

Analisis Efisiensi Kinerja Motor BLDC Menggunakan Metode Kontrol *Sliding Mode Observer* PI

Adi Mulyadi

adimulyadi@unibabwi.ac.id
Universitas PGRI Banyuwangi

Muhammad Zainal Roisul A

mzainalra@unibabwi.ac.id
Universitas PGRI Banyuwangi

Bambang Sri Kaloko

kaloko@unej.ac.id
Universitas Jember

Riska Fita Lestari

Riskaf128@gmail.com
Universitas PGRI Banyuwangi

R. B. Moch. Gozali

Gozali.teknik@unej.ac.id
Universitas Jember

Suprihadi

suprihadi.teknik@unej.ac.id
Universitas Jember

Abstrak

Tulisan ini membahas tentang efisiensi kinerja motor BLDC dengan membandingkan nilai antara input dan output kecepatan rotor (rpm). Efisiensi kinerja motor tanpa beban dan diberi beban tidak dapat mencapai nilai maksimal. Sehingga metode *Sliding Mode Observer Proportional-Integral* (SMO-PI) diusulkan untuk mendapatkan efisiensi yang diinginkan. SMO-PI dihitung berdasarkan nilai kecepatan rotor input pada set point kecepatan rotor (rpm). Hasil simulasi menunjukkan bahwa efisiensi kinerja motor BLDC menggunakan kontrol SMO-PI lebih optimal sebesar 99.76%, 99.94%, 99.93%, 100%, 100% pada kecepatan 500, 1000, 1500, 2000, dan 2500 rpm. Sedangkan nilai efisiensi kinerja motor BLDC tanpa kontrol PI pada kecepatan 500, 1000, 1500, 2000, dan 2500 rpm dengan efisiensi 92.06%, 91.48%, 91.67%, 91.65%, 91.64%, 91.65%.

Kata Kunci — Motor Brushless DC (BLDC), Kontrol SMO-PI, Efisiensi.

Abstract

This paper discusses the performance efficiency of BLDC motors by comparing the values between input and output rotor speed (rpm). The performance efficiency of the motor without load and under load cannot reach the maximum value. So the *Proportional-Integral Sliding Mode Observer* (SMO-PI) method is proposed to get the desired efficiency. SMO-PI is calculated based on the input rotor speed value at the rotor speed set point (rpm). The simulation results show that the performance efficiency of BLDC motors using SMO-PI control is more optimal at 99.76%, 99.94%, 99.93%, 100%, 100% at speeds of 500, 1000, 1500, 2000 and 2500 rpm. While the performance efficiency values of BLDC motors without PI control at speeds of 500, 1000, 1500, 2000 and 2500 rpm with efficiencies of 92.06%, 91.48%, 91.67%, 91.65%, 91.64%, 91.65%.

Keywords — Brushless DC Motor (BLDC), SMO-PI Control, Efficiency

I. PENDAHULUAN

Brushless DC Motor (BLDC) disebut dengan motor magnet permanen *direct current* (DC) tanpa sikat (*brush*) yang membutuhkan suplai tegangan DC dengan menggunakan bahan semikonduktor untuk mengubah arah putarannya dalam menggerakkan motor [1]. Motor BLDC berbeda dengan *ac synchronous motors*, dimana posisi rotor atau kutub magnet menghasilkan sinyal untuk dikontrol dengan saklar elektronik [2]. Pengontrolan kecepatan BLDC tidak maksimal pada kendaraan listrik dengan sistem beban dinamis [3]. Karena beban dinamis harus memperhatikan *set point* sebagai referensi kecepatan dan efisiensi tinggi [4]. Efisiensi tinggi motor BLDC dipengaruhi oleh torsi awal untuk menggerakkan beban. Beban BLDC yang digunakan dalam industri seperti peralatan industri HVAC, medis, peralatan militer, kendaraan listrik, dan *hard disk drive* [5].

Kinerja BLDC menggunakan *hybrid fuzzy/PI controller* diterapkan berdasarkan osilasi, *overshoot*, dan rugi-rugi gesek. *Output* logika dari pensaklaran dihasilkan oleh teknik *pulse-width-modulation* (PWM) [6]-[7]. Kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan teknik *Sliding Mode Observer* (SMO) berdasarkan estimasi *back-electromotive-force* (back-EMF), posisi rotor, dan pengukuran arus serta tegangan. Hasil simulasi diperoleh kecepatan, deteksi posisi rotor sangat efektif pada kecepatan motor lebih dari 3600 rpm [8]. Analisis kinerja motor BLDC diterapkan pada kontrol proses tekanan. Kontrol konvensional sulit diterapkan karena tidak mampu mengatasi waktu jeda, waktu naik, dan kesalahan *steady state*. Sehingga *hybrid fuzzy proporsional-integral-derivatif* (PID) digunakan untuk menganalisis kinerja kontrol. Analisis kinerja berdasarkan parameter waktu naik, puncak *overshoot*, dan

settling time. Hasil simulasi menunjukkan waktu naik, *overshoot* diredam oleh kontrol *fuzzy* dan *hybrid fuzzy* [9].

