

Perilaku Dinamik Motor Induksi Pada *Dual Frequency Supply*

Asfari Hariz Santoso^{*a)}, Imron Ridzki^{a)}, Lukman Hakim^{a)}, Popong Effendrik^{a)}, Priya Surya Harijanto^{a)}, Adam Amrullah Wijaya^{a)}

(Received 14 Oktober 2024 || Revised 6 Februari 2025 || Published 28 Februari 2025)

Abstract: The application of induction motors is currently very broad, one of which is in the fertilizer industry as a motor for vibrating screens with an auto clean mechanism. In this application, the induction motor is operated with two frequency values of 50 Hz during screening and 60 Hz during the auto clean process. The difference in frequency affects the dynamic characteristics of the induction motor. Especially when operated above the rated frequency, it will result in an increase in motor temperature so that regular monitoring of the motor temperature is needed. This study produces the dynamic characteristics of the motor when the supply frequency is 50 Hz with a transient condition duration of 0.5 seconds and a torque at steady state conditions of 25.89 Nm, while when the supply frequency is 60 Hz the transient condition duration is 0.5 seconds with a torque at steady state conditions of 31.03 Nm.

Keywords: induction motor, frequency, dynamic analysis, torque

1. Pendahuluan

Pupuk adalah bahan yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan menyediakan unsur hara atau nutrisi. Penggunaan pupuk di bidang pertanian merupakan kebutuhan wajib [1], dan PT Petrokimia Gresik adalah salah satu perusahaan yang memproduksi pupuk, termasuk pupuk fosfat di unit Pupuk Fosfat 1 (PF1). Dalam proses produksi di unit PF1, pupuk yang dihasilkan perlu dipilah berdasarkan ukurannya, menggunakan motor induksi 3 fasa sebagai penggerak mesin pengayak. Untuk mengatasi masalah tertutupnya lubang ayakan oleh sisa pupuk, unit PF1 menggunakan kontrol kecepatan yang disebut Auto-Clean, yang secara otomatis meningkatkan kecepatan motor listrik untuk membersihkan lubang ayakan [2].

Pengaturan kecepatan dilakukan dengan *Variable Frequency Drive (VFD)*, yang meningkatkan frekuensi dari 50 Hz menjadi 60 Hz. Meskipun motor induksi pada mesin pengayak dirancang untuk frekuensi 50 Hz, dalam waktu singkat motor dipaksa bekerja melebihi batas frekuensi tersebut. Dampak yang dihasilkan dari peningkatan frekuensi ini berpotensi menyebabkan arus berlebih. Salah satu penelitian yang sudah dilakukan adalah dengan menganalisis dinamik motor induksi dengan perubahan secara tiba-tiba [3].

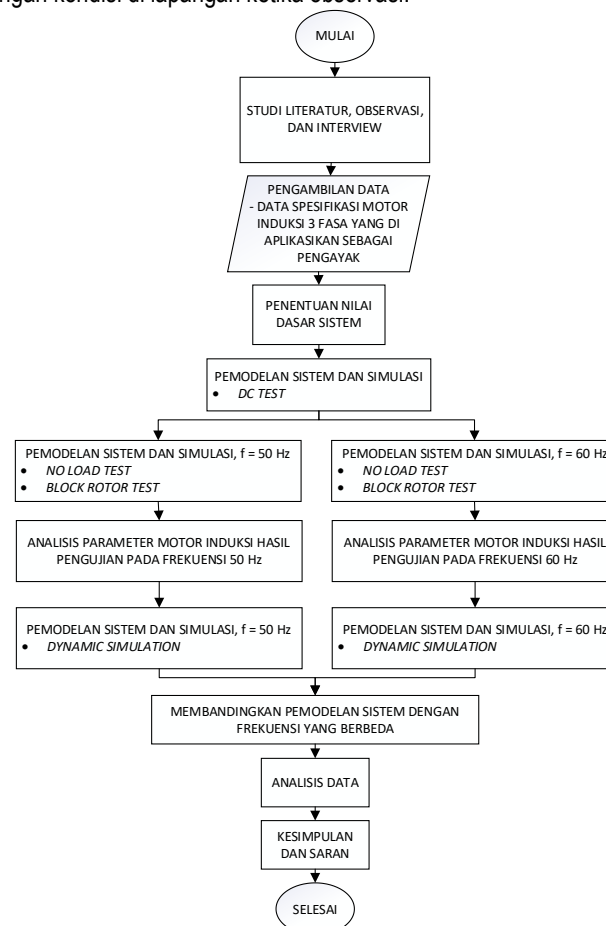
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamik motor induksi melalui nilai parameter motor induksi yang digunakan sebagai penggerak pengayak akibat perubahan frekuensi pada motor pengayak. Dengan melakukan *DC test*, *no load test*, dan *block rotor test* dengan simulasi pada SIMULINK MATLAB yang bisa menyebabkan perubahan parameter terutama pada reaktansinya yaitu X_1 , X_2 dan X_M dan karakteristik torsi fungsi kecepatan motor induksi dengan *Dynamic Simulation* yang menggunakan metode *park dq* [3]. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai acuan pengoperasian motor induksi 3 fasa dengan dua frekuensi suplai khususnya pada motor vibrator dengan sistem *auto clean*.

