

# Sistem Kontrol Motor Dc Brushless Dengan Fix Frequency Hybrid Fuzzy Logic Controller

Wahyu Pribadi  
Prodi Perkeretaapian  
Politeknik Negeri Madiun, PNM  
Madiun, Indonesia  
why.pribadi@pnm.ac.id

Yuli Prasetyo  
Prodi Perkeretaapian  
Politeknik Negeri Madiun, PNM  
Madiun, Indonesia  
yuliprasetyo2224@pnm.ac.id

**Abstrak**— Motor DC brushless (BLDCM) umumnya dikontrol menggunakan jembatan semikonduktor daya tiga fase. Pendeteksian posisi rotor menggunakan 3 sensor hall effect. Berdasarkan posisi rotor komponen switching secara berurutan aktif setiap 60 derajat yang disebut *six step commutation*. BLDCM memiliki karakteristik kecepatan / torsi yang baik, efisiensi dan respon dinamis tinggi dan banyak diaplikasikan di industri dan propulsi kendaraan. BLDCM.

Kontroler yang sesuai dibutuhkan untuk mencapai performa pengendalian BLDCM. Umumnya dalam pengendalian motor magnet permanen menggunakan kontroler proporsional-integral (PI). Kontroler PI sulit untuk mengatasi beberapa kompleksitas kontrol seperti non-linear, gangguan beban dan variasi parametrik. Selain itu pengendali PI membutuhkan model matematika linear yang tepat. Penelitian ini membahas hybrid Fuzzy Logic - Proportional Integral Controller (Fuzzy PI) untuk kontrol kecepatan dari BLDCM. Fuzzy PI didesain untuk memperbaiki respon dinamis dari sistem penggerak motor dan meminimlisir *error steady state*. Hasil pengujian menunjukkan Fuzzy PI controller berhasil memperbaiki performa BLDC dengan error steady state=0,66 rpm, RMSE= 6,33 rpm dan riak arus 0,899A.

**Kata Kunci**—motor DC brushless; six step commutation; fuzzy logic, hybrid fuzzy PI.

## I. PENDAHULUAN

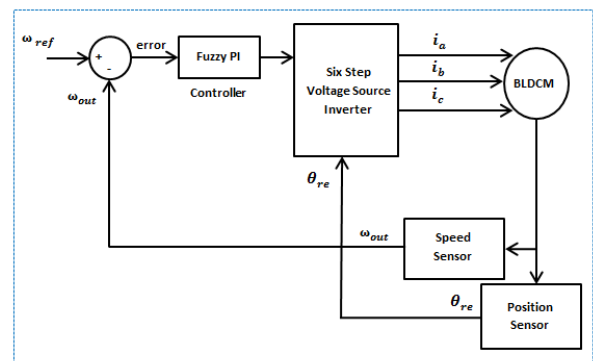
Motor dc konvensional mempunyai efisiensi yang tinggi, dan torsi - kecepatan yang linier. Pengendalian motor DC bersifat sederhana dan tidak memerlukan hardware yang kompleks. Bagaimanapun motor dc memerlukan perawatan secara berkala. Sikat dari komutator mekanik secara berkala harus diganti. Komutator memiliki efek menimbulkan efek yang tidak diinginkan seperti percikan api (*spark*), *noise* akustik dan partikel carbon. BLDCM pada beberapa aplikasi dapat menggantikan motor dc konvensional [1] [6].

BLDCM termasuk dalam tipe motor sinkron permanen magnet. BLDCM dikendalikan dengan tegangan dc tetapi arus komutasinya diatur melalui komponen switching semikonduktor seperti mosfet atau IGBT. Sekuensial komutasi secara langsung ditentukan sesuai posisi rotor dimana posisi rotor dideteksi oleh sensor posisi maupun dengan teknik sensorless (tanpa sensor) [3].

## II. METODOLOGI

### A. Perancangan Sistem

Komponen utama dari sistem adalah BLDCM yang menghasilkan output kecepatan yang nantinya diamati. Komponen pendukung lainnya adalah sensor posisi untuk mendeteksi rotor, sensor kecepatan untuk mengukur kecepatan motor, dan sebuah kontroler Fuzzy untuk memperbaiki respon kecepatan motor. Diagram blok sistem ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Identifikasi parameter BLDCM dilakukan berdasarkan analisa hasil pengukuran. Hasil identifikasi ditunjukkan Tabel 1.