Sliding-Mode-Control (SMC) diusulkan untuk menggantikan kontrol konvensional *proportional-integral* (PI). Desain kontrol SMC dilakukan untuk memahami kinerja motor BLDC. Hasil simulasi memberikan keuntungan biaya yang rendah, dan desain kontroler lebih efisien untuk pemulihan gangguan lebih cepat [10]. Desain kontrol *modified model reference adaptive system* (MMRAS) diusulkan sebagai kinerja kontrol baru tanpa menghitung posisi sensor motor BLDC. Algoritma kontrol *recursive-least-square* (LSR) digunakan sebagai dampak pensaklaran *noise* dan pengurangan kebutuhan *filter*. Kontrol yang diusulkan menghasilkan kecepatan yang stabil dan pendekatan yang sesuai [11]. Adaptif *Sliding-Mode-Observer* (SMO) baru digunakan sebagai estimasi kinerja arus *stator*, *flux rotor*, dan kecepatan rotor. Peningkatan akurasi dari SMO selama operasi frekuensi rendah, *sliding-mode-flux-observer* diterapkan penguatan sendiri [12].

BLDC digunakan untuk menggerakkan kendaraan listrik dengan *hybrid-fuzzy* PI. *Fuzzy-logic-controller* (FLC) dapat memperbaiki kinerja transien dan kesalahan keadaan mantap lebih baik. Sedangkan kontrol PI memberikan respon keadaan mantap baik, tetapi respon transien buruk. Respon keadaan mantap dan transient agar dicapai lebih baik, maka *hybrid-fuzzy* PI diimplementasikan untuk mendapatkan kinerja kontrol mengikuti kebutuhan beban. Hasil implementasi menunjukkan bahwa kontrol PI memiliki puncak *overshoot*, respon lambat, tetapi menjaga akurasi keadaan mantap. Kemudian FLC memiliki *overshoot* nol, dan respon yang lebih cepat. Sedangkan kontrol *hybrid-fuzzy* PI dapat mengikuti dan mempertahankan kecepatan motor BLDC [13].

Analisis kinerja motor BLDC dilakukan pada *prototipe* kendaraan mobil listrik untuk mendapatkan tingkat efisiensi tinggi dan konsumsi daya rendah. Motor BLDC kapasitas 350 watt sebagai penggerak dan dikendalikan dengan inverter. Sedangkan suplai sumber menggunakan baterai 48 volt dan arus 10 ampere. Hasil kinerja motor BLDC menunjukkan efisiensi tinggi dengan daya rendah 6,64 Wh/Km dan kecepatan motor 187 sampai 623 rpm [14]. Kinerja motor BLDC dilakukan pengujian pada lintasan berbeda untuk mengetahui konsumsi energi yang digunakan. Pengujian berdasarkan parameter tegangan, arus, kecepatan dan daya pada setiap konsumsi energi. Hasil pengujian menghasilkan konsumsi energi motor pada jarak lintasan 11,6 km dengan maksimal kecepatan 24,744 km/jam, dan input daya 695,1204 Watt. Kecepatan minimal diperoleh sebesar 23,5008 km/jam dengan input daya 605,3653 Watt [15].

Efisiensi energi motor BLDC dianalisis pada kendaraan *urban car*. Jenis motor BLDC menggunakan 72 volt dengan daya 7kW dan kontrol KBL72401E. Hasil pengujian menunjukkan tingkat efisiensi minimal energi sebesar 12,6% dan maksimal sebesar 82,4%. Nilai efisiensi dihitung berdasarkan daya masukan dan keluaran yang dihasilkan oleh motor. Semakin tinggi efisiensi, maka konsumsi arus juga meningkat [16]. Simulasi kecepatan motor BLDC dilakukan berdasarkan variasi beban dengan *power-simulator-software*

(PSIM). Hasil pengujian pada beban maksimal 20 Nm dihitung untuk menghasilkan putaran maksimal 1442,05 rpm dengan efisiensi yaitu 81,25%. Sedangkan kecepatan motor pada beban 30 Nm menurun 1221,51 rpm dengan efisiensi 78,34% [17]. Efisiensi motor BLDC jenis *Golden Motor Magic Pie 5* dan *Mitsuba M104R* dibandingkan pada kendaraan listrik. Kendaraan listrik memiliki kecepatan rendah dan mahal daripada kendaraan konvensional. Hasil pengujian diperoleh bahwa *Golden Motor Magic Pie 5* memiliki efisiensi 78% dan *Mitsuba M104R* 92% [18].

