

## Kendali Torsi Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) Menggunakan Metode *Direct Torque Control* (DTC)

Rizqa Agung Rakhmawan<sup>1</sup>

Jurusan Teknik Elektro FT UNTIDAR

rakhmawanagung21@gmail.com<sup>1</sup>

**Intisari—** Industri automasi menuntut sistem kendali yang optimal dan mempunyai efisiensi tinggi. Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan industri. Karakteristik motor BLDC yang memiliki torsi awal tinggi membutuhkan kendali torsi untuk meredam riak torsi yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan mengendalikan torsi ketika terjadi perubahan kecepatan dan mengendalikan kecepatan ketika terjadi perubahan torsi. Pada penelitian ini torsi motor BLDC dikendalikan dengan metode *Direct Torque Control* (DTC). Metode DTC dikombinasikan dengan *Space Vector Modulation* (SVM) dalam melakukan pensaklaran pada inverter. Kontrol kecepatan dan torsi yang diinginkan sebagai referensi dikendalikan dengan PID *Ziegler-Nichols*. Penelitian ini mengujicobakan perubahan respon torsi dan kecepatan. Respon torsi motor BLDC tetap ketika terjadi perubahan nilai kecepatan. Ketika terjadi perubahan torsi terjadi perubahan nilai kecepatan dan menaikkan *overshoot*. Perubahan kecepatan juga menyebabkan gelombang beresilasi sebelum dilakukan pengendalian parameter PID. Pada pengendalian kecepatan referensi 100 Rpm menunjukkan bahwa respon awal mengalami osilasi pada awal dengan nilai *overshoot* sebesar 40,41%. Respon nilai aktual yang dicapai 140% dari nilai referensi. Hasilnya setelah melakukan perhitungan parameter PID, respon sinyal menunjukkan hasil yang lebih optimal. Bentuk gelombang lebih stabil dan tidak mengalami *overshoot*. Nilai kecepatan sesuai dengan kecepatan referensi ketika nilai  $K_p=0,687$ ,  $K_i=0,022$  dan  $K_d=0,0055$ .

**Keywords—** Motor BLDC, *Direct Torque Control*, *Space Vector Modulation*, PID

### I. PENDAHULUAN

Pada beberapa dekade terakhir motor induksi digunakan untuk memenuhi kebutuhan industri karena kesederhanaan konstruksinya. Hal tersebut juga didukung oleh pengendalian motor menggunakan teknologi elektronika daya yang hasilnya lebih efektif dan efisien. Negatifnya, motor induksi memiliki efisiensi dan faktor daya yang rendah [1]. Motor DC maupun motor sinkron dapat menjadi solusi masalah tersebut. Namun motor DC dan motor sinkron memiliki kekurangan seperti adanya interferensi elektromagnetik, menimbulkan kebisingan dan keterbatasan pada pengendalian kecepatan [2]. Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) menjadi solusi masalah-masalah tersebut. Motor BLDC memiliki bentuk mekanis seperti motor AC tetapi memiliki karakteristik seperti motor DC.

Motor BLDC merupakan motor sinkron magnet permanen yang memiliki keluaran gelombang berbentuk trapezoidal. Kelebihan yang

dimiliki motor BLDC antara lain yaitu memiliki efisiensi tinggi, torsi awal tinggi, karakteristik kecepatan dan torsi linier, ukuran kompak, densitas daya tinggi dan pengaturan kecepatan lebih luas dibandingkan jenis motor lain [3]. Metode yang dapat digunakan dalam pengendalian motor BLDC yaitu *Direct Torque Motor* (DTC). Metode DTC adalah suatu metode pengendalian yang dapat mengendalikan torsi dan fluks melalui perhitungan matematis. Selain itu DTC juga mempunyai struktur yang sederhana dan respon yang dihasilkan juga optimal [4]. Selanjutnya nilai torsi tersebut dibandingkan dengan nilai fluks dan posisi sektor fluks menggunakan *Space Vector modulation* (SVM). DTC dikombinasikan dengan SVM untuk membuat perubahan frekuensi menjadi lebih stabil, harmonik berkurang, operasi kerja pensaklaran tinggi dan juga mengurangi riak torsi yang dikendalikan DTC tanpa SVM [5].

Pemilihan parameter kendali yang tepat diperlukan untuk membuat sistem berjalan dengan optimal. Penentuan parameter tuning yang terbukti optimal dalam teknik kendali yaitu PID. PID memiliki kelebihan rise time yang cepat, mengurangi *overshoot* dan steady state [6]. Faktor yang sangat penting dalam merancang kendali PID adalah penentuan parameter PID agar sistem kendali tertutup memenuhi kriteria yang diinginkan. Salah satu metode penentuan parameter yang dapat digunakan yaitu *Ziegler-Nichols* kurva reaksi.

