

Analisis Karakteristik Motor Induksi Tiga Fasa XYZ Standar NEMA

Heri Haryanto, Ri Munarto, Ifat Fatmawati¹

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon, Indonesia

Abstrak - Luasnya penggunaan motor induksi dan kebutuhan operasi membutuhkan informasi dari model motor induksi tiga fasa tersebut, dalam kondisi real ditemukan permasalahan tegangan sumber yang tidak sinusoidal dan terjadinya perubahan beban. Selain itu untuk keperluan perancangan kendali selanjutnya sering diinginkan kesederhanaan rangkaian, kompleksitas selalu dihindari untuk menghindari kerumitan pembuatan rancangan. Oleh karena itu diperlukan suatu model motor induksi yang dapat menyelesaikan permasalahan tersebut yaitu dengan model $d-q-n$ menggunakan metode kerangka referensi. Penelitian ini dibuat untuk membuat model matematis motor induksi tiga fasa dalam kerangka referensi menggunakan MATLAB simulink. Motor induksi telah distandardisasi menurut karakteristik torsi dari NEMA, berbagai tipe motor tersebut memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing, maka perancangan program GUI dibuat pada penelitian ini untuk menganalisa karakteristik dan efisiensi daya dari sebuah motor induksi. Hasil simulasi model kerangka referensi menunjukkan hasil gelombang arus stator fasa A sama dengan arus stator fasa D. Motor induksi tiga fasa torsi maksimal pada simulasi sebesar 2.19 N-m, arus starting rendah 3.67 A, dan slip yang rendah saat torsi maksimal yaitu sebesar 12%. Hasil program dan GUI dapat dikatakan cukup berhasil, sehingga dapat digunakan untuk model dinamis motor induksi tiga fasa dan penentuan karakteristik motor standar NEMA.

Kata Kunci: Pemodelan, Karakteristik Motor Induksi Tiga Fasa, Standar NEMA.

Abstract - The extent of the use of induction motors and operating requirements require information from the model of the three-phase induction motors, in real conditions found problems sinusoidal voltage source and the load changes. In addition, for purposes of subsequent control design is often desirable simplicity of the circuit, the complexity is always avoided to avoid the hassle of drafting. Therefore we need a model of the induction motor that can resolve the problem by using a model DQN frame of reference. This study was made to create a mathematical model of three-phase induction motors in the reference frame using MATLAB simulink. Motor induction standardized according to the torque characteristics of NEMA, various types of motors that have the characteristics and advantages of each, then the GUI program design is made in this study to analyze characteristics and power efficiency of an induction motor. The results of model simulations show the results waveform reference frame stator current equal to the current phase A stator phase induction motor three phase D. The maximum torque of the simulation at 2:19 Nm, low starting current is 3.67 A, and low slip when the maximum torque is equal to 12%. The results of the program and the GUI can be quite successful, so it can be used to model the dynamic three-phase induction motors and NEMA standard motor characteristics determination.

Keywords: Modeling, Characteristics of Three Phase Induction Motor, NEMA Standard.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan operasi motor induksi tiga fasa membutuhkan informasi dari model motor, dalam kondisi real ditemukan permasalahan tegangan sumber yang tidak selalu sinusoidal dan terjadinya perubahan beban, serta untuk keperluan perancangan kendali selanjutnya di bidang industri sering diinginkan kesederhanaan rangkaian, kompleksitas selalu dihindari untuk menghindari kerumitan pembuatan rancangan. Maka penelitian ini dibuat untuk membuat model matematis motor induksi tiga fasa dalam kerangka referensi menggunakan MATLAB simulink.

Motor induksi telah distandardisasi menurut karakteristik torsi dari NEMA (*National Electrical Manufactures Association*), seperti desain A, B, C, D, atau F. Berbagai tipe motor tersebut memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing, maka pada penelitian ini juga dibuat perancangan program dan pengujian untuk mendapatkan karakteristik NEMA dari sebuah motor.

II. LANDASAN TEORI

A. Pemodelan dan Simulasi

Menurut Kadaffi (2011) sistem adalah obyek yang saling berinteraksi dan bekerja sama untuk mencapai

tujuan logis dalam suatu lingkungan yang kompleks. Obyek yang menjadi komponen dari sistem dapat berupa obyek terkecil atau sub-sistem. Elemen lingkungan sistem memberikan peran yang sangat penting terhadap perilaku sistem sehingga komponen-komponen sistem berinteraksi untuk mengantisipasi lingkungan. Obyek penelitian merupakan suatu sistem dengan kerumitan yang lebih kompleks sehingga memerlukan ringkasan singkat. Salah satunya adalah dengan melakukan pemodelan dan membuat model dari sistem tersebut.

