

Pengaruh Perubahan Harga Resistansi Rotor Terhadap Kinerja Motor Induksi Tiga Fasa 100 Hp 0,46 kV

Taufik Barlian¹, Asri Indah Lestari², Cekmas Cekdin³

^{1,2,3}Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Palembang

Taufikbar018@gmail.com¹, asri_indahlestari@um-palembang.ac.id², cekmas_cekdin@yahoo.com³

Received 25 Mei 2024 | Revised 04 Juni 2024 | Accepted 07 Juni 2024

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena efisiensi dan keandalannya. Motor ini beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana medan magnet berputar dihasilkan oleh belitan stator. Pengoperasian motor induksi tiga fasa sangat bergantung pada konsep resistansi yang berperan penting dalam menentukan efisiensi dan kinerja motor. Pemahaman menyeluruh tentang resistansi rotor dalam pengoperasian motor induksi tiga fasa sangat penting untuk memaksimalkan kinerja dan keandalan motor induksi di berbagai lingkungan industri. Penelitian dilakukan untuk menganalisis unjuk kerja dari motor induksi terhadap perubahan harga resistansi rotor. Data yang diambil dari *name plate* motor induksi tiga fasa 100 Hp 0,46 kV 60 Hz digunakan untuk menghitung harga parameter-parameter motor induksi. Selanjutnya parameter-parameter tersebut digunakan sebagai input Program MATLAB untuk mensimulasikan karakteristik dari motor induksi tiga fasa. Hasil analisis dari karakteristik motor induksi tiga fasa menunjukkan efisiensi mencapai puncak dengan harga 0,9627 untuk resistansi rotor (R_r) 0,0001932 Ω pada slip sebesar 0,000198. Sedangkan untuk resistansi rotor (R_r) 0,058855 Ω efisiensi meningkat secara cepat dengan harga sebesar 0,9081 dan mulai meningkat secara perlahan ketika mencapai harga slip 0,0225 (slip desain motor). Harga efisiensi yang sama yaitu sebesar 0,6184 untuk kedua harga resistansi terjadi pada slip 0,004389. Hasil simulasi antara slip dan daya output pada motor induksi tiga fasa menggambarkan bahwa perbedaan yang signifikan pada daya keluaran antara dua nilai resistansi yang berbeda. Kinerja motor sangat sensitif terhadap perubahan resistansi rotor. Resistansi yang lebih rendah memungkinkan daya keluaran puncak yang jauh lebih tinggi, hal ini menandakan konversi energi yang lebih efisien pada resistansi yang lebih rendah dalam kondisi tertentu.

Kata kunci: Resistansi rotor, motor induksi, karakteristik, torsi, slip, efisiensi, simulasi matlab

ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in various industrial applications due to their efficiency and reliability. This motor operates based on the principle of electromagnetic induction, where a rotating magnetic field is generated by the stator winding. The operation of a three-phase induction motor relies heavily on resistance, which plays an important role in determining the motor's efficiency and performance. A thorough understanding of rotor resistance in three-phase induction motor operation is critical to maximizing the motor's performance and reliability in a variety of industrial environments. Research was conducted to analyze the performance of an induction motor with different rotor resistance values. Data from the nameplate of a 100 HP, 0.46 kV, 60 Hz three-phase induction motor was used to calculate the motor parameters. These parameters were then input into a MATLAB program to simulate the characteristics of a three-phase induction motor. The analysis of the motor's characteristics showed that the efficiency reaches its peak at a rotor resistance (R_r) value of 0.0001932 Ω with a slip of 0.000198. On the other hand, with a rotor resistance (R_r) value of 0.058855 Ω , the efficiency rapidly increases to 0.9081 and then increases slowly once it reaches a slip value of 0.0225 (motor design slip). Both resistance values lead to an efficiency of 0.6184 at a slip of 0.004389. The simulation results regarding slip and output power in a three-phase induction motor illustrate a significant difference in output power between the two different resistance values. The motor's performance is highly sensitive to changes in rotor resistance. A lower resistance allows for higher peak output power, indicating more efficient energy conversion at lower resistance under certain conditions.