Berdasarkan hasil kajian yang dilakukan, semakin meningkatnya permintaan penggunaan motor BLDC tentu semakin meningkat juga kebutuhan kendali yang optimal. Karakteristik motor BLDC yang memiliki torsi awal tinggi membutuhkan kendali torsi untuk meredam riak torsi yang dihasilkan ketika terjadi perubahan kecepatan. Pada penelitian ini torsi motor BLDC dikendalikan dengan metode DTC. Metode DTC dikombinasikan dengan SVM dalam melakukan pensaklaran pada inverter. Kontrol kecepatan dan torsi yang diinginkan sebagai referensi dikendalikan dengan PID *Ziegler-Nichols*.

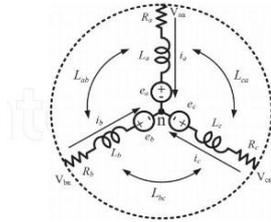
### II. LANDASAN TEORI

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

Motor BLDC merupakan salah satu jenis motor-sinkron. Medan magnet yang dihasilkan oleh rotor dan stator motor ini berada pada frekuensi yang sama. Motor BLDC terdiri dari belitan pada stator dan magnet permanen pada rotor. Motor ini tidak memiliki komutator mekanik untuk mengubah arah arus magnetisasinya. Motor ini umumnya dikendalikan menggunakan inverter sumber 3 fasa [7]. Motor BLDC dikontrol menggunakan pensaklaran inverter 3 fasa. Pensaklaran inverter membutuhkan posisi rotor yang tepat untuk menghidupkannya. Posisi rotor dapat diketahui dengan menggunakan

sensor posisi rotor yang diubah secara berurutan setiap 60 derajat [8]. Selain itu sensor posisi rotor juga bisa didapatkan dengan mengetahui arus dan tegangan stator yang diubah menjadin koordinat dq.

Rangkaian ekivalen motor BLDC brushless menggunakan sistem 3 fasa dengan setiap fase yang terdiri dari resistansi, induktansi, dan sumber tegangan secara seri, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian ekivalen motor BLDC

Berdasarkan pada rangkaian pembanding dari gambar 1, maka dapat diperoleh persamaan berikut :

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{d}{dt} i_a + M \frac{d}{dt} i_b + M \frac{d}{dt} i_c + e_a \dots \dots \dots (2.1)$$

$$V_b = i_b R_b + L_b \frac{d}{dt} i_b + M \frac{d}{dt} i_a + M \frac{d}{dt} i_c + e_b \dots \dots \dots (2.2)$$

$$V_c = i_c R_c + L_c \frac{d}{dt} i_c + M \frac{d}{dt} i_a + M \frac{d}{dt} i_b + e_c \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :

- V(a,b,c) = Tegangan sesaat (berupa fasa a, b, atau c) (Volt);
- R(a,b,c) = R adalah resistansi terminal (Ohm);
- i(a,b,c) = arus sesaat (fasa a,b,c) (Ampere);
- L(a,b,c) = Induktansi setiap fasa a,b,c (Henry);
- M = Induktansi bersama antar fasa kumparan (Henry);
- e(a,b,c) = nilai sesaat back emf (Volt).

**B. Transformasi Park-Clarke**

Sistem 3 fasa memiliki 3 sumber tegangan identik dan saling berhubungan. Antar fasanya memiliki perbedaan sudut 120 derajat atau 2π/3. Sistem 3 fasa yang banyak diimplementasikan yaitu sistem 3 fasa tanpa urutan 0 karena pemanfaatan operasional yang mudah. Perbedaan fasa dapat direpresentasikan

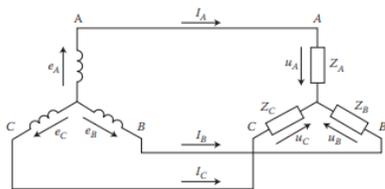
$$e_A = E_m \sin \omega t \dots \dots \dots (2.4)$$

$$e_B = E_m \left( \sin \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \dots \dots \dots (2.5)$$

$$e_C = E_m \left( \sin \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

- e<sub>ABC</sub> = Back emf setiap fasa (Volt);
- E<sub>m</sub> = Tegangan sumber (Volt);
- ωt = Sudut fasa (°).



Gambar 2.2 Hubungan 3 fasa

Respon sistem 3 fasa dapat dianalisis menjadi dua dimensi. Hal ini memudahkan dalam melakukan kendali sistem perangkat elektronika daya yang memanfaatkan sistem 3 fasa tetapi bisa dikontrol dalam sistem dua fasa.

**1) Transformasi Park**

Transformasi clarke atau juga dikenal dengan transformasi bidang alpha beta dikenalkan oleh Edith Clarke. Transformasi ini merupakan transformasi *space vector* dengan domain waktu (tegangan, arus, fluks dll) dari sistem koordinat tiga fasa (abc) menjadi dua bidang referensi dua fasa yang diam (αβ0). Transformasi matriks digunakan untuk koordinat langsung vector x dengan menghilangkan perbedaan fasa 2π/3 dari sumber tiga fasa, representasi matematis yang didapatkan yaitu :

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :

- X<sub>αβ</sub> = Parameter dalam domain αβ;
- X<sub>abc</sub> = Parameter dalam domain abc;
- K = Konstanta proporsional.

