

Desain dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Dengan Metode FOC Menggunakan *Fuzzy*

Rizqi Pradhana^{1*}, Afif Aulia Rahman², Ony Asrarul Qudsy³, Indra Ferdiansyah⁴

^{1*,2,3,4}Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

*Email: rizqipradhana@gmail.com

Abstract

BLDC motors are widely used in automotive and industrial fields. Because it has high efficiency, big torque and easy maintenance. Some drive systems that use BLDC motors sometimes require a constant motor speed. However, when given more load, the speed will decrease. Therefore, a motor speed regulation is needed so that the speed becomes constant even when it is given a load. This paper proposes the FOC method using a fuzzy logic controller to maintain motor performance and efficiency for long-term use. The advantages of the proposed method are low power ripple and high efficiency. This system is simulated using MATLAB and obtained a small error for the setting point. The results obtained with the lowest setting point, namely 500 RPM, with a 1.6% error and a controller output of 515 Rpm. Increase in the RPM reference step reach up to 6000 RPM.

Keywords: Back EMF, Hall effect sensor, FOC

Abstrak

Motor BLDC banyak digunakan pada bidang otomotif dan industri. Karena memiliki efisiensi tinggi, torsi besar, dan perawatan mudah. Beberapa sistem penggerak yang menggunakan motor BLDC terkadang membutuhkan kecepatan motor yang konstan. Akan tetapi ketika diberi beban lebih maka kecepatan akan menurun. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu pengaturan kecepatan motor agar kecepatan menjadi konstan walaupun diberi beban. Pada paper ini mengusulkan metode FOC dengan menggunakan fuzzy logic controller untuk menjaga performa dan efisiensi motor untuk penggunaan jangka panjang. Kelebihan dari metode yang diusulkan adalah ripple daya yang kecil dan efisiensi yang tinggi. Sistem ini disimulasikan dengan menggunakan MATLAB dan didapatkan hasil eror yang kecil terhadap setting point. Hasil yang didapatkan dengan setting point terendah yakni 500 RPM memiliki eror 1.6 % dengan output controller sebesar 515 Rpm. Kenaikan step referensi RPM hingga nominal yakni 6000 RPM.

Kata kunci: Back EMF, Hall effect sensor, FOC

1. Pendahuluan

Motor BLDC telah diterapkan di berbagai bidang karena keunggulannya yang memiliki kepadatan daya tinggi, efisiensi yang tinggi, perawatan yang mudah, kontrol yang sederhana dan konfigurasi perangkat keras yang sederhana [1],[2]. Penggerak dari motor BLDC adalah inverter tiga fasa dengan modulasi sinyal enam pulsa [3]. Penelitian motor BLDC tanpa sensor posisi telah menjadi fokus selama dua dekade terakhir. Banyak metode BLDC tanpa sensor posisi dengan gaya gerak listrik balik trapesium (EMF) telah diusulkan dalam literature [4].

Salah satu pendekatan yang paling populer dan banyak digunakan adalah metode deteksi titik balik nol (ZCPs) karena dapat diimplementasikan dengan mudah [5][6]. Namun pada penggunaan metode ini keandalan pendeteksiannya bergantung pada kecepatan motor, yang menyebabkan ketidakakuratan pada kecepatan yang lebih rendah.

Pengontrolan lain yang sederhana dan banyak digunakan adalah dengan menggunakan proporsional-integral-diferensial (PID) [7], tetapi kinerja dari sistem kontrol ini masih menunjukkan kesalahan steady yang besar [8]. Selain itu, pada motor BLDC juga dikembangkan PID yang disetel dengan algoritma fuzzy. Penelitiannya yakni dengan memberikan beban secara mendadak dan perubahan langkah masukan. Kontroller ini dibandingkan dengan PID konvensional yang memberikan hasil overshoot 750% dan waktu pengendapan yang besar dalam respon kecepatannya [9]. Namun penggunaan kontrol tersebut didasarkan pemodelan yang cukup kuat dimana ketidakpastian dipertimbangkan [10].