Key words: rotor resistance, induction motor, characteristics, torque, slip, efficiency, MATLAB simulation

I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena efisiensi dan keandalannya. Motor ini beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana medan magnet berputar dihasilkan oleh belitan stator. Putaran rotor motor mengikuti medan magnet yang berputar dan menghasilkan tenaga mekanik sesuai dengan hukum Lorentz. Proses ini terjadi dalam motor di mana rotor

berputar dan berinteraksi dengan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan motor, yang menghasilkan arus listrik (Aribowo & Fauzan, 2020), (Ignatius Damas, 2019), (Evalina, 2019). Selain efisiensi dan keandalannya, motor induksi tiga fasa juga dikenal karena kemampuannya beroperasi pada kecepatan yang bervariasi, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi. Motor ini biasanya digunakan pada pompa, kompresor, kipas angin, sistem konveyor, dan mesin industri lainnya. Fleksibilitas dan ketahanan motor induksi tiga fasa menjadikannya pilihan populer di sektor industri, yang mengutamakan kinerja dan daya tahan yang konsisten.

Sebuah penelitian yang dilakukan oleh Lee and Kim bahwa torsi awal yang ditingkatkan dengan meningkatkan resistansi rotor saat start, dan reaktansi rotor dipertahankan selama pengoperasian. Hasilnya menunjukkan peningkatan torsi awal tanpa mengurangi efisiensi berjalan (Lee et al., 2017). Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Smith dkk menunjukkan peningkatan kinerja terhadap torsi beban yang lebih tinggi dari variasi resistansi dan operasi regeneratif dapat dipertahankan hingga beban 25%, dengan kegagalan terjadi pada kisaran beban 25-50% pada kema konvensional yang mempertahankan resistansi 120% (Smith et al., 2015) . Pengoperasian motor induksi tiga fasa sangat bergantung pada konsep resistansi yang berperan penting dalam menentukan efisiensi dan kinerja motor.

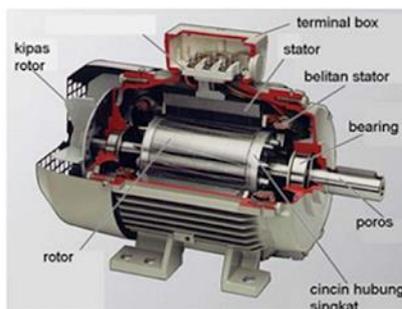
Dengan memahami peran resistansi rotor pada motor induksi, maka dapat lebih memahami cara kerja motor induksi tiga fasa dalam mengoptimalkan kinerjanya untuk berbagai aplikasi. Resistansi dalam pengoperasian motor induksi tiga fasa sangat penting untuk mengendalikan aliran arus dan memastikan motor beroperasi secara efisien. Motor induksi tiga fasa banyak digunakan di berbagai bidang industri dengan kapasitas besar dan memerlukan peralatan proteksi untuk mengamankan motor dari gangguan saat dioperasikan (Ardini, 2023) (Girsang, 2020).

Dengan menyesuaikan resistansi pada rangkaian motor, kita dapat mengatur kecepatan dan keluaran torsi motor agar sesuai dengan kebutuhan spesifik. Pemahaman menyeluruh tentang resistansi rotor dalam pengoperasian motor induksi tiga fasa sangat penting untuk memaksimalkan kinerja dan keandalan motor induksi diberbagai lingkungan industri. Untuk mengetahui lebih jauh pengaruh resistansi terhadap pengoperasian motor, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh nilai resistansi yang berbeda terhadap efisiensi dan kinerja motor induksi tiga fasa. Dengan melakukan simulasi menggunakan program MATLAB dengan dua nilai resistansi dan menghitung kecepatan, torsi, dan konsumsi daya yang dihasilkan, diharapkan dapat memperoleh wawasan berharga mengenai pengaturan resistansi optimal untuk berbagai aplikasi pada motor induksi tiga fasa.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Klasifikasi Motor Induksi

Motor induksi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu motor induksi tiga fasa dan motor induksi satu fasa (Suherman & Harumanto, 2016). Motor induksi tiga fasa merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan di berbagai industri karena efisiensinya yang tinggi dan kemampuannya dalam menangani beban yang berat. Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi motor induksi tiga fasa adalah resistansi pada batasan kerja motor tersebut. Resistansi berpotensi menyebabkan penurunan efisiensi motor. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana resistansi mempengaruhi kinerja motor untuk memaksimalkan penggunaan motor dalam berbagai aplikasi industri. Berikut merupakan konstruksi dari motor induksi.

