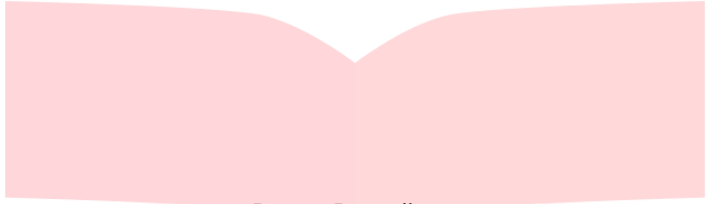


IMPLEMENTASI METODE FIELD ORIENTED CONTROL (FOC) UNTUK PENGATURAN KECEPATAN KONSTAN MOTOR BLDC PADA SEPEDA LISTRIK



Kukuh Prasetya Immanuel
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

kukuhsj@student.telkomuniversity.ac.i
d

Porman Pangaribuan
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

porman@telkomuniversity.ac.id

Ekki Kurniawan
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ekkekurniawan@telkomuniversity.ac.i
d

Abstrak — Perkembangan kendaraan listrik menuntut peningkatan performa sistem penggerak, khususnya motor BLDC (*Brushless DC Motor*) pada sepeda listrik. Penelitian ini membandingkan dua metode pengendalian kecepatan motor BLDC: *Field Oriented Control* (FOC) dan *Pulse Width Modulation* (PWM). Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink, sedangkan pengujian eksperimen diterapkan pada metode PWM menggunakan motor BLDC 36V 350W dan kontroler komersial. Parameter evaluasi meliputi *rise time*, eror *steady-state*, kestabilan torsi, bentuk arus, dan efisiensi sistem.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode FOC memiliki *rise time* < 0.3 detik, eror *steady-state* < 2%, bentuk arus sinusoidal, dan torsi lebih halus. Sebaliknya, metode PWM menunjukkan *rise time* ~0.4 detik, eror *steady-state* 2–3%, serta bentuk arus dan torsi yang mengandung *Ripple* tinggi. Pengujian eksperimen PWM menghasilkan nilai puncak RPM sebesar 950 RPM pada detik ke-4, dengan fluktuasi pada fase 2–6 detik yang menurun bertahap hingga 200 RPM pada detik ke-10. Data aktual mendukung hasil simulasi, menunjukkan karakteristik yang sesuai terhadap kontrol PWM.

Dengan demikian, metode FOC direkomendasikan untuk sepeda listrik yang membutuhkan respons cepat dan kenyamanan, sementara PWM tetap relevan untuk implementasi sederhana dan biaya rendah

Kata kunci: BLDC, FOC, PWM, sepeda listrik, simulasi, kontrol kecepatan

I. PENDAHULUAN

Kendaraan listrik menjadi solusi utama dalam mengatasi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dan permasalahan lingkungan. Sepeda listrik merupakan salah satu jenis kendaraan listrik yang banyak diminati karena efisiensinya, biaya operasional rendah, dan ramah lingkungan. Motor BLDC (*Brushless DC Motor*) sering digunakan sebagai aktuator penggerak utama dalam sepeda listrik karena memiliki keunggulan seperti torsi tinggi, efisiensi tinggi, serta perawatan yang minim.

Namun, kendala yang sering terjadi adalah ketidakmampuan motor BLDC dalam mempertahankan kecepatan tetap ketika terjadi perubahan beban, seperti saat melewati tanjakan. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem kontrol yang mampu menjaga kestabilan kecepatan dan efisiensi energi motor. Dua metode yang umum digunakan adalah *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Field Oriented Control* (FOC). PWM merupakan metode sederhana yang mengatur lebar pulsa tegangan, sedangkan FOC menggunakan pendekatan kontrol vektor yang lebih kompleks namun presisi.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan performa kedua metode tersebut berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen, untuk menentukan metode yang paling sesuai diterapkan pada sepeda listrik modern.

