

JURNAL PENGEMBANGAN ELEKTRONIKA (PENGATURAN KECEPATAN MOTOR BLDC SENSORLESS MENGUNAKAN FOC)

Intan Sholikhah^{1*}, Syechu Dwitya Nugraha², Ony Asrarul Qudsi³, Era Purwanto⁴, Gigih Prabowo⁵, Indra Ferdiansyah⁶
^{1,2,3,4,5,6}Jurusan Teknik Elektro Industri, Departemen Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya
^{1,2,3,4,5,6}Jln. Raya ITS, Kota Surabaya, 60111, Indonesia
email: ¹intansholikhah@gmail.com, ²syechu@pens.ac.id, ³ony@pens.ac.id, ⁴era@pens.ac.id, ⁵gigih@pens.ac.id,
⁶indraferdi@pens.ac.id

Abstract — BLDC motors are popular in electronic appliance applications from household to industrial because of several advantages they have. However, it also has shortcomings in the installation of sensors which cause an increase in the cost of motor driving. From these problems, the use of the sensorless method (using EMF back voltage detection) is an alternative solution for determining the inverter commutation on a BLDC motor, also using the FOC method to reduce noise and torque ripple on the motor by utilizing PID control to speed up and stabilizes the rotation speed automatically. System performance has been tested using Matlab. The simulation results show that the FOC method using PID can improve dynamic system responses and reduce the overshoot value. The speed change in this system has succeeded in reaching the 3000 Rpm set point.

Abstrak – Motor BLDC populer di aplikasi alat elektronik dari rumah tangga ke industri karena beberapa kelebihan yang mereka miliki. Namun juga memiliki kekurangan dalam pemasangan sensor yang menyebabkan peningkatan biaya mengemudi motor. Dari masalah ini, penggunaan metode sensorless (menggunakan deteksi tegangan balik EMF) adalah solusi alternatif untuk menentukan pergantian inverter pada motor BLDC, juga menggunakan metode FOC untuk mengurangi kebisingan dan riak torsi pada motor dengan memanfaatkan kontrol PID untuk mempercepat dan menstabilkan kecepatan rotasi secara otomatis. Kinerja sistem telah diuji menggunakan Matlab. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode FOC menggunakan PID dapat meningkatkan respons sistem dinamis dan mengurangi nilai overshoot. Perubahan kecepatan dalam sistem ini telah berhasil mencapai set point 3000 Rpm.

Kata Kunci – BLDC Motor, Back EMF, Tanpa Sensor, FOC, Kontrol PID.

I. PENDAHULUAN

Motor BLDC (brushless direct current) adalah jenis motor magnet permanen yang memiliki gelombang trapesium [1], yang banyak diaplikasikan pada peralatan rumah tangga hingga industri karena efisiensinya yang tinggi [2] [3], strukturnya yang sederhana, torsi yang besar [1] dan kecepatannya dapat dikontrol secara akurat dari ribuan hingga puluhan ribu putaran / menit. Selain memiliki kelebihan, juga mengalami kesulitan dalam pengaturan kecepatan [1], yang membatasi penerapannya. Motor BLDC dalam penggunaan dan pemasangan sensor posisi (hall effect) [4].

akan meningkatkan biaya penggerak motor yang mempengaruhi keandalan dan masa pakai sistem kontrol [1] akan meningkatkan biaya penggerak motor yang mempengaruhi keandalan dan masa pakai sistem kontrol [1] [5]. Oleh karena itu, strategi kontrol sensorless menjadi arah pengembangan penting untuk sistem penggerak motor otomotif BLDC [1].

Pada tipe pertama menggunakan backEMF untuk mendeteksi posisi rotor, dan pada tipe kedua menggunakan metode estimasi berdasarkan parameter motor, tegangan dan arus [6] Pada tipe kedua karena rumitnya perhitungan, umumnya membutuhkan sinyal digital prosesor (DSP) [1] dan membutuhkan biaya yang relatif lebih tinggi daripada tipe pertama, oleh karena itu skema kontrol tanpa sensor dengan EMF back lebih umum digunakan [1].

Skema yang digunakan untuk mengontrol BLDC tanpa sensor yaitu menggunakan Conventional Back EMF dengan membaca floating state motor yang terdeteksi pada saat PWM off state. Pembacaan back EMF dibandingkan menggunakan op-Amp dengan menghubungkan titik Virtual Neutral yang dibandingkan dengan ground [6] [7].