B. Motor Induksi Tiga Fasa

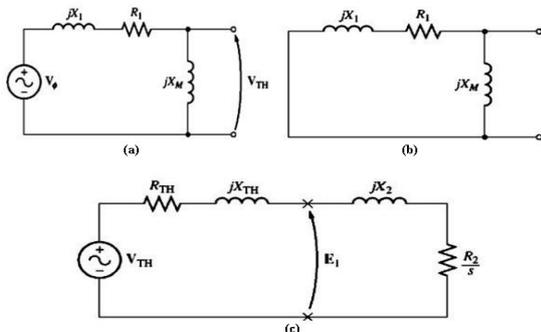
1. Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Hubungan listrik pada motor induksi tidak terdapat antara stator dengan rotor, karena arus pada rotor merupakan arus induksi. Jika belitan stator diberi tegangan tiga fasa, maka pada stator akan dihasilkan arus tiga fasa, arus ini menghasilkan medan magnetik yang berputar dengan kecepatan sinkron.

Ketika medan magnetik memotong konduktor rotor, di dalam konduktor tersebut akan diinduksikan ggl yang sama seperti ggl yang diinduksikan dalam lilitan sekunder transformator oleh fluksi primer. Rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup, baik melalui cincin ujung maupun tahanan luar. Ggl induksi menyebabkan arus mengalir di dalam konduktor rotor. Sehingga dengan adanya aliran arus pada konduktor rotor di dalam medan magnet yang dihasilkan stator, maka akan dibangkitkan gaya (F) yang bekerja pada motor.

2. Turunan Persamaan Torsi

Mengacu pada rangkaian ekivalen per fasa motor induksi yang disederhanakan, didapat rangkaian tegangan dan impedansi thevenin yang ditunjukkan pada Gambar 1. berikut:



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Thevenin Motor Induksi, (a) Rangkaian Ekivalen Tegangan Masuk Thevenin Motor Induksi (b) Rangkaian Ekivalen Impedansi Masuk Thevenin Motor Induksi (c) Rangkaian Ekivalen Sederhana Motor Induksi Tiga Fasa

Gambar 1 di atas menunjukkan sumber terbuka untuk mencari tegangan thevenin dari motor induksi dari pembagi tegangan, didapat:

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (1)$$

Persamaan yang didapat dari Gambar 1 (a):

$$V_{TH} = \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} V_{\phi} \quad (2)$$

$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} V_{\phi} \quad (3)$$

Persamaan yang didapat dari Gambar 1 (b):

$$Z_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (4)$$

Torsi induksi dari motor induksi tiga fasa:

$$T = \frac{3V_{TH}^2 R_2 / s}{\omega_s [(R_{TH} + R_2 / s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (5)$$

$$I = \frac{V_{TH}}{[(R_{TH} + R_2 / s) + j(X_{TH} + X_2)]} \quad (6)$$

$$\text{Slip maksimal} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (7)$$

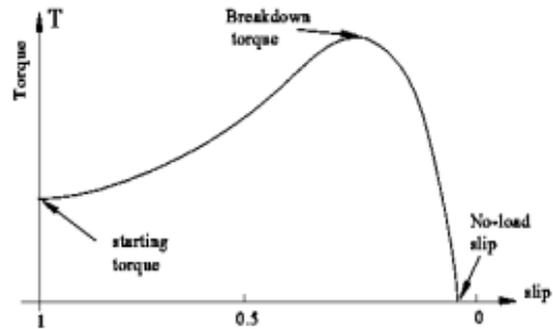
Daya motor Induksi tiga fasa:

$$P_{in} = 3 \times V \times I \times \cos \varphi \quad (8)$$

$$P_{cu} = 3 \times (I^2) \times (R_2 / \text{slip}) \quad (9)$$

$$P_{mek} = (1 - \text{Slip}) \times P_{cu} \quad (10)$$

Gambar kurva torsi kecepatan (*slip*) pada motor induksi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Karakteristik Torsi-Slip Pada Motor Induksi

3. Karakteristik Motor Induksi Standar NEMA

Motor induksi rotor sangkar tupai dibuat dalam 4 kelas berdasarkan *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA).

a. Motor Kelas A

Motor kelas A mempunyai rangkaian resistansi rotor kecil, beroperasi pada *slip* sangat kecil yaitu kurang dari 0.01 dalam keadaan berbeban, motor kelas A digunakan untuk keperluan torsi *start* yang sangat kecil.

b. Motor Kelas B

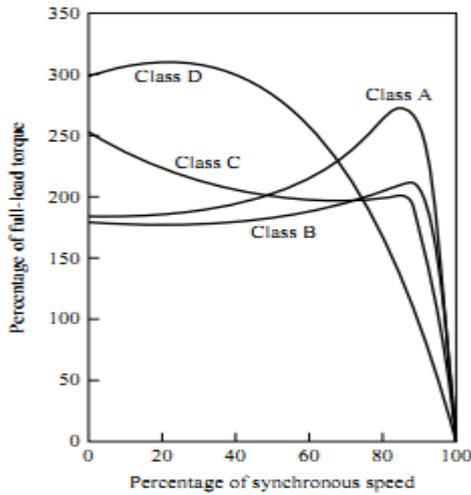
Motor kelas B digunakan untuk keperluan umum mempunyai torsi *starting* normal dan arus *starting* normal, regulasi kecepatan putar pada saat *full load* rendah dibawah 5% dan torsi *starting* sekitar 150% dari *rated*, walaupun arus *starting* normal biasanya mempunyai besar 600% dari *full load*.