2. Metode

2.1 Prosedur Penelitian

Alur penelitian secara umum ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 2.1. Prosedur diawali dengan studi observasi kondisi lapangan dengan mendapatkan data serta prosedur pengoperasian motor. Informasi yang didapatkan digunakan sebagai data awal pada simulasi pada Simulink Matlab. Kemudian simulasi dijalankan dengan melakukan pengujian DC, *no load*, dan

block rotor dengan frekuensi 50 Hz dan 60 Hz pada Motor vibrator 4 kW. Nilai parameter motor induksi yang meliputi R_1 , X_1 , X_m , R_2 , dan X_2 yang didapatkan dari pengujian digunakan sebagai data masukan pada analisis dinamik. Hasil yang didapat divalidasi dengan kondisi di lapangan ketika observasi.



GAMBAR 2.1 FLOWCHART PENGARUH FREKUENSI TERHADAP PARAMETER MOTOR INDUKSI UNTUK MESIN PENGAYAK

2.2 Data Motor Induksi

Motor induksi yang digunakan sebagai penggerak mesin pengayak memiliki data sebagai berikut,

Daya Motor : 4 kW
Tegangan Kerja : 400/650 V
Frekuensi : 50 Hz

*Korespondensi: asfari.hariz@polinema.ac.id

a) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Malang, Indonesia.

Jumlah Fasa : 3 Fasa
 Jumlah Kutub : 4 Kutub
 Hubungan Belitan : Y

Data yang didapatkan dari *name plate* motor digunakan sebagai data awal sebagai acuan ketika pengujian DC, *No Load*, dan *Block Rotor*.

2.3 Rangkaian Ekuivalen

Motor induksi tiga fasa melakukan proses induksi tegangan dan arus pada rotor dari rangkaian stator. Pada prinsipnya proses tersebut yang terjadi pada motor induksi hakikatnya sama seperti di transformator yang berbeban resistif, sehingga penggambaran rangkaian ekuivalennya berdasarkan rangkaian ekuivalen transformator [3], [4], [5]. Karena motor induksi tiga fasa selalu didesain dengan sistem yang seimbang, maka rangkaian ekuivalen bisa dianalisis dengan satu fasa motor atau yang mewakili satu fasa dari mesin tiga fasa [4], [6], [7], yang mencakup sambungan antara R_1 (resistansi rangkaian stator), R'_2 (resistansi rangkaian rotor), X_1 (reaktansi fluks bocor pada rangkaian magnet stator), X'_2 (reaktansi fluks bocor pada rangkaian magnet rotor), dan X_M (reaktansi dari fluks magnetisasi) [8], [9]. Rangkaian ekuivalen ini, digunakan untuk menganalisis dan mengevaluasi kondisi serta kinerja motor induksi. Metode pengujiannya, yaitu :

1. Pengujian Tahanan Stator (*DC Test*).
2. Pengujian Rotor Tertahan (*Blok Rotor Test*).
3. Pengujian Tanpa Beban (*No Load Test*).

2.3.1 Pengujian DC

Pengujian DC (*DC Test*) adalah pengujian dengan menggunakan sumber DC untuk mengetahui nilai dari parameter rangkaian ekuivalen motor induksi 3 fasa sehingga perbedaan nilai dari frekuensi tidak berpengaruh pada hasil *DC Test*. Saat pengujian DC yang menghambat motor adalah resistansi stator, dan oleh karena itu besarnya hambatan dapat ditentukan [9]. Pengujian ini untuk menentukan nilai resistansi setiap belitan per fasa stator [4]. Jika R_1 adalah resistansi antara dua terminal stator motor, maka resistansi per fasa untuk hubungan Y adalah:

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2 I_{DC}} \quad (2-1)$$

V_{DC} : Tegangan searah
 I_{DC} : Arus searah
 R_1 : Resistansi pada sisi stator

2.3.2 Pengujian Tanpa Beban

Pada pengujian tanpa beban (*No Load Test*) kecepatan motor induksi akan mendekati kecepatan sinkronnya. Yang bertujuan untuk mengetahui nilai dari parameter rangkaian ekuivalen motor induksi 3 fasa. Pada pengujian tanpa beban, slip mendekati nol, impedansi rangkaian rotor hampir tak terhingga [10]. Dari pengujian ini diambil parameter Z_{NL} , R_{NL} , dan X_{NL} dengan persamaan di bawah,

$$\text{Impedansinya adalah} \quad Z_{NL} = \frac{V_I}{I_I} \quad (2-2)$$

$$\text{Resistansinya adalah} \quad R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3 I_I^2} \quad (2-3)$$

$$\text{Reaktansinya adalah} \quad X_{NL} = (Z_{NL}^2 - R_{NL}^2)^{1/2} \quad (2-4)$$

dengan :

V_{NL} : Tegangan antar fasa tanpa beban
 V_I : Tegangan fasa ke netral tanpa beban
 I_{NL} : Arus tanpa beban
 P_{NL} : Daya tanpa beban
 R_{NL} : Impedansi tanpa beban
 Z_{NL} : Resistansi tanpa beban
 X_{NL} : Reaktansi tanpa beban

