafik B melalui pembentukan pulsa tegangan positif yang memaksa kenaikan arus pada stator, sebagaimana terlihat pada lonjakan arus di Grafik A. Sebaliknya, tepat saat transisi menuju fase non-aktif dimulai, sistem tidak membiarkan arus meluruh secara alami, melainkan langsung menerapkan tegangan balik sebesar -500 V sesuai dengan logika pada

Persamaan (12). Proses demagnetisasi ini terlihat pada Grafik B sebagai kerapatan sinyal PWM negatif yang bertujuan untuk mengekstraksi sisa energi magnetik dari kumparan secara paksa, sehingga respon arus pada Grafik A turun dengan sangat tajam menuju nol.

Inverter memberikan tegangan penuh sebesar +500 V untuk mendorong arus fasa mencapai nilai referensi dengan cepat. Aktivitas magnetisasi ini ditunjukkan oleh Grafik B melalui pembentukan pulsa tegangan positif yang memaksa kenaikan arus pada stator sebagaimana terlihat pada lonjakan arus di Grafik A. Sebaliknya, tepat saat transisi menuju fase non-aktif dimulai, sistem tidak membiarkan arus meluruh secara alami, melainkan langsung menerapkan tegangan balik sebesar -500 V sesuai dengan logika pada Persamaan (12). Proses demagnetisasi ini terlihat pada Grafik B sebagai kerapatan sinyal PWM negatif yang bertujuan untuk mengekstraksi sisa energi magnetik dari kumparan secara paksa, sehingga respon arus pada Grafik A turun dengan sangat tajam menuju nol. Melalui dukungan frekuensi pengambilan sampel sebesar 1 MHz, perpindahan antara tegangan +500 dan -500 pada sinyal PWM terjadi dengan resolusi waktu yang sangat tinggi. Ketajaman transisi pada Grafik B inilah yang menjamin kendali arus tetap presisi di sekitar nilai referensi, sehingga efektif dalam membuat kecil riak arus dan riak torsi pada motor BLDC.



Gambar 11. (A) Torsi Motor BLDC Sebelum Dikendalikan Oleh Histeresis (B) Torsi Motor BLDC Setelah Dikendalikan Oleh Histeresis

Berdasarkan hasil simulasi, efektivitas algoritma yang diusulkan dapat dibuktikan melalui perbandingan angka riak (*ripple*) sebelum dan sesudah kontrol diterapkan. Pada aspek arus fasa sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9, riak arus tanpa kendali memiliki fluktuasi yang sangat besar mencapai lebih dari 1 A. Namun, setelah penerapan kontrol arus histeresis, riak arus berhasil ditekan dan dijaga secara konsisten di dalam pita toleransi sebesar 0,1 A sesuai dengan parameter masukan pada Tabel 3.

Penurunan riak arus tersebut berdampak langsung pada stabilitas torsi elektromagnetik yang divisualisasikan pada Gambar 11. Sebelum kendali diterapkan (Grafik A), riak torsi memiliki jarak puncak-ke-lembah yang sangat lebar, yaitu sekitar 2,2 Nm (berfluktuasi antara 2,3 Nm hingga 4,5 Nm). Setelah algoritma magnetisasi dan demagnetisasi aktif dijalankan (Grafik B), riak torsi berkurang drastis menjadi hanya sekitar 0,2 Nm hingga 0,4 Nm di sekitar nilai rata-rata 3 Nm. Secara kuantitatif, hasil ini menunjukkan bahwa sistem berhasil mereduksi riak torsi secara signifikan hingga lebih dari 80% dibandingkan dengan kondisi tanpa kontrol.

Pencapaian ini mengonfirmasi validitas Persamaan (9), di mana pengecilan selisih antara nilai maksimum (τ_{max}) dan minimum (τ_{min}) secara otomatis menurunkan persentase riak torsi total, sehingga menghasilkan performa mesin yang jauh lebih halus dan lebih kecil.

IV. CONCLUSION

Berdasarkan seluruh hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan kontrol arus histeresis dengan strategi magnetisasi dan demagnetisasi aktif berhasil menyelesaikan permasalahan riak torsi tinggi pada motor BLDC. Secara kuantitatif, sistem ini mampu menjaga riak arus tetap berada pada rentang 0,1 A, yang jauh lebih presisi dibandingkan kondisi tanpa kontrol di mana riak arusnya sangat besar melebihi 1 A.

Efektivitas kendali arus ini memberikan dampak langsung pada pengecilan riak torsi secara drastis, yang merupakan inti dari permasalahan penelitian ini. Riak torsi yang sebelumnya sangat besar mencapai 2,2 Nm berhasil diperkecil hingga hanya tersisa sekitar 0,2 Nm hingga 0,4 Nm, atau setara dengan reduksi riak sebesar lebih dari 80%. Keberhasilan ini didukung oleh penggunaan frekuensi pengambilan sampel yang tinggi serta pemberian tegangan balik penuh sebesar -500 V saat proses demagnetisasi. Strategi tersebut terbukti menjadi solusi efektif untuk menghilangkan fenomena dua fase yang menyala bersamaan secara instan, sehingga riak torsi yang muncul menjadi jauh lebih kecil, halus, dan mampu meminimalkan getaran mekanis pada motor.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan yang diberikan selama proses penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan satu tim yang telah membantu dalam pengambilan data melalui simulasi serta memberikan dukungan teknis dan diskusi yang konstruktif hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENCES

- [1] A. Padalkar, "Speed and position control of BLDC motor using internal hall sensors and hardware design," in *2015 International Conference on Information Processing (ICIP)*, Pune, India: IEEE, Dec. 2015, pp. 378–381. doi: 10.1109/INFOP.2015.7489411.
- [2] Gérard-André Capolino, "Modern diagnostics techniques for electrical machines, power electronics & drives," in *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, VALENCIA, Spain: IEEE, Aug. 2013, pp. 638–638. doi: 10.1109/DEMPED.2013.6645784.
- [3] L. G. Ronauly and S. Riyadi, "A BLDC Motor Control with Variable Excitation Angle to Obtain Optimum Torque," in *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia: IEEE, Jul. 2019, pp. 330–335. doi: 10.1109/ICEEI47359.2019.8988897.
- [4] H. K. Samitha Ransara and U. K. Madawala, "A Torque Ripple Compensation Technique for a Low-Cost Brushless DC Motor Drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6171–6182, Oct. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2423664.
- [5] N. N. Baharudin and S. M. Ayob, "Brushless DC Motor Speed Control Using Single Input Fuzzy PI Controller," *Int. J. Power Electron. Drive Syst. IJPEDS*, vol. 9, no. 4, p. 1952, Dec. 2018, doi: 10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1952-1966.
- [6] W. Y. Tianxing Li, "(6)li2017," IEEE, 2017. doi: 10.1109/TPEL.2016.2621061.
- [7] Ki-Yong Nam, Woo-Taik Lee, Choon-Man Lee, and Jung-Pyo Hong, "Reducing torque ripple of brushless DC motor by varying input voltage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 1307–1310, Apr. 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.871937.
- [8] Research Scholar, Sathyabama University, Chennai, G. R. P. L. G.R.P.Lakshmi, G. R. P. G.R.Puttalakshmi, and S. P. S.Paramasivam, "Speed Control of Brushless Dc Motor Using Fuzzy Controller," *Indian J. Appl. Res.*, vol. 3, no. 11, pp. 215–219, Oct. 2011, doi: 10.15373/2249555X/NOV2013/69.
- [9] H. Park and Y. Suh, "Fault-Tolerant Control Strategy for Reduced Torque Ripple of Independent Twelve-phase BLDC Motor Drive System under Open-Circuit Faults," in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA: IEEE, Oct. 2020, pp. 3370–3375. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9235949.
- [10] T. Li and J. Zhou, "High-Stability Position-Sensorless Control Method for Brushless DC Motors at Low Speed," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 4895–4903, May 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2863735.
- [11] V. Viswanathan and J. Seenithangom, "Commutation Torque Ripple Reduction in the BLDC Motor Using Modified SEPIC and Three-Level NPC Inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 1, pp. 535–546, Jan. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2671400.
- [12] Vinayaka K U and Priya S., "Analysis of BLDC motor performance using space vector pulse width modulation," in *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuication (ICCPEIC)*, Melmaruvathur, India: IEEE, Apr. 2016, pp. 549–552. doi: 10.1109/ICCPEIC.2016.7557292.
- [13] H.-K. Kim and J. Hur, "Dynamic Characteristic Analysis of Irreversible Demagnetization in SPM- and IPM- Type BLDC Motors".
- [14] A. Mohammad, A. Abedin, and Z. R. Khan, "Microcontroller Based Control System for Electric Vehicle".
- [15] K. M. Reshma and T. B. Isha, "A Back-EMF Based Sensorless Speed Control of Four Switch BLDC Motor Drive," in *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kannur: IEEE, Mar. 2018, pp. 283–287. doi: 10.1109/ICPCT.2018.8574300.
- [16] Dr. P. D. B. Manu C, "Design of Speed Control of BLDC Motor Using Back EMF Method." *International Journal of Engineering Research in Electrical and Electronic Engineering (IJEREE)*, Oct. 10, 2023. doi: ISSN%20(Online)%202395-2717.
- [17] U. K. Soni and R. K. Tripathi, "Novel back EMF zero difference point detection based sensorless technique for BLDC motor," in *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON: IEEE, Mar. 2017, pp. 330–335. doi: 10.1109/ICIT.2017.7913105.
- [18] U. K. Soni and R. K. Tripathi, "Novel estimated back EMF ZDP based sensorless controlled BLDCM using unknown input observer," in *2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, Surabaya: IEEE, Aug. 2017, pp. 205–210. doi: 10.1109/ISITIA.2017.8124081.
- [19] J. Chen, M. Li, and J. Liu, "A new SVPWM-based control scheme of permanent magnetic brushless DC machine with trapezoidal back EMF waveforms," in *2018 33rd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, Nanjing, China: IEEE, May 2018, pp. 1147–1151. doi: 10.1109/YAC.2018.8406544.

- [20] G. Xie, J. Wu, and J. Li, "Research on Sensorless Control Method of Permanent Magnet DC Linear Motor Based on Line Back EMF," in *2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Wuhan, China: IEEE, Jul. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/LDIA49489.2021.9505957.
- [21] M. P. Anjana, K. S. Shinoy, and J. Joy, "Comparative analysis of surface mounted and tangentially magnetized permanent magnet BLDC motor using finite element method," in *2014 Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetism, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)*, Kottayam, India, India: IEEE, Jul. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/AICERA.2014.6908285.
- [22] E. Mazaheri-Tehrani, J. Faiz, M. Zafarani, and B. Akin, "A Fast Phase Variable Sabc Model of Brushless PM Motors Under Demagnetization Faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 7, pp. 5070–5080, Jul. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2868320.
- [23] D.-K. Woo and B. H. Jeong, "Irreversible Demagnetization of Permanent Magnet in a Surface-Mounted Permanent Magnet Motor With Overhang Structure," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 52, no. 4, pp. 1–6, Apr. 2016, doi: 10.1109/TMAG.2015.2476782.