Pada penelitian ini menggunakan skema kendali motor Sensorless BLDC menggunakan back EMF sebagai sensor posisi rotor [8]. Agar informasi posisi rotor benar dengan tidak adanya gangguan disekitar motor, gain lebih sederhana dalam pemasangan wiring dan menghemat daya motor [1].

Pembacaan algoritma pendeteksian sinyal balik EMF dan teknik pergantiannya dilakukan dengan menggunakan mikrokontroler ARM STM32F4 [6] [7].

Pada penggerak yang menggunakan motor BLDC dibutuhkan kecepatan motor yang konstan walaupun bebannya berubah. FOC adalah metode pengaturan medan pada motor AC dari sistem kopel diubah menjadi sistem dekopel. Dengan sistem ini arus gain dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, sehingga pengaturan fluks dan torsi dapat dilakukan secara otomatis terpisah. Namun pada tugas akhir ini hanya mengatur arus torsi karena motor BLDC memiliki magnet permanen yang tidak dapat diatur [9] [10].

II. METODE KONSTRUKSI

A. Sensorless Brushless Direct Current (BLDC)

Ada 2 algoritma untuk sensor, yaitu estimasi kecepatan / posisi untuk kecepatan tinggi dan non model untuk pendekatan kecepatan. Bemf biasanya digunakan untuk estimasi kecepatan atau posisi yang akurat di sirkuit tertutup tanpa sensor [11].

*) penulis korespondensi: Intan Sholikhah
Email: intansholikhah@gmail.com

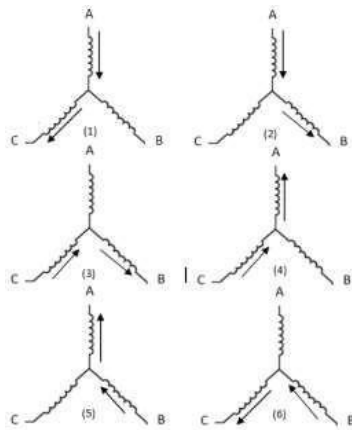
Pergantian enam langkah umumnya ditemukan pada motor BLDC berdaya rendah. Kerugian dari pergantian enam langkah adalah harmonik tinggi yang menghasilkan kerugian daya yang tinggi. Topologi kontrol rotor berorientasi fluks, mengasumsikan pwm inverter untuk pergantian enam langkah. Dengan demikian, bmf diperkirakan arus pengukuran daripada mengukur arus per fase yang dilewati. [12].

Besarnya EMF balik dipengaruhi oleh kecepatan sudut putaran motor (ω), medan magnet yang dihasilkan (B), dan jumlah belitan pada belitan stator (N) sehingga besarnya EMF balik dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\text{back EMF Voltage} = B N l r \omega \quad (1)$$

Dimana B adalah rapat medan magnet yang dihasilkan oleh rotor(tesla), N jumlah lilitan pada belitan stator per fasa, l adalah panjang batang rotor (m), sedangkan r adalah jari-jari dalam motor (m), ω dan adalah sudut putaran motor (rad) (dimana $\omega = 2 \pi f$).

Ketika motor BLDC dibuat, jumlah lilitan pada stator dan nilai medan magnet yang dihasilkan sudah konstan sehingga mempengaruhi sebagian besar EMF yang sangat besar terhadap kecepatan sudut yang dihasilkan motor. Pendeteksian menggunakan EMF back bisa juga disebut dengan sensorless detection karena tidak menggunakan hall sensor effect, pendeteksian ini dilakukan dengan cara mendeteksi tegangan yang timbul akibat induksi magnet pada rotor pada salah satu kumparan stator dalam keadaan mengambang . Kondisi terapung merupakan kondisi dimana suatu fasa tidak ada arus yang mengalir atau tidak aktif dan terjadi setiap 60 derajat.



