
Simulasi Kendali Torka Langsung Pada Motor Induksi 200 Hp 50 Hz

Yogi Sarwo Wibowo*¹, Sugiarto ², Mohammad Arsyad³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

e-mail : yogiswme@gmail.com

Abstrak

Motor induksi merupakan mesin konversi dari listrik ke mekanik. Pada umumnya pengendalian kecepatan putar dilakukan pada tegangan masukannya. Akan tetapi kendali tersebut mempunyai beberapa kelemahan, yaitu sistem akan membangkitkan slip dan kecepatan putar sistem akan menurun saat terjadi pembebanan lebih. Kelemahan dari sistem pengendalian tegangan ini dapat dihilangkan dengan menerapkan kendali pada torka rotor yang disebut kendali torka langsung. Skripsi ini akan dilakukan simulasi kendali kecepatan putar motor induksi dengan teori Direct Torque Control (DTC). Simulasi akan dilakukan menggunakan Matlab-simulink dengan menentukan nilai referensi kecepatan putar untuk mendapatkan respon performa motor induksi. Hasil simulasi pada sistem kendali torka langsung pada motor induksi tiga fasa dengan metode Direct Torque Control (DTC) mempunyai respon yang baik. Berdasarkan gambar grafik dari hasil proses simulasi dengan Matlab-simulink pengendalian kecepatan putar motor induksi dengan metode DTC nilai aktual mendekati nilai referensinya dengan nilai magnituda yang tetap.

Kata Kunci: Motor Induksi, Direct Torque Control (DTC), Matlab-simulink

Abstract

Induction motor is a machine that converts from electricity to mechanics. In general, rotational speed control is carried out at the input voltage. However, this control has several weaknesses, namely the system will generate slip and the rotational speed of the system will decrease when overloading occurs. The weakness of this voltage control system can be eliminated by applying a control on the rotor torque called direct torque control.

This thesis will simulate the rotational speed control of an induction motor with the theory of Direct Torque Control (DTC). Simulation will be carried out using Matlab-simulink by determining the reference value for rotational speed to get the performance response of the induction motor.

The simulation results on a direct torque control system on a three-phase induction motor with the Direct Torque Control (DTC) method have a good response. Based on the graphic image of the results of the simulation process with Matlab-simulink, controlling the rotational speed of the induction motor with the DTC method, the actual value approaches the reference value with a fixed magnitude value.

Keywords: Induction Motor, Direct Torque Control (DTC), Matlab-simulink

1. PENDAHULUAN

Kendali kecepatan putar pada motor induksi dengan teori *Direct Torque Control* (DTC) adalah teknologi baru untuk memvariasi kecepatan putar motor yang pada umumnya pengendalian kecepatan putar dilakukan pada tegangan input.

Sistem pengendalian dikatakan mudah karena dilakukan kendali langsung dari input tegangannya, akan tetapi kendali dari input ini mempunyai dua kelemahan. Pertama, sistem membangkitkan slip s (perbedaan waktu antara pembangkitan awal fluks stator dengan awal rotor

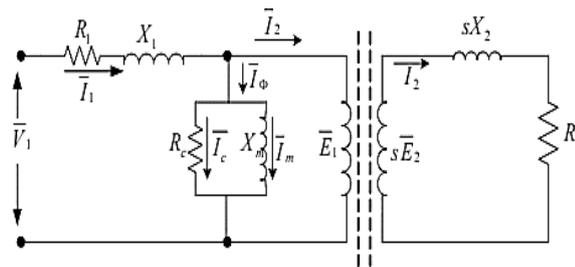
berputar). Slip ini terjadi karena membutuhkan selang waktu saat fluks jangkar menginduksi lilitan rotor. Kedua, kecepatan putar sistem akan menurun saat terjadi pembebanan lebih. Kelemahan dari sistem pengendalian tegangan ini dapat dihilangkan dengan menerapkan kendali pada torka rotor yang disebut kendali torka langsung.