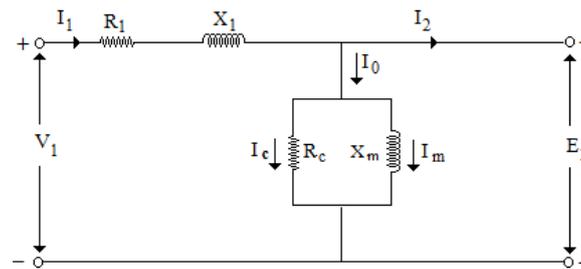


Gambar 1. Konstruksi motor induksi

Sumber : (Konstruksi Motor Listrik 3 Fasa ~ Dunia Elektro, 2017)

B. Rangkaian Ekuivalen Stator Motor Induksi

Stator merupakan bagian yang diam dari konstruksi motor induksi (rumah-rumah motor), Gambar 2 di bawah ini merupakan rangkaian ekuivalen stator.



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen stator

Pada gambar diatas saat tegangan stator (V_1) diterapkan ke belitan stator, arus stator (I_1) mengalir dalam belitan tersebut. Arus (I_1) menghasilkan gaya gerak magnet pada stator yang menyebabkan timbulnya fluks magnet pada stator ϕ_s , fluks tersebut berada di celah udara antara stator dan rotor (Wibowo, 2022), (Utomo, 2018). Fluks pada cela udara ini merupakan fluks bersama yang disebabkan oleh interaksi medan magnet permanen dengan belitan dalam alur. Rapat fluks maksimum terjadi ketika posisi magnet tepat di tengah gigi stator. Pola distribusi menunjukkan bahwa rapat fluks yang tinggi terdapat pada gigi stator dan area tepat di bawah magnet permanen. Namun, sulit untuk memastikan besarnya kerapatan fluks pada titik atau posisi tersebut (Irasari et al., 2012). Dari Gambar diatas, tegangan pada stator dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V_1 = R_1 I_1 + L_{l1} \frac{dI_1}{dt} + L_m \frac{dI_m}{dt} = R_1 I_1 + L_{l1} \frac{dI_1}{dt} + E_1 \quad (1)$$

dengan,

- L_{l1} = kebocoran induktansi stator
- L_m = induktansi magnetik
- I_m = arus magnetisasi
- E_1 = tegangan induksi di belitan stator

Perubahan pada tegangan induksi sebanding dengan kecepatan perubahan waktu fluks stator. Nilai kerapatan fluks digunakan untuk mendapatkan harga dari tegangan induksi. Sedangkan tegangan di belitan stator dan rotor dihasilkan dari induksi medan putar magnet.

C. Rangkaian Ekuivalen Stator Motor Induksi

Tegangan yang timbul pada rotor merupakan hasil dari interaksi medan magnet yang berputar pada cela udara yang menyebabkan timbulnya induksi tegangan pada rotor. Secara matematis tegangan induksi pada rotor dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$E_1 = 4,44 N_1 \phi K_{\omega 1} f_1 \quad (2)$$

dengan,

- E_1 = tegangan induksi di belitan stator
- N_1 = jumlah lilitan stator
- ϕ = fluks magnet
- f_1 = frekwensi stator
- $K_{\omega 1}$ = faktor belitan stator

Arus rotor yang disebabkan oleh tegangan induksi pada rotor yang berinteraksi dengan medan putar magnet pada cela udara menghasilkan torsi. Torsi inilah yang menggerakkan atau menghasilkan kecepatan putar poros motor (n_r). Kecepatan putar poros motor (n_s) lebih kecil jika dibandingkan dengan kecepatan putar medan magnet (n_s) di cela udara, sehingga terjadi selisih kecepatan putar. Selisih kecepatan putar antara rotor dan medan putar magnet ini disebut dengan slip (S) dan ditulis dengan persamaan berikut:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100\% \quad (3)$$

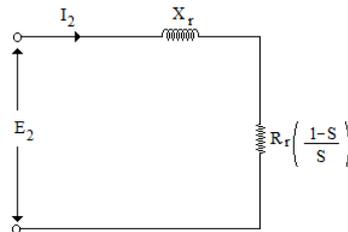
Rentang harga slip (S) pada motor induksi berkisar antara 0.01 sampai 0.05, sehingga besar tegangan induksi pada rotor jika dikaitkan dengan slip dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$E_2 = 4,44 f_2 N_2 \phi K_{\omega 2} s f_2 \tag{4}$$