c. Motor Kelas C

Motor kelas C mempunyai torsi *starting* yang lebih besar dibandingkan motor kelas B, arus *starting* normal, *slip* kurang dari 0.05 pada kondisi *full load*, torsi *starting* sekitar 200% dari *rated*, dan biasanya digunakan untuk konveyor, pompa, kompresor dan lain sebagainya.

d. Motor Kelas D

Motor kelas D mempunyai torsi *starting* yang besar dan arus *starting* relatif rendah, *slip* besar, pada *slip* beban penuh mempunyai efisiensi lebih rendah dibandingkan kelas motor lainnya dan torsi *starting* sekitar 300%.

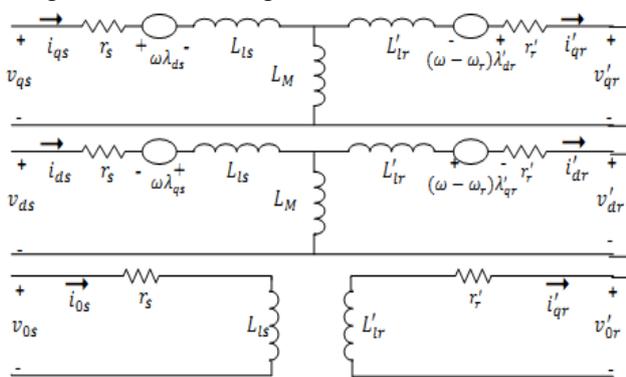


Gambar 3. Karakteristik Torsi dan Kecepatan pada Motor Induksi

C. Teori Kerangka Referensi

Teori kerangka referensi adalah metode yang akan mengubah arus, fluks, dan tegangan tiga fasa (berputar) ke bentuk dua fasa (berputar), metode ini digunakan untuk mempermudah analisa dan perhitungan. Persamaan tegangan dan torsi yang menggambarkan perilaku dinamis dari motor induksi adalah persamaan yang berubah terhadap waktu. Persamaan tersebut digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial dan melibatkan beberapa kompleksitas.

Perubahan variabel dapat digunakan untuk mengurangi kompleksitas persamaan ini dengan mengeliminasi semua induktansi yang berubah terhadap waktu, karena rangkaian listrik dalam gerak relatif, dari persamaan tegangan mesin. Dengan pendekatan ini, kumparan *poly phase* dapat dikurangi menjadi satu set dua kumparan fasa (dq) dengan sumbu magnetik dibentuk dalam kuadratur. Dalam kata lain, variabel stator dan rotor (tegangan, arus dan *flux linkage*) dari mesin induksi yang ditransformasi ke kerangka acuan, yang dapat berputar pada setiap kecepatan sudut atau tetap diam. kerangka acuan biasanya dikenal dalam analisis mesin sebagai kerangka acuan sembarang.



Gambar 4. Rangkaian Ekuivalen dq0 Motor Induksi

Tegangan masukan motor induksi tiga fasa sebelum ditransformasi adalah berupa tegangan tiga fasa, pemodelan tegangan masukan berdasarkan persamaan tegangan stator tiga fasa yang setiap fasanya berbeda 120° :

$$\begin{cases} V_{as} = |V| \sin(\omega t) \\ V_{bs} = |V| \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cs} = |V| \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (11)$$

Transformasi tegangan tiga fasa ke dua fasa berarti konversi koordinat dari sistem koordinat tiga fasa stasioner ke sistem koordinat dq berputar. Matriks yang dapat diimplementasikan dalam Simulink dengan melewati *masukan* tegangan, yang berisi matriks transformasi dalam persamaan:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & +\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \\ +\frac{1}{3} & +\frac{1}{3} & +\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Persamaan transformasi berlaku terlepas dari bentuk tegangan dan arus dalam stator atau rotor. Jika persamaan transformasi digunakan untuk mengubah tegangan dan arus dari stator dan rotor ke kerangka referensi (d-q axis), maka:

$$v_{qs} = p\lambda_{qs} + \lambda_{ds}p\theta + r_s i_{qs} \quad (13)$$

$$v_{ds} = p\lambda_{ds} - \lambda_{qs}p\theta + r_s i_{ds} \quad (14)$$

$$v_{qr} = p\lambda_{qr} + \lambda_{dr}p\theta + r_r i_{qr} \quad (15)$$

$$v_{dr} = p\lambda_{dr} - \lambda_{qr}p\theta + r_r i_{dr} \quad (16)$$

dimana,

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_M i_{qr} \quad (17)$$

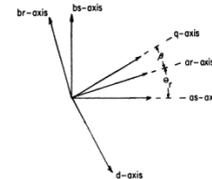
$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_M i_{dr} \quad (18)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_M i_{qs} \quad (19)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_M i_{ds} \quad (20)$$

keterangan:

- L_s = induktansi stator (henry)
- L_r = induktansi rotor (henry)
- r_s = resistansi stator (ohm)
- r_r = resistansi rotor (ohm)



Gambar 5. Axes of 2-pole 2-phase Symmetrical Machine

Secara umum, parameter mesin diukur berkaitan dengan kumparan stator, sehingga, akan lebih mudah untuk merujuk semua nilai rotor ke kumparan stator. dengan variabel rotor yang mengacu pada kumparan stator dan dengan *self-inductance* terpisah ke dalam komponen *leakage inductance* dan komponen *magnetizing inductance*, persamaan fluks menjadi:

Arus dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan *inverse* dari persamaan kopling fluks, yang dapat dinyatakan dengan:

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_r L_s - M^2} \begin{bmatrix} L_r & -M \\ -M & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_r L_s - M^2} \begin{bmatrix} L_r & -M \\ -M & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{rd} \end{bmatrix} \quad (22)$$

keterangan:

M = mutual induktansi (henry)

Sebuah gambaran untuk torsi elektromagnetik sesaat dapat diperoleh dengan menerapkan prinsip dari perpindahan sudut. Hubungan yang positif untuk gerakan motor, adalah:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{1}{\omega_b}\right) (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (23)$$

keterangan:

P = jumlah kutub,

ω_b = kecepatan sudut listrik basis.

$\omega_b = 1$, jika ω_m adalah kecepatan sudut mekanik, maka kecepatan sudut rotor adalah:

$$\omega_r = \frac{P}{2} \omega_m \quad (24)$$

dari persamaan keseimbangan torsi dengan mengabaikan faktor gesekan, ω_0 kecepatan sudut rotor dapat diperoleh sebagai:

$$\omega_0 = \int_0^t \frac{T - T_L}{J} dt \quad (25)$$

keterangan:

T = torsi motor (Nm)

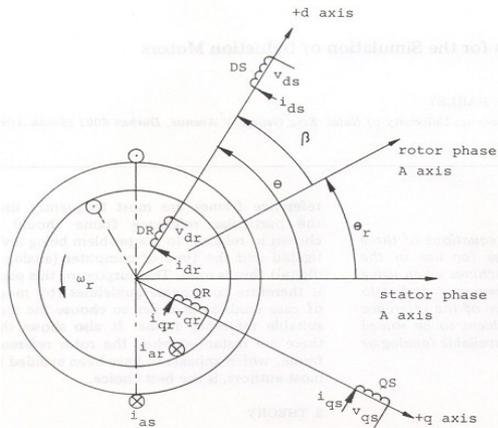
T_L = torsi beban (Nm)

J = momen inersia (kg m²)

t = waktu (det)

Stationary Reference Frame

Kerangka referensi dengan $\theta = 0$ disebut dengan *stationary reference frame* (kerangka referensi acuan stator) karena sumbu dq tidak berputar, selain itu sumbu d dipilih untuk sejajar dengan sumbu stator fasa A.



Gambar 6. DQ Axes Superimposed Onto a Three-Phase Induction Motor

$$\omega = p\theta = 0 \quad (26)$$

$$\beta = \theta_r = -\theta_r \quad (27)$$

$$p\beta = -p\theta_r = -\omega_r \quad (28)$$

Substitusi Persamaan 13 sampai dengan 16 ke Persamaan 17 sampai dengan 20, menjadi persamaan:

$$v_{qs} = p\lambda_{qs} + r_s i_{qs} \quad (29)$$

$$v_{ds} = p\lambda_{ds} + r_s i_{ds} \quad (30)$$

$$v_{qr} = p\lambda_{qr} + \omega_r \lambda_{qr} + r_r i_{qr} \quad (31)$$

$$v_{dr} = p\lambda_{dr} - \omega_r \lambda_{dr} + r_r i_{dr} \quad (32)$$

Transformasi dq ke abc

Transformasi ini merupakan *invers* dari transformasi abc ke dq, digunakan untuk blok konversi