Motor BLDC dimodifikasi pada generator sinkron putaran rendah untuk mencapai efisiensi yang baik. *Permanent-magnet-synchronous-generator* (PMSG) diusulkan karena memiliki putaran rendah atau tinggi serta efisiensi lebih baik dibandingkan generator induksi. PMSG mempunyai 12 magnet permanen yang terbuat dari barium ferrite. Hasil pengujian modifikasi BLDC mendapatkan daya 855 Va pada putaran 1300 rpm, tegangan 200 Vac, 350 Vac dengan efisiensi 68,2% [19]. Efisiensi pengujian dua *3-phase* BLDC motor menggunakan *magnet permanent axial-flux* dengan ukuran 20x2 mm dan 15x2 mm. Perbandingan efisiensi dilihat pada pengujian tanpa beban dan diberikan beban. Hasil efisiensi *3-phase* BLDC motor tanpa beban sebesar 98,1% dan pada saat diberikan beban yaitu 32,2% [20]-[21].

Penelitian yang dilakukan tentang analisis kinerja motor BLDC menggunakan *hybrid fuzzy/PI controller* dengan teknik PWM menghasilkan osilasi, *overshoot*, dan rugi-rugi gesek [6]-[7]. Kemudian teknik SMO diusulkan untuk menganalisis kinerja motor BLDC. Teknik SMO efisien pada putaran motor 3600 rpm [8]. Motor BLDC yang diterapkan dengan *hybrid fuzzy* PI pada proses kontrol tekanan mengurangi *overshoot* dan waktu naik. Sedangkan waktu jeda dan *error steady state* tidak [9]. Kontrol SMC diaplikasikan pada motor BLDC untuk menggantikan kontrol konvensional PI dan analisis kinerja motor. Hasil implementasi kontrol SMC hanya dapat mengurangi biaya lebih rendah dan efisien pada saat diberi beban [10]. Adaptif SMO dianalisis pada kinerja motor BLDC. Peningkatan akurasi SMO dapat berkerja pada frekuensi rendah [12]. *Hybrid fuzzy* PI dan FLC digunakan untuk memperbaiki respon transien dan kesalahan keadaan mantap motor BLDC. Namun penerapan *hybrid fuzzy* PI dan FLC mempunyai *overshoot* dan respon lambat [13].

Efisiensi motor BLDC 350 watt dilakukan pada kendaraan listrik. Motor BLDC mendapatkan efisiensi yang tinggi dengan konsumsi daya rendah 6,64 Wh/Km [14]. Kendaraan listrik *urban car* dengan 2 jenis penggerak motor BLDC diuji berdasarkan tingkat efisiensi energi yang digunakan. Pengujian tingkat efisiensi energi diperoleh minimal 12,6% dan maksimal 82,4% [16]. Simulasi kecepatan motor BLDC dilakukan berdasarkan variasi beban menggunakan PSIM. Putaran maksimal motor 1442,05 rpm dengan efisiensi 81,3% dan putaran minimal 1221,51 rpm dengan efisiensi lebih kecil 78,34% [17]. Perbandingan efisiensi dua jenis motor BLDC tipe *Golden Motor Magic Pie 5* dan *Mitsuba M104R* pada kendaraan listrik dilakukan. Jenis *Mitsuba M104R* lebih efisien 92% dibandingkan jenis *Golden Motor Magic Pie 5* yaitu 78% [18]. Hasil pengujian modifikasi BLDC

mendapatkan daya 855 Va pada putaran 1300 rpm, tegangan 200 Vac, 350 Vac dengan efisiensi 68,2% [19]. Efisiensi pengujian dua 3-phase BLDC motor. Hasil efisiensi tanpa beban sebesar 98,1% dan pada saat diberikan beban yaitu 32,2% [20]-[21].