II. KAJIAN TEORI

Berikut adalah teori-teori yang mendukung penulisan jurnal penelitian yang dilakukan oleh penulis

A. Motor BLDC

Motor BLDC merupakan motor sinkron tanpa sikat yang menggunakan sensor posisi (seperti Hall-effect sensor) untuk

menentukan posisi rotor. Motor ini memiliki efisiensi tinggi dan torsi instan, namun membutuhkan sistem kontrol yang baik untuk berfungsi optimal.

B. Pulse Width Modulation (PWM)

PWM adalah teknik mengatur tegangan rata-rata ke motor dengan cara memodulasi durasi sinyal ON dan OFF. PWM umum digunakan karena sederhana dan mudah diimplementasikan pada kontroler mikroprosesor.

PWM mengatur tegangan efektif yang diterapkan ke motor dengan cara mengubah rasio antara waktu aktif (ON) dan tidak aktif (OFF) dalam satu periode sinyal. Parameter utama yang digunakan dalam PWM adalah duty cycle, yang dinyatakan dalam persen (%). Duty cycle menunjukkan proporsi waktu sinyal ON dibandingkan dengan total waktu satu siklus:

$$\text{Duty Cycle (\%)} = \left(\frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \right) \times 100$$

C. Field Oriented Control (FOC)

FOC adalah teknik kontrol motor berbasis vektor yang memisahkan komponen torsi dan fluks dalam referensi d-q menggunakan transformasi Clarke dan Park. Dengan teknik ini, motor dapat dikontrol secara lebih halus dan efisien.

FOC bekerja berdasarkan transformasi matematis Clarke dan Park yang mengubah arus stator menjadi koordinat rotor. Transformasi Clarke mengubah arus tiga fasa (I_a , I_b , I_c) menjadi koordinat dua dimensi (I_α , I_β) dalam kerangka stator:

$$I_\alpha = I_a$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} I_a + \frac{2}{\sqrt{3}} I_b$$

Transformasi ini digunakan untuk menyederhanakan representasi arus, sehingga lebih mudah dikontrol dalam ruang vektor.

Selanjutnya, transformasi Park digunakan untuk mengonversi koordinat stator (I_α , I_β) menjadi koordinat rotor (I_d , I_q) menggunakan sudut posisi rotor (θ):

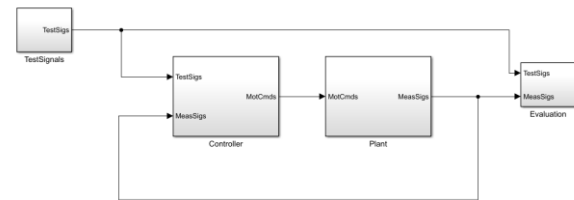
$$I_d = I_\alpha \cos(\theta) + I_\beta \sin(\theta)$$

$$I_q = -I_\alpha \sin(\theta) + I_\beta \cos(\theta)$$

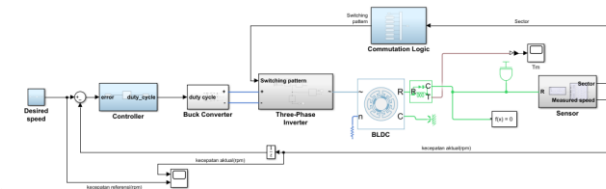
Dengan transformasi ini, I_d bertanggung jawab untuk mengontrol fluks magnetik, sedangkan I_q bertanggung jawab untuk menghasilkan torsi motor. Transformasi ini telah divalidasi dalam berbagai penelitian, termasuk oleh Infineon Technologies, yang menunjukkan bahwa teknik ini meningkatkan efisiensi kontrol motor

III. METODE

Penelitian dilakukan dengan dua pendekatan: simulasi dan eksperimen. Simulasi dilakukan di MATLAB/Simulink untuk kedua metode kontrol, dengan model motor BLDC 3 fasa, inverter, kontrol PI, dan sistem pembacaan sensor. Metode FOC menggunakan blok transformasi Clarke dan Park serta kontrol PI pada arus d dan q.



