

Estimasi Kecepatan Motor Brushless DC dengan Menggunakan Metode Sliding Mode Observer

Rizqy Abdurrahman⁽¹⁾, Novie Ayub Windarko⁽²⁾, Bambang Sumantri⁽³⁾

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), Kampus, Jl. Raya ITS, Keputih,
Kec. Sukolilo, Kota SBY, Jawa Timur Indonesia

Email: ¹rizqyabdurrahman1@gmail.com, ²ayub.sch@gmail.com,
³bambang@pens.ac.id

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima pada Juni 2021
Disetujui pada Agustus 2021
Dipublikasikan pada Agustus 2021
Hal. 696-709

Kata Kunci:

BLDC; Motor; SMO; PSIm

DOI:

<http://dx.doi.org/10.28926/briliant.v6i3.700>

Abstrak: Pada dasarnya motor *brushless DC* (BLDC) atau yang biasa juga disebut *permanent magnet synchronous motor* (PMSM) menggunakan *hall-sensor* untuk mengetahui posisi dan kecepatan dari motor tersebut. Data nilai arus (I) dan tegangan (V) pada pemodelan dasar dari motor BLDC sebagai masukan dari metode *sliding mode observer* (SMO). Metode *sensorless* yang didasarkan pada SMO diajukan untuk menggantikan perangkat *hall-sensor* untuk mengestimasi posisi rotor dan kecepatan motor BLDC. Pengujian akan dilakukan menggunakan aplikasi *power simulator* (PSim). Untuk mendapatkan error estimasi kecepatan pengujian dilakukan dengan membandingkan kecepatan aktual dengan kecepatan estimasi. Pengujian dilakukan dengan dua (2) nilai kecepatan yang berbeda yaitu sebesar 1000 r/min dan 1200 r/min dan dua (2) beban mekanik yang berbeda yaitu sebesar 0.1 Nm dan 0.5 Nm. Hasil dari simulasi yang telah dilakukan dengan kecepatan motor BLDC sebesar 1000 r/min dan beban mekanik sebesar 0.1 Nm, didapatkan nilai error estimasi kecepatan sebesar 6,7%, dengan kecepatan sebesar 1000 r/min dan

beban sebesar 0.5 Nm, didapatkan nilai error estimasi sebesar 7,2%, dengan kecepatan motor sebesar 1200 r/min dan beban sebesar 0.1 Nm, didapatkan nilai error estimasi sebesar 9,5%, dengan kecepatan motor sebesar 1200 r/min dan beban sebesar 0.5 Nm, didapatkan nilai error estimasi sebesar 9,8%. Dari pengujian tersebut membuktikan *sliding mode observer* dapat bekerja dengan baik karena nilai error estimasi kurang dari 10% dan merupakan metode yang *robust*

PENDAHULUAN

Motor *Brushless DC* (BLDC) pada kondisi lain juga biasa disebut motor sinkron atau *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) memiliki beberapa kelebihan diantaranya efisiensi yang tinggi, keandalan yang tinggi, kepresisian dan kecepatan yang juga tinggi. Oleh karena itu, pada saat ini banyak dari perusahaan bidang industri yang menggunakan motor BLDC dikarenakan manfaat kelebihannya yang cukup baik (Liang, Li, & Qu, 2017). Namun, untuk beberapa kondisi motor BLDC tidak cukup handal ketika digunakan secara jangka panjang, dan juga motor BLDC mempunyai harga yang lebih mahal dibandingkan motor elektrik lainnya (Topal, Iskender, & Genc, 2019). Motor BLDC pada umumnya terdiri dari konstruksi tiga fase, dengan tiga magnet kumparan listrik yang terletak di stator, dan dinyalakan sesuai dengan enam transistor MOSFET yang berbeda (Chang, Lin, & Yu,

2019). Input arus pada rangkaian digunakan untuk menggerakkan rotor, yaitu magnet permanen yang memutar poros motor, gelombang persegi enam langkah yang bergantian menghidupkan dan mematikan enam MOSFET (Geraee, Shafiei, Sahami, & Alavi, 2017). Selain itu motor BLDC membutuhkan *hall-sensor* yang ditempatkan diluar motor untuk mengetahui posisi dan kecepatan rotor pada motor BLDC. Dimana, pada penempatan yang ringkas tidak ada ruang yang cukup untuk menempatkan sensor tersebut maka dibutuhkan *sensorless control* untuk mengestimasi posisi dan kecepatan rotor (Zaky, Metwaly, Azazi, & Deraz, 2018).

Teknik *sensorless* sudah banyak digunakan pada kontrol sistim motor *brushless dc* (BLDC) untuk estimasi kecepatan dan posisi pada motor BLDC. Beberapa teknik *sensorless* yang biasa digunakan antara lain *extended kalman filter* (EKF), *model reference adaptive system* (MRAS), dan *sliding mode observer* (SMO) (Liu, Qiu, & Chen, 2019) (Rif'an, Yusivar, & Kusumoputro, 2019) (Liang et al., 2017). Pada *sliding mode observer* (SMO) kontrol struktur variabel memiliki permasalahan yaitu berupa *chattering* pada saat frekuensi tinggi yang bahkan dapat menyebabkan ketidakstabilan kontrol. Oleh karena itu, cara mengurangi *chattering* telah menjadi fokus penelitian strategi pengendalian SMO (Liu et al., 2019). Metode *extended Kalman filter* (EKF) memiliki beberapa kelemahan, antara lain perhitungan yang rumit dari matriks Jacobian, hanya akurasi urutan pertama, dll. Untuk menutupi kekurangan dari algoritma EKF, khususnya dalam penggunaan matriks Jacobian, telah dikembangkan algoritma EnKF (Rif'an et al., 2019).

