



# Perancangan Kendali Motor Induksi Menggunakan Variable Speed Drive

Mery Nur Laili<sup>1</sup>, Muhammad Cahyo Bagaskoro<sup>2</sup>, Langlang Gumilar<sup>3</sup>, Mohamad Rodhi Faiz<sup>4</sup>, Aripriharta<sup>5\*</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5 Malang 65145, Jawa Timur, Indonesia

<p><b>INFORMASI ARTIKEL</b></p>	<p><b>ABSTRAK</b></p>
<p>Received: December 08, 2022 Revised: February 26, 2023 Available online: April 12, 2023</p>	<p>Saat ini, motor sering digunakan sebagai penggerak utama pada banyak mesin untuk aplikasi industri dan pertambangan. Oleh karena itu, lebih dari 65% energi listrik yang dikonsumsi oleh industri digunakan oleh motor tersebut. Motor induksi didasarkan pada prinsip induksi elektromagnetik, yaitu sebuah gaya gerak listrik terinduksi akan terjadi ketika medan magnet berputar dan melintasi konduktor listrik. Kecepatan putar pada motor induksi tergantung pada frekuensi tegangan yang diberikan ke motor tersebut. Ketika beban bertambah, kecepatan putar motor akan berubah. Variable Speed Drive (VSD) berfungsi untuk mengatur frekuensi tegangan yang diberikan ke motor, sehingga kecepatan putar motor dapat diatur meskipun beban yang digunakan bervariasi. Dengan demikian, VSD digunakan untuk memperoleh nilai kecepatan putaran motor yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Pengujian dilakukan dengan melakukan analisis terhadap proses kerja perangkat VSD untuk mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa. Parameter pengujian berupa arus stator (Is), kecepatan putar rotor (Nr), dan torsi elektromagnetik (Te). Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diketahui bahwa pemasangan VSD pada motor memiliki kemampuan untuk mengatur kecepatan motor dengan baik.</p> <p>Kata kunci— Frekuensi, Kendali Motor, Motor Induksi, dan Variable Speed Drive</p>
<p><b>CORRESPONDENCE</b></p>	<p><b>ABSTRACT</b></p>
<p>E-mail: <a href="mailto:aripriharta.ft@um.ac.id">aripriharta.ft@um.ac.id</a> Phone: +62 821 3258 0202</p>	<p>Today, motors are often used as prime movers in many machines for industrial and mining applications. Therefore, more than 65% of the electrical energy consumed by industries is used by such motors. Induction motors are based on the principle of electromagnetic induction, i.e. an induced electromotive force will occur when a magnetic field rotates and crosses an electrical conductor. The rotational speed of an induction motor depends on the frequency of the voltage applied to the motor. When the load increases, the rotational speed of the motor will change. Variable Speed Drive (VSD) functions to adjust the frequency of the voltage applied to the motor, so that the rotational speed of the motor can be adjusted even though the load used varies. Thus, VSD is used to obtain a motor rotation speed value that can be adjusted as needed. The test was conducted by analysing the working process of the VSD device to regulate the speed of a 3-phase induction motor. The test parameters are stator current (Is), rotor rotational speed (Nr), and electromagnetic torque (Te). Based on the test results, it is known that the installation of VSD on the motor has the ability to regulate the motor speed properly.</p> <p>Keywords— Frequency, Motor Control, Induction Motor and Variable Speed Drive</p>

## I. PENDAHULUAN

Motor induksi semakin umum digunakan sebagai penggerak utama pada sebagian besar mesin untuk aplikasi industri dan pertambangan [1]. Sebagian besar energi listrik industri digunakan oleh motor, dengan persentase konsumsi mencapai lebih dari 65% [2-4]. Memiliki konstruksi yang sederhana dengan efisiensi dan ketahanan yang tinggi, keandalan, biaya yang rendah serta perawatan yang mudah

menjadikan motor induksi banyak diminati. Sebuah motor induksi hanya membutuhkan suplai utama (1 fasa atau 3 fasa) bergantung pada konstruksi motor yang digunakan [5]. Motor induksi memiliki kecenderungan berputar pada kecepatan yang konstan serta memiliki kontrol kecepatan yang sangat buruk. Dalam aplikasi industri, beberapa proses menuntut kecepatan dan torsi yang sangat presisi [6] sehingga untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan sebuah

perangkat untuk mengatur variabel kecepatan pada sebuah motor induksi.