Gambar 1. Floating Phase in Six Step

Proses metode enam langkah pada Gambar 1. menunjukkan hanya dua fase bolak-balik untuk memutar motor. Momen kedua fasa adalah arus, fasa lainnya tidak mengalir atau tidak aktif, fasa ini disebut fasa mengambang. Fase tidak aktif inilah yang nantinya ada sinyal EMF balik karena adanya magnet permanen pada rotor BLDC. [12]

Teknik pendeteksian EMF balik didasarkan pada kenyataan bahwa hanya dua fasa motor BLDC yang terhubung pada satu waktu, sehingga fasa ketiga dapat digunakan untuk pendeteksian tegangan balik EMF. Diasumsikan bahwa ketika fasa A dan B hidup dan fasa C mati. Tidak ada arus yang melalui fasa C ini. Hal ini dijelaskan oleh kondisi berikut [6] [7].

$$I_A = I_B; I_C = 0 \quad (2)$$

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad (3)$$

EMF balik yang terjadi pada fasa mengambang merupakan indikasi dari posisi rotor dan dapat digunakan untuk menentukan waktu perubahan komutasi.

Untuk membentuk sinyal digital sebagai hasil balik EMF, diperlukan sebuah komparator pada setiap fasa motor. Perbandingan pada setiap fasa motor ini memberikan sinyal digital sesuai dengan EMF balik pada setiap fasa motor. Kombinasi ketiga sinyal ini digunakan untuk menentukan waktu pergantian [6] [7].

TABEL I.
PARAMETER OF BLDC MOTOR [14]

Parameters	Value
Rated Power	1 KW
Rated Voltage	500V DC
Resistance of the stator (R)	21,2 Ω
Inductance of the stator (L)	0,052 H
Viscous coefficient (D)	1×10^{-4} kg-ms/rad
Moment of Inertia (I)	1×10^{-5} kgms ² /rad
Back EMF Constant (K _b)	0,1433 vs/rad
Load Torque (T _L)	11 Nm
No. of Pole Pairs	2
Speed of the rotor (N)	3000 rpm
Rotor Magnetic Flux (ϕ)	0,11 Weber

B. Sliding Mode Observer (SMO) Based on BEMF

Sliding Mode Observer digunakan untuk memperkirakan arus fasa, setelah arus diperkirakan, kecepatan rotor yang diukur dengan BEMF. BEMF digunakan untuk kecepatan sedang hingga tinggi. BLDC memiliki keunggulan torsi tinggi, inersia rendah, respons dinamis tinggi, tahan lama dan rentang kecepatan tinggi.

Kelemahan BEMF adalah riak torsi tinggi, 2 jenis operasi tanpa sensor yaitu pada kecepatan rendah, dan sedang hingga tinggi. Operasi rendah, frekuensi tinggi dan metode injeksi rendah. Sedangkan medium to high berbasis MRAS, Back EMF, SMO. SMO untuk memperkirakan arus BEMF, dan posisi. / Kecepatan motor BLDC.[2] Dengan asumsi bahwa laju perubahan kecepatan listrik lebih lambat dari laju perubahan arus stator, i. e., $u > e = 0$, persamaan back-EMF BLDC dapat ditulis sebagai [13] :

$$\dot{e}_\alpha = -\omega e \times e_\beta \quad (4)$$

$$\dot{e}_\beta = \omega e \times e_\alpha \quad (5)$$

C. MRE Structure

Persamaan MRE terdiri dari jumlah akar sisa. Kami menambahkan parameter epsilon yang merupakan konstanta positif kecil. Istilah epsilon mencegah gradien tak terbatas dalam proses backpropagation [17].

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{Y_i - \hat{Y} + \epsilon}, \text{ given } \epsilon > 0 \quad (6)$$

$$\text{Local Error rate} = \frac{Y_i - \hat{Y}}{\sum_{k=1}^{100} \sqrt{Y_i - \hat{Y} + \epsilon}} \quad (7)$$

Dari persamaan 7 didefinisikan sebagai Local Error Rate untuk mencari hubungan antara jumlah residual dan jarak. Kita dapat menemukan bahwa MRE memiliki kesalahan terbesar ketika kesalahan lebih rendah dari satu. Akibatnya, mengubah MSE ke MRE berarti memberikan lebih banyak tingkat kesalahan lokal yang mendekati nilai prediksi.

Pengaruh jarak dari nilai prediksi diubah oleh jenis kesalahan. MRE memiliki dampak outlier yang lebih rendah daripada MSE. Akibatnya, MRE dapat berkumpul di beberapa titik data yang dikelompokkan yang merupakan titik mode lokal [17].