dengan,

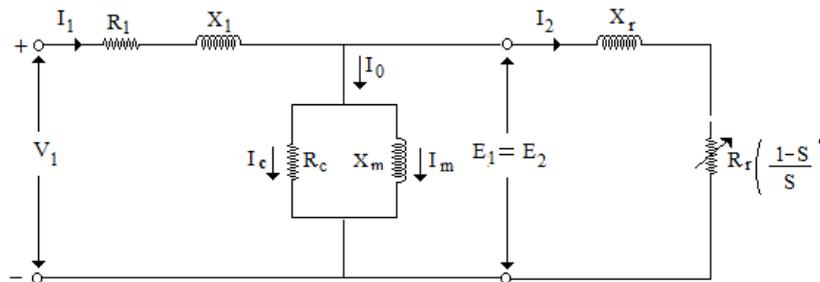
- E_2 = tegangan induksi di belitan rotor
- f_2 = frekwensi rotor
- ϕ = fluks magnet
- N_2 = jumlah lilitan rotor
- $K_{\omega 2}$ = faktor belitan rotor
- S = slip

Gambar di bawah ini adalah gambar rangkaian ekivalen rotor yang sudah disesuaikan jika dilihat dari sisi stator.



Gambar 3. Rangkaian ekivalen rotor

Jika rangkaian ekivalen stator dan rotor digabungkan maka didapatkan rangkaian ekivalen dari motor induksi seperti yang ter lihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. Rangkaian ekivalen motor induksi

D. Karakteristik Motor Induksi Tiga fasa

Gambaran dari unjuk kerja motor induksi tiga fasa dapat dilihat dari karakteristik motor tersebut, misalnya karakteristik kecepatan versus torsi motor atau karakteristik slip versus torsi. Slip merupakan fungsi dari impedansi input atau impedansi stator pada rangkaian motor induksi seperti dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + \left[\frac{X_m}{\frac{R_1}{S} + jX_2} \right] = |Z_1| \angle \theta_1 \tag{5}$$

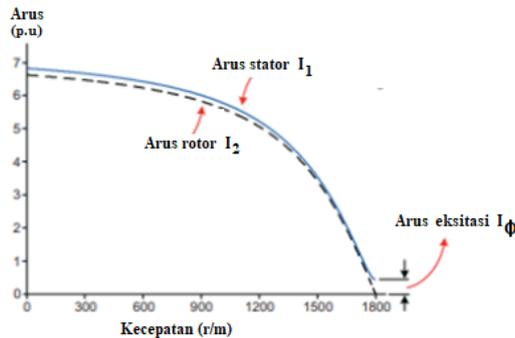
dengan,

- Z_1 = timpedansi stator
- R_1 = resistansi stator
- X_1 = reaktansi stator
- X_m = reaktansi magnetisasi
- X_2 = reaktansi rotor
- θ_1 = sudut impedansi pada stator
- S = slip

Sehingga dengan menerapkan hukum Ohm pada rangkaian motor induksi, maka arus pada stator dapat dicari dengan persamaan berikut ini.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\phi + I_2 \tag{6}$$

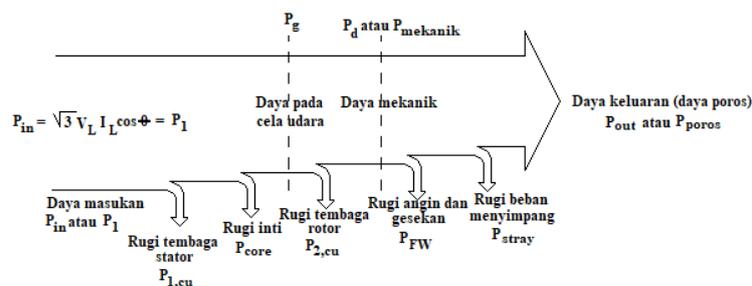
Arus stator (I_1) adalah hasil penjumlahan dari arus eksitasi (I_ϕ) dan arus rotor (I_2), dengan tegangan stator konstan. Kendali kecepatan dengan variasi resistansi rotor membutuhkan motor induksi tipe rotor belitan dan rentang kendali kecepatan terbatas. Pengurangan kecepatan dengan metode ini akan mempengaruhi efisiensi motor (Wibowo, 2022). Kurva arus stator terhadap fungsi kecepatan menunjukkan hubungan antara arus stator dengan kecepatan motor, seperti yang ditunjukkan gambar di bawah ini.



Gambar 5. Kurva Arus Stator versus Kecepatan
 Sumber : (Kim, 2017)

E. Unjuk Kerja Motor Induksi Tiga fasa

Gambar 6. Dibawah ini menunjukkan diagram aliran daya motor induksi.