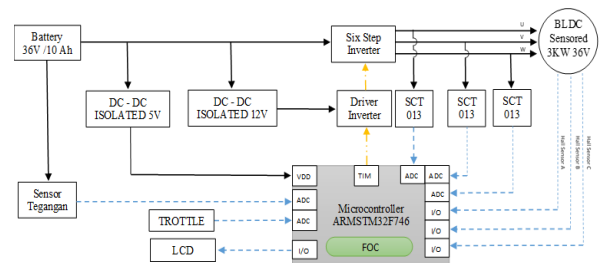
Pada paper ini mengusulkan pengaturan kecepatan motor BLDC dengan menggunakan metode FOC yang telah disimulasikan dengan menggunakan MATLAB. Metode FOC bagus untuk memberikan performa dinamik yang tinggi [11]. Selain itu, FOC gelombang sinus memiliki keunggulan riak torsi rendah, kehilangan arus eddy rendah, dan kinerja dinamis yang andal [12]. Sehingga dapat

menjaga performa dan efisiensi dari motor pada penggunaan jangka panjang.

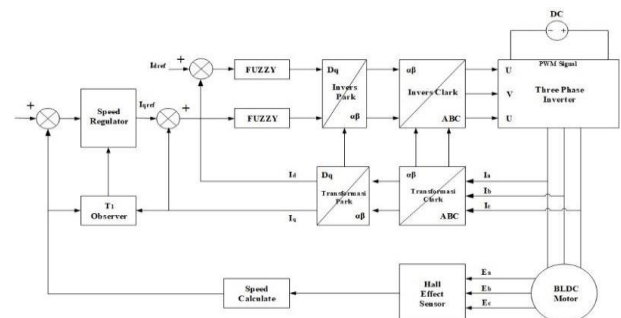
2. Metoda Penelitian

2.1. Field Oriented Control (FOC)

Field Oriented Control (FOC) merupakan suatu metode pengaturan medan pada motor AC dari sistem coupled menjadi decoupled. Dengan sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, dengan demikian torsi dan fluksi juga dapat diatur secara terpisah. Umpan balik berupa kecepatan aktual dari motor dibandingkan dengan kecepatan referensi.



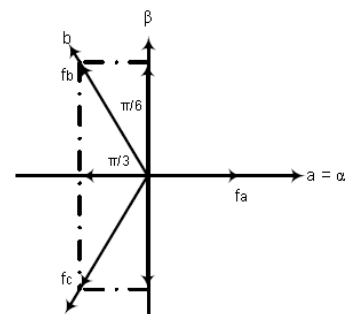
Gambar 1. Blok Diagram Sistem



Gambar 2. Blok Diagram Kontrol

2.2. Transformasi Clarke

Transformasi Clarke digunakan untuk mengkonversi koordinat tiga fasa (i_a, i_b, i_c) menjadi koordinat stationer dua fasa (i_a, i_b).



Gambar 3. Koordinat Transformasi Clarke

$$[f_{\alpha} \ f_{\beta} \ f_{\theta}] = \frac{2}{3} \cdot [f_a \ f_b \ f_c] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

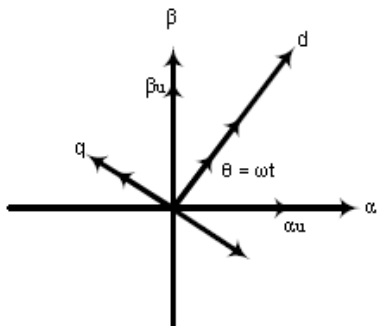
Notasi f menyatakan fungsi yang ada pada motor induksi, baik fungsi arus, fluks dan tegangan sedangkan f0 adalah pusat sumbu dengan nilai konstan sebesar 1 dan 2/3 adalah konstanta pada matrik transformasi clarke.