III.KONSTRUKSI KONTROL

A. Field Oriented Control (FOC)

Pada FOC yang diatur, besarnya fluks akan berdampak langsung pada perubahan kecepatan pada motor BLDC. Pengukuran besaran fluks tidak diukur secara langsung, melainkan dapat diperkirakan dengan mengubah nilai kecepatan rotor motor yang dipantau oleh sensor yang dijelaskan dalam desain sistem. Kecepatan motor adalah umpan balik dan kemudian dibandingkan dengan referensi kecepatan oleh pembanding[15].

FOC menggunakan Clarke dan Park Transformation. Transformasi Clarke mengubah *Three-phase reference frame current* menjadi *Two-phase reference frame current*. Selanjutnya, transformasi Park menghasilkan *Two-phase rotating reference frame current*. Menerapkan sudut theta rotor ke dalam blok transformasi Park untuk menyelaraskan arus referensi. Blok sampling menyesuaikan sampel frekuensi. Persamaan dapat ditulis sebagai berikut[16] :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dengan :

$I_a; I_b; I_c = \text{Three-phase reference frame current [A]}$

$I_\alpha; I_\beta = \text{Two-phase reference frame current [A]}$

$I_d; I_q = \text{Two-phase rotating reference frame current [A]}$

Ekspresi matematika dari Transformasi Clarke ditunjukkan pada persamaan 9 :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dengan :

$I_\alpha; I_\beta = \text{Two-phase reference frame current [A]}$

$I_a; I_b = \text{Three-phase reference frame current [A]}$

Torsi yang dihasilkan motor sinkron sama dengan perkalian silang medan magnet stator dan rotor. Motor mencapai pembangkitan torsi maksimum ketika medan magnet stator dan rotor ortogonal. Selain itu, menjaga medan magnet tetap ortogonal akan mengurangi riak torsi dan meningkatkan respons dinamis[16].

Transformasi menyelaraskan kerangka acuan fluks stator - dengan kerangka acuan torsi rotor d - q dengan memperoleh sudut _ antara kerangka acuan. Transformasi memastikan bahwa arus fluks ortogonal terhadap arus torsi setiap saat. Pengaturan kerangka referensi dengan cara ini memungkinkan untuk mengontrol motor dengan menyesuaikan nilai arus torsi I_q dan menyetel I_d komponen langsung ke nol[16].

Representasi matematis dari transformasi Park ditunjukkan pada:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dengan :

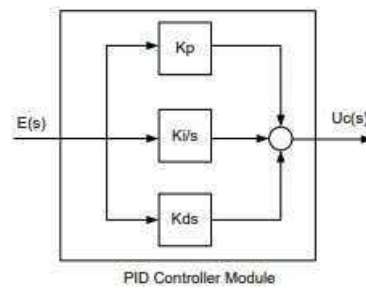
$I_d; I_q = \text{Two-phase rotating reference frame current [A]}$

$\theta = \text{Rotor flux position [rad]}$

$I_\alpha; I_\beta = \text{Two-phase reference frame current [A]}$

B. Proportional Integral Derivative (PID)

Dalam pengontrol PID, keuntungan integral proporsional ditambahkan ke satu jumlah dan membentuk sistem kontrol dan turunan untuk mempercepat respons awal sistem, namun tidak meminimalkan kesalahan pada kondisi tunaknya. Cara kerjanya adalah dengan membandingkan sinyal referensi dengan output dan memberikannya ke controller. Keluaran kontroler diberikan ke motor, agar kontroler PID membuat kesalahan sekecil mungkin sehingga respon motor lebih baik dari sebelumnya[14].



Gambar 2. Diagram Kontrol PID

$$T_s = 5\tau$$

$$\tau = T_s/5$$

$$K = Y_{ss} / X_{ss}$$

Transfer function[18] :