Dibandingkan dengan soft starter yang hanya mengurangi lonjakan arus pada motor, variable speed drive (VSD) menjadi salah satu alternatif yang lebih banyak dipilih selain karena bisa memberikan start-up yang halus, kecepatan putaran juga dapat diubah sesuai kebutuhan dengan memvariasikan nilai tegangan yang disuplai ke motor. Menurut [7], penggunaan VSD menjadi salah satu alasan utama untuk penghematan energi karena VSD dapat mengubah kecepatan motor listrik dengan mengontrol daya yang diumpangkan pada mesin. Permasalahan yang dibahas mengenai bagaimana pengaruh variasi nilai V/f dan indeks modulasi terhadap kerja VSD saat diberi beban dengan tujuan utama pada penelitian ini adalah untuk mendapatkan hasil dari proses kerja VSD pada setiap perubahan variabel yang diuji dan menganalisa pengaruh tersebut sesuai dengan karakteristik beban yang dipakai. Sehingga pada studi kasus berikut, penulis melakukan pengujian dengan menganalisa operasi perangkat kecepatan variabel (VSD) dalam mengatur kecepatan motor induksi menggunakan parameter utama yaitu arus, kecepatan, dan torsi.

## II. PENELITIAN RELEVAN

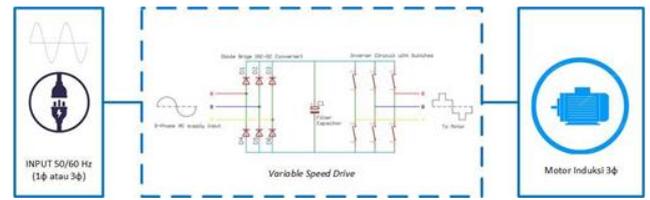
Menurut [8], kontrol kecepatan motor induksi menggunakan variable frequency drive dapat menghemat energi dengan mengurangi kecepatan sesuai hukum dan persamaan afinitas. Literatur [9,10] dan [11] menggunakan variable frequency drive untuk mengatur kecepatan pada sistem pemompaan sebagai upaya dalam operasi hemat energi. Dilakukan pemodelan terhadap kurva kinerja pada pompa dengan memperkirakan parameter seperti laju aliran dan nilai tekanan untuk adaptasi otomatis dalam VFD.

Penulis [12] mengkaji beberapa teknik estimasi kecepatan pada drive motor induksi untuk membuat IM-VFD lebih efektif selama operasi kecepatan yang lebih lebar termasuk wilayah kecepatan sangat tinggi dan sangat rendah. VFD memantau berbagai data operasional motor, termasuk frekuensi, arus, tegangan, dan daya. Frekuensi dan arus yang dihasilkan oleh VFD memberikan nilai yang sangat akurat sesuai dengan nilai sebenarnya, sedangkan tegangan dan daya memiliki hubungan konsisten dengan nilai aktual tetapi tidak dapat memberikan nilai yang akurat secara langsung [13].

## III. TINJAUAN PUSTAKA

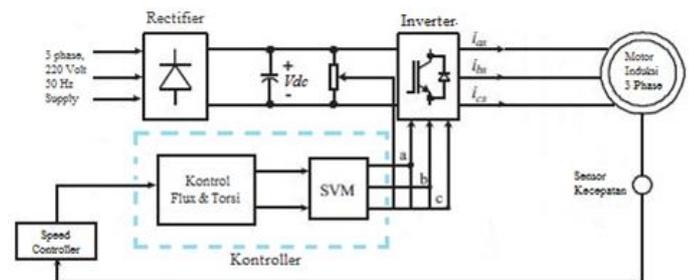
### A. Motor Induksi

Motor induksi merupakan jenis asynchronous motor yang beroperasi pada kecepatan dibawah kecepatan sinkron, karena kecepatan rotor tidak cukup sinkron dengan fluks stator yang berputar. Dimana untuk menghasilkan torsi, rotor harus berputar pada kecepatan yang lebih lambat atau lebih cepat daripada kecepatan sinkron. Akibatnya, rotor mengendap pada kecepatan yang lebih rendah dari fluks yang berputar, yang memberikan torsi yang cukup untuk mengatasi gesekan bantalan dan lilitan.