2.3.3 Pengujian *Block Rotor*

Block rotor test adalah pengujian dengan menahan di sisi rotor agar tidak bergerak. Hal ini dilakukan untuk mengetahui nilai dari parameter rangkaian ekuivalen motor induksi 3 fasa. Percobaan ini dimaksudkan untuk mengetahui reaktansi stator (X_1), reaktansi rotor (X'_2), reaktansi magnetik (X_M) serta resistansi rotor (R'_2) [4]. Dari pengujian ini diambil parameter Z_{BL} , R_{BL} , dan X_{BL} impedansinya adalah:

$$Z_{BL} = \frac{V_I}{\sqrt{3} \cdot I_I} \quad (2-5)$$

Resistansinya adalah

$$R_{BL} = \frac{P_{BL}}{3 I_I^2} \quad (2-6)$$

Reaktansinya adalah:

$$X_{BL} = (Z_{BL}^2 - R_{BL}^2)^{1/2} \quad (2-7)$$

dengan :

V_1 : Tegangan fasa ke netral rotor ditahan
 I_{BL} : Arus rotor ditahan
 P_{BL} : Daya rotor ditahan
 R_{BL} : Impedansi rotor ditahan
 Z_{BL} : Resistansi rotor ditahan
 X_{BL} : Reaktansi rotor ditahan

Dari perhitungan di atas dapat dicari parameter rangkaian ekuivalen lainnya.

$$X'_{BL} = \frac{f}{f_{BL}} \cdot X_{BL} ; X'_{BL} = X_{BL} \quad (2-8)$$

Dan,

$$X'_{BL} = X_1 + X'_2 ; X_1 = X'_2 \quad (2-9)$$

Sehingga,

$$X_1 = \frac{X'_{BL}}{2} \quad (2-10)$$

Maka X_M adalah

$$X_M = X_{NL} - X_1 \quad (2-11)$$

R'_2 adalah

$$R'_2 = \left(\frac{X'_2 + X_M}{X_M} \right)^2 R_1 \quad (2-12)$$

dengan:

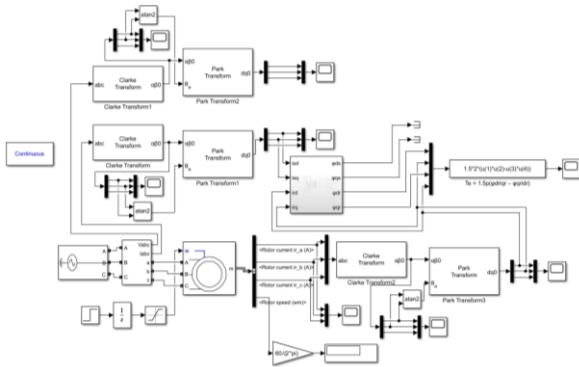
X_{BL} : Reaktansi rotor ditahan
 X'_{BL} : Reaktansi rotor ditahan
 f_{BL} : Frekuensi rotor ditahan
 f : Frekuensi sumber
 X_1 : Resistansi stator
 X'_2 : Resistansi rotor
 X_M : Reaktansi magnetisasi
 X_{NL} : Reaktansi tanpa beban

R_1 : Resistansi stator

R_2 : Resistansi rotor

2.4 Simulasi Dinamik

Untuk mengoptimalkan kinerja motor induksi 3 fasa, analisis perilaku dinamik motor induksi 3 fasa menggunakan pemodelan dinamik di Matlab (Gambar 2.4) menjadi sangat penting. Salah satu pendekatan yang digunakan dalam analisis ini adalah metode transformasi *Park dq* [11]. metode *Park dq* yang dikenalkan oleh R. H. Park sekitar tahun 1920-an [12], [13]. Sehingga perilaku motor dapat dianalisis dan disimulasikan [13], [14]. Ketika motor induksi tiga fasa terhubung dengan sumber maka tegangan induksi akan menghasilkan arus dan torsi pada rotor [15]. Torsi adalah momen putar yaitu gaya yang diterapkan untuk memutar benda pada sebuah sumbu. Pada motor induksi, sisi rotor bisa bergerak karena adanya torsi yang bekerja pada poros. Torsi tersebut dihasilkan oleh medan magnet yang berputar dan merupakan definisi torsi elektromagnetik.



GAMBAR 2.4 PEMODELAN DYNAMIC PADA MATLAB SIMULINK.