$$(C(s))/(U(s)) = K/(\tau_s + 1)$$

$$T_s' = K.T_s$$

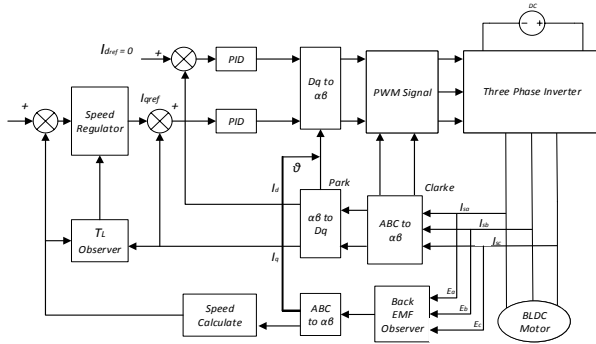
$$K_p = \tau / \tau' \times K$$

$$K_i = K_p / \tau_i$$

$$K_d = K_p \times \tau_d \quad (11)$$

IV.DESAIN SISTEM

Sistem yang dikembangkan dalam penulisan ini adalah Motor BLDC tanpa sensor menggunakan FOC. Sistem ini akan diuji dengan satu set titik kecepatan motor 1400 dan 2000 Rpm untuk melihat cara kerja motor di bawah kecepatan nominalnya. Kontroler PID juga digunakan untuk mengurangi kondisi sistem dinamis karena membatasi rentang kecepatan di bawah kecepatan normal seperti overshoot. Diagram blok rangkaian sistem ini mulai dari sumber listrik hingga beban ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 3. Blok Diagram

Gambar diatas merupakan blok diagram dari sistem yang akan dibuat. Sumber tegangan yang masuk ke dalam inverter 3 fasa berasal dari Catu Daya DC, yang akan diubah menjadi sumber tegangan AC sebagai tegangan kerja motor BLDC, dan tambahan tegangan suplai 5V untuk STM32F4.

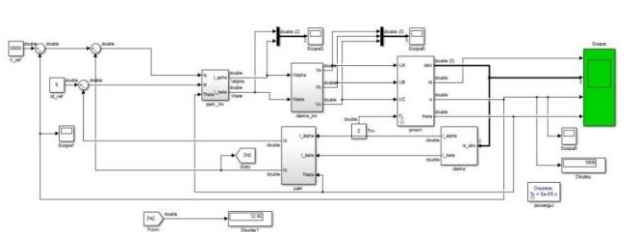
Mikrokontroler membangkitkan gelombang keluaran PWM dari inverter, menerima sumber potensial sebagai resistor variabel (throttle), dan memproses sinyal dari sensor dan menentukan proses pergantian inverter.

Untuk mengendalikan motor BLDC tanpa menggunakan hall effect, diperlukan rangkaian tegangan balik EMF yang terdiri dari rangkaian pembagi tegangan, filter, detektor zero crossing, dan rangkaian pemacu schmitt. Keluaran rangkaian pendeteksi tegangan balik EMF ditempatkan oleh mikrokontroler sebagai pergantian inverter tiga fasa. Sensor yang dibutuhkan oleh sistem ini adalah arus dan tegangan. Kedua sensor ini berfungsi untuk memonitor input dari inverter 3 fasa, selanjutnya sensor yang digunakan adalah ACS758ECB-200B-PFF-T untuk sensor arus, dan pembagi tegangan yang berfungsi sebagai sensor tegangan.

V. HASIL SIMULASI

Dalam mensimulasikan parameter kontrol kecepatan motor BLDC ini dibutuhkan motor yang akan diinput pada rangkaian open loop atau close loop, yang menggunakan parameter pendekatan real motor melalui data jurnal pada tabel I.

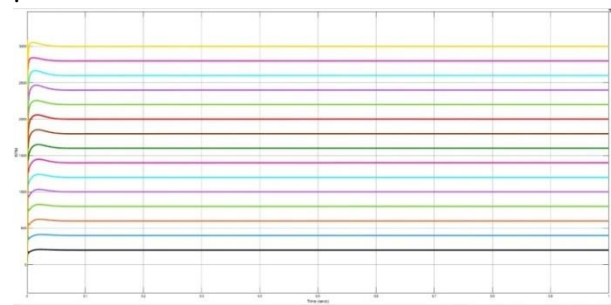
Simulasi ini bertujuan untuk menerapkan kontrol PID yang telah dirancang untuk mengatur kecepatan motor BLDC menggunakan metode sensorless FOC, selain kontrol PID, kontrol PI dapat digunakan untuk membandingkan respon sistem yang diinginkan sesuai. menggunakan aplikasi MATLAB



Gambar 4. Simulasi Open Loop Sensorless FOC BLDC Motor

Setelah itu kita menjalankan simulasi dan mengamati bagaimana respon kecepatan pada motor BLDC yang memanfaatkan sinyal tegangan balik EMF. Pada simulasi

integrasi melalui simulasi ini digunakan set point yaitu 3000 Rpm sesuai dengan Rpm yang diinginkan.