Gambar. 1 Blok Diagram Sistem

Gambar 1 menunjukkan sistem yang diusulkan dalam penelitian ini. Pada gambar 1. motor induksi memperoleh suplai tegangan ac dari sumber yang terlebih dahulu melewati *rectifier*, tegangan diubah menjadi dc oleh dioda. Selanjutnya, dc link akan melakukan filter pada tegangan yang masih mengandung *ripple ac*. Kemudian, tegangan akan dikonversi kembali menjadi tegangan ac oleh inverter.



Gambar. 2 Blok Diagram Sistem yang Diusulkan

Dalam mengatur kecepatan motor, kontroler digunakan untuk mengatur frekuensi yang akan disampaikan ke motor melalui inverter, sehingga kecepatan rotasi motor dapat disesuaikan dengan referensi kecepatan yang telah ditetapkan. Sistem kontrol untuk variable speed drive yang dipakai yaitu *Direct Torque Control (DTC)* seperti pada Gambar 2. Salah satu cara untuk mengatur kecepatan pada motor induksi tiga fasa adalah melalui DTC, yang melibatkan pengendalian nilai fluks dan torsi untuk mendapatkan perkiraan kecepatan motor [14].

### B. Variabel Speed Drives

Variable speed drive atau juga dikenal dengan Variable frequency drive bekerja dengan mengubah frekuensi daya listrik yang masuk ke motor ac sehingga torsi dan kecepatan putar motor dapat divariasikan sesuai dengan keinginan [15]. Variable speed drive akan mengubah frekuensi grid dan menyesuaikan nilai pada sisi mesin untuk mengatur kecepatan motor induksi [16].

### C. Inverter

Menurut [17], besar tegangan output yang dihasilkan oleh suatu inverter bergantung pada proses pensaklaran dari 6 buah saklar semi konduktor yang terpasang. Dalam penelitiannya, [18] menyebutkan bahwa inverter AC-DC biasanya beroperasi menggunakan teknik pulse width modulation (PWM). Untuk menampilkan keluaran inverter yang ideal dimana gelombang arus yang dihasilkan harus terdistorsi dalam harmonik yang rendah, pada sistem tiga fasa penggunaan 6-pulse-(three-leg) bridge inverter dinilai lebih ekonomis.

### D. Control Circuits

Teknik PWM yang paling umum digunakan pada inverter tiga fasa adalah modulasi lebar pulsa sinusoidal [19]. Pada control circuits, tiga buah sinyal sinusoidal

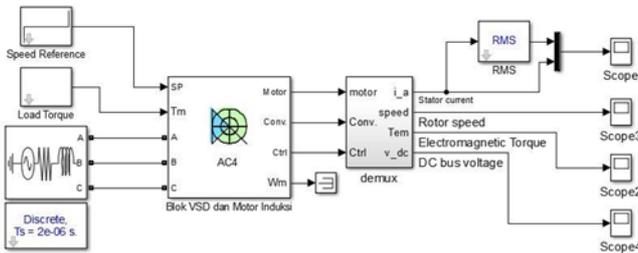
sebagai tegangan referensi dibandingkan dalam tiga pembanding terpisah dengan sinyal segitiga sebagai tegangan carrier terpisah dimana pada masing-masing sinyal memiliki beda fasa 120°.

IV. METODE PENELITIAN

Untuk merealisasikan tujuan pada penelitian ini, dilakukan skenario pengujian pada sistem dengan menunjukkan kondisi sesungguhnya dari motor induksi yang kecepatannya dikontrol menggunakan Variable Speed Drive (VSD) berdasarkan data dan literatur yang telah didapatkan. Tujuan pemodelan sistem ini untuk mengetahui dan memahami prinsip kerja dari VSD dalam mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa untuk setiap perubahan variabel yang akan diuji kemudian melakukan analisa terkait pengaruh hasil uji sesuai dengan karakteristik beban yang dipakai. Pemodelan terhadap sistem yang akan diuji dibuat menggunakan software powersim dan hasil yang didapatkan akan dipaparkan ke dalam bentuk tabel serta grafik.