2.3. Transformasi Park

Transformasi Park merupakan transformasi dari sistem koordinat stationer (ab) ke dalam sistem koordinat putar (d-q) seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Karakteristik motor induksi yang mulanya berada pada sumbu *stationer* (ab) lalu bekerja dan terjadi putaran rotor, sehingga fungsi arus tegangan, dan fluks juga mengalami perubahan nilai. Transformasi dari sumbu ab menjadi sumbu d-q dapat ditulis seperti persamaan.

$$[f_d \ f_q \ f_0] = \frac{2}{3} \cdot [f_{\alpha} \ f_{\beta} \ f_{\theta}] \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dari Dari persamaan matrik transformasi clarke dan park, maka persamaan umum tranformasi dari koordinat abc menjadi koordinat d-q ditunjukkan pada persamaan.



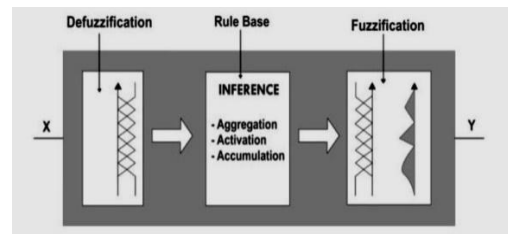
Gambar 4. Koordinat Transformasi Park

$$[f_d \ f_q \ f_0] = \frac{2}{3} \cdot [f_a \ f_b \ f_c] \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.4 Fuzzy Logic System

a. Struktur dan Elemen

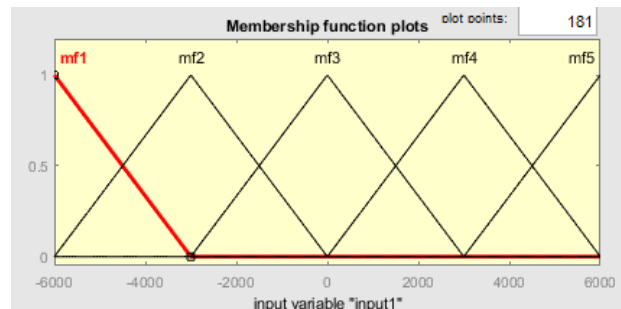
Dari hasil Analisis dengan menggunakan *spreadsheet* di dapatkan persamaan garis Sistem kontrol logika *fuzzy*, adalah peningkatan dari logika *boolean* yang berhadapan dengan konsep kebenaran sebagian. Dimana logika klasik menyatakan bahwa segala hal dapat diekspresikan dalam istilah binery (0 atau 1, ya atau tidak), logika fuzzy menggantikan kebenaran boolean dengan tingkat kebenaran. Logika fuzzy memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1.



Gambar 5. Struktur dan Elemen Fungsi dari kontrol fuzzy

b. Fungsi Keanggotaan

Dari fungsi keanggotaan fuzzy, maka diperlukan mengatur *rule base* yang didapatkan berdasarkan dari perubahan keluaran yang dapat di amati dari variabel input *error* dan *delta error*. *Rule base* sendiri di gunakan sebagai menentukan aturan untuk proses kontrol sesuai apa yang di harapkan yang nantinya dinyatakan dalam bentuk *IF-THEN*.