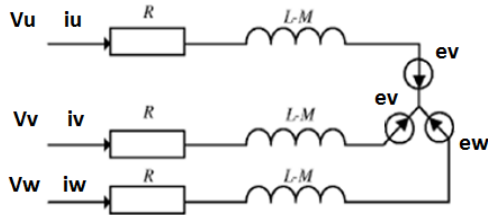
Tabel 1. Hasil identifikasi parameter BLDC

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Jumlah kutub	4	
2	Tegangan kerja	48	Volt
3	Resistansi stator	0,85	Ohm
4	Induktansi stator	0,0142	H
5	Mutual induktansi	0,0136	H
6	Konstanta torsi motor	0,366	Nm / A
7	Konstanta back emf	0,09	V/rad ps

Model matematis beban :

$$G_L(s) = \frac{1}{0,445 \cdot 10^{-4}s + 152 \cdot 10^{-4}}$$

Model matematis BLDCM diturunkan dari rangkaian ekivalen stator ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekivalen stator

Persamaan tegangan stator [4] :

$$L \frac{di_U}{dt} + Ri_U + M \frac{di_V}{dt} + M \frac{di_W}{dt} + e_U = V_U$$

$$L \frac{di_V}{dt} + Ri_V + M \frac{di_W}{dt} + M \frac{di_U}{dt} + e_V = V_V$$

$$L \frac{di_W}{dt} + Ri_W + M \frac{di_U}{dt} + M \frac{di_V}{dt} + e_W = V_W$$

Persamaan tegangan [4]:

$$\begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_U \\ e_V \\ e_W \end{bmatrix}$$

Persamaan arus stator [5]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} = D^{-1} \left\{ RI \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} + I \begin{bmatrix} V_U \\ V_V \\ V_W \end{bmatrix} - I \begin{bmatrix} e_U \\ e_V \\ e_W \end{bmatrix} \right\}$$

Persamaan back emf :

$$e_U = K_e \omega_m$$

$$e_V = K_e \omega_m$$

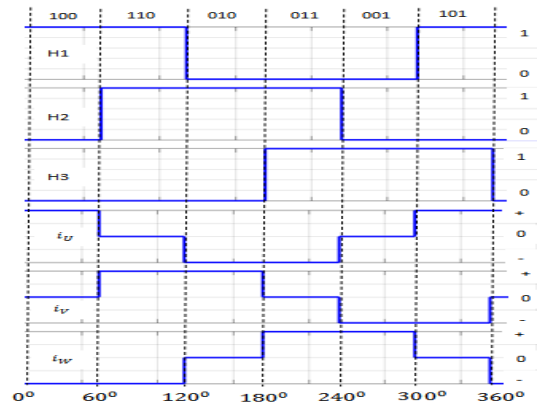
$$e_W = K_e \omega_m$$

Persamaan torsi motor [5]:

$$T_M = \frac{K_{TM}}{3} \left[ F(\theta_e) i_U + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_V + F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_W \right]$$

Sebuah sensor posisi (sensor hall) digunakan untuk mendeteksi posisi rotor. BLDCM bekerja pada medan konduksi 120° tiga fasa. Signal output sensor hall menghasilkan kombinasi 3 digit biner yang berubah setiap 60°, sehingga dalam satu siklus terdapat 6 step perubahan data posisi rotor seperti ditunjukkan Gambar 3. [3]

Komutasi dilakukan dengan mengatur polaritas arus  $i_U, i_V, i_W$  melalui proses switching pada enam transistor berdasarkan output sensor hall (Tabel 2).



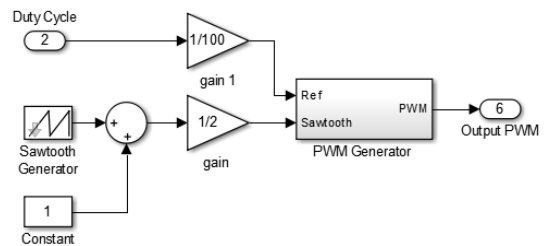
Gambar 3. Output hall sensor dan polaritas arus

Tabel 2. Sekuensial switching six step commutation [3]

Switching interval	Sequential Number	Sensor output			Phase current			Switch On
		H1	H2	H3	U	V	W	
0° – 60°	0	1	0	0	+	0	-	Q1 Q6
60° – 120°	1	1	1	0	0	+	-	Q3 Q6
120° – 180°	2	0	1	0	-	+	0	Q2 Q3
180° – 240°	3	0	1	1	-	0	+	Q2 Q5
240° – 300°	4	0	0	1	0	-	+	Q4 Q5
300° – 360°	5	1	0	1	+	-	0	Q1 Q4