Direct Torque Control (DTC) adalah kendali kecepatan putar motor induksi yang mengacu pada torkanya langsung dengan mengendalikan vektor arusnya. Sehingga nilai magnituda dan frekuensi pada motor induksi tetap atau konstan. Oleh karena itu skripsi ini akan meneliti motor induksi sangkar 200 Hp dengan kendali DTC.

Paper ini disusun dalam 4 bagian. Metode penelitian dibahas pada bagian 2. Bagian 3 menjelaskan penelitian hasil dan analisis. Sedangkan bagian akhir membahas kesimpulan yang diikuti oleh pustaka.

2. METODE PENELITIAN

Kendali kecepatan motor induksi pada umumnya dilakukan pada input tegangannya. Berbasis persamaan $E = 4,44 f N \Phi$, kecepatan putar dapat diubah pada variasi tegangan masukannya. Akan tetapi kendali kecepatan putar rotor berbasis kepada kendali tegangan masukan mempunyai kekurangan yaitu bahwa kecepatan putarnya akan berkurang sebanding dengan kenaikan beban. Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik digambarkan dengan rangkaian ekuivalen. Induksi elektromagnetik pada motor induksi menyerupai induksi elektromagnetik pada transformator. Sehingga dapat digambarkan rangkaian ekuivalen dibawah ini.



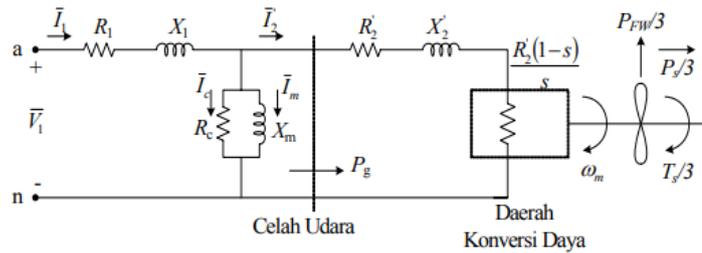
Gambar 1 Rangkaian ekuivalen motor induksi (Jeremia Purba,2009)

Rangkaian ekuivalen ditentukan berdasarkan kondisi stator. Pada sisi stator celah udara membentuk gelombang fluks yang berputar sinkron membangkitkan ggl lawan tiga fasa yang seimbang di dalam fasa-fasa stator. Besarnya tegangan terminal stator berbeda dengan ggl lawan sebesar jatuh tegangan pada impedansi bocor stator, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1 (R_1 + jX_1) \text{ Volt} \quad (1)$$

dengan \bar{V}_1 adalah tegangan terminal stator (Volt), \bar{E}_1 adalah ggl lawan yang dihasilkan oleh fluks celah udara resultan(Volt), \bar{I}_1 adalah arus stator (Ampere), R_1 adalah resistansi efektif stator (Ohm), dan X_1 merupakan reaktansi bocor stator (Ohm).

Sumber tegangan yang juga merupakan tegangan terminal stator pada motor induksi tidak terhubung langsung dengan rotor, sehingga daya yang melewati celah udara diasumsikan sama dengan daya yang masuk ke rotor. Proses perubahan daya elektromekanik pada motor induksi tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Rangkaian ekivalen per-fasa motor induksi tiga fasa (Jeremia Purba,2009)

Proses transfer daya ke rotor yang melalui celah udara pada motor induksi memiliki rugi-rugi tembaga stator. Adanya rugi-rugi tembaga pada kumparan stator tersebut mengakibatkan terjadinya slip. Dengan demikian daya mekanik yang diinputkan ke rotor memiliki hubungan dengan rugi-rugi tembaga stator. Sehingga dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$P_1 = 3 V_1 I_1 \cos\theta \tag{2}$$