Gambar 6. Diagram aliran daya motor induksi
 Sumber : (Gonen, 2011)

Hal ini didasarkan pada rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 4. Daya masukan merupakan masukan daya listrik pada stator motor (Gonen, 2011). Karena itu persamaanya dapat ditulis sebagai berikut

$$P_{in} = P_1 = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \tag{7}$$

Total rugi-rugi tembaga pada stator adalah,

$$P_{1CU} = 3 I_1^2 R_1 \tag{8}$$

Oleh karena itu total rugi-rugi inti pada motor dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$P_{Core} = \frac{3E_1^2}{R_c} \tag{9}$$

Sehingga total daya pada cela udara adalah sebagai berikut,

$$P_g = P_{in} - P_{1CU} - P_{Core} \tag{10}$$

Total rugi – rugi tembaga adalah:

$$P_{2CU} = sP_g \tag{11}$$

Jadi rugi-rugi mekanik dapat dicari dengan persamaan di bawah ini,

$$P_{mech} = P_g - P_{2CU} \tag{12}$$

Jika rugi-rugi gesekan dan angin (P_{FW}) serta rugi-rugi beban menyimpang (P_{stray}) diketahui, daya keluaran (P_{out}) dapat ditentukan dari persamaan berikut,

$$P_{out} = P_{mech} - P_{FW} - P_{stray} \tag{13}$$

Torsi yang dihasilkan didefinisikan sebagai torsi mekanis yang disebabkan oleh proses konversi energi elektromagnetik, karena itu torsi mekanik dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$T_{mech} = \frac{3 V_{th}^2 R_r / s}{\omega_{sink} [(R_{th} + R_r / s)^2 + (X_{th} + X_r)^2]} \quad (14)$$

Sedangkan torsi output atau torsi pada poros motor dapat dinyatakan sebagai berikut,

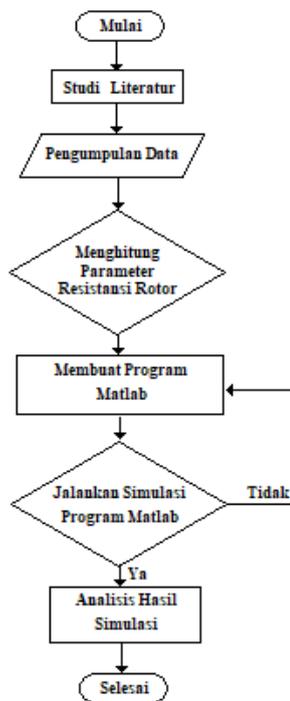
$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (15)$$

Untuk efisiensi motor induksi dapat ditentukan dari persamaan berikut,

$$\eta_{out} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (16)$$

III. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan untuk menganalisis unjuk kerja dari motor induksi terhadap perubahan harga resistansi rotor. Berikut adalah diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir penelitian

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Data Motor dan Perhitungan

Data yang diambil dari name plate motor induksi tiga fasa digunakan untuk menghitung harga parameter-parameter motor induksi. Selanjutnya parameter-parameter tersebut digunakan sebagai input program matlab untuk mensimulasikan karakteristik dari motor induksi tiga fasa. Adapun data pada name plate motor seperti berikut ini.

Tabel 1. Data name plate motor

No	Spesifikasi Motor	
1	Tegangan	0,46 kV
2	Daya	100 HP
3	Frekuensi	60 Hz
4	Kecepatan Sinkron	1800 rpm
5	Slip	2.25 %
6	Kutub	4
7	Fasa	3
8	Arus Beban Penuh	112,1 Ampere

9	Power Faktor	89%
10	Servis Faktor	1
11	Desing	A

1. Parameter-Parameter Motor Induksi Tiga Fasa

Harga parameter motor induksi dari hasil uji dapat dilihat pada Table 2 di bawah ini.