Berdasarkan kinerja motor BLDC dengan metode *hybrid fuzzy PI* menghasilkan osilasi dan *overshoot*, sedangkan SMO dapat efisien pada putaran tinggi. Kontrol SMC hanya dapat mengurangi efisien pada saat diberi beban. *Hybrid fuzzy PI* dan FLC mempunyai *overshoot* dan respon lambat. Efisiensi yang tinggi dengan konsumsi daya rendah pada motor BLDC. Pengujian motor BLDC pada *urban car* dengan efisiensi energi minimal 12,6% dan maksimal 82,4%. Putaran maksimal motor 1442,05 rpm dengan efisiensi 81,3% dan putaran minimal 1221,51 rpm dengan efisiensi lebih kecil 78,34%. Jenis *Mitsuba M104R* lebih efisien 92% dibandingkan jenis *Golden Motor Magic Pie 5* yaitu 78% dan efisiensi 3-phase BLDC motor tanpa beban sebesar 98,1% dan pada saat diberikan beban yaitu 32,2%. Oleh sebab itu, metode kontrol *sliding mode observer* (SMO) dengan integrasi *proportional-integral* (PI) diusulkan untuk mendapatkan efisiensi kinerja motor BLDC. Desain kontrol membandingkan nilai *set point* kecepatan rotor (rpm) pada BLDC mulai 500 rpm sampai 2500 rpm dengan interval 500 rpm. Kontrol PI yang berfungsi sebagai regulator rpm agar kecepatan motor BLDC mempunyai efisiensi kinerja maksimal 99-100%.

II. METODE PENELITIAN

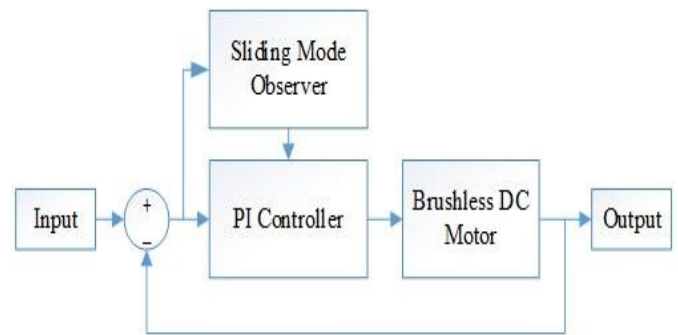
A. *Sliding Mode Observer Integrasi PI Controller*

Konfigurasi sistem kontrol kecepatan motor BLDC membandingkan antara kecepatan motor BLDC tanpa kontrol dengan rangkaian kontrol *Sliding Mode Observer Propotional-Integral* (SMO-PI) [22]. Kontrol PI digunakan sebagai regulator rpm agar kecepatan motor BLDC mempunyai efisiensi kinerja maksimal. SMO mempunyai parameter handal terhadap parameter yang tidak diketahui untuk menghitung *trapezoidal back-EMF*. *Trapezoidal back-EMF* digunakan untuk menentukan posisi rotor dan kecepatan sudut rotor. Sehingga torsi dapat ditentukan berdasarkan pencarian arus *back-EMF*. Kecepatan motor dimodelkan dalam matlab simulink [23].

B. *Rancangan Sistem Sliding Mode Observer Integrasi PI Controller*

Skema pemodelan sistem kontrol SMO-PI pada penelitian ini direpresentasikan oleh gambar 1. Diagram blok sistem pengendalian kecepatan rotor BLDC dengan memasukkan *set point* berupa kecepatan motor BLDC yang diinginkan dan selisih pembacaan sensor kecepatan rotor BLDC. Hasil selisih kecepatan rotor (*error* kecepatan rotor) dikontrol oleh SMO-PI agar untuk mengendalikan kecepatan rotor *plant motor* BLDC sampai efisiensi kenerja tercapai sesuai yang diinginkan [24]. Ketika SMO mencapai permukaan *sliding mode*. *Error* arus dan *error* derivatif keduanya mencapai nilai nol [25]. Kecepatan sudut dan torsi sebagai variabel, torsi elektromekanik sebagai sistem *input* dan kecepatan sudut sebagai *output* sistem [26]. *Sliding surface* dapat mengurangi kesalahan sistem, tetapi menyebabkan respon osilasi. Integral

sliding mode digunakan untuk menghindari saturasi ketika kesalahan sistem lebih besar dari *threshold* [27].



Gbr 1. Skema Pemodelan Sistem Kontrol *Sliding Mode Observer-PI*

C. *Paramater Motor Brushless DC (BLDC)*

Tabel 1. Paramater Motor *Brushless* DC (BLDC)

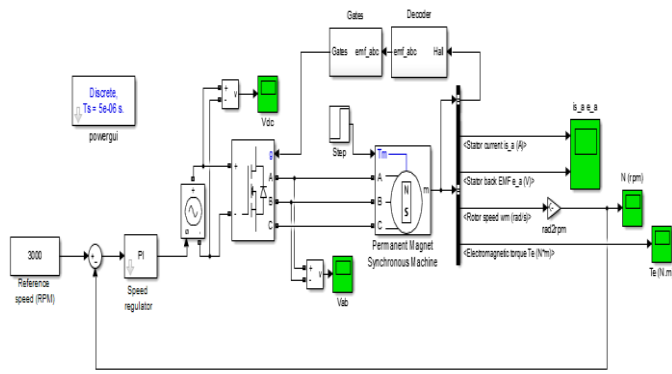
Parameter	Nilai
Rated Power	874 Watt
Rated Speed	2820 rpm
Rated Torque	2.9588 Nm
Resistance	0,408 Ohm
Inductance	1.71 mH
Speed Constant	29.239 krpm/V
Torque Constant	0,3269 Nm/A
No. Of Poles	8
Momen Of Inersia	0,4939x10 ⁻³ Kg.m ²
No load Speed	2920 rpm
No Load Current	0,7 A