$$P_{rcu} = (I_2)^2 R_2 = s P_{AG} \tag{3}$$

$$P_d = (I_2)^2 \frac{(1-s)}{s} R_2 = (1-s) P_{AG} \tag{4}$$

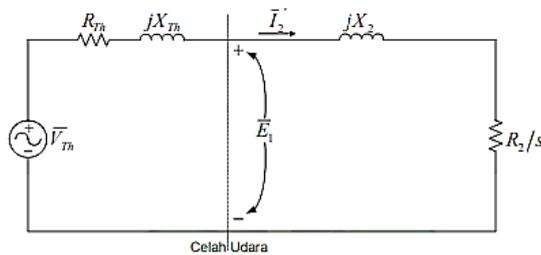
dengan P_1 adalah daya yang diinputkan pada kumparan stator, P_{rcu} adalah rugi-rugi daya pada kumparan stator, P_{AG} adalah daya yang ditransfer melalui celah udara, P_d adalah daya mekanik, s adalah slip, V_1 adalah tegangan sumber, I_1 adalah arus stator, I_2 adalah arus rotor, dan θ adalah perbedaan sudut fasa antara arus masukan dan tegangan sumber.

Kecepatan motor induksi berhubungan langsung dengan torka putar. Torka mekanik (τ_d) dapat dihitung dengan memperhatikan persamaan (4) berbanding kecepatan sudut poros. Sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\tau_d = \frac{(I_2)^2 R_2}{\omega_s} \tag{5}$$

dengan τ_d adalah torka mekanik, R_2 adalah tahanan rotor (ohm), dan ω_s merupakan kecepatan sudut sinkron (radian/detik).

Rangkaian ekivalen pada Gambar 1 dapat disederhanakan sehingga menjadi rangkaian Thevenin seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Dengan rangkain ini, harga arus rotor (I_2) dapat dihitung.



Gambar 3 Rangkaian ekivalen Thevenin per fasa motor induksi tiga fasa (Jeremia Purba,2009)

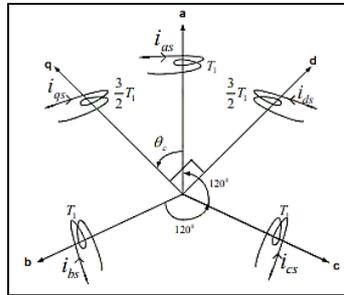
Berdasarkan rangkaian ekivalen yang telah disederhanakan didapatkan persamaan untuk memperoleh nilai torka yang diinginkan dengan pengali 3 untuk torka tiga fasa. Adapun persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

$$\tau_{d,3\phi} = \frac{3V_{Th} \frac{R_2}{s}}{\omega_s \left[\left(R_{Th} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{Th} + X_2')^2 \right]} \quad (6)$$

dengan V_{Th} adalah tegangan input, R_{Th} adalah tahanan pada stator, X_{Th} adalah kumparan stator, dan X_2 adalah kumparan rotor.

Model dinamik motor induksi tiga fase diturunkan dari mesin dua fase. Kedua model ini ekuivalen karena kumparan pada dua fase dan tiga fase menghasilkan *mmf* (*magnetomotive force*) dan arus yang sama dengan menganggap kumparan tiga fase masing-masing memiliki jumlah belitan (T_1) per fase. Gambar 4 menunjukkan kumparan stator motor induksi dua fase dan tiga fase. Untuk mendapatkan model dinamik motor induksi, maka ada beberapa asumsi yang diambil pada motor induksi yaitu:

- Reaksi antara *flux* lilitan stator terhadap *flux* rotor terjadi pada celah udara.
- Celah udara tidak menyebabkan reaksi induktansi terhadap rotor.
- Saat terjadi putaran sudut rotor terhadap stator, rotor menginduksi arus Eddy.
- Perubahan parameter stator dan rotor pada motor induksi dan saturasi magnetik diabaikan.



Gambar 4. Kumparan stator motor dua fase dan tiga fase (Jeremia,2009).

Mmf (*magnetomotive force*) dapat dihasilkan dengan memberikan kumparan pada fase. Diasumsikan bahwa pada tiga fase masing-masing memiliki jumlah belitan. *Mmf* yang sama atau seimbang dihasilkan dengan memberikan jumlah belitan ($\frac{3T_1}{2}$) per fase. Untuk memproyeksikan *mmf* pada sumbu *d-q* menggunakan *mmf* tiga fase pada sumbu *d-q*. Diasumsikan sumbu *q* tertinggal θ_c dari sumbu *a*, maka hubungan antara arus fase *d-q* dengan fase *abc* adalah:

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_c & \cos(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta_c & \sin(\theta_c - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_c + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Jika sumbu *q* pada Gambar 4 berimpit dengan fase *a* ($\theta_c = 0$), maka transformasi dari sumbu *abc* ke sumbu *d-q* menjadi seperti pada persamaan (8). Kondisi seperti ini disebut model *stator reference-frames*.

$$[T^s_{abc}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Didapatkannya model *stator reference-frames* berdasarkan transformasi dari sumbu *abc* ke sumbu *d-q* maka didapatkan tegangan pada dua fase. Sehingga persamaan untuk tegangan pada dua fase adalah:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_0 \end{bmatrix} = T^s_{abc} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (10)$$

sehingga,

$$V_{qs} = \frac{2}{3} \left[V_{as} - \frac{1}{2} (V_{bs} + V_{cs}) \right] \quad (11)$$

untuk sistem tiga fasa yang seimbang berlaku persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} V_{as} + V_{bs} + V_{cs} &= 0 \\ (V_{bs} + V_{cs}) &= -V_{as} \end{aligned} \quad (12)$$

Tegangan *quadrature* stator (V_{qs}) dapat diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan 11 dengan persamaan 12. Maka persamaan tersebut menjadi:

$$V_{qs} = \frac{2}{3} \left[\frac{3}{2} V_{as} \right] = V_{as} \quad (13)$$

$$V_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (V_{cs} - V_{bs}) = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{cb} \quad (14)$$

dengan V_{qs} adalah tegangan pada fasa q dan V_{ds} adalah tegangan pada fasa d .

Hubungan tegangan stator mesin dua fasa dengan mesin tiga fasa didapatkan dari persamaan 15 dan 16. Transformasi ini berlaku juga untuk menghitung arus dan fluks. Maka didapatkan persamaan arus sebagai berikut:

$$i_{qs} = i_{as} \quad (15)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{\sqrt{3}} (V_{cs} - V_{bs}) \quad (16)$$

dengan, i_{qs} , i_{as} adalah arus pada fasa q i_{ds} arus pada fasa d .

Menentukan putaran motor dapat digunakan persamaan rangkaian dan arus motor diukur pada *reference frame*, sehingga persamaan tegangan stator dalam kerangka stator referensi adalah:

$$V_s = R_s I_s + \frac{d}{dt} (\Psi_s) \quad (17)$$

$$\Psi_s = \int (V_s - R_s I_s) dt \quad (18)$$

Flux linkages dalam koordinat *stator reference frames* dihitung dengan

$$\Psi_{qs} = \int (V_{qs} - R_s I_{qs}) dt \quad (19)$$

$$\Psi_{ds} = \int (V_{ds} - R_s I_{ds}) dt \quad (20)$$

Akibatnya fluks stator bernilai

$$\Psi_s = \sqrt{(\Psi_{qs})^2 + (\Psi_{ds})^2} < \Phi_{fs} \quad \Phi_{fs} = \tan^{-1} \left[\frac{\Psi_{qs}}{\Psi_{ds}} \right] \quad (21)$$

Persamaan torka elektromagnetik adalah $T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}$. Frekuensi listrik dapat dihitung dengan melakukan proses diferensial terhadap sudut vektor fluks rotor:

$$\omega_e = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\Psi_{qs}}{\Psi_{ds}} \right] \right) = \frac{\dot{\Psi}_{qs} \Psi_{ds} - \Psi_{qs} \dot{\Psi}_{ds}}{\Psi_s^2} \quad (22)$$

Persamaan kecepatan rotor adalah

$$\omega_r = P \left(\omega_e - R_r \frac{T_e}{\Psi_r^2} \right) \quad (23)$$

Skema sistem kendali terdiri atas dua pengaturan yaitu pengaturan fluks stator dan pengaturan torka. Pengaturan fluks stator digunakan menentukan selang-waktu vektor tegangan aktif yang menggerakkan fluks stator pada lintasan referensi. Adapun pengaturan torka dipakai untuk menentukan selang-waktu vektor tegangan nol yang menahan torka motor pada batas toleransi yang telah ditentukan.