Tabel 2. Data parameter motor

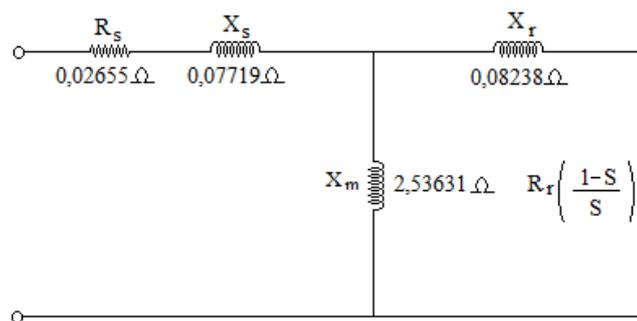
No	Parameter Motor	Harga (Ω)	Keterangan
1	$R_s = R1$	0.02655	Resistansi Stator
2	$X_s = X1$	0.07719	Reaktansi Stator
3	$X_r = X2$	0.08238	Reaktansi Rotor
4	X_m	2,53631	Reaktansi Magnetisasi

Data-data di atas untuk menghitung besaran-besaran yang akan digunakan dalam analisis penentuan nilai resistansi rotor (R_r) pada motor induksi tiga fasa.

2. Perhitungan

a. Perhitungan Impedansi Thevenin dan Tegangan Thevenin Motor Induksi

Menghitung impedansi Thevenin dan tegangan Thevenin pada motor induksi, perlu digambarkan dahulu rangkaian ekivalen motor tersebut seperti gambar 8 dibawah ini.

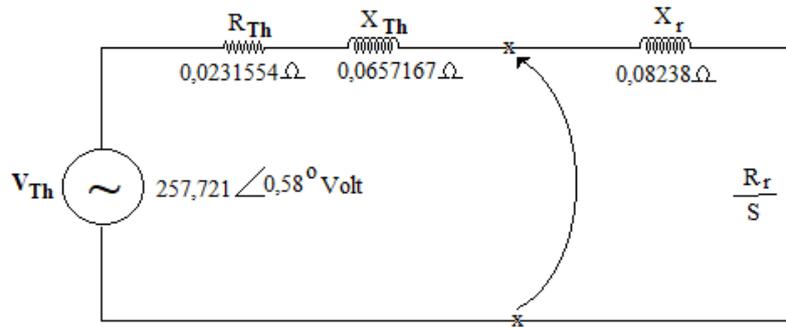


Gambar 8. Rangkaian ekivalen motor induksi

Rangkaian ekivalen Thevenin tersebut pakai sebagai acuan untuk menetapkan harga-harga pada komponen rangkaian yang akan digunakan untuk mencari harga impedansi Thevenin dan tegangan Thevenin.

Dari Rangkaian ekivalen Thevenin diatas dapat dicari besar harga impedansi Thevenin dan tegangan Thevenin sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Z_{Th} &= \frac{(j2,23631)(0,02655 + j0,07719)}{0,02655 + j(0,07719 + 2,53631)} \\
 &= 0,0696769 \angle 70,59^\circ \Omega \\
 &= 0,0231554 + j0,0657167 \Omega \\
 V_\phi &= \frac{460 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 265,58 \angle 0^\circ \text{ Volt} \\
 V_{Th} &= \frac{j2,53631}{0,02655 + j(0,07719 + 2,53631)} \cdot 265,58 \angle 0^\circ \\
 &= 257,721 \angle 0,58^\circ \text{ Volt} \\
 &= 257,707 + j0, \text{ Volt}
 \end{aligned}$$



Gambar 9. Rangkaian ekivalen Thevenin motor induksi

b. Perhitungan Kecepatan Mekanik dan Torsi Mekanik Pada Motor Induksi

Kecepatan mekanik dihitung pada saat slip sebesar 2,25% yang diambil dari data *name plate* motor yaitu,

$$n_m = (1 - 0,0225) \cdot (1800 \text{ r/min})$$

$$= 1760 \text{ r/min}$$

Torsi *start* minimum yang harus dihasil oleh motor induksi untuk menggerakkan beban pada rating kecepatannya adalah,

$$T_{\text{strat}} = \frac{100 \times 5250}{1800}$$

$$= 291,667 \text{ N.m}$$

Perhitungan torsi mekanik dilakukan pada saat beban penuh dengan daya keluaran (P_{out}) sebesar 100 hp.

$$T_{\text{mech}} = \frac{74600 \text{ W}}{184,213 \text{ rad/s}}$$

$$= 404,96 \text{ N.m}$$

c. Perhitungan Harga Resistansi Rotor (R_r) Motor Induksi

Perhitungan untuk menentukan harga dari resistansi rotor motor induksi menggunakan persamaan (14).