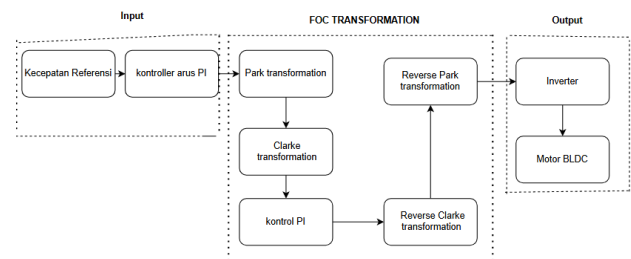
Gambar 3 1 Model Simulink FOC



Gambar 3 2 Model Simulink PWM

Eksperimen dilakukan untuk metode PWM menggunakan motor BLDC 36V 350W, kontroler komersial FOCAN, sensor Hall, serta mikrokontroler ESP32 untuk mengukur RPM aktual. Data kecepatan direkam dalam berbagai kondisi beban untuk melihat kestabilan sistem.

Parameter evaluasi meliputi rise time, error steady-state, bentuk arus, kestabilan kecepatan, dan efisiensi energi (dalam simulasi).



Gambar 3 3 Diagram Blok Sistem FOC

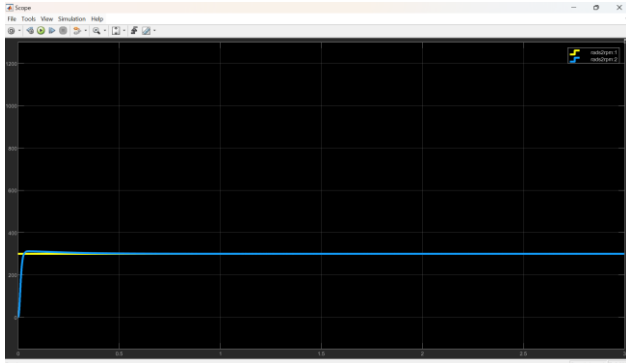
Diagram blok tersebut menggambarkan sistem pengendalian motor BLDC (Brushless DC Motor) menggunakan metode FOC, yang dirancang untuk mengoptimalkan kinerja motor dengan efisiensi tinggi. Sistem dimulai dengan input referensi kecepatan, yang berfungsi sebagai set point kecepatan motor yang diinginkan oleh pengguna. Nilai referensi ini dibandingkan dengan kecepatan aktual motor, yang diperoleh melalui Sensor Hall, oleh kontroler PI (Proportional-Integral). Kontroler PI menghitung error, yaitu selisih antara kecepatan referensi dan kecepatan aktual, dan menghasilkan sinyal kontrol untuk memperbaiki kinerja motor.

Sinyal kontrol dari kontroler PI kemudian diproses oleh algoritma FOC. Algoritma ini memisahkan arus yang mengalir ke motor menjadi dua komponen utama dalam koordinat d-q (direct-quadrature): arus magnetisasi (i_d), yang bertanggung jawab mengontrol medan magnet, dan arus torsi (i_q), yang menghasilkan torsi pada motor. Dengan pendekatan berbasis vektor ini, FOC memastikan bahwa pengendalian arus dilakukan secara optimal untuk mencapai efisiensi energi yang tinggi dan kinerja motor yang presisi.

Selanjutnya, keluaran dari algoritma FOC dikirim ke PWM generator, yang mengonversi sinyal tersebut menjadi sinyal PWM. Sinyal PWM ini digunakan untuk

mengontrol inverter 3 fasa, yang mengubahnya menjadi gelombang arus 3 fasa yang sesuai untuk menggerakkan motor BLDC. Baterai berfungsi sebagai sumber daya utama sistem, menyediakan energi listrik yang dibutuhkan oleh inverter dan motor.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