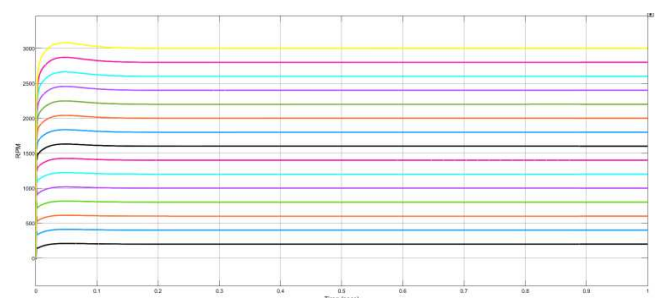


Gambar 5. Grafik Respon Sistem PID

TABEL II
RESPON SISTEM PID

Set Point (Rpm)	Over Shoot (%)	Rise Time (ms)	Settling Time (s)	Steady State (Rpm)	Iabc (A)
200	0.575	0.716	0.072	200	7.421
400	0.032	0.775	0.079	400	7.472
600	0.480	0.818	0.070	600	7.530
800	0.308	0.794	0.066	800	7.611
1000	0.417	0.743	0.071	1000	7.713
1200	0.323	0.692	0.069	1200	7.832
1400	0.611	0.626	0.083	1400	7.973
1600	0.453	0.575	0.071	1400	8.158
1800	0.026	0.509	0.069	1800	8.343
2000	0.069	0.477	0.065	2000	8.619
2200	0.055	0.433	0.064	2200	9.000
2400	0.263	0.411	0.059	2400	9.231
2600	0.288	0.378	0.069	2600	9.672
2800	0.429	0.351	0.063	2800	9.959
3000	0.192	0.337	0.058	3000	10.64

Dari data yang telah diambil, pengujian close loop dengan diberikan set point kecepatan 200 Rpm sampai 3000 Rpm, sistem menunjukkan respon yang baik dengan memberikan nilai. Overshoot tertinggi sebesar 0,784% dan terkecil sebesar 0,026%. Data pada tabel di atas menunjukkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tunak (Settling Time) paling lambat 0,083s dan tercepat 0,058.



Gambar 6. Grafik Respon Sistem PI

TABEL III
RESPON SISTEM PI

Set Point (Rpm)	Over Shoot (%)	Rise Time (ms)	Settling Time (s)	Steady State (Rpm)	Iabc (A)
200	5.000	13.45	0.209	200	8.16
400	2.604	0.654	0.229	400	8.319
600	1.008	0.714	0.234	600	8.57
800	0.981	0.696	0.241	800	8.603

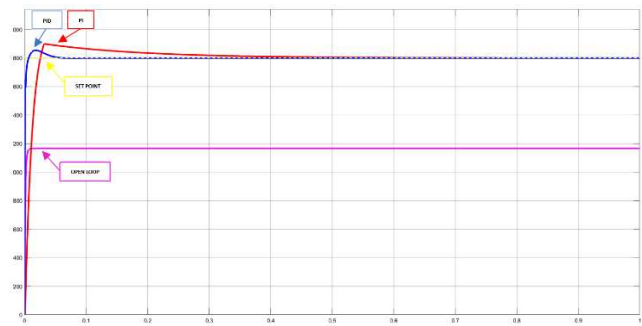
1000	2.577	0.626	0.226	1000	8.626
1200	0.618	0.643	0.235	1200	8.703
1400	1.121	0.574	0.235	1400	8.138
1600	0.801	0.558	0.249	1400	8.92
1800	0.353	0.504	0.249	1800	8.763
2000	1.531	0.446	0.249	2000	8.354
2200	1.036	0.421	0.249	2200	8.429
2400	0.324	0.404	0.241	2400	9.312
2600	1.446	0.368	0.223	2600	9.874
2800	0.644	0.351	0.226	2800	10.25
3000	0.009	0.337	0.191	3000	10.78

Berdasarkan tabel di atas, overshoot yang signifikan pada saat start 200 Rpm adalah 5%, namun nilai overshoot saat di atas 200 Rpm hingga 3000 Rpm memiliki kestabilan 1-2%. Nilai settling time membutuhkan waktu 0,1 detik lebih lambat dari kontrol PID.