**2) Transformasi Clarke**

Tranformasi Park pertama kali ditemukan oleh R. H. Park. Transformasi ini juga sering disebut transformasi dq0. Transformasi dq0 merepresentasikan domain 2 fasa dan menggunakan sudut θ pada mesin listrik. Titik 0 menyatakan komponen urutan fasa-nol. Pada keadaan fasa seimbang, tidak ada komponen urutan fasa-nol. Pada beberapa kasus, analisis menggunakan koordinat kartesian pada pemrosesan komponen elektronika daya dan persamaan matematis yang sesuai dari sistem yang dianalisis merupakan pilihan yang tepat. Sebagai contoh untuk analisis rangkaian listrik, sebaiknya gunakan parameter frekuensi jaringan. Sedangkan pada mesin sinkron menggunakan persamaan Park, yang direpresentasikan dalam sistem koordinat yang berputar dengan kecepatan poros penggerak motor. Dalam hal ini, proses elektromagnetik pada mesin sinkron dijelaskan dengan persamaan diferensial dengan konstanta koefisien, bukan koefisien periodik sehingga menyederhanakan analisis. Rumus untuk torsi elektromagnetik motor yang berbentuk produk dari dua variable menjadi lebih sederhana. Sumbu rotasi sistem koordinat dq yang terukur adalah sumbu A dari sistem koordinat tiga fase atau ekuivalen, sumbu α dari Cartesian tak bergerak sistem koordinat αβ [9]. Konversi sistem koordinat αβ ke sistem dq dapat didasarkan pada persamaan 2.5.

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{pmatrix} \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan :

- X<sub>dq</sub> = Parameter dalam domain dq;
- θ = Sudut koordinat sistem.

**C. Direct Torque Control (DTC)**

*Direct Torque Motor* (DTC) merupakan penegembangan dari metode *Direct Self Motor* (DSC). Metode DSC pertama kali dikembangkan oleh Manfred Depenbrock di Amerika Serikat dan Jerman pada tahun 1984. Selanjutnya pada tahun 1986 Isao Takahashi dan Tishihiko Noguchi mengembangkan metode DTC. Perbedaan dari DTC dan DSC adalah frekuensi pensaklaran dari metode DTC lebih tinggi dibandingkan DSC. Metode DTC dapat diaplikasikan pada mesin listrik kecepatan rendah dan sedang, sedangkan DSC hanya bisa diaplikasikan pada kecepatan tinggi. Metode DTC sering digunakan pada kendali motor induksi karena lebih sederhana dan memiliki respon torsi dan fluks yang cepat [10]. Metode DTC dapat digunakan dalam pengendalian torsi motor BLDC. Torsi elektromagnetik motor dihitung berdasarkan *back emf* dan arus sesaat motor dalam domain dua fasa. Perhitungan nilai fluks stator dilakukan secara matematis dengan menurunkan persamaan hukum faraday [5].

$$\varphi\alpha\beta = \int (Vs - Rs is) dt \dots\dots\dots(2.9)$$

$$\varphi_s = \sqrt{(\varphi\alpha + \varphi\beta)} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\theta = \text{atan} \frac{\varphi\alpha}{\varphi\beta} \dots\dots\dots(2.11)$$

Torsi elektromagnetnya yang dihasilkan dari motor BLDC adalah

$$Te = \frac{3}{2} P (\varphi\beta i\alpha - \varphi\alpha i\beta) \dots\dots\dots(2.12)$$

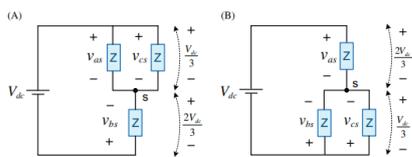
Keterangan :

- e = Back emf (Volt);
- Vs = Tegangan LN (Volt);
- Rs = Resistansi stator (Ohm);
- Ls = Induktansi stator (H);
- Φs = Fluks stator (wb);
- θ = Posisi sudut fluks (°);
- ωm = Kecepatan putar (Rpm);
- Te = Torsi elektromagnetik (Nm);
- i = arus (Ampere);
- p = Daya (Watt);
- P = Kutub;
- 3/2 = Konstanta abc ke αβ.