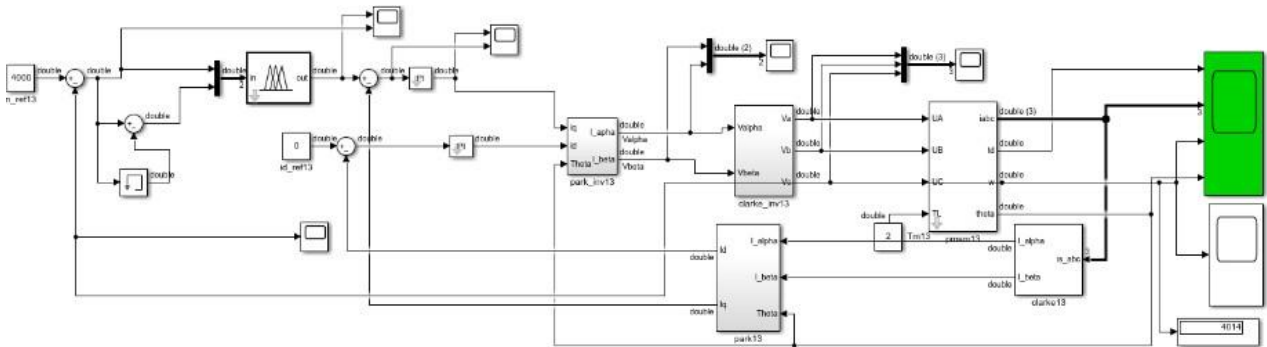
Gambar 6. Fuzzy Fungsi Keanggotaan

Tabel 1. Fuzzy Control Rule Base

	E	NB	N	Z	P	PB
CE						
NB	NB	NB	NB	N	N	Z
N	NB	NB	N	Z	Z	P
Z	NB	N	Z	P	P	PB
P	N	Z	P	PB	PB	PB
PB	Z	P	PB	PB	PB	PB

3. Hasil Penelitian

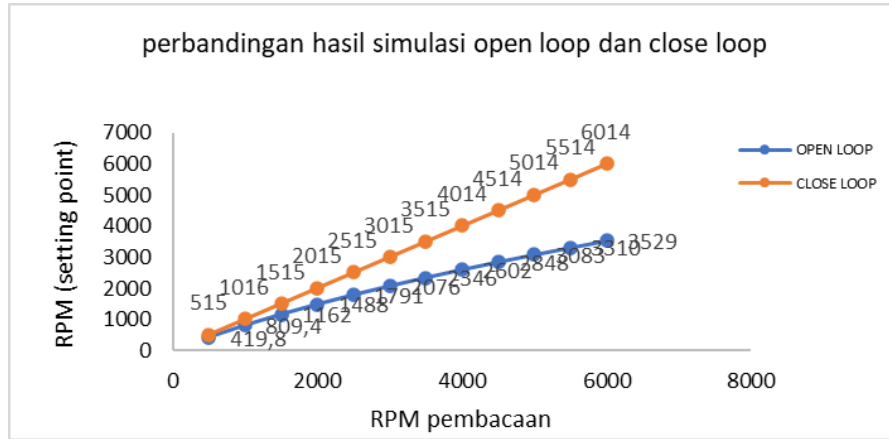
Simulasi dilakukan dengan menggunakan MATLAB yang membandingkan nilai kecepatan yang dihasilkan menggunakan metode FOC dan tanpa menggunakan FOC seperti pada gambar 8. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan besarnya nilai setting poin kecepatan yang diinginkan pada motor BLDC dari range 500 – 6000 rpm. Selain itu, nilai rise time yang dicapai pada masing- masing set poin telah di bahas pada bagian ini. Feedback yang digunakan pada control ini yakni besarnya pembacaan RPM motor yang digunakan sebagai referensi untuk input eror pada control fuzzy. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 berikut.



Gambar 7. Simulasi menggunakan MATLAB

Tabel 2. Hasil Pengujian *Close Loop* dengan Kontrol *Fuzzy*

Setting point (RPM)	Steady State Open loop (RPM)	Rise Time (s)	Steady State Close loop (RPM)	Rise Time (ms)	Error (%)	Error (%)
500	419.8	0,4	515	21,7	16	3
1000	809.4	0,39	1016	21,7	19	1.6
1500	1162	0,36	1515	21,7	22.5	1
2000	1488	0,34	2015	21,7	25.6	0.75
2500	1791	0,32	2515	21,7	28.3	0.6
3000	2076	0,31	3015	21,7	30.8	0.5
3500	2346	0,3	3515	21,7	32.9	0.42
4000	2602	0,29	4014	21,8	34.9	0.35
4500	2848	0,34	4514	21,5	36.7	0.31
5000	3083	0,34	5014	22,3	38.3	0.28
5500	3310	0,34	5514	22,6	29.8	0.25
6000	3529	0,34	6014	22,9	41.1	0.23