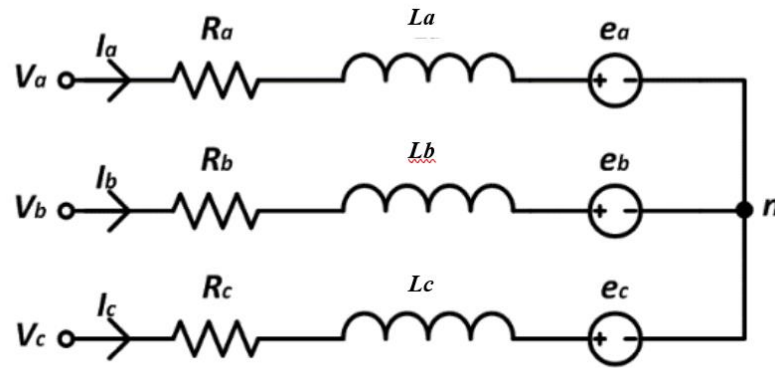
. Dalam kontrol *sensorless* berbasis MRAS dengan estimasi parameter online untuk PMSM akurasi estimasi posisi dan kecepatan sangat ditingkatkan dengan bantuan skema estimasi (Syamsiana & Wang, 2019). Pada *hybrid hysteresis observer* yang menggabungkan EKF dengan otomatisasi *hybrid* diusulkan untuk operasi tanpa sensor kecepatan lebar. Histeresis diterapkan untuk menghindari obrolan dengan kecepatan sangat rendah (Chen & Liu, 2020). Dalam , estimasi posisi yang terdiri dari EKF tambahan dan EKF lainnya, diusulkan untuk kontrol *sensorless* aktuator katup elektromagnetik. Pada saat yang sama, parameter mesin diestimasi untuk memperoleh akurasi estimasi posisi yang lebih tinggi. Dalam *high-gain observer* tahap dua diusulkan untuk mengatasi ketidakpastian parameter dan menghindari estimasi yang sulit dalam kontrol *sensorless* motor BLDC (Venkateswari, 2020).

Untuk meningkatkan kinerja keseluruhan penggerak pada motor BLDC, telah dikembangkan kinerja pemodelan mesin dan teknik kontrol. Model penggerak motor BLDC telah dibuat dengan menggunakan teknik kontrol yang efisien dalam simulasi. Penggerak motor BLDC dianalisis tergantung pada persamaan *state-space*, transformasi fourier, pemodelan d-q transform, variabel sampling, frekuensi waktu. Selain itu, teknik kontrol arus PWM digunakan untuk menganalisis drive motor BLDC dalam literatur (Poovizhi, Senthil Kumaran, Ragul, Irene Priyadarshini, & Logambal, 2017).

Dari beberapa referensi literature yang telah disebutkan, pada penelitian ini akan dilakukan pengujian metode *sliding mode observer* untuk mengestimasi kecepatan pada motor *brushless DC* (BLDC). Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi pada *software* PSIM untuk mengetahui seberapa *robust* metode *sliding mode observer* dengan masukan nilai arus (I) dan nilai tegangan (V). Selanjutnya, didapatkan nilai estimasi kecepatan sebagai keluaran dari *sliding mode observer* yang akan dibandingkan dengan nilai kecepatan aktual pada simulasi, untuk didapatkan seberapa besar nilai error estimasi kecepatan.

Pemodelan Motor BLDC

Pada dasarnya motor BLDC mempunyai lilitan tiga fasa pada statornya yang ditenagai oleh inverter tiga fasa. Gambar 1 adalah rangkaian equivalent motor BLDC. (Topal et al., 2019)



Gambar 1 rangkaian equivalent motor BLDC

Pada gambar 1 nilai dari resistansi dan induktansi dari kumparan dianggap sama pada setiap fasanya dan dinyatakan sebagai R_s dan L_s . Pada fasa “a” nilai tegangan dapat dinyatakan pada persamaan (1)

$$V_{an} = I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + e_{an} \quad (1)$$

Dimana, R_a adalah resistansi pada stator a, L_a adalah Induktansi fasa a, e_{an} ada back EMF dan I_a nilai arus pada fasa a. Berlaku juga persamaan untuk dua fasa yang lainnya dapat ditulis kembali pada persamaan (2) dan (3).

$$V_{bn} = I_b R_b + L_b \frac{dI_b}{dt} + e_{bn} \quad (2)$$

$$V_{cn} = I_c R_c + L_c \frac{dI_c}{dt} + e_{cn} \quad (3)$$

$$R_a = R_b = R_c = R_s \quad (4)$$

$$L_a = L_b = L_c = L_s \quad (5)$$

Dimana, nilai dari R_a, R_b, R_c memiliki nilai sama dengan R_s dan nilai dari L_a, L_b, L_c juga memiliki nilai sama dengan L_s . Persamaan (1), (2), dan (3) dapat juga dikombinasi menjadi persamaan matrix yang ditulis pada persamaan matrix (6).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Pada motor BLDC dibutuhkan arus yang mengalir pada setiap fasa dari inverter, posisi rotor dapat diketahui dengan menggunakan sensor maupun secara *sensorless*.

Maka dari itu, motor akan mulai berputar sesuai dengan *commutation step*. Pada saat yang sama hanya terdapat dua fasa yang terbentang dengan jarak sejauh 120° , sedangkan fasa yang ke-tiga berada di lebih dari itu. Pada setiap *commutation step*, satu dari dua kumparan mempunyai polaritas positif sedangkan yang lain berpolaritas negative (Bondre & Thosar, 2017). Disebabkan adanya interaksi antara kumparan stator dan medan magnet rotor, dan dengan demikian torsi dihasilkan. Secara teoritis, torsi puncak terjadi ketika medan magnet stator dan rotor berada pada saat 90° . Kumparan harus diberi sumber tenaga agar motor tetap berjalan sehubungan dengan rangkaian tertentu dengan mempertimbangkan informasi posisi dan ini disebut sebagai komutasi (Putra, Has, & Effendy, 2018).