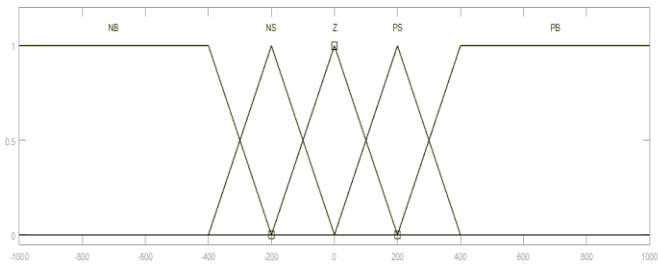
### B. Fuzzy Logic Controller

Fuzzy logic controller didesain Multiple-Input-Single-Output (MISO). Variabel inputnya adalah error dan delta error, sedangkan untuk variabel untuk keluaran adalah gain kontroler Proportional dan Integral. Selanjutnya kontroler PI mengatur duty cycle ratio PWM. Berikut ini diagram blok fix frequency PWM.



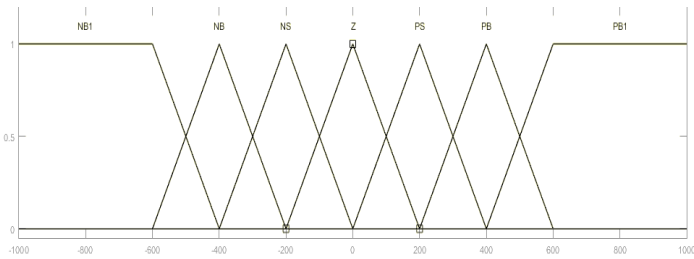
Gambar 4. Diagram blok fix frequency PWM

Membership function input error dapat dilihat pada gambar 5. Masing - masing memiliki 5 dibagi menjadi lima yaitu Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS) dan Positive Big (PB).



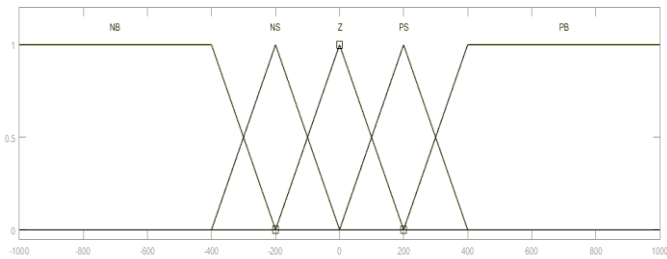
Gambar 5. Membership function input *error*

Input delta error dibagi menjadi 7 yaitu Negative Big1 (NB1), Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (Z), Positif Small (PS), Positif Big (PB), Positif Big1 (PB1) seperti ditunjukkan pada gambar 6.



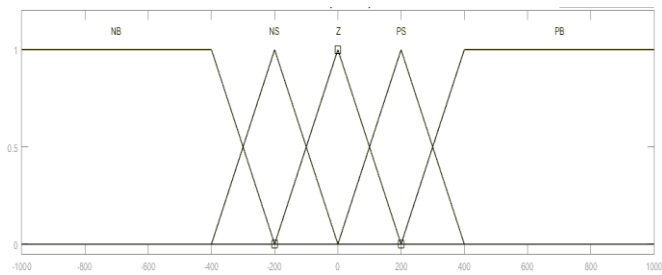
Gambar 6. Membership function input *delta error*

Membership output control proportional dibagi menjadi 5 yaitu Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (Z), Positif Small (PS), Positive Big (PB) seperti ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Membership function output *control Proportional*

Membership output control integral dibagi menjadi 5 yaitu Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (Z), Positif Small (PS), Positive Big (PB) seperti ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Membership function output *control Integral*

Rule base fuzzy disusun dengan mempertimbangkan masukan error dan delta error sampai didapatkan respon terbaik. Terdapat 35 rule base untuk output control proportional seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rule base Fuzzy output control proportional

<b>d_ERROR</b> \ <b>ERROR</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>NB1</b>	NB	NB	NS	Z	Z
<b>NB</b>	NB	NB	NS	Z	Z
<b>NS</b>	NB	NS	Z	Z	PS
<b>Z</b>	NB	NS	Z	PS	PB
<b>PS</b>	Z	Z	PS	PS	PB
<b>PB</b>	NS	NS	Z	PS	PB
<b>PB1</b>	NS	NS	Z	PS	PB