Selanjutnya dicari beberapa parameternya berfungsi untuk mencari nilai torsi. Bisa dicari menggunakan persamaan:

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2-13)$$

Dan nilai L'_r ,

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (2-14)$$

Sehingga bisa dicari untuk nilai φ_{qs} ,

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + L_m \cdot I'_{qr} \quad (2-15)$$

Nilai dari φ_{ds} ,

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + L_m \cdot I'_{dr} \quad (2-16)$$

Nilai dari φ'_{qr} ,

$$\varphi'_{qr} = L'_r \cdot I'_{qr} + L_m \cdot I_{qs} \quad (2-17)$$

Dan nilai dari φ'_{dr} ,

$$\varphi'_{dr} = L'_r \cdot I'_{dr} + L_m \cdot I_{ds} \quad (2-18)$$

dengan :

L_m : Induktansi bersama

L_{ls} : Induktansi bocor stator

L'_{lr} : Induktansi bocor rotor

L_s : Total induktansi stator

L'_r : Total induktansi rotor

I_{qs} : Arus stator pada sumbu *quadrature*

I'_{qr} : Arus rotor pada sumbu *quadrature*

I_{ds} : Arus stator pada sumbu *direct*

I'_{dr} : Arus rotor pada sumbu *direct*

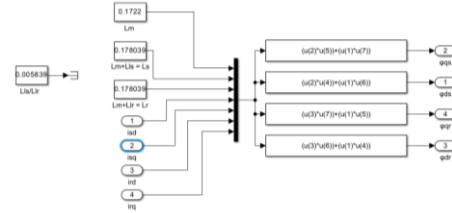
φ_{qs} : Fluks stator pada sumbu *quadrature*

φ_{ds} : Fluks stator pada sumbu *direct*

φ'_{qr} : Fluks rotor pada sumbu *quadrature*

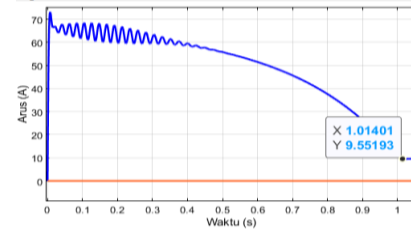
φ'_{dr} : Fluks rotor pada sumbu *direct*

Sedangkan pemodelan untuk mendapatkan nilai fluks dq motor induksi dapat dilihat di Gambar 2.5.

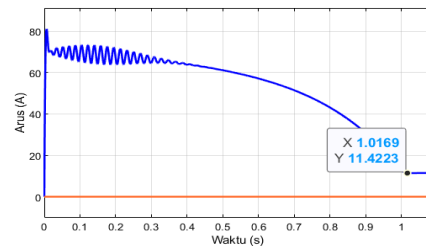


GAMBAR 2.5 PEMODELAN DALAM MENCAIRI FLUKS DQ PADA MOTOR INDUKSI 3 FASA.

Selain itu juga menggunakan arus dengan metode *park dq* dari sisi rotor dengan karakteristik arus pada frekuensi 50 Hz dan 60 Hz dapat dilihat di Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.



GAMBAR 2.6 ARUS ROTOR FREKUENSI 50 Hz METODE PARK DQ



GAMBAR 2.7 ARUS ROTOR FREKUENSI 60 Hz METODE PARK DQ

sehingga Gambar 2.4 bisa disederhanakan berdasarkan Persamaan 2-19 menjadi Gambar 2.8.

$$T_e = 1,5 \times \text{poles pair} (\omega \varphi_{dr} I'_{qr} - \omega \varphi_{qr} I'_{dr}) \quad (2-19)$$

dengan:

V_{qs} : Tegangan stator pada sumbu *quadrature*

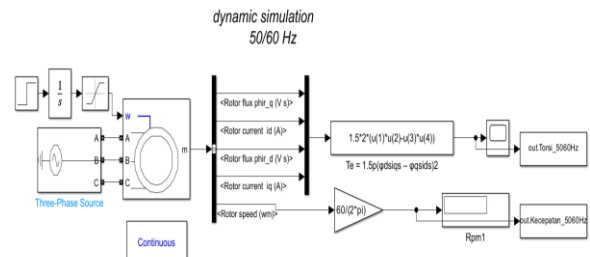
I'_{qr} : Arus rotor pada sumbu *quadrature*

I'_{dr} : Arus rotor pada sumbu *direct*

φ'_{qr} : Fluks rotor pada sumbu *quadrature*

φ'_{dr} : Fluks rotor pada sumbu *direct*

ω : Kecepatan sudut stator



2.8 PEMODELAN DYNAMIC SIMULATION SEDERHANA

3. Hasil dan Pembahasan

3.1.1 DC TEST

Hasil simulasi DC test diperoleh data seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Sedangkan rangkaian ekivalen setelah DC test dapat dilihat di Gambar 3.1.

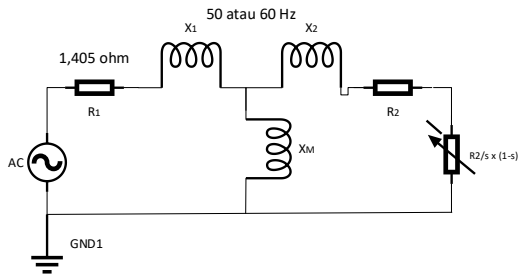
TABEL 3.1 HASIL SIMULASI DC TEST.