**D. Space Vector Modulation (SVM)**

SVM awalnya dikembangkan sebagai metode pendekatan vektor pada Pulse Width Modulation (PWM) untuk inverter tiga fasa. Metode SVM ini didasarkan adanya vektor ruang pada koordinat abc sumber tiga fasa. SVM adalah sebuah teknik tingkat lanjut untuk membangkitkan gelombang sinus yang menghasilkan bentuk tegangan sumber untuk motor induksi dengan total distorsi harmonik yang rendah. Tujuan utama dari teknik modulasi ini adalah untuk mendapatkan variasi keluaran yang mempunyai komponen fundamental maksimum dengan nilai harmonisa yang minimum. SVM adalah metode tingkat lanjut dari metode PWM dengan komputasi khusus untuk aplikasi penggerak elektrik dengan frekuensi yang berubah-ubah.

Inverter 3 fasa terdiri dari sumber 3 fasa dan 6 saklar. Setiap fasa memiliki saklar sendiri untuk mengaktifkannya dan saklar lainnya diaktifkan secara bergantian. Saklar dari setiap kutub akan dihidupkan dan dimatikan secara bergantian setiap interval 90 derajat. Namun, untuk mencapai tegangan tiga fasa, masing-masing tegangan fasa harus digeser satu sama lain sebesar 120 derajat. Tegangan dari tiap fasa bergantung pada keadaan semua saklarnya. Tegangan fasa dapat dikendalikan dengan melakukan pensaklaran pada inverter[11].



Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen saat pensaklaran

Pada saat keadaan pertama Q5,Q6 dan Q1 maka

$$Vas = \frac{1}{3} Vdc, Vbs = -\frac{2}{3} Vdc, Vcs = \frac{1}{3} Vdc \dots\dots\dots(2.13)$$

Pada saat keadaan pertama Q6,Q1 dan Q2 maka

$$Vas = \frac{2}{3} Vdc, Vbs = -\frac{1}{3} Vdc, Vcs = \frac{1}{3} Vdc \dots\dots\dots(2.14)$$

Keterangan :

- Vas, Vbs, Vcs = Tegangan LN (Volt);
- Vdc = Tegangan DC (Volt).

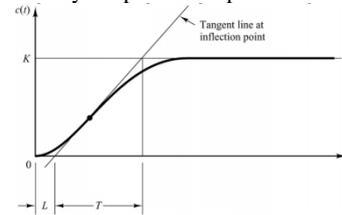
**E. Sistem kendali Proportional Integral Derivative (PID)**

Sistem kendali merupakan cara yang dipelajari dari kebiasaan manusia dalam pengamatan kualitas produk yang dihasilkan sehingga memiliki karakteristik sesuai dengan yang diharapkan. Sistem kendali yang digunakan dalam otomatisasi memiliki banyak variasi, seperti kendali *proportional*, kendali *derivative*, kendali *Integral* dan kendali PID (kombinasi dari kendali *proportional*, *integral* dan *derivative*).

Kendali PID merupakan teknik kendali yang banyak digunakan dalam proses automasi. Kendali PID didefinisikan melalui tiga parameter kendali, yaitu *proportional* (*Kp*), *integral* (*Ki*) dan *derivative* (*Kd*). Faktor yang sangat penting dalam merancang kendali PID adalah penentuan parameter PID agar sistem kendali tertutup memenuhi kriteria yang diinginkan, penentuan parameter ini disebut juga dengan istilah *tuning*. Salah satu metode yang dapat digunakan yaitu *Ziegler-Nichols*, yang memiliki dua cara yaitu osilasi dan kurva reaksi.

**1) Metode kurva reaksi**

Metode kurva reaksi didasarkan terhadap reaksi sistem kendali terbuka yang repon sistemnya dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.4 Kurva reaksi sistem kendali terbuka

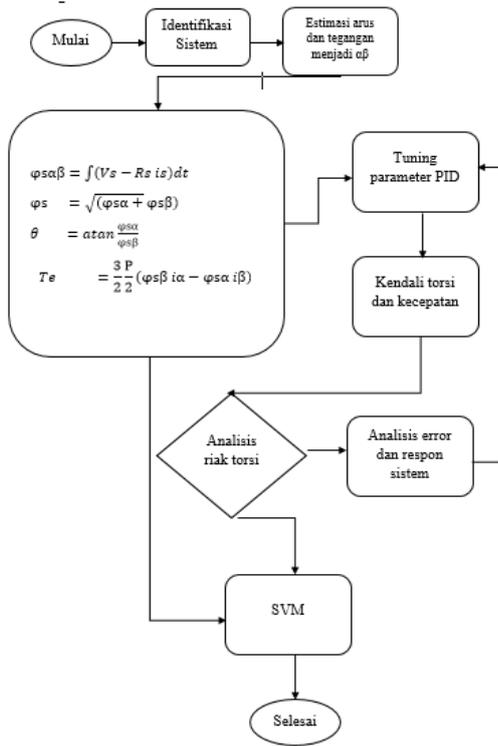
Kurva berbentuk S pada gambar 2.4 mempunyai dua konstanta, waktu mati atau *dead time* (*L*) dan waktu tunda atau *time delay* (*T*). *Dead time* (*L*) merupakan batas naiknya kurva, sedangkan waktu tunda menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai 66% dari keadaan mantapnya. Pada kurva dibuat suatu garis yang bersinggungan dengan garis kurva. Garis singgung itu akan memotong dengan sumbu absis dan garis maksimum. Untuk menentukan nilai *T* dan *L*, perlu mengetahui titik *rise time* (*L*) dan *settling time* (*ST*). *L* merupakan waktu gelombang berhenti sebelum mencapai *overshoot* sedangkan *ST* merupakan waktu gelombang mencapai titik stabil.