Sumber: Matlab

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Perancangan Simulasi Motor Brushless DC*

Sistem ini di desain dengan sebuah rangkaian simulasi menggunakan *software* Matlab sebagai bahan analisis. Perancangan ini menggunakan motor *BLDC* dengan *modeling* kontrol PI. Dari hasil simulasi seluruh sistem dibuat analisa dan hasilnya berupa kecepatan rotor dengan membandingkan hasil simulasi antara motor *BLDC* tanpa kontrol dengan kontrol *Sliding Mode Observer-PI* (SMO-PI). Simulasi dalam *software Matlab* dengan variabel perubahan kecepatan rotor (rpm) pada motor BLDC tanpa kontrol dan kecepatan rotor (rpm) pada motor BLDC terkontrol. Nilai *set point* kecepatan rotor (rpm) pada Motor Brushless DC mulai 500 rpm sampai 2500 rpm dengan *interval* 500 rpm. Perancangan sistem ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gbr 2. Kontrol Motor BLDC Model

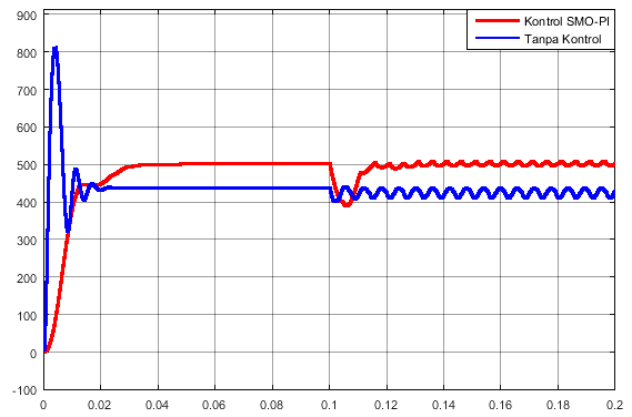
B. Hasil Pengujian Menggunakan Kontrol SMO-PI dan tanpa Kontrol dengan nilai set-point kecepatan motor bervariasi.

Tabel 2 menjelaskan variasi kecepatan motor 500, 1000, 1500, 2000, dan 2500 rpm. Variasi kecepatan diikuti oleh efisiensi kontrol SMO-PI dan tanpa kontrol berdasarkan peningkatan kecepatan rotor BLDC.

Tabel 2. Set point Kecepatan Motor 500-2500 rpm

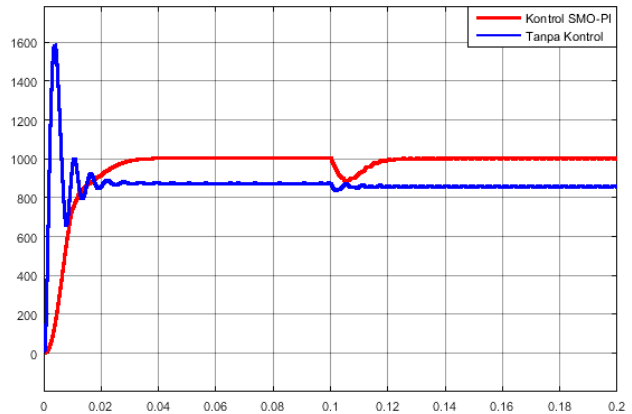
Set Point (rpm)	SMO-PI (rpm)	Efisiensi (%)	Tanpa PI (rpm)	Efisiensi (%)
500	498.3	99.76	460.3	92.06
1000	999.4	99.94	914.8	91.48
1500	1499	99.93	1375	91.67
2000	2000	100	1833	91.65
2500	2500	100	2291	91.64

Tabel 2 menunjukkan bahwa saat pengaturan set point motor BLDC 500 rpm nilai kecepatan rotor menggunakan kontrol SMO-PI sebesar 498,3 rpm dan efisiensi 99,76%. Sedangkan putaran rotor tanpa kontrol PI didapatkan sebesar 460,3 rpm dengan efisiensi 92,06%. Perbedaan efisiensi tanpa kontrol dengan kontrol SMO-PI dipengaruhi oleh selisih daya input dan output pada kecepatan rotor tanpa beban. Kecepatan rotor tanpa beban mempengaruhi nilai efisiensi yang optimal. Namun pada saat motor BLDC diberi beban, nilai efisiensi kinerja akan menurun [28].