Hasil Simulasi Frekuensi 50 Hz	
Tegangan (V _{DC})	12 V
Arus (I _{DC})	4,27 A

Dari data hasil pengujian simulasi di *software matlab Simulink* maka bisa ditentukan R₁ atau resistansi pada stator. Karena motor tersebut menggunakan hubungan Y maka dalam menghitung R₁ menggunakan persamaan (2.1),

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2 I_{DC}} \text{ atau } \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \times 0,5 = \frac{12 \text{ V}}{4,271 \text{ A}} \times 0,5 = 1,405 \text{ ohm}$$

Pada saat DC test tidak ada perbedaan sama sekali dengan dua frekuensi suplai karena dengan motor induksi yang sama motor dialiri dengan tegangan DC sebagai pengujian sehingga perbedaan frekuensi tidak berpengaruh pada kondisi pengujian ini. Hasil dari pengujian ini adalah motor induksi 3 fasa ini memiliki nilai dari R₁ = 1,405 Ohm. Rangkaian ekivalen setelah DC test dapat dilihat di Gambar 3.1.



GAMBAR 3.1 RANGKAIAN EKIVALEN SETELAH SIMULASI DC TEST

3.1.2 No Load Test

Dengan perbedaan acuan dari dua variabel frekuensi dan tegangan saat simulasi maka arus dan daya yang dihasilkan akan berbeda. Dari hasil simulasi, diperoleh hasil simulasi *no load test* seperti pada Tabel 3.2.

TABEL 3.2 PERBANDINGAN SIMULASI NO LOAD TEST

Nilai Parameter	Frekuensi 50 Hz	Frekuensi 60 Hz
Tegangan (V)	222 V	270 V
Arus (A)	3,891 A	3,834 A
Daya Aktif / P (W)	339,2 W	340,9 W
Kecepatan (rpm)	1499	1799

Lalu menghitung Z_{NL}, R_{NL}, dan X_{NL} saat frekuensi 50 Hz:

$$Z_{NL} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{222 \text{ V}}{3,891 \text{ A}} = 57,05 \Omega$$

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3 I_1^2} = \frac{339,2 \text{ W}}{3 \times 3,891 \text{ A}^2} = 7,47 \Omega$$

$$X_{NL} = (Z_{NL}^2 - R_{NL}^2)^{1/2} = (57,05^2 - 7,47^2)^{1/2} = 56,56 \Omega$$

Serta saat frekuensi 60 Hz:

$$Z_{NL} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{270 \text{ V}}{3,834 \text{ A}} = 70,42 \Omega$$

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3 I_1^2} = \frac{340,9 \text{ W}}{3 \times 3,834 \text{ A}^2} = 7,73 \Omega$$

$$X_{NL} = (Z_{NL}^2 - R_{NL}^2)^{1/2} = (70,42^2 - 7,73^2)^{1/2} = 70 \Omega$$

TABEL 3.3 PERBANDINGAN PERHITUNGAN NO LOAD TEST

Hasil Perhitungan	Frekuensi 50 Hz	Frekuensi 60 Hz
Z _{NL}	57,05 Ohm	70,42 Ohm
R _{NL}	7,47 Ohm	7,73 Ohm
X _{NL}	56,56 Ohm	70 Ohm

Pada frekuensi 50 Hz, Z_{NL} sebesar 57,05 Ohm, sedangkan pada 60 Hz sebesar 70,42 Ohm, dengan selisih 13,37 Ohm yang mempengaruhi nilai X_{NL}. R_{NL} yang dihitung menggunakan daya dan arus dari simulasi, adalah 7,47 Ohm pada 50 Hz dan 7,73 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 0,26 Ohm. X_{NL} yang dihitung dari Z_{NL} dan R_{NL}, menunjukkan nilai 56,56 Ohm pada 50 Hz dan 70 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 13,44 Ohm.

3.1.3 Block Rotor Test

Dengan perbedaan acuan dari dua variabel frekuensi dan tegangan saat simulasi maka arus dan daya yang dihasilkan akan berbeda. Dari hasil simulasi, diperoleh hasil seperti pada Tabel 3.4.

TABEL 3.4 PERBANDINGAN SIMULASI BLOCK ROTOR TEST

Nilai Parameter	Frekuensi 50 hz	Frekuensi 60 hz
Tegangan (V)	220.1 V	264.1 V
Arus (A)	48.54 A	51.51 A
Daya Aktif / P (W)	4942 W	6000 W

Lalu menghitung Z_{BL}, R_{BL}, dan X_{BL} saat frekuensi 50 Hz:

$$Z_{BL} = \frac{V_1}{\sqrt{3} \times I_1} = \frac{220,1 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 48,54 \text{ A}} = 2,62 \Omega$$

$$R_{BL} = \frac{P_{NL}}{3 I_1^2} = \frac{4942 \text{ W}}{3 \times 48,54 \text{ A}^2} = 0,7 \Omega$$

$$X_{BL} = (Z_{BL}^2 - R_{BL}^2)^{1/2} = (2,62^2 - 0,7^2)^{1/2} = 2,53 \Omega$$

Serta saat frekuensi 60 Hz

$$Z_{BL} = \frac{V_1}{\sqrt{3} \times I_1} = \frac{264,1 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 51,51 \text{ A}} = 2,96 \Omega$$

$$R_{BL} = \frac{P_{NL}}{3 I_1^2} = \frac{6000 \text{ W}}{3 \times 51,51 \text{ A}^2} = 0,75 \Omega$$

$$X_{BL} = (Z_{BL}^2 - R_{BL}^2)^{1/2} = (2,96^2 - 0,75^2)^{1/2} = 2,86 \Omega$$

TABEL 3.5 PERBANDINGAN PERHITUNGAN BLOCK ROTOR TEST

Nilai Parameter	Frekuensi 50 Hz	Frekuensi 60 Hz
Z _{BL}	2.62 Ohm	2.96 Ohm
R _{BL}	0.7 Ohm	0.75 Ohm
X _{BL}	2.53 Ohm	2.86 Ohm