Dasar dari metode DTC adalah perubahan torka sebanding dengan slip antara fluks stator dan fluks rotor pada kondisi fluks bocor stator tetap. Oleh karena itu, pada keadaan perubahan yang cepat fluks rotor cenderung tidak berubah. Perubahan cepat dari torka elektromagnetik dapat dihasilkan dari putaran fluks stator, sebagai arah torka. Fluks stator dapat seketika mempercepat atau memperlambat dengan menggunakan vektor tegangan stator yang sesuai. Torka dan fluks dikendalikan bersama-sama dengan pengaturan langsung dari tegangan stator, dari *error* respon torka dan fluks. Untuk menentukan putaran motor dapat digunakan persamaan rangkaian dan arus motor diukur pada *reference frame*, sehingga persamaan tegangan stator dalam kerangka stator referensi adalah:

$$V_s = R_s I_s + \frac{d}{dt} (\Psi_s) \quad (24)$$

$$\Psi_s = \int (V_s - R_s I_s) dt \quad (25)$$

Flux linkages dalam koordinat *stator reference frames* dihitung dengan

$$\Psi_{qs} = \int (V_{qs} - R_s I_{qs}) dt \quad (26)$$

$$\Psi_{ds} = \int (V_{ds} - R_s I_{ds}) dt \quad (27)$$

Akibatnya fluks stator bernilai

$$\Psi_s = \sqrt{(\Psi_{qs})^2 + (\Psi_{ds})^2} < \Phi_{fs} \quad \Phi_{fs} = \tan^{-1} \left[\frac{\Psi_{qs}}{\Psi_{ds}} \right] \quad (28)$$

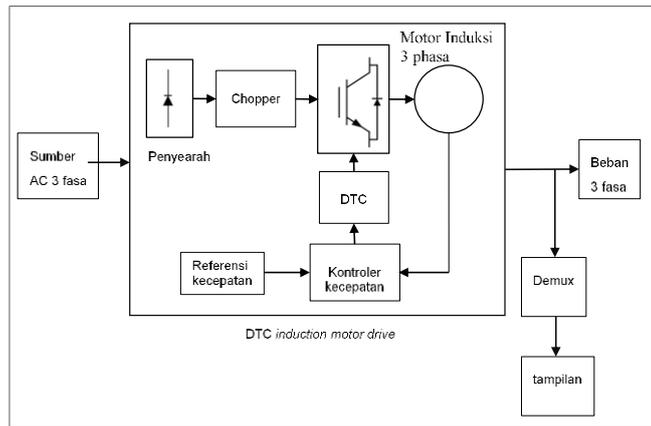
Persamaan torka elektromagnetik adalah $T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}$. Frekuensi listrik dapat dihitung dengan melakukan proses diferensial terhadap sudut vektor fluks rotor:

$$\omega_e = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\tan^{-1} \left[\frac{\Psi_{qs}}{\Psi_{ds}} \right] \right) = \frac{\dot{\Psi}_{qs} \Psi_{ds} - \Psi_{qs} \dot{\Psi}_{ds}}{\Psi_s^2} \quad (29)$$

Persamaan kecepatan rotor adalah

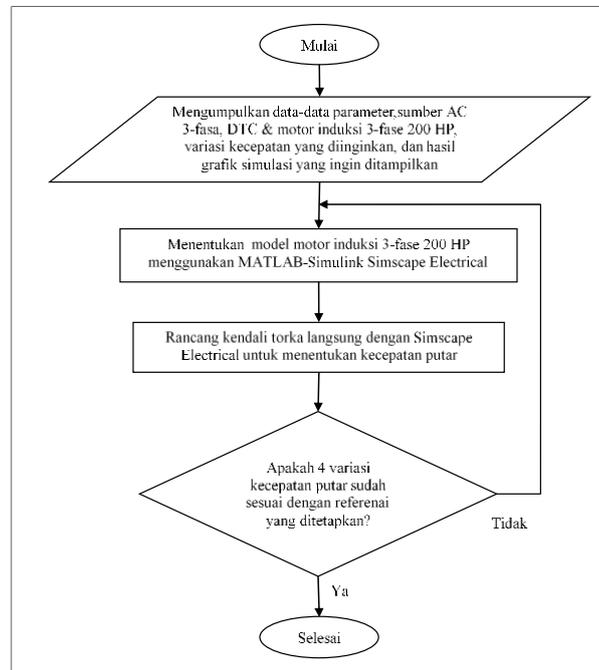
$$\omega_r = P \left(\omega_e - R_r \frac{T_e}{\Psi_r^2} \right) \quad (30)$$