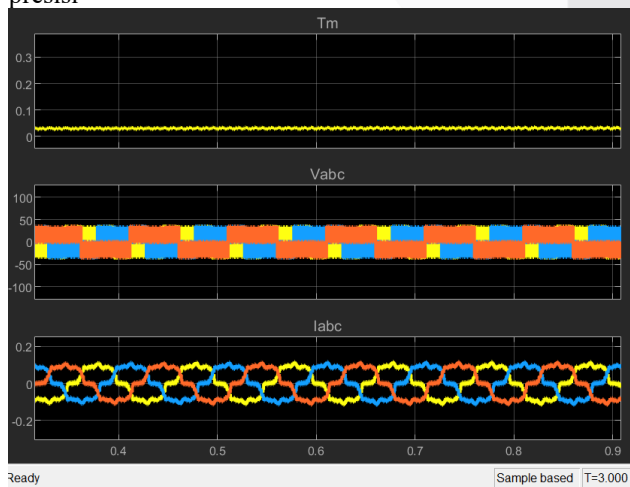


Gambar 4 1 Hasil Simulasi FOC (speed)\

Gambar di atas menunjukkan respon kecepatan motor terhadap kecepatan referensi:

- Respons Dinamis Cepat: Kecepatan aktual mencapai nilai referensi dalam waktu kurang dari 0.3 detik, menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu tunak (settling time) yang pendek.
- Overshoot Minimal: Terlihat sedikit lonjakan di awal respons, namun nilainya relatif kecil dan cepat teredam.
- Error Steady-State: Setelah mencapai keadaan tunak, error antara kecepatan referensi dan aktual sangat kecil, menunjukkan bahwa sistem efektif mengikuti referensi secara akurat.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa metode FOC memberikan respon kecepatan yang stabil dan presisi tinggi, sangat sesuai untuk aplikasi kendali kecepatan motor presisi



Gambar 4 2 Hasil Simulasi PWM (Arus, Tegangan, Torsi)

Gambar berikutnya memperlihatkan torsi (T_m), tegangan fasa (V_{abc}), dan arus fasa (I_{abc}) dari motor selama simulasi:

1. Torsi Motor (T_m)

- Stabil: Torsi menunjukkan nilai rata-rata yang konstan setelah transien awal.
- Ripple Rendah: Tidak terdapat fluktuasi besar, menandakan kontrol FOC mampu menjaga kestabilan torsi dengan baik.
- Efisiensi Tinggi: Torsi halus ini menunjukkan kinerja sistem yang efisien dan minim getaran mekanik.

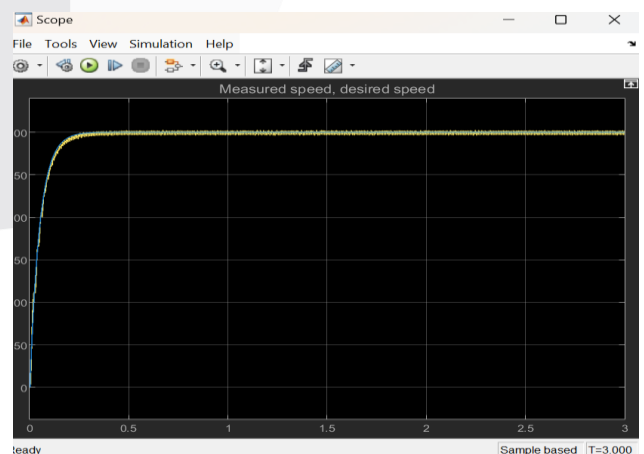
2. Tegangan Tiga Fasa (V_{abc})

- Bentuk tegangan menunjukkan pola PWM yang simetris dan berimbang.
- Tegangan antar fasa saling bergantian sesuai urutan komutasi, menunjukkan komutasi elektronik pada inverter bekerja dengan benar.

3. Arus Tiga Fasa (I_{abc})

- Arus pada masing-masing fasa membentuk gelombang yang mendekati sinusoidal, meskipun menggunakan motor BLDC.
- Ini membuktikan keunggulan FOC dalam menghasilkan kontrol arus vektor, yang mengurangi harmonisa dan meningkatkan efisiensi motor.

Simulasi metode FOC menunjukkan waktu naik $< 0,3$ detik, error steady-state $< 2\%$, serta arus sinusoidal dan torsi yang halus. Pada metode PWM, hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan waktu naik sekitar 0,4–0,5 detik dan error steady-state antara 3–5%, dengan ripple torsi dan fluktuasi arus cukup besar.