Dari Tabel 3.5 Z_{BL} dihitung dari tegangan dan arus yang diperoleh dari simulasi. Pada frekuensi 50 Hz, Z_{BL} bernilai 2,62 Ohm, sedangkan pada 60 Hz bernilai 2,96 Ohm, dengan selisih 0,34 Ohm yang mempengaruhi X_{BL}. R_{BL} yang dihitung dari daya dan arus, bernilai 0,7 Ohm pada 50 Hz dan 0,75 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 0,05 Ohm. X_{BL} yang dihitung dari Z_{BL} dan R_{BL}, memiliki nilai 2,53 Ohm pada 50 Hz dan 2,86 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 0,34 Ohm. Sehingga dari data hasil perhitungan tersebut bisa ditentukan X'_{BL}, X₁, X'₂, X_M, dan R'₂. Karena f_{BL} dan f nilainya sama yaitu frekuensi sumber, maka diperoleh hasil beberapa parameter berikut.

Saat frekuensi 50 Hz:

$$X'_{BL} = \frac{f}{f_{BL}} \cdot X_{BL}; X'_{BL} = X_{BL} = 2,53 \text{ Ohm}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X'_{BL}}{2} = \frac{2,53}{2} = 1,26 \text{ Ohm}$$

$$X_M = X_{NL} - X_1 = 55,56 - 1,26 = 55,3 \text{ Ohm}$$

$$R'_2 = \left(\frac{X'_2 + X_M}{X_M} \right)^2 R_1 = \left(\frac{1,26 + 55,3}{55,3} \right)^2 \times 1,405 = 1,47 \text{ Ohm}$$

Saat frekuensi 60 Hz:

$$X'_{BL} = \frac{f}{f_{BL}} \cdot X_{BL}; X'_{BL} = X_{BL} = 2,86 \text{ Ohm}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X'_{BL}}{2} = \frac{2,86}{2} = 1,43 \text{ Ohm}$$

$$X_M = X_{NL} - X_1 = 70 - 1,43 = 68,57 \text{ Ohm}$$

$$R'_2 = \left(\frac{X'_2 + X_M}{X_M} \right)^2 R_1 = \left(\frac{1,43 + 68,57}{68,57} \right)^2 \times 1,405 = 1,46 \text{ Ohm}$$

X'_{BL} , yang sama dengan X_{BL} karena pengujian *Block Rotor Test* menggunakan frekuensi yang sama dengan sumbernya, bernilai 2,53 Ohm pada frekuensi 50 Hz dan 2,86 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 0,33 Ohm yang mempengaruhi X_1 dan X'_2 . X_1 dan X'_2 dihitung dengan membagi X'_{BL} menjadi 1,26 Ohm pada 50 Hz dan 1,43 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 0,17 Ohm, yang berpengaruh pada X_M dan R'_2 . X_M , dihitung dari X_{NL} dan X_1 , memiliki nilai 55,3 Ohm pada 50 Hz dan 68,57 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 13,27 Ohm yang mempengaruhi R'_2 . R'_2 , dihitung dari X_M , X_1 , dan X'_2 , bernilai 1,47 Ohm pada 50 Hz dan 1,46 Ohm pada 60 Hz, dengan selisih 0,01 Ohm. Nilai pada pengujian *block rotor* memiliki perbedaan berdasar nilai frekuensi suplai, hal ini berbeda dengan penelitian dengan merubah tegangan suplai yang didapatkan resistansi dan reaktansi motor sama [3].

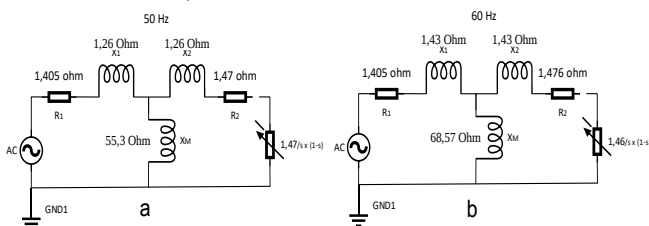
3.1.4 Perbandingan Rangkaian Ekuivalen

Dari hasil simulasi dari R_1 dan perhitungan antara X'_{BL} , X_1 , X'_2 , X_M dan R'_2 diperoleh perbandingan parameter seperti di Tabel 3.6.

TABEL 3.6 PERBANDINGAN PARAMETER PADA RANGKAIAN EKIWALEN

PARAMETER	FREKUENSI 50 Hz	FREKUENSI 60 Hz
R_1	1,405 Ohm	1,405 Ohm
$X_1 = X'_2$	1.26 Ohm	1.43 Ohm
X_M	55.3 Ohm	68.57 Ohm
R'_2	1.47 Ohm	1.46 Ohm

Bisa diperoleh bahwa parameter yang sama hanya R_1 sedangkan parameter X_1 , X'_2 , X_M , dan R'_2 dari rangkaian saat menggunakan 60 Hz lebih tinggi dari pada frekuensi 50 Hz. Rangkaian ekuivalen pada frekuensi 50 Hz dapat dilihat di Gambar 3.2a dan pada frekuensi 60 Hz dapat dilihat di Gambar 3.2b.