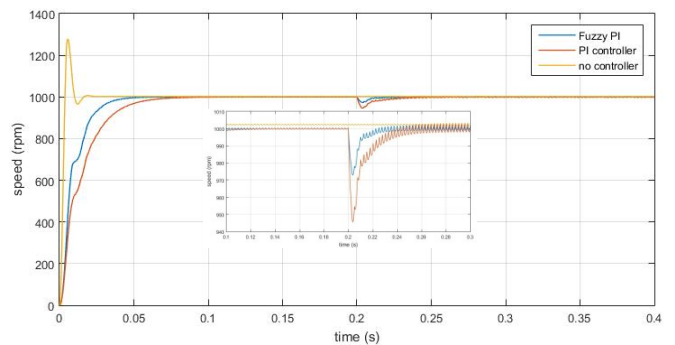
Terdapat 35 rule base untuk output control integral seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rule base Fuzzy output control integral

<b>d_ERROR</b> \ <b>ERROR</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>NB1</b>	NB	NB	NS	NS	Z
<b>NB</b>	NB	NB	NS	Z	Z
<b>NS</b>	NB	NS	Z	Z	PS
<b>Z</b>	NS	NS	Z	PS	PS
<b>PS</b>	Z	Z	PS	PS	PB
<b>PB</b>	NS	NS	Z	PS	PB
<b>PB1</b>	NS	NS	Z	PS	PB

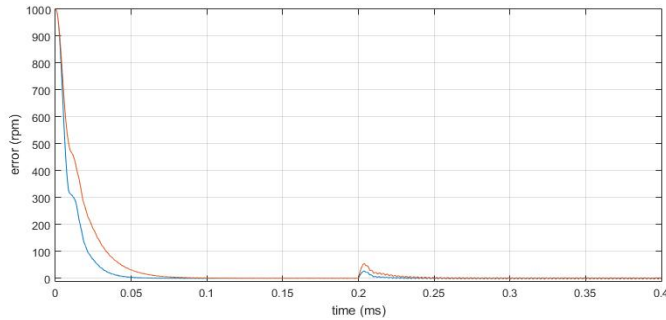
### III. HASIL DAN ANALISA

Pengujian dilakukan dengan memberi setpoint kecepatan sebesar 1000 rpm kemudian pada waktu ke 0.2 ms diberikan torsi beban sebesar 1 Nm. Respon kecepatan motor dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Respon kecepatan motor BLDC

Plot error dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Plot error

Tabel 5. Hasil pengujian kontroler

No	Tipe	Overshoot (rpm)	Rise Time (ms)	Settling Time (ms)	RMSE (rpm)
1	No controller	273	0.002	0.024	78
2	Fuzzy	-	0.034	0.052	46
3	Fuzzy PI	-	0.018	0.034	24

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa pengendalian motor BLDC dengan kontroler Fuzzy PI memiliki performa yang lebih baik, dapat mencapai setpoint tanpa mengalami overshoot dengan rise time 0.018 ms, settling time 0.034 ms dan RMSE sebesar 24 rpm.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Indonesia melalui program Penelitian Dosen Pemula 2019

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] YunChang Kwak, Jin Woo Ahn, Dong Hee Lee, "An High Performance Direct Torque Control Method with PWM Approach of PMSMs", International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2014
- [2] Anju George, Surya Susan Alex, "Bridgeless buck-boost based power factor correction for multi quadrant operated brushless DC motor drive", International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), 2017.
- [3] M Akhila, P. Ratnan, "Brushless DC motor drive with regenerative braking using adaptive neuro based fuzzy inference system", International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 2016.
- [4] Lirong Shen, Kun Xia, "Feasibility of four-switch three-phase brushless DC motor control scheme based on quasi Z-Source network", International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016.
- [5] Santanu Mondal, Abhirup Nandi, Indranil Mallick, Chirantan Ghosh, Alapan Giri, "Performance evaluation of brushless DC motor drive for three different types of MOSFET based DC-DC converters", Devices for Integrated Circuit (DevIC), 2017.
- [6] Arman Jaya, Era Purwanto, Melinda Badriatul Fauziah, Farid Dwi Murdianto, Gigih Prabowo, Muhammad Rizani Rusli, "Design of PID-fuzzy for speed control of brushless DC motor in dynamic electric vehicle to improve steady-state performance", International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA), 2017.