Aplikasi kendali berbasis *direct torque control* (DTC) dilakukan dengan menggunakan Matlab-simulink. Simulink merupakan suatu sistem khusus yang dirancang untuk mensimulasikan kinerja proses atau plant secara dinamik. Simulink mempunyai antarmuka dengan multi window, yang berisi icon/fungsi-fungsi khusus sebagai *library*, persamaan linier, non-linier, *connection toolboxes* dan sebagainya. Dalam sebuah program yang berisi operasi matematik ataupun variable program yang digunakan, Matlab mempunyai aturan (*syntax*) penulisan. Jadi Simulink merupakan bagian dari MATLAB yang digunakan sebagai sarana pemodelan. Model yang akan dibuat berdasarkan blok-blok parameter seperti pada Gambar 5.



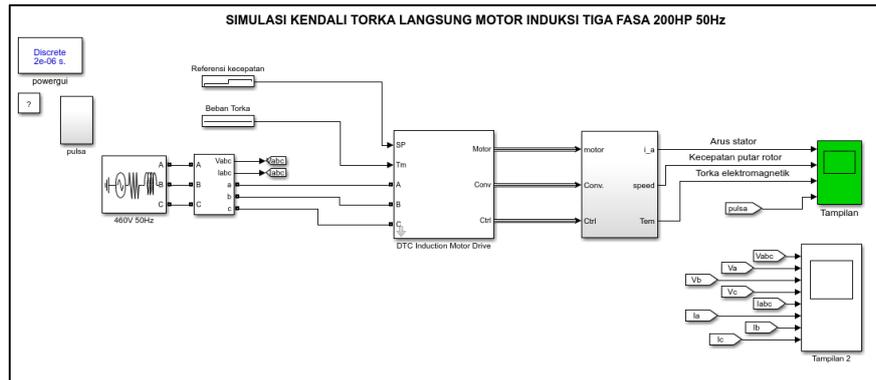
Gambar 5. Blok diagram pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *direct torque control*

Pelaksanaan dalam skripsi mempunyai beberapa tahapan atau alur dalam penelitian. Untuk melaksanakan penelitian ini diperlukan prosedur penjadwalan atau urutan kerja yang dapat digambarkan dalam *flowchart* pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram alir penelitian skripsi

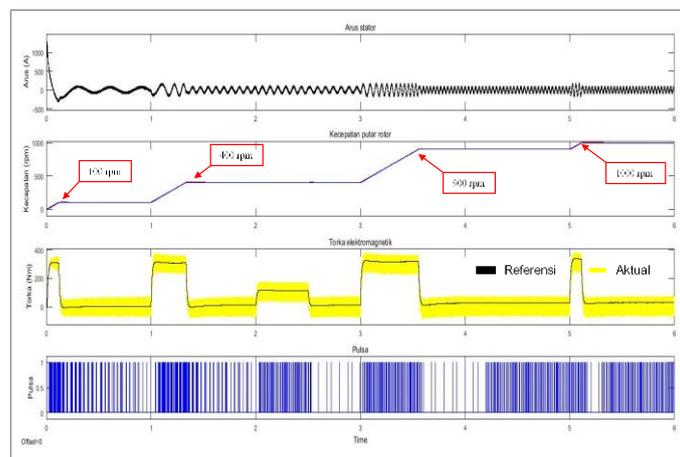
Model rangkaian simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tersebut ditunjukkan pada Gambar 7. Model yang dibuat berdasarkan prinsip blok diagram pada Gambar 5.