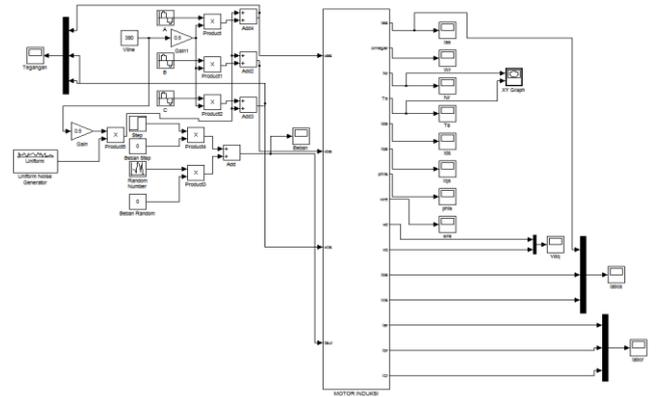
arus agar terlihat arus keluaran dari motor. Berikut persamaan yang dibentuk:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & +\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \end{bmatrix} \quad (33)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Perancangan Simulink

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimen yakni membuat model matematis motor induksi tiga fasa menggunakan model kerangka referensi acuan stator sehingga motor induksi tiga listrik dapat menghasilkan karakteristik unjuk kerja dinamisnya.



Gambar 7. Model Simulink Sistem Motor Induksi Tiga Fasa

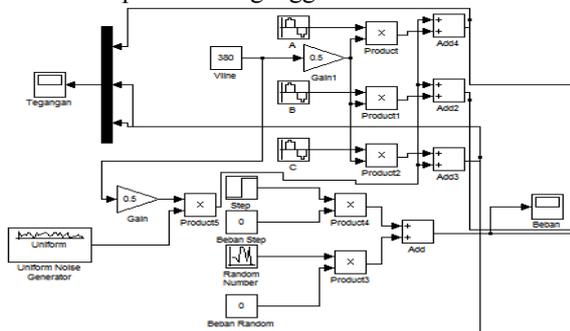
Tabel 1. Parameter-parameter motor induksi

No	Nama Parameter	Simbol	Nilai (satuan)
1.	Tegangan masukan	V	380 (volt)
2.	Jumlah kutub	P	4
3.	Resistansi stator	R_s	6.4 (ohm)
4.	Resistansi rotor	R_r	5.8 (ohm)
5.	Induktansi stator	L_s	0.45 (henry)
6.	Induktansi rotor	L_r	0.45 (henry)
7.	Mutual induktansi	M	0.36 (henry)
8.	Konstanta Inersia	J	0.00145 (kgm ²)

Model matematis motor induksi tiga fasa yang dibuat dilakukan dengan membuat model *Simulink* dari 4 sub model sehingga memiliki hubungan keterkaitan yang jelas antar sub model tersebut. sehingga didapat output berupa tegangan keluaran, arus keluaran, torsi elektromagnetik, dan kecepatan motor.

1. Model Tegangan Masukan dan Beban

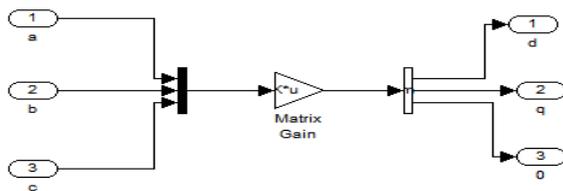
Tegangan masukan yang diberikan berupa tegangan tiga fasa, sedangkan keluaran yang dihasilkan adalah V_{as} , V_{bs} , V_{cs} membentuk tiga gelombang sinusoidal. Tegangan tersebut berasal dari tegangan stator tiga fasa yang setiap fasanya berbeda 120° . Selain masukan berupa tegangan tiga fasa, masukan dari simulasi ini juga dipengaruhi oleh beban berupa beban *step* dan beban *random*. Pembebanan ini dapat dipilih untuk digunakan, sehingga dapat dilihat kinerja dari motor saat terbebani atau tidak terbebani. Tegangan masukan terhubung ke model untuk transformasi tiga fasa ke dua fasa, sedangkan beban terhubung ke model mekanikal dari motor, mempengaruhi torsi dan momen inersia. Selain pembebanan, pada tegangan masukan akan dilakukan perubahan amplitudo dan gangguan simetris.



Gambar 8. Model Simulink Tegangan Masukan dan Beban

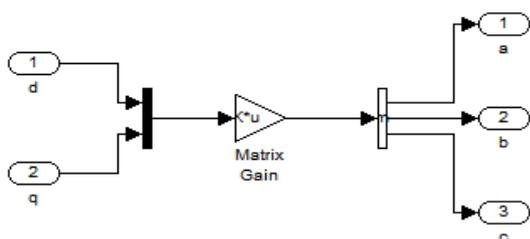
2. Model Kerangka Referensi

Sub model Kerangka Referensi memiliki dua sub model yaitu transformasi tiga ke dua fasa dan transformasi dua ke tiga fasa. Model kerangka referensi yang digunakan adalah acuan stator, model transformasi tiga ke dua fasa menggunakan matrik transformasi dapat dibentuk berdasarkan masukan tegangan tiga fasa dan menghasilkan keluaran tegangan dq (V_{dq}). Nilai yang dihasilkan akan digunakan dalam model dq *reference*. Model Kerangka Referensi berdasarkan Persamaan 12.