V. SKENARIO PENGUJIAN

Skenario pengujian bertujuan mengetahui kondisi sesungguhnya dari motor yang kecepatannya diatur menggunakan variable speed drive (VSD) berdasarkan data dan literatur yang telah didapatkan. Pengujian dilakukan terhadap nilai keluaran berupa arus stator (Is), kecepatan putar rotor (Nr), dan torsi elektromagnetik (Te). MATLAB/Simulink digunakan untuk membuat pemodelan terhadap sistem yang akan diuji.



Gambar. 3 Simulasi rangkaian menggunakan MATLAB/Simulink

A. Data Motor Induksi

Motor yang digunakan pada pengujian merupakan jenis motor induksi 3Φ kelas B merk AERO-ITALY AE-100L-4. Tabel 1 menjelaskan pemaparan lebih jelas mengenai data namplate motor yang akan diuji.

TABEL I. DATA NAMPLATE MOTOR

<b>Rate Power</b>	2.2 kW
<b>HP</b>	3 HP
<b>Rated Voltage</b>	220/380 VAC
<b>Rated Current</b>	5.09 A
<b>Pole</b>	4
<b>Rated Speed</b>	1430 rpm
<b>Rated Frequency</b>	50 Hz

B. Perhitungan Parameter Berdasarkan Spesifikasi

Nilai  $\cos\phi = 0.54$   
 $P = 2238 \text{ Watt}$

$$S = VI\sqrt{3} \tag{1}$$

$$= 280 \times 5.09 \times \sqrt{3}$$

$$= 3.350,13 \text{ VAR}$$

Dimana,

$$\cos\phi = \frac{P}{S} \tag{2}$$

$$= \frac{2238}{3.350,13}$$

$$= 0.69$$

Kecepatan sinkron motor  $n_s$  adalah 1500 rpm

$$n_s = \frac{120f}{P} \tag{3}$$

$$= \frac{120 \times 50}{4}$$

$$= 1500 \text{ rpm}$$

Nilai slip yang diijinkan  $\leq 7.3\%$

$$\%Slip = \frac{n_s - n}{n_s} \tag{4}$$

$$= \frac{1500 - 1430}{1500} \times 100\%$$

$$= 4.67\%$$

Torsi nominal

$$T = \frac{P}{\omega} \tag{5}$$

$$= \frac{2238}{\frac{2\pi n}{60}}$$

$$= \frac{2238 \times 60}{2 \times 3.14 \times 1430}$$

$$= 14.95 \text{ Nm}$$

C. Skenario Pengujian

Terdapat tiga jenis pengujian yang akan dilakukan untuk melihat performa variable speed drive dalam mengontrol kecepatan motor. Pengujian dilakukan sesuai dengan parameter yang telah didapatkan melalui literatur dan data primer.

- Pengujian pada motor induksi tanpa pemasangan vsd: bertujuan melihat karakteristik ketika motor beroperasi. Pengujian dilakukan dengan memberi dua buah pembebanan yang berbeda yaitu, 7.48 Nm dan 14.59 Nm. Kondisi motor pada saat tidak berbeban juga diukur untuk mengetahui perubahan yang terjadi.
- Pengujian VSD-MI beban konstan: bertujuan untuk mengetahui performa motor ketika dipasang VSD saat beban konstan dengan nilai yang berbeda.
- Pengujian VSD-MI beban variatif: bertujuan untuk mengetahui performa motor ketika dipasang VSD saat beban divariasi.

D. Teknik Analisis

Dalam penelitian ini, dalam analisis menggunakan dua teknik untuk mendukung proses pengerjaan dalam memperoleh hasil yang dibutuhkan. Teknik statistik deskriptif melibatkan proses menjelaskan atau menggambarkan data yang telah dikumpulkan dengan cara yang objektif dan sistematis, tanpa melakukan interpretasi atau analisis lebih lanjut.. Analisis komparasi digunakan untuk membandingkan performa motor induksi tanpa pemasangan vsd dengan saat menggunakan vsd.