Gambar 7. Rangkaian simulasi pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dengan *direct torque control*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

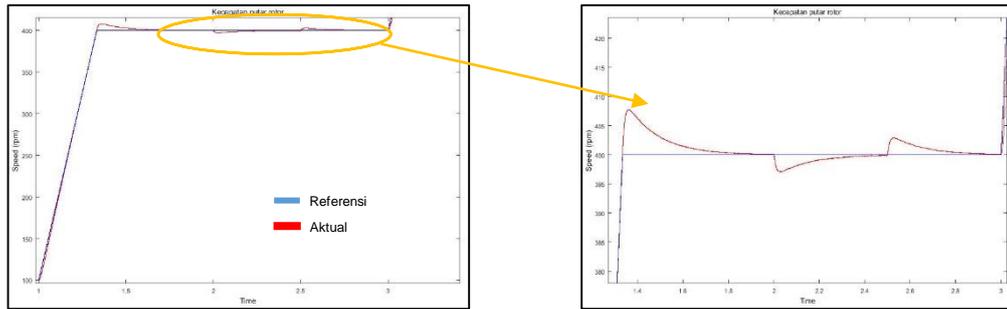
Hasil simulasi kendali kecepatan putar motor induksi tiga-fasa ditunjukkan pada Gambar 8. Pada tampilan/scope menggambarkan grafik arus stator, kecepatan putar rotor, torka elektromagnetik, pulsa.



Gambar 8. Grafik arus stator, kecepatan putar, torka elektronik, dan pulsa.

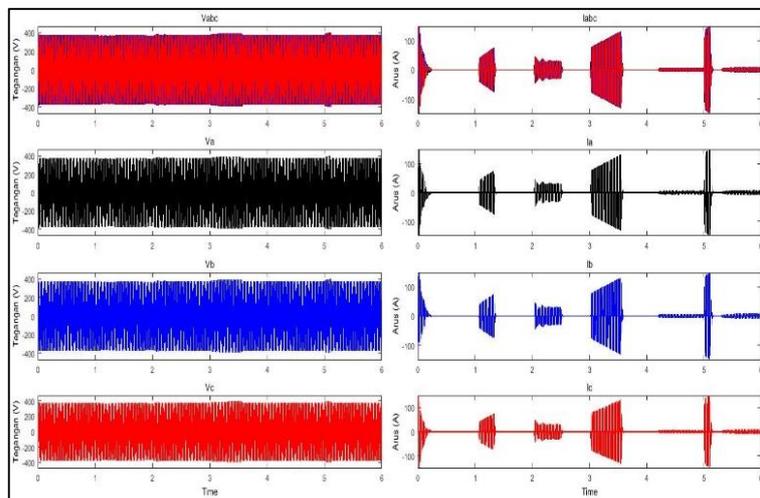
Hasil simulasi berupa gambar grafik yang ditunjukkan Gambar 8. Pada kecepatan referensi 100 rpm terlihat bahwa pada kondisi torsi tanpa beban motor mampu mencapai kecepatan referensi dalam waktu 0,1 detik, kecepatan 400 rpm mampu mencapai kecepatan referensi dalam waktu 0,3 detik, pada kecepatan 900 rpm lama kecepatan referensi dalam waktu 0,55 detik dan untuk 1000 rpm mampu mencapai kecepatan referensi dalam waktu 0,1 detik.

Gangguan transien disimulasikan pada perioda 2,0 detik sehingga terjadi sedikit drop pada motor. Namun gangguan tersebut kembali ke nilai kecepatan referensinya dalam waktu 0,5 detik dan tidak mempengaruhi tegangan input terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik simulasi gangguan transien pada perioda 2,0 detik.

Variasi kecepatan putar yang dikendalikan dengan metode berbasis DTC nilai tegangan masukan tetap konstan, hal tersebut dibuktikan pada Gambar 10 dibawah ini. Nilai magnituda tegangan tetap konstan ketika arus di *chopper* untuk mengendalikan kerja torka pada perioda tertentu berdasarkan variasi referensi kecepatan putar. Bahkan ketika kecepatan putar di beri gangguan transien antara variasi kedua dan ketiga nilai magnituda tetap konstan.