Gambar 9. Model Simulink 3-2 Fase Conversion

Matrik dalam persamaan 12 dimasukkan ke matrik gain pada gambar 9 dan merubah masukan V_{abc} menghasilkan keluaran tegangan dua fasa V_d , dan V_q untuk selanjutnya menjadi masukan model simulasi.

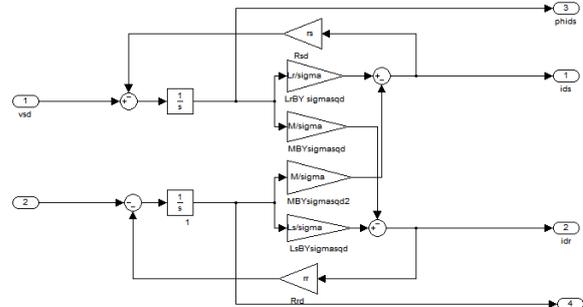


Gambar 10. Model Simulink 2-3 Fase Conversion

Matrik dalam persamaan 33 dimasukkan ke matrix gain pada gambar 10 dan merubah masukan idq menghasilkan keluaran arus tiga fasa ia , ib , dan ic untuk memperlihatkan arus keluaran dari motor induksi.

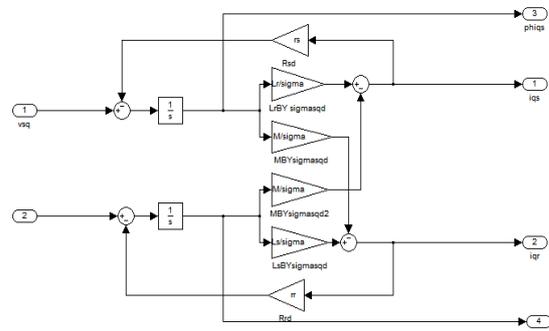
3. Model DQ Reference

Sub model Model DQ *Reference* merupakan model dari rangkaian ekuivalen dinamis dari motor induksi. Model ini terbagi menjadi dua sub model yaitu sub model D dan sub model Q. Komponen arus stator dapat digunakan untuk pembentukan *state variable*. Representasi *state space* kemudian terdiri dari menentukan persamaan diferensial yang hanya memungkinkan definisi variabel oleh integrasi dengan hubungan matematis perantara. Dengan demikian, hubungan resistansi yang dimasukkan dalam turunan fluks dapat menentukan persamaan diferensial rotor fluks komponen langsung. Ketika menerapkan prosedur yang sama untuk fluks lain. Kedua sub model tersebut menggunakan Persamaan 29 sampai dengan 32 dan persamaan 21 dan 22.



Gambar 11. Model Simulink D Reference

Pemodelan DQ *reference* menghasilkan keluaran yang dipengaruhi oleh waktu. Keluaran dari model DQ *reference* digunakan sebagai keluaran dari kinerja motor berupa tegangan dan arus DQ yang merupakan gambaran dari kondisi dinamis motor induksi. Model DQ *reference* sangat dipengaruhi oleh nilai parameter dari motor induksi. Sub model selanjutnya adalah model Q *reference*.

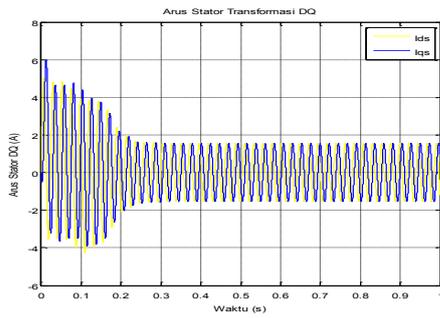


Gambar 12. Model Simulink Q Reference

4. Model Mekanikal

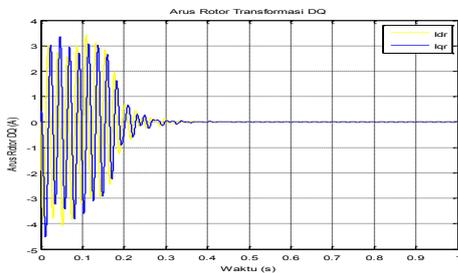
Sub model mekanikal merupakan model yang dapat memperlihatkan perilaku dari motor induksi. Model ini dibangun berdasarkan persamaan 23 sampai dengan 25. Sub model mekanikal motor ini memberikan keluaran berupa torsi elektromagnetik dan kecepatan motor.

Tegangan masukan yang diberi gangguan simetris akan mempengaruhi hasil arus induksi pada kumparan stator.