**2) Metode osilasi**

Pada metode Ziegler Nichols 2, penalaan dilakukan dalam loop tertutup dimana masukan referensi yang digunakan adalah fungsi tangga (step). Semula parameter parameter integrator disetel tak berhingga dan parameter diferensial disetel nol ( $T_i = \infty ; T_d = 0$ ). Pengendali proporsional. *Kp*, dinaikkan dari 0 hingga nilai kritis *Kp*, sehingga diperoleh keluaran yang terus-menerus berosilasi dengan amplitudo yang sama. Nilai kritis *Kp* ini disebut sebagai ultimate gain. Sistem dapat berosilasi dengan stabil pada saat  $K_p = K_u$ . Gambar 2.20 menggambarkan kurva reaksi untai tertutup ketika berosilasi [12].

**III. METODE PENELITIAN**

Pada bab ini membahas secara umum metode penelitian yaitu penelitian yang dilaksanakan melalui tahap-tahap yang bertujuan mencari dan membuat pemecahan masalah. Metodologi yang digunakan dalam penelitian Skripsi ini antara yaitu studi literatur, pemodelan sistem, perhitungan matematis, simulasi rangkaian pada Matlab Simulink, analisis hasil dan kesimpulan. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1.

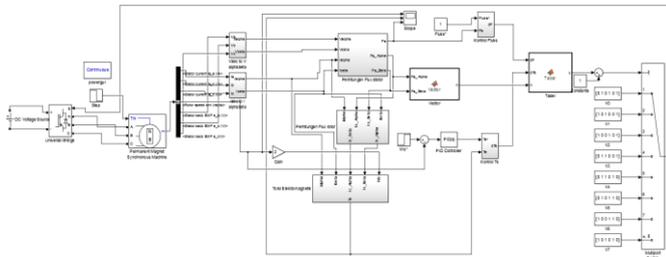


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

1) *Alat dan bahan*

Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa *software* matlab R2016a sebagai simulator. Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian adalah data motor BLDC *Electrocraft RPX32* yang memiliki spesifikasi arus 18 A, tegangan 10 V, torsi maksimal 1 Nm, resistansi 0,22 Ω, induktansi w.72 mH, kecepatan maksimal 2400 Rpm, jumlah kutub 4.

2) *Simulasi rangkaian*



a. *Pengubahan abc menjadi αβ*

Nilai *back emf* dan arus motor koordinat abc diubah menjadi koordinat αβ. Nilai arus motor dihasilkan dari parameter resistansi dan induktansi motor.

b. *Perhitungan fluks stator*

Fluks stator, fluks stator dihitung berdasarkan arus motor dan tegangan motor pada koordinat αβ.

c. *Perhitungan torsi elektromagnetik*

Torsi elektromagnetik, torsi elektromagnetik dihitung berdasarkan fluks stator, fluks stator pada koordinat αβ dan kecepatan rotor.

d. *Kendali PID*

Kendali kecepatan, pengendalian kecepatan pada penelitian ini menggunakan PID untuk menentukan kecepatan optimal. Penentuan parameter PID menggunakan *Ziegler-Nichols*.

e. *Penentuan sektor posisi fluks*

Penentuan sektor posisi fluks, penentuan sektor posisi fluks rotor dibagi menjadi 8 sektor. Setiap sektor mempunyai sudut sebesar 60°. Penentuan sektor posisi fluks diimplementasikan pada *Matlab editor*.

f. *Pensaklaran inveter*

Pensaklaran inveter, pensaklaran inverter dengan metode SVM digunakan pada simulasi ini. Nilai fluks, torsi dan posisi rotor dibandingkan untuk menghidupkan saklar inverter.

3) *Analisis hasil yang diperoleh*

Tahapan yang dilakukan pada tahap ini adalah menganalisis respon torsi terhadap kecepatan yang berubah-ubah dan torsi yang berubah-ubah. Apakah riak torsi yang dihasilkan lebih sedikit ketika menggunakan metode DTC-SVM. Setelah didapat data yang hasil simulasi, kemudian akan dibuat kesimpulan dari hasil penelitian.