Torsi elektromagnetic dijelaskan dengan persamaan :

$$T_e = \frac{[E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c]}{\omega} \quad (7)$$

Persamaan *back emf* ditulis dengan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} E_a &= f_a(\theta)\lambda\omega \\ E_b &= f_b(\theta)\lambda\omega \\ E_c &= f_c(\theta)\lambda\omega \end{aligned} \quad (8)$$

Dimana $f_a(\theta)$, $f_b(\theta)$, $f_c(\theta)$ adalah fungsi yang memiliki bentuk yang sama dengan *back emf*. Nilai-nilai dari (7) dapat diganti dalam (6) untuk mendapatkan nilai torsi. didapatkan persamaan :

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_e - T_l \quad (9)$$

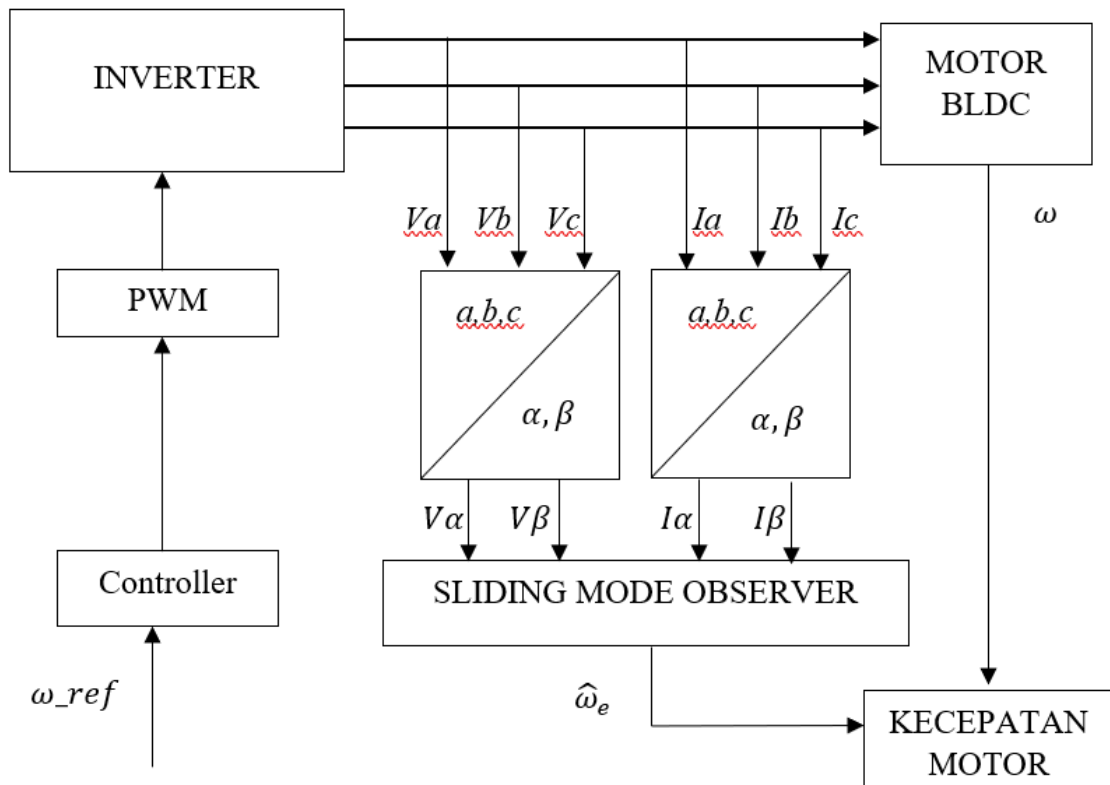
Dimana T_l adalah torsi beban, J adalah momen inersia, B adalah koefisien gesek. Kecepatan dan posisi rotor listrik dapat dicari dengan :

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{P}{2}\right) \times \omega \quad (10)$$

Dimana P adalah jumlah pole di motor.

Sliding mode observer

Bentuk dasar dari desain sistem estimasi kecepatan pada motor BLDC dengan metode *sliding mode observer* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 desain sistem estimasi kecepatan motor BLDC dengan metode SMO

Pada sistem, *sliding mode observer* digunakan sebagai pengganti sensor posisi secara mekanik pada motor. Pengukuran tegangan dan arus stator motor digunakan untuk mengestimasi posisi dan kecepatan rotor menggunakan *sliding mode observer* pada motor BLDC (Venkateswari, 2020). Estimasi posisi dan kecepatan dapat digunakan untuk posisi motor atau kontrol kecepatan dan transformasi koordinat antara kerangka acuan stasioner dan kerangka putar sinkron (Gan, Zhang, Zheng, & Chen, 2018). Sensor posisi pada sistem motor digantikan oleh algoritma perangkat lunak, yang dapat mengurangi biaya perangkat keras dan meningkatkan keandalan sistem motor.

Dalam membuat state space dibutuhkan state variabel ($\dot{x}$), input state (u), dan output state (y) sesuai dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (11)$$

Didapatkan *state variable* sebagai berikut.

$$x(t) = [I_a \ I_b \ I_c \ \omega \ \theta]^T \quad (12)$$

Dengan input state :

$$u = [V_a \ V_b \ V_c \ T_l]^t \quad (13)$$

Didapatkan,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -\frac{\lambda_p}{L} f_a(\theta_r) & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\lambda_p}{L} f_b(\theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{\lambda_p}{L} f_c(\theta_r) & 0 \\ \frac{\lambda_p}{J} f_c(\theta_r) & \frac{\lambda_p}{J} f_c(\theta_r) & \frac{\lambda_p}{J} f_c(\theta_r) & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Disubstitusikan dengan persamaan (1)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -\frac{\lambda_p}{L} f_a(\theta_r) & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{\lambda_p}{L} f_b(\theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & -\frac{\lambda_p}{L} f_c(\theta_r) & 0 \\ \frac{\lambda_p}{J} f_c(\theta_r) & \frac{\lambda_p}{J} f_c(\theta_r) & \frac{\lambda_p}{J} f_c(\theta_r) & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ T_1 \end{bmatrix}$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