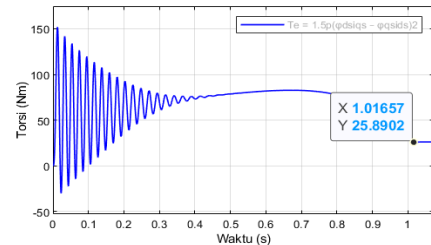


GAMBAR 3.2 RANGKAIAN EKIWALEN DENGAN FREKUENSI 50 Hz DAN 60 Hz

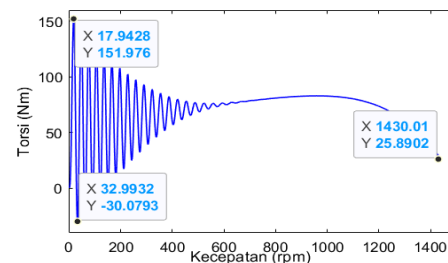
3.2 Dynamic Simulation

Apabila disimulasikan menggunakan frekuensi 50 Hz maka diperoleh data seperti pada Gambar 3.3. dan Gambar 3.4. Gambar

3.3 menunjukkan karakteristik motor induksi dari pengasutan hingga steady state. Karakteristik torsi elektromagnetik serupa dengan arus motor induksi 3 fasa, seiring dengan kecepatan rotor. Dengan tegangan seimbang, torsi maksimum mencapai 151,97 Nm pada 17,94 rpm dalam 1,016 detik untuk steady state. Gambar 3.4 menunjukkan karakteristik kecepatan rotor dari pengasutan hingga steady state, dengan kecepatan rotor mencapai 1430 rpm dan torsi 25,89 Nm.

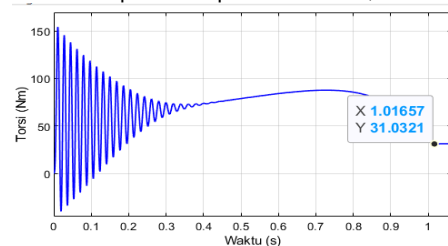


GAMBAR 3.3 GRAFIK KARAKTERISTIK TORSI FUNGSI WAKTU 50 Hz

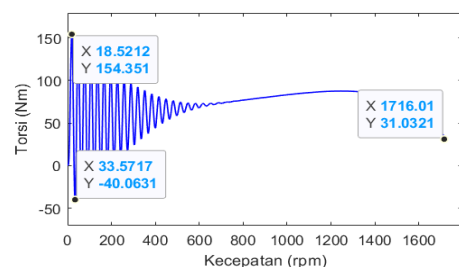


GAMBAR 3.4 GRAFIK KARAKTERISTIK TORSI FUNGSI KECEPATAN 50 Hz

Apabila disimulasikan menggunakan frekuensi 60 Hz maka diperoleh data seperti pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6. Dari Gambar 3.5 dan 3.6, terlihat karakteristik torsi elektromagnetik motor induksi dari pengasutan hingga steady state. Karakteristik torsi elektromagnetik serupa dengan arus motor induksi 3 fasa, seiring dengan kecepatan rotor. Dengan tegangan seimbang, torsi maksimum mencapai 154,35 Nm pada 18,52 rpm dalam 1,016 detik untuk steady state. Gambar 3.6 menunjukkan karakteristik kecepatan rotor dari pengasutan hingga steady state, dengan kecepatan rotor mencapai 1716 rpm dan torsi 31,03 Nm.



GAMBAR 3.5 GRAFIK KARAKTERISTIK TORSI FUNGSI WAKTU 60 Hz



GAMBAR 3.6 GRAFIK KARAKTERISTIK TORSI FUNGSI KECEPATAN 60 Hz

Hasil perbandingan simulasi pada kedua frekuensi itu dapat

dilihat di Tabel 3.7. Diketahui bahwa torsi elektromagnetik pada frekuensi 60 Hz yang nilai torsi maksimumnya 154,35 Nm dan saat steady state torsi bernilai 31,03 Nm. Nilai tersebut lebih besar dari pada frekuensi 50 Hz yang nilai torsi maksimumnya 151,97 Nm dan saat steady state torsi 25,89 Nm. Waktu untuk mencapai kondisi steady state adalah sama yaitu 0,016 detik.

TABEL 3.7 PERBANDINGAN DYNAMIC SIMULATION METODE PARK DQ

Hasil Simulasi	Frekuensi 50 Hz	Frekuensi 60 Hz
Kecepatan (rpm)	1430 rpm	1716 rpm
Maksimum Torsi	151,97 Nm	154,35 Nm
Steady State	25,89 Nm	31,03 Nm

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa saat frekuensi dinaikkan parameter rangkaian ekuivalen motor induksi 3 fasa semuanya dari X_1 , X'_2 , dan X_M akan berbanding lurus dengan naiknya frekuensi dari 50 Hz ke 60 Hz terkecuali parameter dari R'_2 yang akan berbanding terbalik dengan naiknya frekuensi dari 50 Hz ke 60 Hz dan parameter R_1 yang nilai parameternya tetap.