VI. HASIL DAN ANALISA

Pengujian dan pengolahan data untuk performa VSD pada motor induksi 3Φ kelas B merk *AERO-ITALY AE-100L-4* diuji menggunakan *simulink* MATLAB R2016a, dimana data motor dapat dilihat pada tabel 1. Parameter yang diuji pada skenario pengujian yaitu besar arus stator ( $I_s$ ), kecepatan putar rotor ( $N_r$ ), dan torsi elektromagnetik ( $T_e$ ).

TABEL II. HASIL PENGUJIAN MOTOR INDUKSI TANPA VSD

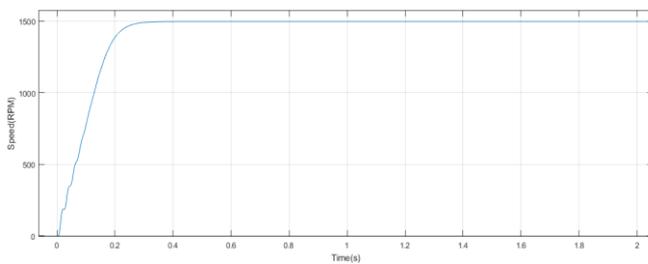
Beban (Nm)	Arus Starting (Amp)	Keadaan Steady State		
		Arus (Amp)	Kecepatan (rpm)	Waktu (s)
0	75.23	5.83	1498	2
7.48	75.34	5.67	1466	2
14.95	75.67	5.95	1432	2

TABEL III. HASIL PENGUJIAN MOTOR INDUKSI DENGAN VSD

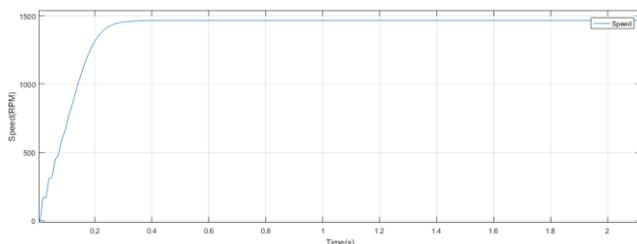
Beban (Nm)	Arus Starting (Amp)	Keadaan Steady State		
		Arus (Amp)	Kecepatan (rpm)	Waktu (s)
0	36.82	5.83	1430	2
7.48	36.82	5.67	1430	2
14.95	36.82	5.95	1430	2

D. Pengujian pada Motor Induksi Tanpa Pemasangan VSD

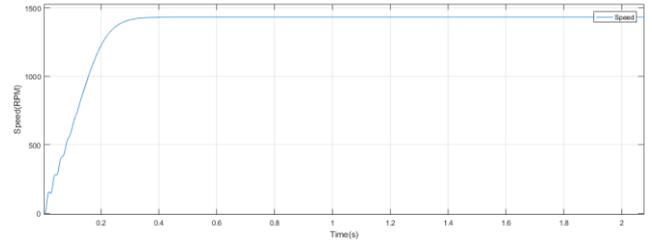
Hasil pengujian menunjukkan kecepatan putaran motor turun sebanding dengan kenaikan nilai torsi pembebanan yang diberikan seperti pada tabel 2. Motor mencapai kecepatan steady state setelah berlangsung selama 0.25 detik dari start awal seperti ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 2 untuk keadaan tidak berbeban, Gambar 3 untuk beban 7.48 Nm dan Gambar 4 untuk beban 14.95 Nm.