Gambar 4 3 Hasil Simulasi PWM(speed)

Gambar berikut menunjukkan kurva hasil simulasi metode kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan metode PWM dengan komutasi 6-langkah (trapezoidal control). Kurva kuning menunjukkan kecepatan referensi

(desired speed), sedangkan kurva biru menunjukkan kecepatan aktual motor (measured speed).

1. Respons Dinamis

- Sistem mencapai kecepatan referensi dalam waktu sekitar 0,35–0,4 detik, yang relatif lambat dibandingkan metode FOC.
- Terdapat waktu transien yang sedikit lebih panjang, mencerminkan keterbatasan dalam kecepatan respons sistem.

2. Error Steady-State

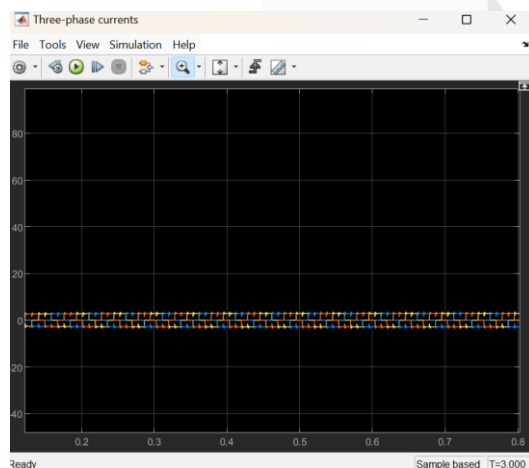
- Setelah mencapai kondisi tunak, kecepatan aktual tetap berada sangat dekat dengan kecepatan referensi.
- Error steady-state tergolong kecil, namun tidak sepresisi metode FOC. Error berkisar sekitar 2–3%, mendekati batas toleransi sistem.

3. Overshoot dan Osilasi

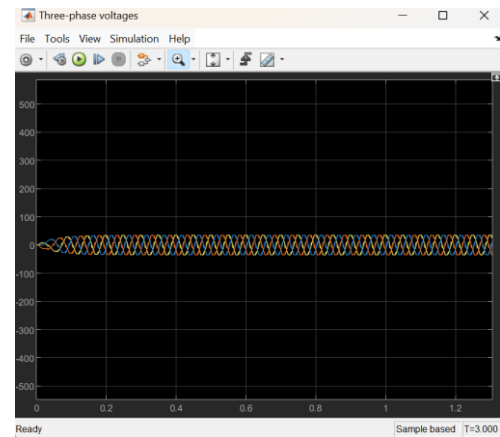
- Tidak terdapat overshoot signifikan, tetapi respons cenderung lambat merambat menuju referensi.
- Ripple kecil tampak di sekitar steady-state, menunjukkan adanya riak kecepatan akibat karakteristik switching dari metode trapezoidal.

4. Stabilitas Umum

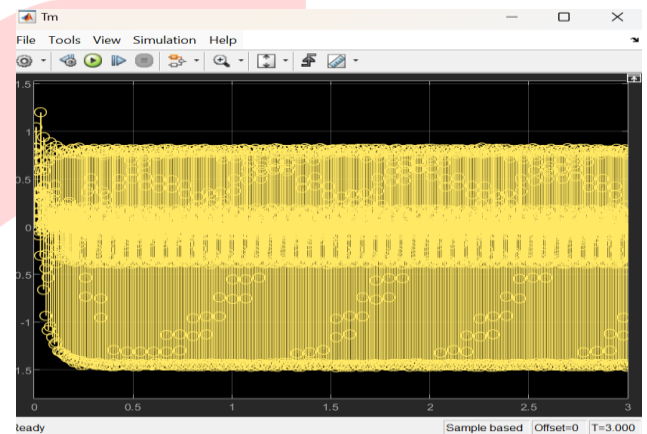
- Sistem cukup stabil, tetapi tidak sehalus dan seefisien pendekatan berbasis kontrol vektor seperti FOC.
- Riak torsi dan switching kasar pada inverter kemungkinan menghasilkan getaran mekanik lebih besar dibanding FOC.