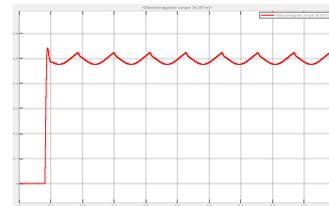
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Pengujian respon torsi*

Proses analisis respon torsi motor BLDC dilakukan berdasarkan perubahan nilai torsi dari titik 0, Uji coba pada penelitian ini mengambil 3 nilai torsi, yakni pada nilai torsi 0,5 Nm, 0,7 Nm dan 0,9 Nm. Respon torsi dianalisis dengan melihat riak torsi ketika terjadi perubahan torsi maupun kecepatan. Hasilnya, tidak terjadi perubahan torsi dan tidak muncul riak torsi ketika terjadi perubahan nilai kecepatan. Torsi tetap stabil sesuai dengan referensi yang diberikan.

1) *Torsi 0,5 Nm*

Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi torsi 0,5 Nm pada nilai step. Waktu diatur pada titik 0 s sampai dengan 1 s dan kenaikan nilai torsi pada waktu 0,08 s/.



Gambar 4.1 Gelombang respon torsi 0,5 Nm

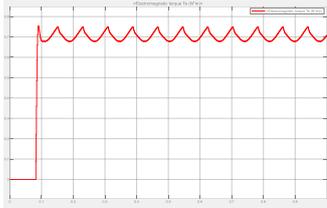
Hasilnya torsi elektromagnetik tetap stabil pada nilai 0,477 Nm pada posisi lembah dan 0,523 Nm pada posisi puncak. Nilai riak tetap ada karena kecenderungan torsi elektromagnetik yang dipengaruhi oleh fluks yang berubah-ubah. Rata-rata torsi yang dihasilkan yaitu :

$$T_e = \frac{0,477 + 0,543}{2}$$

$$T_e = 0,504 \text{ Nm}$$

2) *Torsi 0,7 Nm*

Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi torsi 0,7 Nm pada nilai step. Waktu diatur pada titik 0 s sampai dengan 1 s dan kenaikan nilai torsi pada waktu 0,08 s.



Gambar 4.2 Gelombang respon torsi 0,7 Nm

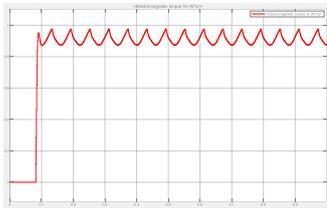
Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi torsi 0,7 Nm. Hasilnya torsi elektromagnetik tetap stabil pada nilai 0,677 Nm pada posisi lembah dan 0,742 Nm pada posisi puncak. Nilai riak tetap ada karena kecenderungan torsi elektromagnetik yang dipengaruhi oleh fluks yang berubah-ubah. Rata-rata torsi yang dihasilkan yaitu

$$T_e = \frac{0,677+0,758}{2}$$

$$T_e = 0,709 \text{ Nm}$$

3) Torsi 0,9 Nm

Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi torsi 0,9 Nm pada nilai step. Waktu diatur pada titik 0 s sampai dengan 1 s dan kenaikan nilai torsi pada waktu 0,08 s/.



Gambar 4.3 Gelombang respon torsi 0,9 Nm

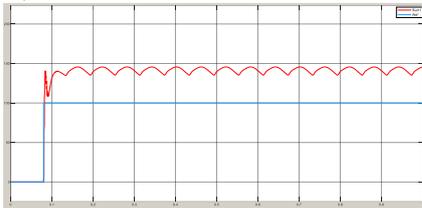
Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi torsi 0,9 Nm. Hasilnya torsi elektromagnetik tetap stabil pada nilai 0,874 Nm pada posisi lembah dan 0,977 Nm pada posisi puncak. Nilai riak tetap ada karena kecenderungan torsi elektromagnetik yang dipengaruhi oleh fluks yang berubah-ubah. Rata-rata torsi yang dihasilkan yaitu

$$T_e = \frac{0,874+0,977}{2}$$

$$T_e = 0,923 \text{ Nm}$$

B. Pengendalian PID

Kendali PID di tuning sesuai dengan hasil uji dari sistem yang telah dibuat, dengan menggunakan metode Ziegler-Nichlos pengujian sistem harus menggunakan sinyal *step* dan dibandingkan dengan hasil keluaran dari sistem. Uji coba dilakukan dengan mengambil waktu 0 s sampai 1 s. Perubahan nilai kecepatan terjadi ketika waktu 0,08 s.