Pada persamaan (1)-(3) ditransformasikan menggunakan *Clarke transform* atau dibawa menjadi bentuk *alpha-beta* seperti pada gambar 2 agar didapatkan power sistim analisis yang lebih ringkas, dapat dituliskan pada persamaan (17) (Aboutanios, 2017)

$$\left. \begin{aligned} i_{\alpha} &= \frac{-R_s i_{\alpha} - e_{\alpha} + v_{\alpha}}{L} \\ i_{\beta} &= \frac{-R_s i_{\beta} - e_{\beta} + v_{\beta}}{L} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Dimana, i_{α} dan i_{β} adalah arus pada stator, v_{α} dan v_{β} adalah tegangan pada stator, R_s adalah resistansi pada lilitan stator, L adalah induktansi pada $\alpha - \beta$ axis, dan e_{α} , e_{β} adalah tegangan *back-EMF* dengan memenuhi persamaan (18)

$$\left. \begin{aligned} e_{\alpha} &= -\psi_f \omega_e \sin \theta_e \\ e_{\beta} &= \psi_f \omega_e \cos \theta_e \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Dimana, ψ_f adalah hubungan fluks magnet motor, ω_e adalah kecepatan sudut rotor, dan θ_e adalah posisi sudut rotor. Dapat dilihat dari persamaan (19) bahwa *back-EMF* memiliki informasi posisi rotor dan kecepatan motor. Oleh karena itu, posisi dan kecepatan rotor dapat dihitung dari persamaan (19) jika *back-EMF* dapat diperoleh secara akurat. Dari persamaan (18), *conventional sliding mode observer* dapat ditentukan sebagai berikut

$$\left. \begin{aligned} \hat{i}_{\alpha} &= \frac{-\hat{R}_s \hat{i}_{\alpha} + v_{\alpha} + u_1}{\hat{L}} \\ \hat{i}_{\beta} &= \frac{-\hat{R}_s \hat{i}_{\beta} + v_{\beta} + u_2}{\hat{L}} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Dimana, $\hat{i}_{\alpha}$ dan $\hat{i}_{\beta}$ adalah estimasi sinyal arus stator yang diperkirakan, $\hat{R}_s$ dan $\hat{L}$ adalah nilai estimasi dari R_s dan L , dan u_1 , u_2 adalah dua input kontrol estimasi.

Diasumsikan nilai parameter $\hat{R}_s = R_s$ dan $\hat{L} = L$. Kemudian, persamaan error arus stator dapat diperoleh dengan mengurangkan persamaan (20) dari persamaan (18).

$$\left. \begin{aligned} \dot{\bar{i}}_{\alpha} &= \frac{-\hat{R}_s \bar{i}_{\alpha} + e_{\alpha} + u_1}{\hat{L}} \\ \dot{\bar{i}}_{\beta} &= \frac{-\hat{R}_s \bar{i}_{\beta} + e_{\beta} + u_2}{\hat{L}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Dimana, $\bar{i}_{\alpha} = \hat{i}_{\alpha} - i_{\alpha}$ dan $\bar{i}_{\beta} = \hat{i}_{\beta} - i_{\beta}$ adalah error arus stator. Untuk menentukan kontrol input estimasi u dapat diambil dari persamaan (21) dan ditulis pada persamaan berikut (22)

$$\left. \begin{aligned} u &= [u_1, u_2]^T \\ u &= [-k \operatorname{sgn}(\bar{i}_{\alpha}), -k \operatorname{sgn}(\bar{i}_{\beta})]^T \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Dimana, $k > \max(|e_{\alpha}|, |e_{\beta}|)$

Estimasi pada persamaan (21) dengan kontrol (22) dapat mencapai error estimasi berturut-turut $\bar{i}_{\alpha} = 0$ dan $\bar{i}_{\beta} = 0$, masing – masing didapatkan pada waktu yang terbatas dan tetap berlangsung terus menerus. Pada *sliding mode*, *state variable* sistim pada persamaan (21) merupakan $\dot{\bar{i}}_{\alpha} = \bar{i}_{\alpha} = 0$, $\dot{\bar{i}}_{\beta} = \bar{i}_{\beta} = 0$ Dari (21), diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} e_{\alpha} &= -u_{1eq} = [k \operatorname{sgn}(\bar{i}_{\alpha})]_{eq} \\ e_{\beta} &= -u_{2eq} = [k \operatorname{sgn}(\bar{i}_{\beta})]_{eq} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Back EMF dapat diestimasi dengan menggunakan kontrol *equivalent* dari *observer*. Namun, pada *sliding mode* kontrol menggunakan sinyal *switching discontinue* (22).

Oleh karena itu, filter *low-pass* diperlukan untuk mengekstrak komponen *back-EMF* secara kontinyu.

$$\dot{\hat{e}}_{\alpha} = \frac{-\hat{e}_{\alpha} + k \operatorname{sgn}(\bar{i}_{\alpha})}{\tau_0}$$

$$\dot{\hat{e}}_{\beta} = \frac{-\hat{e}_{\beta} + k \operatorname{sgn}(\bar{i}_{\beta})}{\tau_0}$$

Dimana, τ_0 adalah konstanta waktu pada filter. Merujuk pada persamaan (19) dan persamaan (24), estimasi kecepatan dan posisi motor BLDC dapat dihitung sebagai berikut

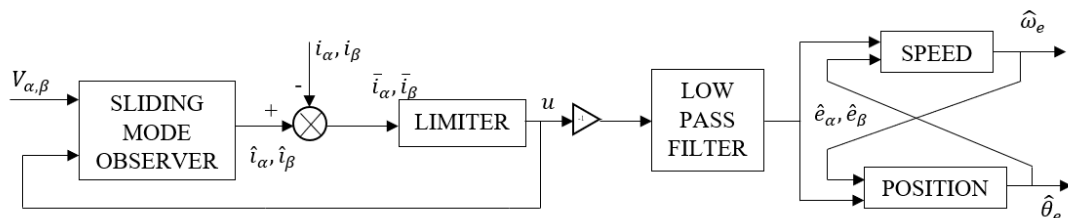
$$\hat{\omega}_e = \frac{\sqrt{\hat{e}_{\alpha}^2 + \hat{e}_{\beta}^2}}{\psi_f} \operatorname{sgn}(\hat{e}_{\beta} \cos \hat{\theta}_e - \hat{e}_{\alpha} \sin \hat{\theta}_e) \quad (25)$$

$$\hat{\theta}_e = \arctan\left(\frac{-\hat{e}_{\alpha}}{\hat{e}_{\beta}}\right) \quad (26)$$

Algoritma estimasi ini didasarkan pada algoritma *sliding mode observer*. Namun, *phase-lag* pada estimasi ini tidak dapat dihindari karena penerapan *low-pass filter* (24). Oleh karena itu, posisi rotor yang diestimasi harus dikompensasikan untuk meningkatkan presisi estimasi. Biasanya, kompensasi *phase-lag* pada (26) dibuat sesuai dengan frekuensi respon dari *low-pass filter*.

$$\hat{\theta}_e = \arctan\left(\frac{-\hat{e}_{\alpha}}{\hat{e}_{\beta}}\right) + \arctan\left(\frac{\hat{\omega}_e}{\omega_{cutoff}}\right) \quad (27)$$

Dimana, $\omega_{cutoff} = \frac{1}{\tau_0}$ adalah frekuensi *cutoff* dari *low-pass filter*. Pada persamaan (27) dapat dilihat pada saat kecepatan motor yang sama, semakin tinggi frekuensi *cutoff*, semakin sedikit kompensasi, namun lebih banyak *noise* pada *observer*. Pada gambar 3 dijelaskan diagram blok pada algoritma *sliding mode observer*.