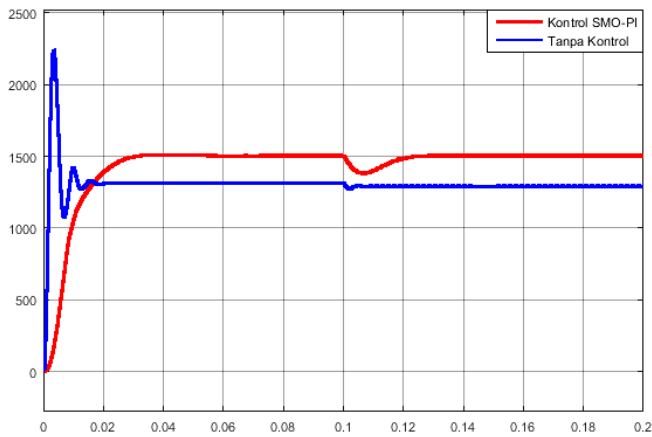
Gbr 3. Respon Kecepatan Motor BLDC 500 rpm

Gambar 4 menunjukkan pengaturan set point motor BLDC 1000 rpm nilai kecepatan rotor menggunakan kontrol SMO-PI sebesar 999.4 rpm dan efisiensi 99.94%. Sedangkan putaran rotor tanpa kontrol PI didapatkan sebesar 914.8 rpm dengan efisiensi 91.48%. Perbedaan efisiensi tanpa kontrol dengan kontrol SMO-PI dipengaruhi oleh selisih daya input dan output pada kecepatan rotor. Semakin besar kecepatan rotor, maka efisiensi semakin optimal [29].



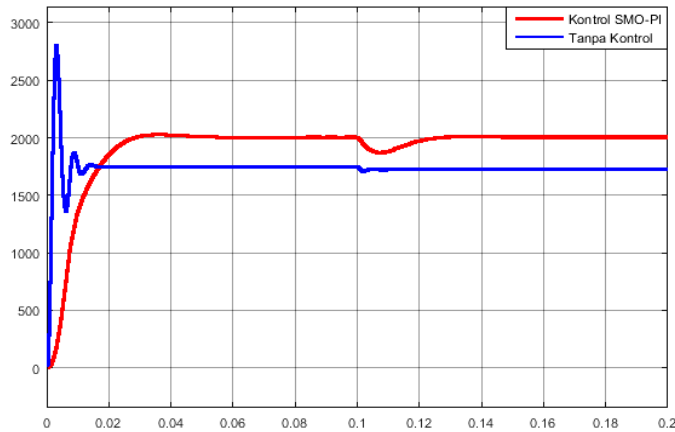
Gbr 4. Respon Kecepatan Motor BLDC 1000 rpm

Gambar 5 menunjukkan pengaturan set point motor BLDC 1500 rpm nilai kecepatan rotor menggunakan kontrol SMO-PI sebesar 1499 rpm dan efisiensi 99.93%. Sedangkan putaran rotor tanpa kontrol PI didapatkan sebesar 1375 rpm dengan efisiensi 91.67%. Perbedaan efisiensi tanpa kontrol dengan kontrol SMO-PI dipengaruhi oleh daya input dan output pada kecepatan rotor [30].

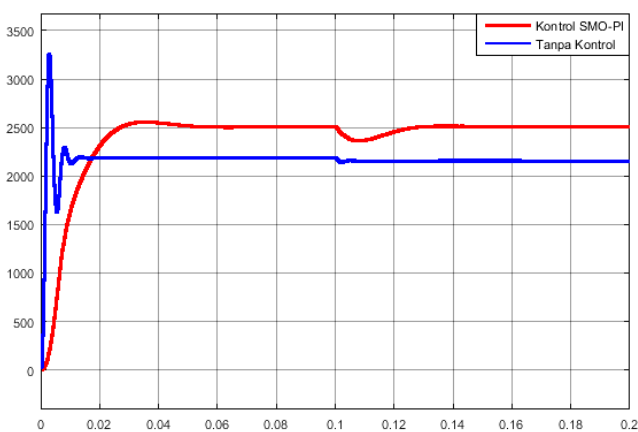


Gbr 5. Respon Kecepatan Motor BLDC 1500 rpm

Gambar 6 menunjukkan pengaturan *set point* motor BLDC 2000 rpm nilai kecepatan rotor menggunakan kontrol SMO-PI sebesar 2000 rpm dan efisiensi 100%. Sedangkan putaran rotor tanpa kontrol PI didapatkan sebesar 1833 rpm dengan efisiensi 91.65%. Perbedaan efisiensi tanpa kontrol dengan kontrol SMO-PI dipengaruhi oleh daya *input* dan *output* pada kecepatan rotor.