Gambar 8. Grafik Perbandingan data Simulasi menggunakan Fuzzy dan tidak menggunakan Fuzzy

Data hasil simulasi respon kecepatan dengan menggunakan metode FOC fuzzy memiliki hasil yang lebih baik yakni mendekati setting point yang diberikan dibandingkan kondisi *open loop*. Metode ini dapat memberikan eror steady state yang kecil pada nilai RPM yang kecil yakni ketika kecepatan referensi yang diatur adalah 500 RPM besar pembacaan hasil pengujian dengan fuzzy adalah 515 RPM dengan eror 1.6%. Kontroler ini dapat bekerja dengan beberapa setting point yang berbeda bahkan hingga RPM nominal dari motor yakni 6000 RPM. Respon dari kontrol ini sangat adaptif ketika diberikan perubahan set poin pada nilai yang diinginkan hingga pada kecepatannominal dari motor.

Perbandingan hasil dari metode FOC dan tanpa control dapat diketahui melalui gambar 8, Yang menunjukkan bahwa kinerja kontrol ini memiliki respon yang lebih cepat serta nilai keluaran rpm yang mendekati set poin. Sedangkan untuk karakteristik respon dari RPM hasil kontroler memiliki nilai rise time yang hampir sama yakni sebesar 21.7 ms tanpa adanya overshoot pada tiap setting poin. Dapat dibandingkan dengan pengujian tanpa kontrol yang memiliki nilai yang jauh dari referensi, artinya penggunaan metode FOC

fuzzy pada kontrol kecepatan motor BLDC dapat meningkatkan besar kecepatan yang diharapkan dengan selisih eror yang sangat kecil.

4. Kesimpulan

Hasil pengujian simulasi dengan metode FOC dan kontrol fuzzy pada motor BLDC dapat memberikan hasil eror yang kecil terhadap setting point. Hasil yang didapatkan dengan setting point terendah yakni 500 RPM memiliki eror 1.6 % dengan output kontroler sebesar 515 Rpm. Kenaikan step referensi RPM hingga nominal yakni 6000 RPM memiliki rise time yang cukup kecil yakni 21.7 ms pada masing-masing setting point tanpa adanya *overshoot*. Kontroler ini dapat bekerja pada sesuai dari referensi yang diberikan.

6. Daftar Pustaka

- [1] R. I. Putri, M. Fauziyah, and A. Setiawan, "Penerapan Kontroler Neural Fuzzy Untuk Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Pada Mesin Sentrifugal," no. 1, p. 13, 2009.
- [2] N. Evalina, "Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Programmable logic controller," vol. 3, no. 2, p. 8.