$$404,96 = \frac{3(257,721)^2 R_r / s}{(184,213 \text{ rad/s}) \cdot [(0,0231554 + R_r / s)^2 + (0,0657167 + 0,08238)^2]}$$

$$74,598 = \frac{199,260 R_r / s}{[(0,0231554 + R_r / s)^2 + 0,0219326]}$$

$$(R_r / s)^2 - 2,6246892 \frac{R_r}{s} + 0,0224687 = 0$$

$$\left(\frac{R_r}{s} - 0,008589\right) \left(\frac{R_r}{s} - 2,61581\right) = 0$$

Perhitungan ini menghasilkan dua nilai untuk resistansi rotor yaitu :

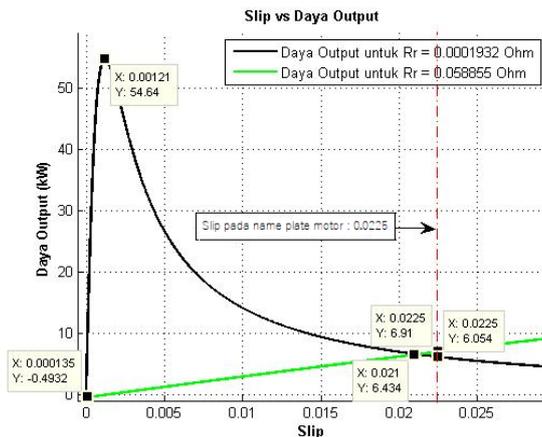
1. $R_r = 0,0001932 \Omega$
2. $R_r = 0,058855 \Omega$

Harga resistansi rotor (R_r) yang di dapat dari hasil perhitungan digunakan sebagai input pada program MATLAB untuk mensimulasikan karakteristik motor induksi tiga fasa.

B. Simulasi Karakteristik Motor dan Analisis

1. Analisis Slip Terhadap Daya Output pada Motor Induksi Tiga Fasa

Grafik pada gambar 10 di bawah ini menunjukkan hubungan antara slip dan daya keluaran (Daya Output) motor induksi tiga fasa dengan dua harga resistansi rotor yang berbeda.



Gambar 10. Karakteristik motor induksi slip vs daya keluaran

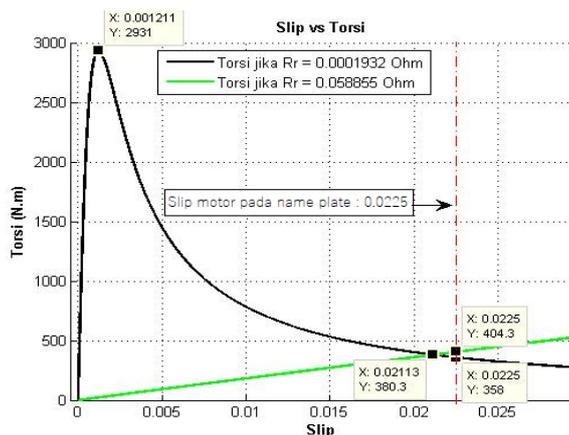
- Kurva diatas yang bergaris hitam mewakili resistansi dengan harga $R_r = 0,0001932 \Omega$ ($R_r = 0,0001932 \Omega$): Ketika slip berada di harga 0,00121, daya keluaran mencapai puncaknya yaitu 54,64 kW. Daya keluaran menurun tajam seiring dengan peningkatan slip setelah melewati titik daya keluaran puncak.
- Kurva yang bergaris hijau mewakili resistansi dengan harga 0,058855 Ω ($R_r = 0,058855 \Omega$): Daya keluaran relatif rendah dan terus meningkat bertahap secara linier terhadap slip motor pada rentang slip yang ditunjukkan pada grafik diatas. Daya keluaran motor mempunyai besar yang sama baik untuk harga $R_r = 0,0001932\Omega$ maupun untuk harga $R_r = 0,058855\Omega$ yaitu sebesar 6,434 kW pada posisi slip 0,021.

Perbedaan yang signifikan pada daya keluaran antara kedua nilai resistansi menunjukkan bahwa kinerja motor sangat sensitif terhadap perubahan resistansi rotor.

Resistansi yang lebih rendah (0,0001932 Ω) memungkinkan daya keluaran puncak yang jauh lebih tinggi, menunjukkan konversi energi yang lebih efisien pada resistansi yang lebih rendah dalam kondisi tertentu. Grafik pada gambar 9 di atas menunjukkan bahwa ketika slip meningkat, keluaran daya untuk resistansi yang lebih rendah turun lebih tajam dibandingkan dengan resistansi yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa motor dioptimalkan untuk rentang slip yang lebih rendah ketika beroperasi pada resistansi yang lebih rendah.