Gbr 6. Respon Kecepatan Motor BLDC 2000 rpm



Gbr 7. Respon Kecepatan Motor BLDC 2500 rpm

Gambar 7 menunjukkan pengaturan *set point* motor BLDC 2500 rpm nilai kecepatan rotor menggunakan kontrol SMO-PI sebesar 2500 rpm dan efisiensi 100%. Sedangkan putaran rotor tanpa kontrol PI didapatkan sebesar 2291 rpm dengan efisiensi 91.64%. Perbedaan efisiensi tanpa kontrol dengan kontrol SMO-PI dipengaruhi oleh daya *input* dan *output* pada kecepatan rotor.

IV. KESIMPULAN

Efisiensi kinerja motor BLDC menggunakan kontrol SMO-PI lebih optimal dibandingkan tanpa kontrol. Hal ini ditunjukkan pada variasi kecepatan motor BLDC dari 500 sampai 2500 rpm. Hasil efisiensi kinerja motor BLDC menggunakan kontrol SMO-PI sebesar 99.76%, 99.94%, 99.93%, 100%, 100% pada kecepatan 500, 1000, 1500, 2000, dan 2500 rpm. Sedangkan nilai efisiensi kinerja motor BLDC tanpa kontrol PI pada kecepatan 500, 1000, 1500, 2000, dan 2500 rpm dengan efisiensi 92.06%, 91.48%, 91.67%, 91.65%, 91.64%, 91,65%.

REFERENSI

- [1] R. Hazari and E. Jahan, "Design of a Brushless Dc Motor for Missile Applications," in *International conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology(ICEEICT)*, 2014, pp. 0–5.
- [2] T. and S. N. Kenjo, *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*. United States of America: Clarendon Press. Oxford, 1985.
- [3] S. Mondal, A. Nandi, I. Mallick, C. Ghosh, and A. Giri, "Performance evaluation of brushless DC motor drive for three different types of MOSFET based DC-DC converters," in *Proceedings of 2nd International Conference on 2017 Devices for Integrated Circuit, DevIC 2017*, 2017, pp. 589–593.
- [4] A. Jaya, E. Purwanto, M. B. Fauziah, F. D. Murdianto, G. Prabowo, and M. R. Rusli, "Design of PID-fuzzy for speed control of brushless DC motor in dynamic electric vehicle to improve steady-state performance," in *Proceedings IES-ETA 2017 - International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications*, 2017, vol. 2017-Decem, pp. 179–184.
- [5] J. K. Mandal, S. C. Satapathy, M. K. Sanyal, and V. Bhateja, "A New Implementation Scheme in Robotic Vehicle Propulsion Using Brushless DC Motor," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, vol. 458, pp. 387–394.
- [6] D. Akbar and S. Riyadi, "Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (Pulse Width Modulation)," in *Seminar Nasional Instrumentasi Kontrol dan Otomasi (SNIKO) 2018*, 2018, pp. 2–2.
- [7] P. Suganthi, S. Nagapavitha, and S. Umamaheswari, "Modeling and Simulation of Closed Loop Speed Control for BLDC Motor," in *IEEE Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS 2017)*, 2012, no. March, pp. 83–126.
- [8] M. Topal, I. Iskender, and N. Genc, "Sensorless Speed Control of a BLDC Motor Using Improved Sliding Mode