Gambar 3. Diagram sistem *sliding mode observer*

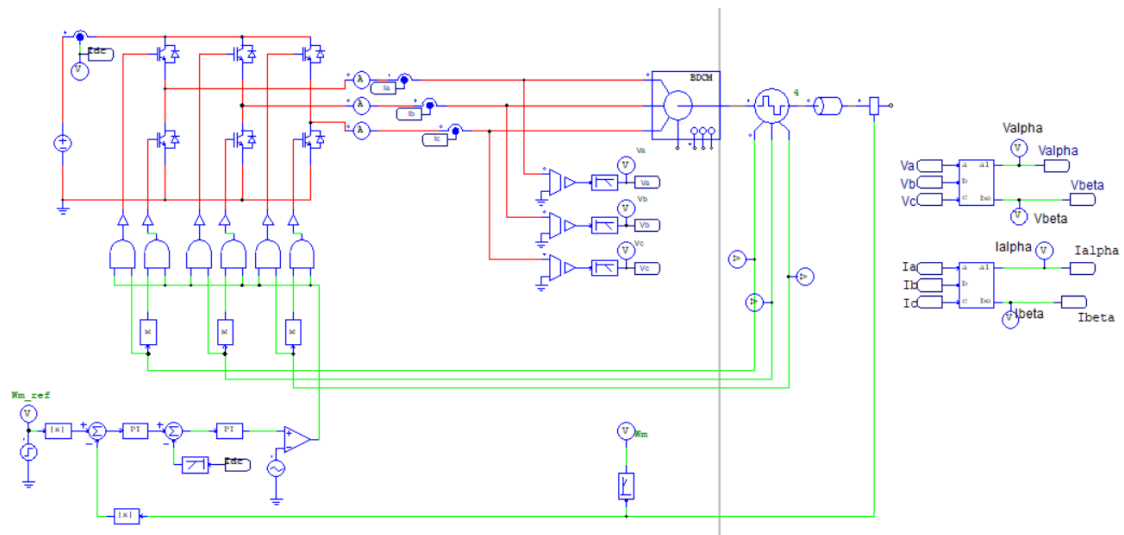
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada percobaan ini akan dilakukan pengujian sistem dengan menggunakan perangkat lunak *Power Simulator* yang nantinya akan dianalisis bagaimana cara kerja dari algoritma *sliding mode observer* yang digunakan sebagai pengestimasi kecepatan pada motor BLDC. Kontrol kecepatan dari motor BLDC tiga fasa akan disimulasikan dengan PI controller. Pengujian dilakukan secara *open loop* dengan kecepatan 1000 r/min dan 1200 r/min dengan beban 0.1Nm dan 0.5Nm. Parameter motor BLDC dan parameter kontrol PI ditampilkan pada Tabel 1.

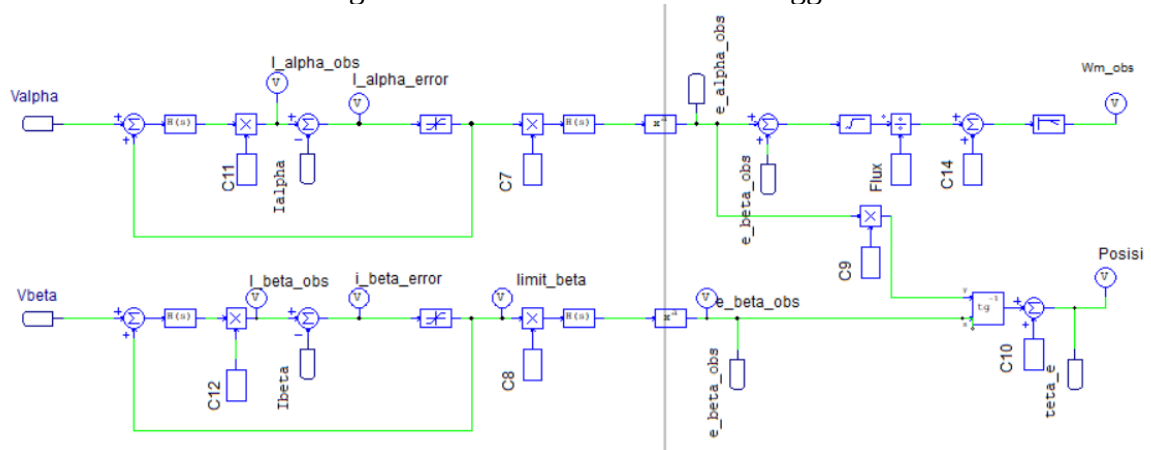
Tabel 1 Parameter Motor BLDC dan PI controller

No	Parameter	Simbol	Nilai
----	-----------	--------	-------

1	Resistansi Stator	R	11.9Ω
2	Induktansi Stator	L	207×10^{-3}
3	<i>Mutual inductance</i>	L_m	-0.00069
4	Flux	ψ_f	0.8 Wb
5	Pole	P	4
6	Proportional Gain	K_p	0.002
7	Integral Gain	K_i	0.007