Dari data PI dan PID yang telah dibandingkan didapatkan nilai setting time yang besar sehingga menghasilkan waktu steady state yang lebih lama dibandingkan dengan kontrol PID, karena kontrol PI tidak menggunakan kontrol diferensial. yang dapat mengantisipasi kesalahan generator, memberikan tindakan yang tepat. Bersifat korektif dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem serta dapat meningkatkan stabilitas sistem dan mengurangi respon maksimum (overshoot). Sehingga penggunaan kontrol PID merupakan strategi terbaik untuk meminimalkan overshoot dibandingkan dengan kontrol PI dan dapat mencapai output yang diinginkan tanpa error sesuai dengan set point Rpm.

TABEL IV
PERBANDINGAN RESPON SISTEM OVERSHOOT

	Set Point (Rpm)	Over Shoot (%)	Rise Time (ms)	Settling Time (s)	Iabc (A)	MRE
PID	1800	0.026	0.818	0.069	8.343	1.478
PI	1800	6.989	26.336	0.0190	7.621	1.733



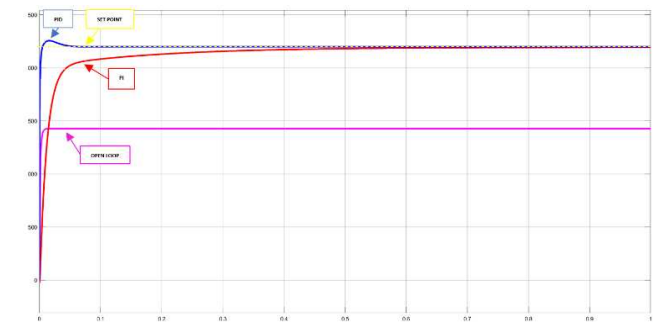
Gambar 7. Grafik Perbandingan Respon Sistem Kontrol saat 1800 Rpm

Berdasarkan grafik kedua kontrol pada putaran 1800 Rpm, grafik open loop menunjukkan nilai sebesar 1198 Rpm sehingga diperlukan kontrol untuk mencapai 1800 Rpm. Diperlukan kontrol, dengan menggunakan kontrol PID dan PI, grafik PID

dan PI telah menunjukkan bahwa kontrol telah berhasil mencapai set point yang diinginkan yaitu 1800 Rpm tetapi nilai overshoot pada kontrol pi lebih besar 1% dari pid yang menghasilkan kestabilan waktu yang dibutuhkan oleh kontrol PI lebih lambat dari 0.2 detik kontrol PID, sehingga kontrol terbaik untuk diterapkan pada sistem ini adalah PID.

TABEL V
PERBANDINGAN RESPON SISTEM RISE TIME

	Set Point (Rpm)	Over Shoot (%)	Rise Time (ms)	Settling Time (s)	Iabc (A)	MRE
PID	2200	0.055	0.585	0.064	9.00	1.133
PI	2200	0.489	59.814	0.240	7.497	2.397



Gambar 8. Grafik Perbandingan Respon Sistem Kontrol saat 2200 Rpm

Berdasarkan grafik kedua kontrol pada 2200 Rpm, grafik open loop menunjukkan nilai 1198 Rpm sehingga diperlukan kontrol untuk mencapai 2200 Rpm. Diperlukan kontrol, dengan menggunakan kontrol PID dan PI, grafik menunjukkan kontrol telah berhasil mencapai set point yang diinginkan yaitu 2200 Rpm, Kurangnya kontrol PI yang maksimal mengakibatkan nilai rise time yang sangat besar, dapat dipengaruhi oleh nilai yang kecil, kontroler proporsional hanya mampu mengoreksi error yang kecil, sehingga akan mengakibatkan respon sistem yang lambat (meningkatkan waktu naik), nilai mean root error (MRE) dari PID lebih kecil dari PI menunjukkan bahwa kontrol PID lebih akurat, kinerja overshoot, waktu naik, dan waktu penyelesaian lebih baik di PID.

VI.KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, diperoleh set point variatif yang diinginkan dengan mengubah kecepatan dinamis pada sistem. Sistem dapat mencapai kondisi stabil yang diperoleh dengan rise time sebesar 0,6 detik dan overshoot sebesar 0,2%. Pada kontrol yang dilakukan menunjukkan presentasi error bernilai nol, maka simulasi berjalan sesuai dengan yang diharapkan. dengan metode ini sistem akan bekerja dengan baik dengan menggunakan kontrol PID sebagai pengganti kontrol PI.