Gambar. 2 Grafik Kecepatan Motor Ketika Tidak berbeban



Gambar. 3 Grafik Kecepatan Motor Ketika Half Load

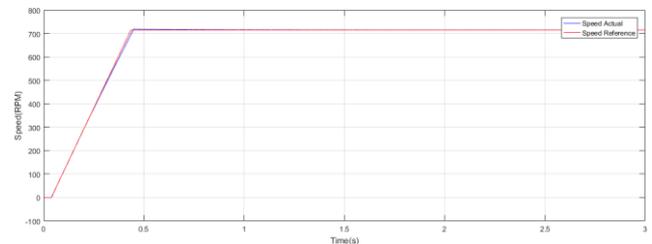


Gambar. 4 Grafik Kecepatan Motor Ketika Full Load

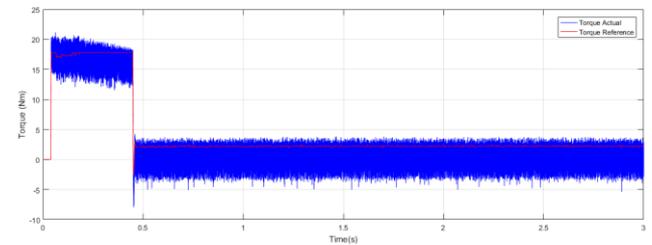
E. Pengujian VSD-MI Dengan Beban Konstan

Untuk melakukan pengujian pada motor saat tidak berbeban, sebuah kecepatan referensi sebesar 715 rpm diterapkan pada Gambar 5 (a) dan (b). Berdasarkan hasil simulasi, pada Gambar 5 (a), motor mencapai kecepatan referensi tersebut dalam waktu 0.45 detik sejak dimulainya pengujian. Pada saat motor di-start, torsi elektromagnetik dapat mencapai 20 Nm, namun akan kembali stabil setelah 0.45 detik.

Dalam pengujian pada motor, dilakukan pemberian torsi beban sebesar 7,48 Nm pada Gambar 6 (a) dan (b), serta sebesar 14,95 Nm pada Gambar 7 (a) dan (b). Dalam kedua pengujian tersebut, kecepatan referensi yang digunakan adalah sebesar 715 rpm. Ketika diberi torsi beban 7.48 Nm, respon kecepatan aktual baru bisa mencapai kecepatan referensinya setelah 0.8 detik dari start awal. Torsi elektromagnetik, diketahui mengalami penurunan hingga 10 Nm dan kembali stabil setelah 0.01 detik. Saat torsi beban 14,95 Nm, respon kecepatan aktual untuk mencapai kecepatan referensinya membutuhkan waktu 5.5 detik.

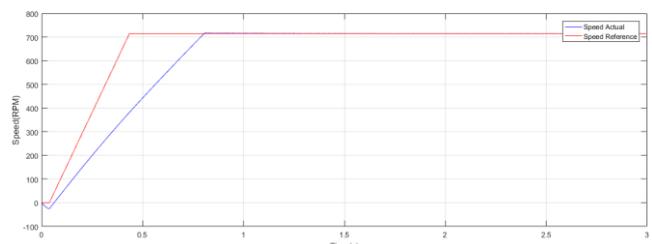


(a)

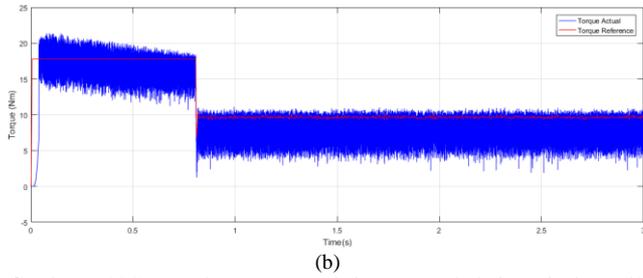


(b)

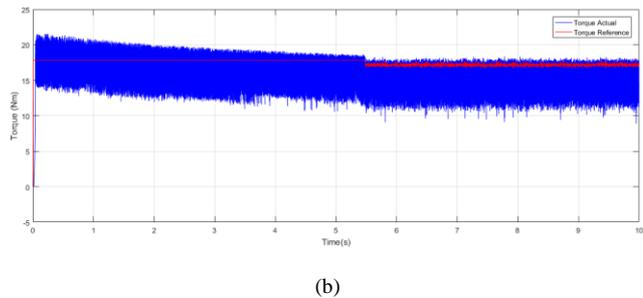
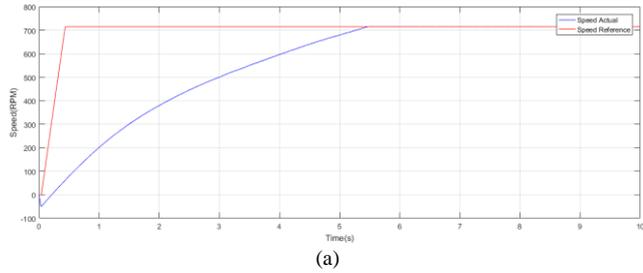
Gambar. 5 (a) Respon kecepatan saat 0. (b) Torsi Elektromagnetik saat beban 0.