Gambar 4 4 Hasil Simulasi Arus PWM



Gambar 4 5 Hasil Simulasi Tegangan PWM



Gambar 4 6 Hasil Simulasi Torsi PWM

Dari sisi implementasi, metode PWM lebih sederhana karena hanya membutuhkan pembacaan sensor posisi untuk komutasi dan satu kontrol PI untuk kecepatan. Sebaliknya, FOC membutuhkan kontrol arus presisi dan sensor tambahan seperti arus dan posisi rotor, serta komputasi real-time yang lebih berat.

Aspek	Metode FOC (Field Oriented Control)	Metode PWM (6-step trapezoidal control)
Jenis Kontrol	Kontrol vektor berbasis transformasi d-q	Komutasi diskrit berdasarkan sektor posisi rotor
Respons Dinamis	Sangat cepat (rise time < 0.3 s)	Cukup cepat (rise time ~0.35–0.4 s), namun lebih lambat
Presi Kecepatan	Tinggi, error steady-state < 2%	Menengah, error steady-state ~2–3%
Torsi Elektromagnetik	Halus, ripple torsi sangat rendah	Tidak stabil, ripple tinggi terlihat jelas
Arus Tiga Fasa	Sinusoidal, simetris, dan seimbang	Tidak sinusoidal, banyak spike, harmonisa tinggi
Tegangan Tiga Fasa	Halus (PWM sinusoidal), berimbang	Tegangan trapezoidal, diskrit, transisi tajam

Efisiensi Energi	Tinggi, karena arus dan torsi optimal	Lebih rendah karena switching kasar dan harmonisa
Kompleksitas Implementasi	Tinggi, memerlukan transformasi matematis dan pengukuran real-time	Rendah, lebih mudah diimplementasikan di mikrokontroler
Stabilitas Sistem	Sangat baik dalam beban bervariasi	Cenderung tidak stabil pada transien atau beban mendadak
Kenyamanan Pengguna	Tinggi, rendah, getaran halus, torsi	Kurang nyaman, getaran torsi terasa
Kebutuhan Sensor	Sensor posisi (Hall), sensor arus, dan pengukuran sudut rotor	Sensor Hall saja untuk komutasi sektoral
Cocok untuk	Aplikasi presisi: sepeda listrik, robotika, kendaraan listrik	Aplikasi sederhana: kipas, pompa, motor industri konvensional

Tabel 4 1Perbandingan Hasil 2 Metode

Analisis pasar menunjukkan bahwa metode PWM cocok untuk sepeda listrik murah dan beban tetap, sedangkan FOC sesuai untuk aplikasi urban, ekspor, dan kendaraan listrik yang mengutamakan kenyamanan serta efisiensi.

V. KESIMPULAN

Metode FOC unggul dari segi respons, kestabilan, dan efisiensi, serta cocok untuk sepeda listrik modern dengan kebutuhan performa tinggi. PWM tetap menjadi solusi praktis untuk produk dengan keterbatasan biaya. Penelitian ini menyarankan pengembangan lebih lanjut untuk implementasi FOC secara nyata di perangkat keras sepeda listrik.

REFERENSI

- [1] P. K. Sharma dan A. S. Sindekar, "Performance analysis and comparison of BLDC motor drive using PI and FOC," in *Proc. Int. Conf. on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication*, 2016, pp. 485–492.
- [2] Alameen, M.W.H., et al., "Analysis and Modeling of Brushless DC Motor PWM Control Technique Using PSIM Software," *International Journal of Engineering Research*, 2022.
- [3] Reddy, M.S.P., et al., "Speed Control of BLDC Motor using PWM and Arduino Uno," *E3S Web of Conferences*, vol. 550, 2024.
- [4] Qorvo, "BLDC Motor Control Design and Safety Guide," Qorvo Technical Paper, 2023.

[5] Portescap, "Understanding the Effect of PWM When Controlling a Brushless DC Motor," Technical Whitepaper, 2021.

.