Gambar 4.4 Gelombang respon kecepatan 100 Rpm tanpa PID

Bentuk gelombang pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa tegangan terminal mengalami osilasi pada awal dengan nilai *overshoot* sebesar 40,41%. Respon sinyal tidak dapat mencapai nilai referensi, nilai *steady* yang dicapai 140% dari nilai gain untuk kecepatan referensi 100 Rpm. Untuk menentukan nilai T dan L, perlu mengetahui titik *rise time* (RS) dan *settling time* (ST). RS merupakan waktu gelombang berhenti sebelum mencapai *overshoot* sedangkan ST merupakan waktu gelombang mencapai titik stabil.

$$T = R_s - 0$$

$$T = 0,082 \text{ s}$$

$$L = ST - T$$

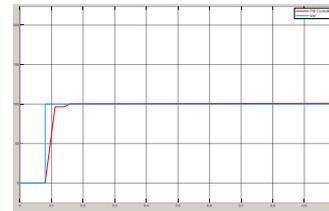
$$L = 0,192 - 0,082$$

$$L = 0,110 \text{ s}$$

Berdasarkan pengamatan pada gelombang nilai T = 0,082 s dan L = 0,110 s. Sehingga nilai tiap parameter untuk kecepatan 100 Rpm menurut Tabel 4.1 adalah

Tabel 4.1 Perhitungan parameter PID kecepatan 100 Rpm

Tipe kendali	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	0,572	~	0
PI	0,515	0,036	0
PID	0,687	0,0022	0,0055



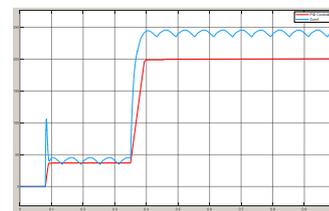
Gambar 4.5 Gelombang respon kecepatan 100 Rpm dengan PID Hasilnya setelah melakukan perhitungan parameter PID, bentuk gelombang lebih stabil dan tidak mengalami *overshoot*. Nilai kecepatan sesuai dengan kecepatan referensi ketika nilai P = 0,687, Ki = 0,022 dan Kd = 0,0055.

C. Pengujian respon kecepatan

Proses analisis respon kecepatan motor BLDC dilakukan ketika terjadi perubahan nilai kecepatan. Uji coba pada penelitian ini mengambil 3 nilai kecepatan, yakni pada nilai kecepatan 200 Rpm, 400 Rpm dan 600 Rpm. Respon kecepatan dianalisis ketika terjadi perubahan kecepatan dan torsi. Hasilnya, ketika terjadi perubahan torsi terjadi perubahan nilai kecepatan dan menaikkan *overshoot*. Perubahan kecepatan juga menyebabkan gelombang berosilasi sebelum dilakukan pengendalian parameter PID. Pemilihan parameter PID menyesuaikan kecepatan referensi yang diberikan. Setiap perubahan kecepatan, nilai parameter PID harus diubah.

1) kecepatan 200 Rpm

Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan 200 Rpm dan dilakukan dengan mengambil waktu 0 s sampai 1 s. Perubahan nilai torsi saat 0,08 s dan perubahan nilai kecepatan saat 0,35 s.



Gambar 4.6 Gelombang respon kecepatan 200 Rpm Hasilnya, ketika nilai torsi naik 0,9 Nm nilai kecepatan juga naik 35 Rpm dan sebelum menggunakan PID terjadi *overshoot* sebesar 9,3%. Setelah nilai referensi kecepatan naik 200 Rpm, gelombang kecepatan sebelum menggunakan PID mencapai 240 Rpm sedangkan setelah

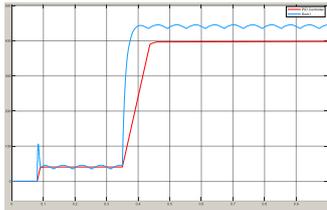
menggunakan PID nilai kecepatan stabil di titik 200 Rpm. Berdasarkan pengamatan pada gelombang nilai  $T = 0,241$  dan  $L = 0,350$ , sehingga nilai tiap parameter untuk kecepatan 200 Rpm adalah

Tabel 4.2 Parameter PID kecepatan 200 Rpm

P	Ki	Kd
0,811	0,007	0,00175

2) Kecepatan 400 Rpm

Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan 200 Rpm dan dilakukan dengan mengambil waktu 0 s sampai 1 s. Perubahan nilai torsi saat 0,08 s dan perubahan nilai kecepatan saat 0,35 s.



Gambar 4.7 Gelombang respon kecepatan 400 Rpm

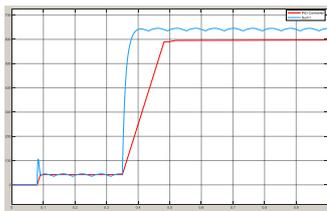
Hasilnya, ketika nilai torsi naik 0,9 Nm nilai kecepatan juga naik 38 Rpm dan sebelum menggunakan PID terjadi overshoot sebesar 7.6%. Setelah nilai referensi kecepatan naik 400 Rpm, gelombang kecepatan sebelum menggunakan PID mencapai 440 Rpm sedangkan setelah menggunakan PID nilai kecepatan stabil di titik 400 Rpm. Berdasarkan pengamatan pada gelombang nilai  $T = 0,261$  dan  $L = 0,348$ , sehingga nilai tiap parameter untuk kecepatan 400 Rpm adalah

Tabel 4.3 Parameter PID kecepatan 400 Rpm

P	Ki	Kd
0,888	0,006	0,00174

3) Kecepatan 600 Rpm

Uji coba dilakukan dengan memberikan referensi kecepatan 600 Rpm dan dilakukan dengan mengambil waktu 0 s sampai 1 s. Perubahan nilai torsi saat 0,08 s dan perubahan nilai kecepatan saat 0,35 s.