(a)



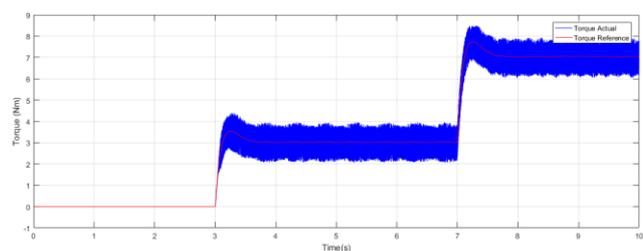
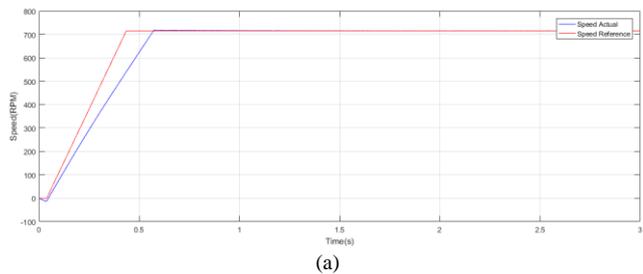
Gambar. 6 (a) Respon kecepatan saat beban setengah dari nominalnya. (b) Torsi Elektromagnetik saat beban setengah dari nominalnya.



Gambar. 7 (a) Respon kecepatan saat beban penuh. (b) Torsi Elektromagnetik saat beban penuh.

F. Pengujian VSD-MI dengan Beban Variatif

Pada pengujian motor di Gambar 8 (a) dan (b), dilakukan variasi torsi beban dengan memberikan torsi beban sebesar 3 Nm dan 7 Nm pada kecepatan 715 rpm. Respon kecepatan estimasi mampu mencapai kondisi *steady state* dalam waktu 0.57 detik. Terjadi 2 kali kenaikan torsi beban hingga 4 Nm pada t=3 detik dan t=7 detik. Setelah kenaikan terakhir, torsi elektromagnetik mencapai kondisi *steady state* setelah 0.02 detik.



Gambar. 8 (a) Respon kecepatan saat beban berubah. (b) Torsi Elektromagnetik saat beban berubah.

Penggunaan VSD pada motor mampu mengurangi arus *starting* motor menjadi 36.82A, yang sebelumnya berkisar 75.41A ketika motor tidak dipasang VSD. Pemasangan VSD pada motor juga mampu mempertahankan kecepatan motor agar selalu berada pada kecepatan referensinya walaupun beban yang digunakan bervariasi pada keadaan konstan maupun berubah.

KESIMPULAN

Pengaturan kecepatan pada motor induksi tiga fasa melalui variable speed drive telah berhasil disimulasikan, dan diperoleh kesimpulan bahwa perubahan pada beban motor memengaruhi kecepatan motor. Makin besar beban yang ditambahkan, penurunan kecepatan estimasi motor juga makin besar. Pemasangan VSD pada motor mampu memberikan arus *starting* yang lebih kecil daripada ketika motor beroperasi tanpa menggunakan VSD. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa ketika beban divariasikan pada keadaan konstan ataupun berubah, kecepatan aktual motor akan tetap sama, menyesuaikan dengan nilai kecepatan referensinya. Arus starting motor yang sebelumnya sekitar 75,41A saat motor tidak dipasang VSD, dapat diturunkan dengan penggunaan VSD pada motor menjadi 36,82A. Sekalipun beban yang digunakan bervariasi dalam kondisi konstan atau berubah, pemasangan VSD pada motor dapat menjaga kecepatan motor pada kecepatan referensinya.