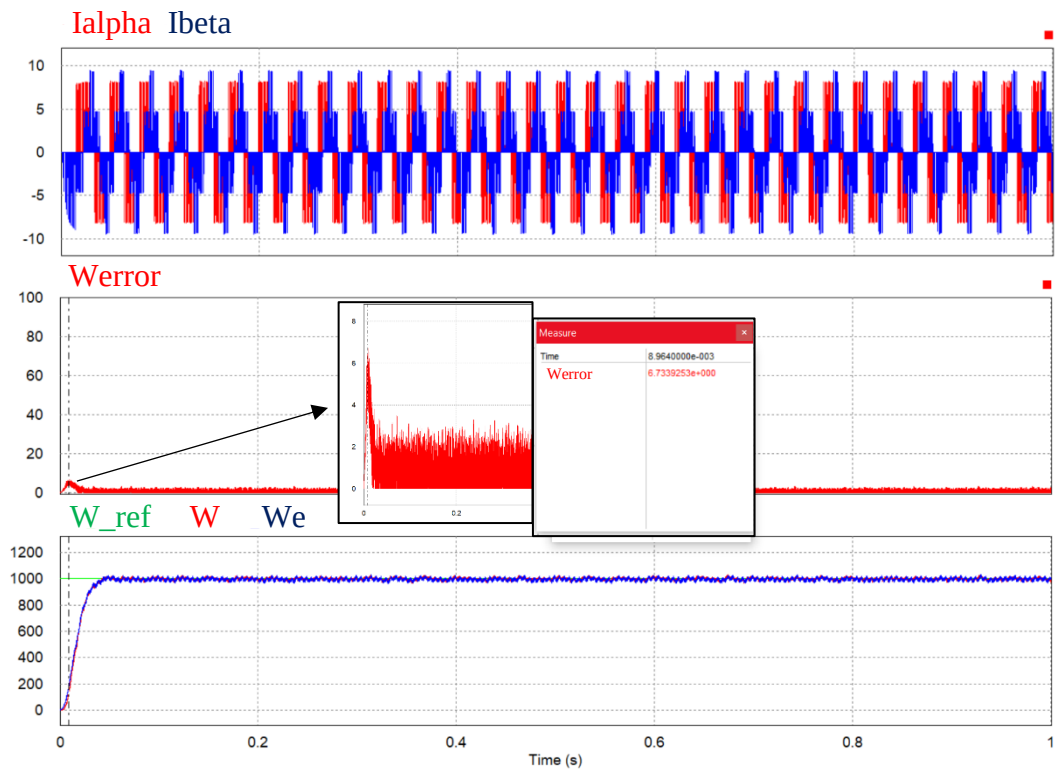


Gambar 4. Rangkaian simulasi motor BLDC menggunakan PSIM

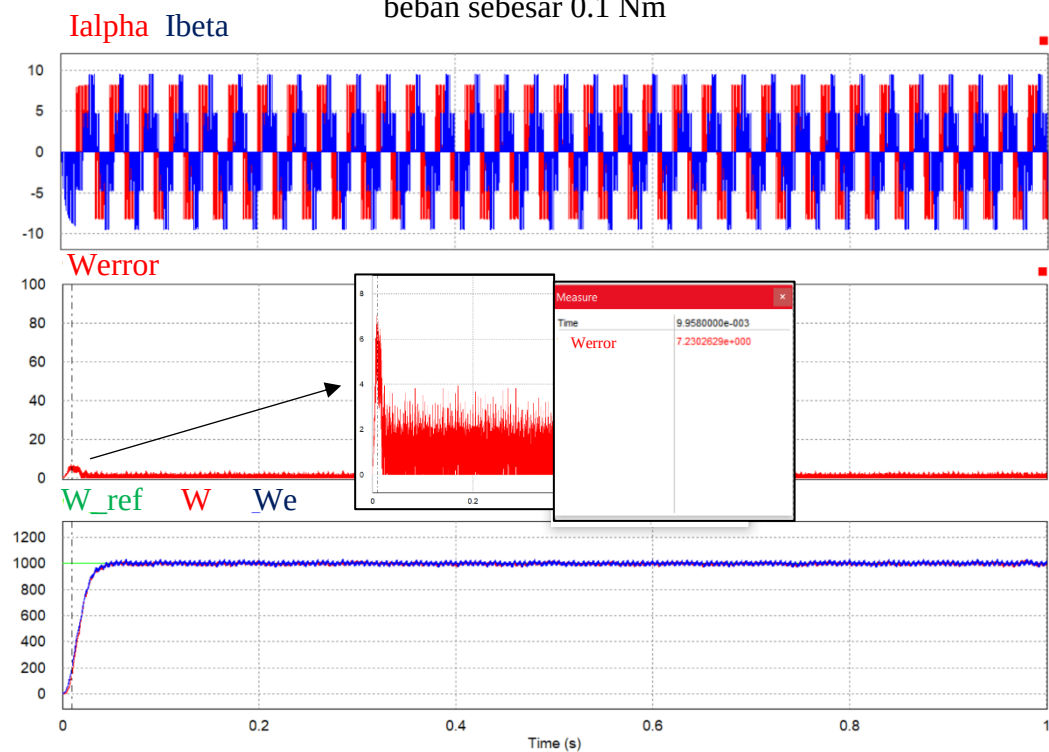


Gambar 5. Rangkaian simulasi *sliding mode observer* menggunakan PSIM

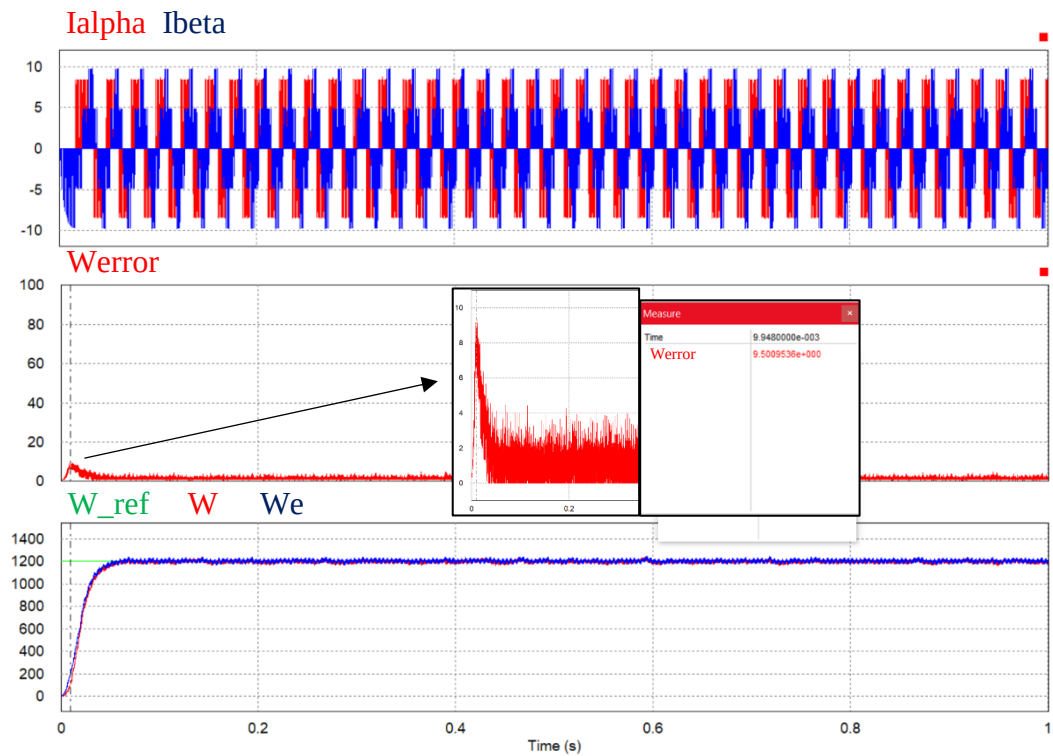
Pada Gambar 4 ditampilkan rangkaian utama simulasi motor BLDC menggunakan *software* PSIM. Merujuk diagram blok *sliding mode observer* pada gambar 3, rangkaian simulasi *sliding mode observer* dibuat seperti pada gambar 5. Hasil pengujian simulasi dengan rangkaian pada gambar 4 dengan menggunakan rangkaian algoritma *sliding mode observer* seperti pada gambar 5 didapatkan beberapa parameter seperti I_{α} , I_{β} , W , W_{error} dan W_e . Dimana $i_{\alpha} = I_{\alpha}$, $i_{\beta} = I_{\beta}$, $\omega = W =$ kecepatan aktual, $\omega_{error} = W_{error} =$ error estimasi kecepatan, dan $\hat{\omega}_e = W_e =$ estimasi kecepatan.