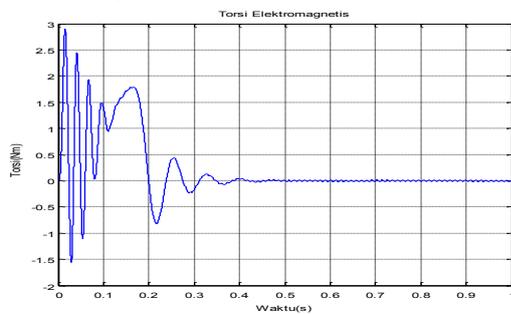
Gambar 20. Grafik Arus Stator DQ Reference dengan Gangguan Simetris

Arus stator yang dihasilkan akan menginduksi kumparan rotor sehingga dapat timbul GGL dari perbedaan magnet putar.

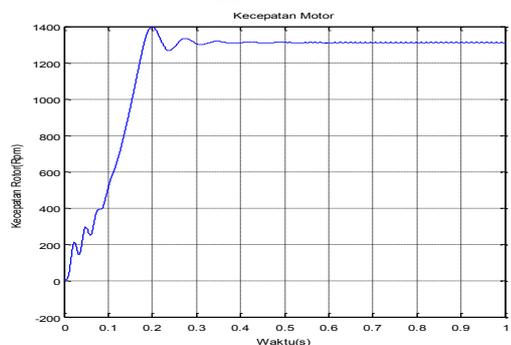


Gambar 21. Grafik Arus Rotor DQ Reference dengan Gangguan Simetris

Torsi dan kecepatan yang dihasilkan akibat gangguan simetris yang diberikan pada tegangan masukan, menjadi:



Gambar 22. Grafik Torsi Elektromagnetik Motor dengan Gangguan Simetris



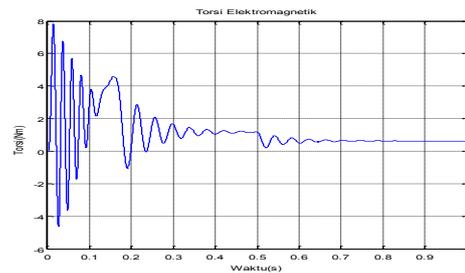
Gambar 23. Grafik Kecepatan Motor Induksi dengan Gangguan Simetris

B. Model Motor Induksi Berbeban

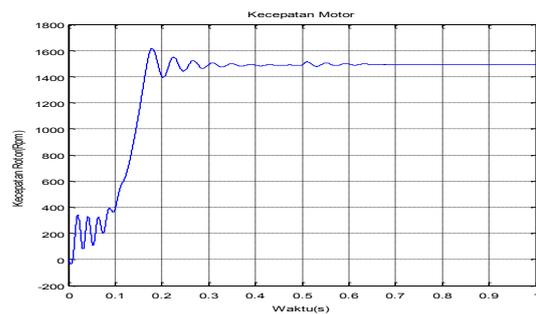
Pada simulasi ini beban yang digunakan adalah beban *step* dan beban *random*, blok beban ini dihubungkan dengan *subsystem* mekanikal motor. Beban berlaku sebagai torsi beban sebagai pengurang dari torsi elektromagnetik motor, hal ini akan mempengaruhi keluaran torsi elektromagnetik dan kecepatan motor yang juga mempengaruhi parameter momen inersia pada blok mekanikal motor.

1. Perubahan Amplitudo Tegangan

Hasil simulasi motor berbeban dengan perubahan amplitudo tegangan hanya berbeda di nilai untuk tiap tegangan masukan, sedangkan untuk distorsi akibat pembebanan sama pengaruhnya untuk keluaran tiap nilai tegangan masukan.



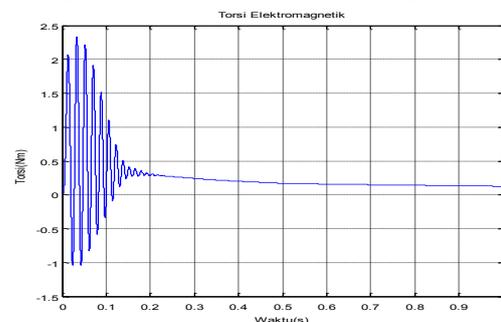
Gambar 24. Grafik Torsi Elektromagnetik 380 Volt Berbeban



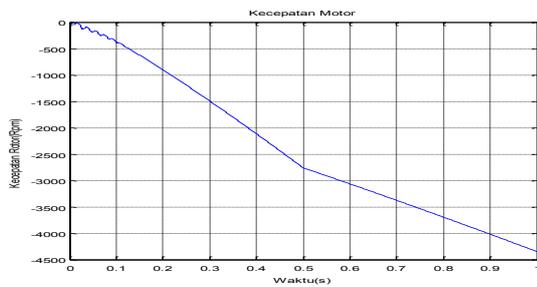
Gambar 25. Grafik Kecepatan Motor Induksi 380 Volt Berbeban

2. Gangguan Simetris

Pada percobaan simulasi ini motor diperlakukan dengan pembebanan *step* dan *random* serta gangguan simetris pada tegangan *input*. Ternyata hal ini membuat motor berjalan tidak stabil dan tidak mumpuni.