REFERENSI

- [1] Yu, J., Zhang, G., Peng, M., Song, D., & Liu, M. (2020). Power-matching based SOC balancing method for cascaded H-bridge multilevel inverter. CPSS, 2-3.
- [2] Jibrán, M.; Tijdink, A.; Patel, M.K. Techno-economic analysis of energy efficiency improvement in electric motor driven systems in Swiss industry. Appl. Energy 2017, 205, 85–104.I.
- [3] De Almeida, A.; Fong, J.; Brunner, C.U.; Werle, R.; VanWerkhoven, M. New technology trends and policy needs in energy efficient motor systems—A major opportunity for energy and carbon savings. Renew. Sustain. Energy Rev. 2019, 115, 109384.
- [4] Fong, J.; Ferreira, F.J.T.E.; Silva, A.M.; De Almeida, A.T. IEC61800-9 System Standards as a Tool to Boost the Efficiency of Electric Motor Driven Systems Worldwide. Inventions 2020, 5, 20.
- [5] Umar, M. F., Akbar, M. N., & Kazmi, S. M. R. (2018). Design and simulation of a 3 phase induction motor drive based on indirect rotor field orientation using MATLAB Simulink tool. 2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG). doi:10.1109/icpesg.2018.8384497.
- [6] Qingfeng Wu, R. G. (2018). SoC Balancing Strategy for Multiple Energy Storage Units with Different Capacities in Islanded Microgrids Based on Droop Control. IEEE Journal, 1-2.
- [7] Eman K. Belal, D. M. (2019). Adaptive droop control for balancing SOC of distributed batteries in DC microgrids. IET Generation, Transmission & Distribution, 4-5.
- [8] Bhashe, P., & Lathkar, M. (2015). Energy conservation using VFD. 2015 International Conference on Energy Systems and Applications.
- [9] Arun Shankar V.K., Umashankar S., Rajvikram M.E. et al. Sensorless parameter estimation of VFD based cascade centrifugal pumping system using automatic pump curve adaptation method. Energy Report (7) 2021 : 2352-4847
- [10] Caiping Zhang, J. J. (2016). A Generalized SOC-OCV Model for Lithium-Ion Batteries and the SOC Estimation for LNMCO Battery. Scient direct energies, 4-5.
- [11] Shaik, R., Beemkumar, N., Adharsha, H., Venkadeshwaran, K., & Dhass, A. D. (2020). Efficiency enhancement in a PV operated solar pump by effective design of VFD and tracking system.

- [12] Bi, K., Sun, L., An, Q., & Duan, J. (2019). Active SOC Balancing Control Strategy for Modular Multilevel Super Capacitor Energy Storage System. *IEEE*, 3-4.
- [13] Wang, G., & Han, Z. (2019). Investigation of the Accuracy of VFD Analog Output Data and the Energy Performance of Different Voltage Controls in a VFD-motor-belt-fan System. *Energy and Buildings*.
- [14] AITAO BI, W. Y. (2020). Dynamic SOC Balance Strategy for Modular Energy Storage System Based on Adaptive Droop Control. *IEEE*, 3-4.
- [15] Foulke, Randall L (2009). Principles and Application of Variable Frequency Drive. 2009 NC AWWA-WEA Spring Conference.
- [16] D. N. Huda, "Pengujian untuk Kerja Variable Speed Drive VF-S9 dengan. Beban Motor Induksi 3 Fasa 1 Hp," Politeknik Negeri Bandung, 2012.
- [17] Bose, Bimal K, 2002, *Modern Power Electronics and AC Drives*, New Jersey: Prentice-Hall.
- [18] Sandeep Phogat, "Analysis of Single Phase SPWM Inverter", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol. 3, Issue 8, August 2014.
- [19] Arun Shankar V.K., Umashankar S., Rajvikram M.E. et al. Sensorless parameter estimation of VFD based cascade centrifugal pumping system using automatic pump curve adaption method. *Energy Report (7) 2021: 2352-4847*.