- Observer Technique,” *Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [9] T. Anitha, G. Gopu, M. Nagarajapandian, and P. A. M. Devan, “Hybrid Fuzzy PID Controller for Pressure Process Control Application,” in *2019 IEEE Student Conference on Research and Development, SCORed 2019*, 2019, pp. 129–133.
- [10] P. I. T. Chang, X. Y. Lin, and I. J. Yu, “Sensorless BLDC Motor Sliding Mode Controller Design for Interference Recovery,” *2019 6th Int. Conf. Control. Decis. Inf. Technol. CoDIT 2019*, pp. 1780–1785, 2019.
- [11] S. Geraee, M. Shafiei, A. R. Sahami, and S. Alavi, “Position sensorless and adaptive speed design for controlling brushless DC motor drives,” *2017 North Am. Power Symp. NAPS 2017*, 2017.
- [12] M. S. Zaky, M. K. Metwaly, H. Z. Azazi, and S. A. Deraz, “A New Adaptive SMO for Speed Estimation of Sensorless Induction Motor Drives at Zero and Very Low Frequencies,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 9, pp. 6901–6911, 2018.
- [13] B. N. Kommula and V. R. Kota, “Performance Evaluation of Hybrid Fuzzy PI Speed Controller for Brushless DC Motor for Electric Vehicle Application,” in *2015 Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth, PCCCTSG 2015*, 2016, no. 1, pp. 266–270.
- [14] Jatmiko, A. Basith, A. Ulinuha, M. A. Muhlasin, and I. Shokhibul Khak, “Analisis Performa dan Konsumsi Daya Motor BLDC 350 W pada Prototipe Mobil Listrik Ababil,” *Emit. J. Tek. Elektro*, vol. 18, no. 02, pp. 55–58, 2018.
- [15] N. I. Suendri, S. Hani, and D. S. Priyambodo, “Analisis Performa Brushless Motor Dc Pada Mobil Listrik Molista,” *J. Elektr.*, vol. 5, no. 1, pp. 18–26, 2018.
- [16] M. B. Dwifa and Munadi, “Pengujian Efisiensi Energi Motor BLDC 72 Volt – 7kW untuk Aplikasi Model Electric Urban Car,” in *Prosiding Seminar Nasional ReTII ke-10 2015*, 2017, pp. 2–7.
- [17] M. H. As-Salaf and Syahrial, “Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Software PSIM,” *J. Multimed. Artif. Intell. Netw. Database*, vol. 6, no. 1, pp. 103–117, 2021.
- [18] M. Fikri, M. Fordry Okta, and A. Bagus, “Analisis Perbandingan Performa Golden Motor Magic Pie 5 dan Mitsuba M1048R Sebagai Penggerak Kendaraan Listrik,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 6, no. 3, pp. 147–151, 2015.
- [19] D. G. Ramdhany, N. Hiron, and N. Busaeri, “Modifikasi Motor Brushless Dc Menjadi Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial Putaran Rendah,” *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 27–33, 2021.
- [20] A. Nurmalia, W. Hadi, and W. Cahyadi, “Performance Test of Three-Phase Brushless Direct Current Motor Axial Flux with Differences Diameter of Neodymium Type Permanent Magnet,” *Elkha*, vol. 13, no. 1, p. 55, 2021.
- [21] M. A. Izzati and N. Gusnita, “Analisis Performa dan Daya Konsumsi Brushless Direct Current,” *Briliant J. Ris. dan Konseptual*, vol. 7, no. November, pp. 1104–1115, 2022.
- [22] D. Liang, J. Li, and R. Qu, “Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Second-Order Sliding-Mode Observer With Online Resistance Estimation,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 4, pp. 3672–3682, 2017.
- [23] K. Venkateswari, “A sensor less BLDC motor drive using sliding mode observer for electric vehicle,” *Malaya J. Mat.*, vol. 119, no. 2, pp. 3544–3548, 2020.
- [24] M. Poovizhi, M. Senthil Kumaran, P. Ragul, L. Irene Priyadarshini, and R. Logambal, “Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor(BLDC) drives by using MATLAB-SIMULINK,” *Int. Conf. Power Embed. Drive Control. ICPEDC 2017*, pp. 178–183, 2017.
- [25] S. Liu, Z. Qiu, and W. Chen, “Sensorless Control with Sliding Mode Observer for a Brushless DC Motor based on Concave Function,” *Proc. 2019 IEEE 3rd Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC 2019*, no. Imceec, pp. 872–876, 2019.
- [26] I. N. Syamsiana and M. Wang, “A Study of Sliding Mode Observer Sensorless of Brushless Motor using Embedded Coder Matlab/Simulink,” in *ICEEIE 2019 - International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering: Emerging Innovative Technology for Sustainable Future*, 2019, no. 1, pp. 1–6.
- [27] N. Jin, X. Wang, and X. Wu, “Current sliding mode control with a load sliding mode observer for permanent magnet synchronous machines,” *J. Power Electron.*, vol. 14, no. 1, pp. 105–114, 2014.
- [28] A. Ramadhan and M. T. Tamam, “Perancangan Permanent Magnet Synchronous Generator Kapasitas 22 KVA Menggunakan Metode Finite Element Method,” *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 3, no. 2, pp. 83–90, 2021.
- [29] M. N. Kholis, “Rancangan permanent magnet synchronous generator (pmsg) 12 slot 8 pole dengan menggunakan software magnet infolytica 7.5,” pp. 5–19, 2020.
- [30] A. Islam, N. Ternate, and B. Android, “Analisis Perbandingan Bahan Material Magnet Dalam Pemodelan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) 12 Slot 8 Kutub Dengan Menggunakan Finite Element Method (FEM) Software,” pp. 1–10, 2019.