Pada saat percobaan menggunakan transformasi park direct-quadrature dapat diketahui bahwa dengan kondisi slip yang sama antara torsi maksimum dan torsi saat kondisi Steady State nilai dari simulasi saat menggunakan 60 Hz lebih tinggi dari pada saat menggunakan 50 Hz. Sehingga disimpulkan bahwa torsi berbanding lurus dengan frekuensi, jadi dengan menggunakan motor frekuensi 50 Hz jika dipaksa dinaikkan frekuensinya maka semakin besar torsi yang dihasilkan dengan slip yang sama.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk terlebih dahulu mengetahui kecepatan motor untuk melakukan simulasi dinamis. Hal ini penting untuk membandingkan slip pada setiap frekuensi serta menghitung dan menentukan rating pengaman yang optimal untuk motor induksi 3 fasa yang beroperasi dengan frekuensi yang berubah secara berkala.

Referensi

- [1] A. Suhastyo, "PEMBERDAYAAN KELOMPOK WANITA TANI MELALUI PELATIHAN PEMBUATAN PUPUK ORGANIK CAIR," *Jurnal PPKM*, vol. 6, no. 2, pp. 60–64, 2019.
- [2] E. Sahnur Nasution and A. Hasibuan, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P," 2018.
- [3] I. Leonardus Siregar, R. Silaen, and J. L. Hutabarat, "Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Putaran Dan Daya Masuk Motor Induksi Tiga Fasa (Aplikasi Pada Laboratorium Konversi Energi Listrik FT-UHN)," 2021.
- [4] A. Mashar and A. Mudawari, "Determination of Three-Phase Induction Motor Equivalent Circuit Parameters Experimentally," 2020.
- [5] D. Novianto, E. Zondra, and H. Yuwendius, "Analisis Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Vacuum Di PT. Pindo Deli Perawang," *Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri*, vol. 4, no. 2, pp. 73–80, 2022, doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9734.
- [6] A. Zuriman, "PENDEKATAN RANGKAIAN EKIVALEN UNTUK MENGANALISIS MOTODE SCHEDA TERHADAP KINERJA ARUS, FAKTOR DAYA DAN DAYA MASUKAN MOTOR," *Jurnal Teknik Elektro ITP*, vol. 5, no. 1, 2016.H.
- [7] Haryanto, R. Munarto, and I. Fatmawati, "Analisis Karakteristik Motor Induksi Tiga Fasa XYZ Standar NEMA," vol. 3, no. 1, 2014.
- [8] M. Averbukh and E. Lockshin, "Estimation of the equivalent circuit parameters of induction motors by laboratory test," *Machines*, vol. 9, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/machines9120340.
- [9] D. A. Pratama, M. Anisah, and K. A. Setiyadi, "The Three Phase Induction Motor Test Using MATLAB 2021b/SIMULINK at Bukit Energi Servis Terpadu, Ltd," *International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS)*, vol. 1, no. 4, pp. 60–65, Jan. 2022, doi: 10.53893/ijrvocas.v1i4.84.
- [10] S. Rafli, A. Hamzah, and D. Yayan Sukma, "Analisis Dan Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa Delapan Kutub Dengan Rangkaian Ekuivalen Invers Γ ," 2015.
- [11] P. Rajesh, M. Sharanya, and A. P. Student, "Dynamic Simulation for Three phase Induction Motor and Speed Control Using Matlab Simulink," 2021.
- [12] A. A. Adam, Y. Arifin, B. Mukhlis, A. Kali, and R. Mar'atussolihah, "KENDALI TORKA PREDIKTIF DENGAN PREDIKSI DUA LANGKAH MOTOR INDUKSI YANG DICATU OLEH SEBUAH INVERTER TIGA FASE," *Foristek*, vol. 14, no. 1, Jun. 2023, doi: 10.54757/fs.v14i1.255.
- [13] P. Setiawan, P. Aryani, and B. Sudibya, "Analisis Phase Lead Compensator Pada Pemodelan State Space Motor Induksi Tiga Fasa," *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 13, no. 2, p. 80, May 2022, doi: 10.22441/jte.2022.v13i2.004.
- [14] B. Majid¹, S. Nisworo², A. Trihasto³, and J. T. Elektro, "STUDI TRANSIEN MOTOR INDUKSI 3 FASA ROTOR SANGKAR KAPASITAS 2300V 700 HP PADA PT. PERTAMINA RU IV CILACAP," *THETA OMEGA: Journal of Electrical Engineering, Computer, and Information Technology*, 2022.
- [15] Z. Anthony, B. Busran, and E. Erhaneli, "A NEW EQUIVALENT CIRCUIT OF THE THREE-PHASE INDUCTION MOTOR (CASE STUDIES: CURRENT AND POWER FACTOR OF THE MOTOR)," vol. 12, no. 23, 2017, [Online]. Available: www.arpnjournals.com