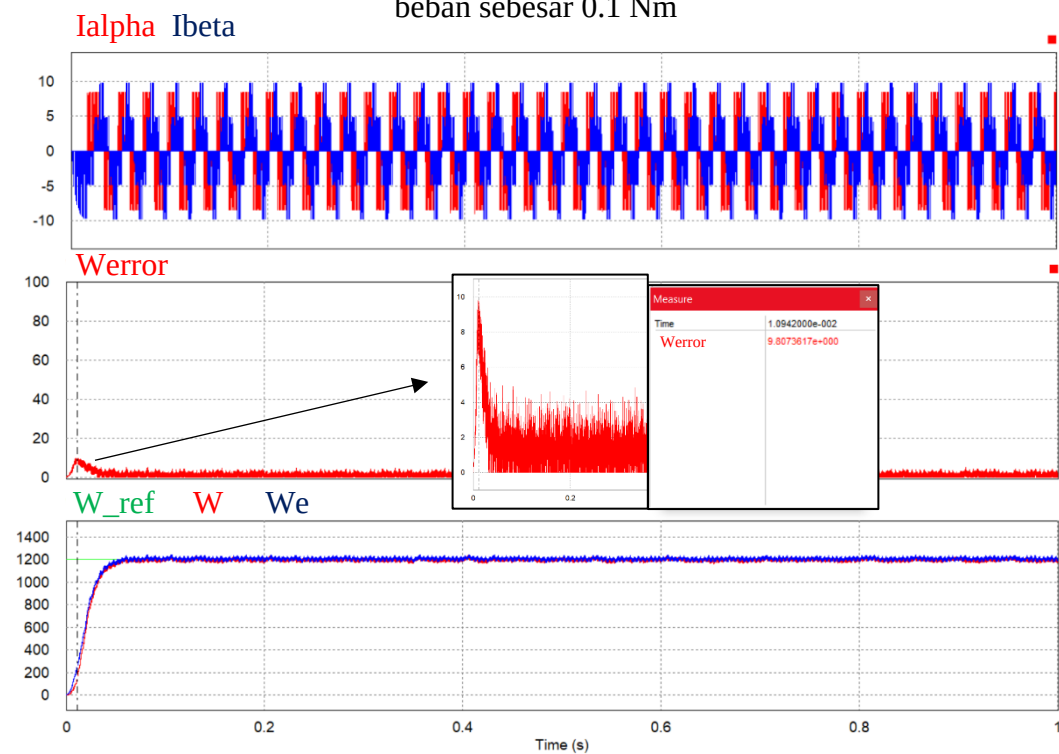
Gambar 6. Hasil simulasi menggunakan PSIM dengan speed 1000 r/min dan beban sebesar 0.1 Nm



Gambar 7. Hasil simulasi menggunakan PSIM dengan speed 1000 r/min dan beban sebesar 0.5 Nm



Gambar 8. Hasil simulasi menggunakan PSIM dengan speed 1200 r/min dan beban sebesar 0.1 Nm



Gambar 9. Hasil simulasi menggunakan PSIM dengan speed 1200 r/min dan beban sebesar 0.5 Nm

Pengujian dengan kecepatan 1000 r/min dengan beban mekanik sebesar 0.1Nm dijelaskan pada gambar 6 dan dengan beban mekanik sebesar 0.5Nm dijelaskan pada gambar 7. Pada gambar 8 dan 9 adalah hasil simulasi dengan kecepatan 1200 r/min dengan beban mekanik sebesar 0.1Nm dan 0.5Nm.