VII.HARAPAN LUARAN

Setelah kontrol dilakukan, penyesuaian dibuat sesuai untuk eksperimen dan kecepatan rotor juga sesuai, dan cukup presisi pada kecepatan tinggi. Kami telah memahami bahwa kami telah menerapkan semua kontrol ke model simulasi motor dan sekarang kami dapat melanjutkan untuk menerapkannya ke motor sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1].Chang-liang Xia, PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTOR DRIVES AND CONTROLS. Singapore : ohn Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2012
- [2]. Gaolin Wang , Goqiang Zhang, Diango Xu. Position Sensorless Control Techniques for Permanent Magnet Synchronous Magnet Synchronos Machine Drives. China : Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2020
- [3]. N. Syamsiana, M. Wang, Aripriharta and A. Firmansah, "A Study of Sliding Mode Observer Sensorless of Brushless Motor using Embedded Coder Matlab/Simulink," *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEEIE47180.2019.8981456.
- [4]. Biswajit Saha, Bhim Singh, "An Economical Approach for Solar PV-Battery Based E-Rickshaw with Regenerative Braking using Sensorless BLDC Motor Drive", *Power Electronics Drives and Energy Systems (PEDES) 2020 IEEE International Conference on*, pp. 1-6, 2020.
- [5]. A. Cabarbaye, R. L. Leal and M. B. Estrada, "Sensorless adaptive field oriented control of brushless motor," *2016 European Control Conference (ECC)*, 2016, pp. 2398-2403, doi: 10.1109/ECC.2016.7810649.
- [6] D. Arifiyan and S. Riyadi, "Hardware Implementation of Sensorless BLDC Motor Control To Expand Speed Range," *2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, 2019, pp. 476-481, doi: 10.1109/ISEMANTIC.2019.8884269.
- [7] Yushui Huang, Yugang Xin and Weicheng Zhang, "An improved BEMF detection method for sensorless BLDC motors," *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIT.2008.4608661
- [8] C. Huang, G. Chen, S. Yang and Y. Hsu, "Comparison of High Speed Permanent Magnet Machine Sensorless Drive using Trapezoidal BLDC and Sinusoidal FOC under Insufficient PWM Frequency," *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 321-325, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912495.
- [9] P. K. Sharma and A. S. Sindekar, "Performance analysis and comparison of BLDC motor drive using PI and FOC," *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, 2016, pp. 485-492, doi: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955350.
- [10] C. Huang, G. Chen, S. Yang and Y. Hsu, "Comparison of High Speed Permanent Magnet Machine Sensorless Drive using Trapezoidal BLDC and Sinusoidal FOC under Insufficient PWM Frequency," *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2019, pp. 321-325, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912495.
- [11] M. Mariano, K. Scicluna and J. Scerri, "Modelling of a sensorless rotor Flux oriented BLDC machine," *2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, 2017, pp. 194-199, doi: 10.1109/EDPE.2017.8123232.
- [12] Paper yang dimuat dalam jurnal IREE 2015 dan disusun oleh S.A. KH. Mozaffari Niapour, GH. Shokri Garjan, M. Shafiei, M.R. Feyzi, S. Danyali, M. Bahrami Koushahi dengan judul "Review of Permanenr- Magnet Brushless DC Motor Basic Drives Based on Analysis and Simulation Study".
- [13] Paper yang dimuat dalam jurnal ICMEAE 2019 dan disusun oleh O. Sandre Hernandez, P.Ordaz Oliver, C. Cuvas Castillo dengan judul "Sensorless Field Oriented Control of BLDC motor based on Sliding Mode Observer".
- [14] Paper yang dimuat dalam jurnal International Journal of Engineering Science and Technology 2010 dan disusun oleh A. Purna Chandra RAO, Y.P. Obulesu, CH. Sai Babu dengan judul "Robust International Model Control Strategy Based PID Controller for BLDCM".
- [15] Jurnal yang dimuat dalam Transactions on Electrical Engineering 2015 dan disusun oleh Dávid Rau, Jozef Rodina, Lukáš Palkovič dan Peter Hubinský dengan judul "Sensorless Field Oriented Control of BLDC Motors for MAVs".
- [16] Kjartan Kristiansen, Knut Erlend Steinsland, PSIM-Based Hardware of an Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronus Motor.Kristiansand :University of Agder, Grimstad, 2018
- [17] N. Sedova, R. Bazhenov, V. Sedov, "Intelligent Strategies for the Wind Chill Effect Assessment", *Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) 2019 International Multi-Conference on*, pp. 1-4, 2019.