- [3] E. Nurcahyo and B. Prio Hartono, "Analisis Hemat Energi Pada Inverter Sebagai Pengatur Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa," *Elektrika: Jurnal Teknik Elektro*, Rabu, Agustus 2017.
- [4] E. S. Nasution and A. Hasibuan, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P," vol. 2, p. 10, 2018.
- [5] P. R. Bana, K. P. Panda, R. T. Naayagi, P. Siano, and G. Panda, "Recently Developed Reduced Switch Multilevel Inverter for Renewable Energy Integration and Drives Application: Topologies, Comprehensive Analysis and Comparative Evaluation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 54888–54909, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913447.
- [6] H. Hartono, R. I. Sudjoko, and P. Iswahyudi, "Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Universal Bridge and PID Controller," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1381, no. 1, p. 012053, Nov. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1381/1/012053.
- [7] Y. Xia, B. Gou, and Y. Xu, "A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter," *Prot Control Mod Power Syst*, vol. 3, no. 1, p. 33, Dec. 2018, doi: 10.1186/s41601-018-0109-x.
- [8] M. T. Setiawan, A. D. Efendi, and G. J. Rusmadi, "Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa melalui Arus Rotor menggunakan PI," *triac*, vol. 7, no. 2, pp. 40–42, Dec. 2020, doi: 10.21107/triac.v7i2.5921.
- [9] S. Eddine Rezugui, H. Benalla, and H. Bouhebel, "Hybrid bacteria foraging-particle swarm optimization algorithm in DTC performance improving for induction motor drive," *IJECS*, vol. 22, no. 2, p. 660, May 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v22.i2.pp660-669.
- [10] I. Ferdiansyah, E. Purwanto, and N. A. Windarko, "Fuzzy Gain Scheduling of PID (FGS-PID) for Speed Control Three Phase Induction Motor Based on Indirect Field Oriented Control (IFOC)," *emitter*, vol. 4, no. 2, Dec. 2016, doi: 10.24003/emitter.v4i2.147.
- [11] Electrical Eng. Department, University of Sulaimani, Sulaimani, Iraq, A. Omar, A. M. Abdulrahman, Department of Physics, College of Science, University of Sulaimani, Kurdistan Region, Iraq, G. I. Rashed, and Department of Physics, College of Science, University of Sulaimani, Kurdistan Region, Iraq, "Direct on Line Operation of Three Phase Induction Motor using MATLAB," *JZS-A*, vol. 21, no. 2, pp. 21–34, Aug. 2019, doi: 10.17656/jzs.10754.
- [12] M. A. Awdaa, A. A. Obed, and A. L. Saleh, "Three-phase Induction Motor SVPWM-FOC Control Based on PLC Matlab Translation Approach," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 745, no. 1, p. 012028, Feb. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/745/1/012028.
- [13] X.-C. Wang *et al.*, "Air pollution terrain nexus: A review considering energy generation and consumption," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 71–85, May 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.049.
- [14] P. Ewert, "Application of Neural Networks and Axial Flux for the Detection of Stator and Rotor Faults of an Induction Motor," *Power Electronics and Drives*, vol. 4, no. 1, pp. 203–215, Jun. 2019, doi: 10.2478/pead-2019-0001.
- [15] G. Nugroho and I. T. Sukmadi, "Perbandingan Sistem Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode Field Oriented Control Menggunakan Pi Controller Dan Fuzzy Logic Controller," p. 12.
- [16] E. A. T. Yuwono, A. Warsito, and M. Facta, "Inverter Multi Level Tipe Jembatan Satu Fasa Tiga Tingkat Dengan Mikrokontroler AT89S5," p. 6, 2011.

- [17] F. N. Budiman, N. A. Windarko, and S. Kuswadi, "Application of Genetic Algorithm to Minimize Harmonic in Multilevel Inverter," *JNTE*, vol. 5, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.20449/jnte.v5i1.192.
- [18] F. A. Izzaqi, N. A. Windarko, and O. A. Qudsi, "Minimization of total harmonic distortion in neutral point clamped multilevel inverter using grey wolf optimizer," *IJPEDS*, vol. 13, no. 3, p. 1486, Sep. 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1486-1497.
- [19] O. V. Kryukov, D. A. Blagodarov, N. N. Dulnev, Y. M. Safonov, N. N. Fedortsov, and A. A. Kostin, "Intelligent Control of Electric Machine Drive Systems," in *2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*, Novocherkassk, Oct. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571670.
- [20] I. P. Sutawinaya, "Pengembangan Model Fuzzy Mamdani Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Metode Kontrol Field Oriented," vol. 13, no. 2, p. 6, 2013.