Gambar 26. Grafik Torsi Elektromagnetik Gangguan Simetris dan Beban



Gambar 27. Grafik Kecepatan Motor dengan Gangguan Simetris dan Beban

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi model dan analisis karakteristik motor induksi tiga fasa yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Berhasil membuat perancangan program untuk analisa karakteristik motor induksi tiga fasa standar NEMA, dengan spesifikasi motor $R1 = 6.4$; $X1 = 26.12$; $R2 = 5.8$; $X2 = 26.12$; $Xm = 115.27$ didapatkan karakteristik sesuai dengan NEMA B dihubungkan dengan teori standar NEMA motor induksi. Karakteristik motor dengan torsi maksimal normal 2.19 N-m, arus starting rendah 3.67 A, dan slip yang rendah saat torsi maksimal yaitu sebesar 12%.
2. Berhasil membuat model matematis kerangka referensi motor induksi tiga fasa menggunakan MATLAB *simulink*. Perubahan tegangan amplitudo mempengaruhi keluaran kinerja motor induksi sesuai dengan penurunan dan kenaikan tegangan masukan, pembebanan mempengaruhi blok mekanik motor membuat torsi lebih meningkat dan kecepatan motor menurun, dengan operasi kerja motor paling buruk pada motor dengan gangguan simetris dan pembebanan. Pembuatan *simulink* model ini dapat menjadi alternatif untuk mempelajari dan menganalisis kinerja motor induksi tiga fasa agar dapat merancang proteksi untuk mencegah gangguan yang akan terjadi.
3. Analisis efisiensi daya terhadap karakteristik motor membuktikan penurunan daya masukan akibat penurunan tegangan pada beban 40% torsi 3.44 N-m dan 55% torsi 4.7 N-m. Semakin kecil beban yang digunakan dan tegangan masukan yang semakin kecil akan memperbesar penghematan energi yang dihasilkan. Kenaikan beban 10% sampai dengan 100% mengakibatkan % Efisiensi naik 0.98 sampai 12 pada tegangan *input* konstan 380 V.

B. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang dihasilkan, maka saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya:

1. Model simulasi kerangka referensi dapat ditambahkan dengan berbagai pengujian metode *starting* motor induksi dan gangguan non simetris.
2. Sebagai pengembangan tugas akhir ini dapat dikaji tentang metode *vector control* yang merupakan aplikasi kontrol motor induksi tiga fasa yang dapat dibuat dari model dinamis motor induksi menggunakan kerangka referensi ini.

3. Dapat ditambahkan perancangan model proteksi untuk gangguan yang terjadi pada motor induksi tiga fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- Palpandar P. M., Ghanmare R.U., dan Makade N. 2013. *A Generalized Dynamic Model of Induction Motor using Simulink*. D.B.A.C.E.R, Nagpur.
- Ozpineci Burak, dan Tolbert Leon M.. 2009. *Simulink Implementation of Induction Machine Model A Modular Approach*. Oak Ridge National Laboratory.
- Robyns, B. 2012. *Vector Control of Induction Machines, Power Systems*. Springer-Verlag London.
- Aktaibi Adel, Ghanim Daw. Dkk. 2013. *Dynamic Simulation of a Three-Phase Induction Motor Using Matlab Simulink*. Memorial University of Newfoundland.
- Lee R. J., Pillay P. dan Harley R.G. 1984. *D, Q Reference Frames for the Simulation of Induction Motors*. University of Natal.
- Finayani Yaya, dan Alhan Muhammad. 2011. *Analisis Karakteristik Motor Induksi Tiga Fase NEMA D Untuk Melakukan Penghematan Energi*. Politeknik Pratama Mulia.
- Kadaffi, Muhamar.MT. *Penerapan Simulink Untuk Simulasi*. Universitas Mercu Buana: Jakarta.2011.
- Purnomo, Isnanto Heru. *Analisis Motor Induksi Tiga Fasa dengan Metode Kerangka Referensi*. Universitas Diponegoro.
- Chapman, Stephen J. *Electric Machinery Fundamentals 4th Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Putri, Devia Rafika. 2013. *Rancang Bangun Laboratorium Virtual untuk Studi Analisis Karakteristik Motor-motor Listrik*. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Yandri. 2011. *Penentuan Parameter dan Arus Asut Motor Induksi Tiga Fasa*. Universitas Tanjungpura.
- Krause P. C., dan Thomas C. H. 1965. *Simulation of Symmetrical Induction Machinery*. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*.
- Prasetyo, Eko. 2009. *Analisis Pengaruh Jatuh Tegangan Jala-jala Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai*. Universitas Sumatera Utara.
- Chapter 3 Model of a Three Phase Induction Motor*. Tersedia dari <http://www.ntech.edu/files/cesr/StudThesis/asuri/chapter3.pdf>.