Gambar 9. Grafik tegangan dan arus

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan pada Bab-bab sebelumnya hasil dari simulasi kendali torka langsung pada motor induksi tiga fasa dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil desain simulasi pada sistem kendali torka langsung pada motor induksi tiga fasa dengan metode *Direct Torque Control* (DTC) mempunyai respon yang baik dibandingkan dengan respon motor induksi yang dijalankan tanpa kendali. Hasil tersebut dibuktikan dengan hasil simulator Matlab-*simulink*.
2. Berdasarkan gambar grafik dari hasil simulasi dengan Matlab-*simulink* nilai aktual mendekati nilai referensi. Dengan pencapaian nilai referensi 100 rpm pada perioda 0,1 detik dan saat variasi kecepatan putar motor pada 400 rpm pada perioda 1,3 detik, 900 rpm pada perioda 3,55 detik, dan 1000 rpm pada perioda 5,1 detik, dan gangguan transien pada perioda 2 detik kembali pada nilai referensi selama 0,5 detik. Sedangkan pada gambar grafik motor induksi dengan kendali on/off untuk mencapai kecepatan 200 rpm membutuhkan waktu 2 detik.

5. SARAN

Topik penelitian ini dapat dikembangkan lagi dengan memberi pembebanan motor induksi tiga fasa. Pembebanan yang diberikan dilakukan berdasarkan data real, sehingga didapatkan variasi kecepatan pada perioda yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, Braham. 2001. *Induction Motors Analysis and Torque Control*. New York. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Boldea, Ion & Nasar, Syed A. 2002. *The Induction Machine Handbook*. London. Boca Raton London New York Washington, D.C.
- Bose, Bimal K. 2002. *Modern Power Electronics and AC Drive*. Prentice Hall.
- Dan Sun, 2008. *Clarke's and Park's Transformations*. Zhejiang University.
- Fakultas Teknologi Industri, ITNY, 2021. *Panduan & Tata Tulis Tugas Akhir, Perancangan mesin dan Kerja Praktik*. Yogyakarta. Institut Teknologi Nasional Yogyakarta.
- Henneberger, Gerhard. 2003. *Electrical Machines I Basics*. Aachen University.
- Husnawan, Anwar. 2008. *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Logika Fuzzy*. Depok. Universitas Indonesia.
- Nugroho, EA., Setiawan, JD. 2012. *Kajian Sistem Kendali Space Vector Pulse Width Modulation Sebagai Pengendali Motor Induksi 3 Fasa*. Semarang. Universitas Diponegoro.
- Nur Faizi. M., Marzuarman. 2017. *Pengontrolan Fluks dan Torsi Pada Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Metode Direct Torque Control (DTC) Berbasis PI dan Fuzzy Logic Controllers (flc)*. Rian. Jurnal Inovtek Polbeng.
- Perdana, dkk. 2010. *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3Fasa Melalui DTC Dengan Menggunakan Sliding Mode Control*. Surabaya. Institut Teknologi Surabaya.
- Pyrhonen, Juha., Jokinen, Tapani., Hrabovcova, Valeria. 2008. *Design of Rotating Electrical Machines*. India. John Wiley & Son, Ltd.
- Purba, Jeremi. 2009. *Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Direct Torque Control Dengan Menggunakan Matlab 7.0.1*. Medan. Universitas Sumatra Utara.
- Sudirham, Sudaryatno. 2010. *Analisis Rangkaian Listrik Jilid 3*. Bandung. Mini-Encyclopédie.
- Sugiarto, 2014. *Pengaruh Beban Takseimbang Pada Stabilitas Generator Dalam Kondisi Ajeg dan Kondisi Transien*. Yogyakarta, Universitas Gadjah Mada.
- Theraja B.L., Theraja A.K. 2005. *Electrical Technology, Induction Motor chapter 34 (1243-1311)*. S. Chand & Company LTD.
- Wahjono, Endro & Soebagyo. *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Sebagai Penggerak Mobil Listrik dengan Kontroler Fuzzy Logic Berbasis Direct Torque Control*. Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Yahya, Sofian, dkk. 2020. *Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode Logika Fuzzy Berbasis PLC*. Bandung. Industrial Research Workshop and National Seminar.
-