Pengujian algoritma *sliding mode observer* sebagai estimasi kecepatan pada motor BLDC yang dilakukan secara simulasi menggunakan *software* PSIM didapatkan hasil yang baik dapat dilihat dari grafik respon pada gambar 6 saat kecepatan 1000 r/min dengan beban mekanik sebesar 0.1 Nm nilai kecepatan aktual (ω) dan estimasi kecepatan ($\hat{\omega}_e$) tetap memiliki selisih nilai, namun selisih nilai tersebut tidak jauh berbeda dan memiliki nilai error estimasi kecepatan (ω_{error}) maksimal sebesar 6.7% . Pengujian selanjutnya pada gambar 7 dengan kecepatan yang sama yaitu sebesar 1000 r/min, namun dengan beban mekanik sebesar 0.5Nm nilai kecepatan aktual (ω) dan estimasi kecepatan ($\hat{\omega}_e$) juga memiliki selisih nilai yang tidak jauh berbeda namun memiliki nilai error estimasi kecepatan (ω_{error}) maksimal sebesar 7.2%

Pada pengujian berikutnya pada gambar 8 kecepatan motor BLDC diubah menjadi 1200 r/min dengan beban mekanik sebesar 0.1 Nm memiliki nilai error estimasi kecepatan (ω_{error}) maksimal sebesar 9.5%. Selanjutnya pada gambar 9 dilihat kecepatan motor BLDC sebesar 1200 r/min namun, diberi beban mekanik sebesar 0.5 Nm memiliki nilai error estimasi kecepatan (ω_{error}) maksimal sebesar 9.8%. Error yang terjadi dikarenakan masih menggunakan sistem *open loop* sehingga nilai estimasi kecepatan ($\hat{\omega}_e$) hanya dibandingkan dengan nilai kecepatan aktual (ω) sebagai keluaran dari *controller* dan tidak dikembalikan ke *controller* sebagai nilai masukan.

KESIMPULAN

Pada penelitian yang telah dilakukan, penulis mengajukan metode *sliding mode observer* digunakan untuk mengestimasi kecepatan pada motor *brushless DC* (BLDC). Hal tersebut dilakukan secara simulasi menggunakan *software* PSIM. Pengujian dilakukan dengan membandingkan kecepatan aktual (ω) pada motor BLDC dengan kecepatan estimasi ($\hat{\omega}_e$) yang dihasilkan dari perhitungan pada metode *sliding mode observer* dari perbandingan tersebut nantinya akan didapatkan error estimasi kecepatan (ω_{error}). Dilihat dari hasil simulasi setelah dilakukan pengujian dengan kecepatan motor sebesar 1000 r/min dan 1200 r/min dengan perubahan beban mekanik sebesar 0.1 Nm dan 0.5 Nm didapatkan nilai error estimasi kecepatan (ω_{error}) dengan jarak sebesar 6.7% hingga 9.8%. Dari hasil tersebut membuktikan bahwa algoritma *sliding mode observer* sebagai estimasi kecepatan motor BLDC merupakan metode yang *robust* dan dapat berkerja dengan baik dikarenakan error yang terjadi masih dalam batas wajar yaitu dibawah 10%.

SARAN

Hasil yang telah didapatkan dari pengujian secara simulasi ini hanya menggunakan dua nilai kecepatan yang berbeda dengan dua nilai beban yang berbeda. Untuk mendapatkan hasil pengujian metode *sliding mode observer* yang

lebih baik, diperlukan pengujian secara *close loop* dan *hardware* dengan menggunakan perangkat motor BLDC yang nyata dengan data yang lebih bervariasi.

DAFTAR RUJUKAN

- Aboutanios, E. (2017). An adaptive clarke transform based estimator for the frequency of balanced and unbalanced three-phase power systems. *25th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2017, 2017-Janua(1)*, 1001–1005. <https://doi.org/10.23919/EUSIPCO.2017.8081358>
- Bondre, V. S., & Thosar, A. G. (2017). Mathematical modeling of direct torque control of BLDC motor. *2017 International Conference on Innovative Research in Electrical Sciences, IICIRES 2017*. <https://doi.org/10.1109/IICIRES.2017.8078304>
- Chang, P. I. T., Lin, X. Y., & Yu, I. J. (2019). Sensorless BLDC motor sliding mode controller design for interference recovery. *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019*, 1780–1785. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820383>
- Chen, X., & Liu, G. (2020). Sensorless optimal commutation steady speed control method for a nonideal back-EMF BLDC motor drive system including buck converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 6147–6157. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2945282>
- Gan, M. G., Zhang, M., Zheng, C. Y., & Chen, J. (2018). An adaptive sliding mode observer over wide speed range for sensorless control of a brushless DC motor. *Control Engineering Practice*, 77(May), 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.05.004>
- Geraee, S., Shafiei, M., Sahami, A. R., & Alavi, S. (2017). Position sensorless and adaptive speed design for controlling brushless DC motor drives. *2017 North American Power Symposium, NAPS 2017*. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107246>
- Liang, D., Li, J., & Qu, R. (2017). Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Second-Order Sliding-Mode Observer With Online Resistance Estimation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3672–3682. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2690218>
- Liu, S., Qiu, Z., & Chen, W. (2019). Sensorless Control with Sliding Mode Observer for a Brushless DC Motor based on Concave Function. *Proceedings of 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, IMCEC 2019, (Imcec)*, 872–876. <https://doi.org/10.1109/IMCEC46724.2019.8984058>
- Poovizhi, M., Senthil Kumaran, M., Ragul, P., Irene Priyadarshini, L., & Logambal, R. (2017). Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor(BLDC) drives by using MATLAB-SIMULINK. *International Conference on Power and Embedded Drive Control, ICPEDC 2017*, 178–183. <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081083>
- Putra, E. H., Has, Z., & Effendy, M. (2018). Robust adaptive sliding mode control design with genetic algorithm for Brushless DC motor. *International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, 2018-Octob, 330–335.

<https://doi.org/10.1109/EECSI.2018.8752768>

- Rif'an, M., Yusivar, F., & Kusumoputro, B. (2019). Sensorless-BLDC motor speed control with ensemble Kalman filter and neural network. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 10(1), 1. <https://doi.org/10.14203/j.mev.2019.v10.1-6>
- Syamsiana, I. N., & Wang, M. (2019). A Study of Sliding Mode Observer Sensorless of Brushless Motor using Embedded Coder Matlab/Simulink. *The 6th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE 2019)*, (1).
- Topal, M., Iskender, I., & Genc, N. (2019). Sensorless speed control of a BLDC motor using improved sliding mode observer technique. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 11(1), 1–9.
- Venkateswari, K. (2020). A sensor less BLDC motor drive using sliding mode observer for electric vehicle. *Malaya Journal of Matematik*, (2), 3544–3548.
- Zaky, M. S., Metwaly, M. K., Azazi, H. Z., & Deraz, S. A. (2018). A New Adaptive SMO for Speed Estimation of Sensorless Induction Motor Drives at Zero and Very Low Frequencies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(9), 6901–6911. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2793206>