Gambar 4.8 Gelombang respon kecepatan 600 Rpm

Hasilnya, ketika nilai torsi naik 0,9 Nm nilai kecepatan juga naik 38 Rpm dan sebelum menggunakan PID terjadi overshoot sebesar 5.8%. Setelah nilai referensi kecepatan naik 600 Rpm, gelombang kecepatan sebelum menggunakan PID mencapai 640 Rpm sedangkan setelah menggunakan PID nilai kecepatan stabil di titik 600 Rpm. Berdasarkan pengamatan pada gelombang nilai  $T = 0,303$  dan  $L = 0,390$ , sehingga nilai tiap parameter untuk kecepatan 600 Rpm adalah

Tabel 4.4 Parameter PID kecepatan 600 Rpm

P	Ki	Kd
0,935	0,008	0,002

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data pada penelitian kendali torsi dan kecepatan motor BLDC, disimpulkan bahwa respon nilai torsi terhadap naiknya kecepatan tidak mengakibatkan perubahan pada torsi. Torsi tetap pada nilai referensi dan tidak menyebabkan riak. Respon nilai kecepatan terhadap naiknya torsi mengakibatkan perubahan kecepatan motor dan menaikkan overshoot. Perubahan kecepatan juga menyebabkan gelombang berosilasi sehingga perlu melakukan tuning parameter PID. Pada referensi kecepatan 100 Rpm menunjukkan respon awal mengalami osilasi dengan nilai overshoot sebesar 40,41%. Respon sinyal mencapai 140% dari nilai referensi. Setelah dilakukan pengendalian parameter PID, respon sinyal menunjukkan hasil yang lebih optimal. Bentuk gelombang mencapai keadaan tetap pada nilai referensi 100 Rpm dan tidak mengalami overshoot. Nilai kecepatan aktual sesuai dengan kecepatan referensi ketika nilai  $K_p = 0,0687$ ,  $K_i = 0,022$  dan  $K_d = 0,0055$ . Pengendalian parameter PID Ziegler-Nichols memiliki kekurangan yaitu Pemilihan parameter PID menyesuaikan kecepatan referensi yang diberikan. Setiap perubahan kecepatan, nilai parameter PID harus diubah sehingga perlu adanya perbaikan sistem kendali yang mampu menyesuaikan perubahan kecepatan.

REFERENSI

- [1] Rachakonda S.R.A, Chaudhari M.A. *Direct Torque Control of PM BLDC Motor Using Fuzzy Controllers*. 2017. International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS).
- [2] Jadhav S.V, Srikanth J, Chaudhari B.N. *Intelligent Controllers applied to SVM DTC based Induction Motor Drives: A Comparative Study*. International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems 2010,
- [3] Korkmaz F, Topaloglu I, Mamur H. *Modified Direct Torque Control for BLDC Motor Drives*. International Journal of Control Theory and Computer Modeling (IJCTCM) 2016 Vol. 6(3).
- [4] Prastiwi W, Iskandar E, Effendie R. *Perancangan Dan Implementasi Direct Torque Control 2 Level Inverter Pada Motor Induksi*. JURNAL TEKNIK POMITS 2012 Vol 1(1) 1-6.
- [5] Hendershot Jr, Miller TJR. *Design of Brushless Permanent-Magnet Machines*. 2010, Motor Design Book LLC : Florida.
- [6] Hameed H.S. *Brushless DC Motor Controller Design Using Matlab Applications*. International Scientific Conference of Engineering Sciences 2018.
- [7] Kellen DCBS. *Hybrid Sensorless Field Oriented and Direct Torque Control for Variable Speed Brushless DC Motors*. 2018. Thesis. Marquette University. Wisconsin.
- [8] Rambabu S. *Modeling And Control Of A Brushless Dc Motor*. 2007. Thesis. National Institute Technology of Rourkela : Rourkela.
- [9] Rozanov Y, Ryvkin S, Chaplygin E, Voronin P. *Power Electronics Basic : Operating Principles, Design, Formulas and Applications*. CRC Press : London.
- [10] Buja G, Casadei D, Serra G. *Direct Torque Control of Induction Motor Drives*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Vol 2(2-8).
- [11] Kim SH. *Electrial Motor Control : Dc, AC and BLDC Motor*. 2017. Elsevier : Amsterdam.
- [12] Ogata, Katsuhiko. *Teknik Kontrol Otomatis*. 1997. Jakarta: Erlangga.