2. Analisis Slip Terhadap Torsi pada Motor Induksi Tiga Fasa

Gambar 11. Di bawah ini menampilkan grafik yang menggambarkan hubungan antara slip dan torsi untuk motor induksi tiga fasa, pada dua kondisi tahanan rotor yang berbeda yaitu, resistansi dengan harga 0,0001932 Ω ($R_r = 0,0001932\Omega$) dan resistansi dengan harga 0,058855 Ω ($R_r = 0,058855 \Omega$).



Gambar 11. Karakteristik motor induksi slip vs torsi

Slip motor adalah selisih kecepatan antara kecepatan medan putar magnet di celah udara terhadap kecepatan aktual rotor, yang merupakan pecahan dari kecepatan sinkron (n_s). Sedangkan torsi adalah gaya putar yang dihasilkan oleh motor. Torsi diukur dalam satuan Newton meter (Nm) dan menunjukkan seberapa besar gaya yang dihasilkan motor induksi untuk menggerakkan beban.

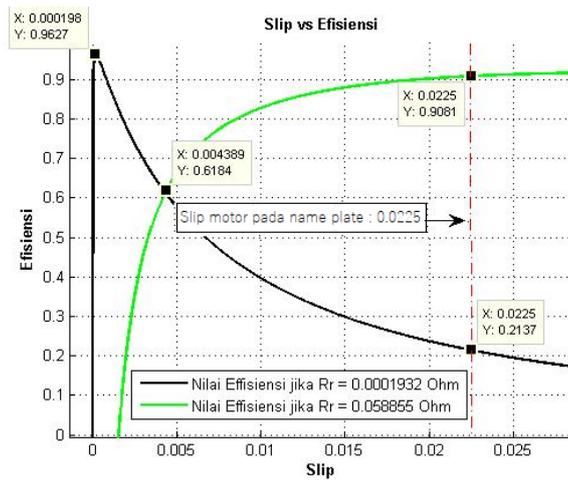
- Garis hitam pada kurva di atas mewakili hubungan torsi-slip untuk resistansi rotor dengan harga $0,0001932 \Omega$ ($R_r = 0,0001932\Omega$). Garis ini menunjukkan kurva torsi khas motor induksi, dimana torsi meningkat seiring dengan peningkatan harga slip dan mencapai harga maksimum, lalu menurun tajam seiring dengan peningkatan harga slip.
- Garis hijau mewakili hubungan torsi-slip untuk resistansi rotor yang lebih tinggi yaitu $0,058855 \Omega$ ($R_r = 0,058855\Omega$). Garis hijau pada kurva ini relatif datar dibandingkan dengan garis hitam, yang menunjukkan bahwa peningkatan resistansi rotor akan mengubah karakteristik torsi, meningkatkan harga torsi secara linier terhadap slip motor, dan memperluas rentang slip yang torsinya terus meningkat.

Besar torsi yang sama terjadi pada harga slip $0,02113$, baik untuk harga resistansi $R_r = 0,0001932\Omega$ maupun untuk harga resistansi $R_r = 0,058855\Omega$ yaitu dengan torsi sebesar $380,3 \text{ Nm}$.

Pada harga slip design motor ($0,0225$) untuk resistansi $0,0001932 \Omega$ harga torsinya sebesar 358 Nm , sedangkan pada harga slip design motor ($0,0225$) untuk harga resistansi $0,058855 \Omega$ torsinya sebesar $404,3 \text{ Nm}$. Grafik tersebut mengilustrasikan bagaimana peningkatan tahanan rotor pada motor induksi mempengaruhi karakteristik torsi-slipnya. Resistansi yang lebih tinggi cenderung menurunkan torsi puncak namun membuat motor lebih stabil pada rentang nilai slip yang lebih luas, yang dapat menguntungkan dalam aplikasi yang memerlukan torsi stabil dalam berbagai kondisi beban. Perpotongan dan perbandingan nilai torsi pada slip $0,0225$ menunjukkan titik analisis di mana kinerja motor pada pengaturan harga resistansi yang berbeda dievaluasi untuk tujuan optimasi.

3. Analisis Slip Terhadap Efisiensi pada Motor Induksi Tiga Fasa

Grafik yang ditampilkan pada gambar 12 di bawah ini menggambarkan hubungan antara slip (sumbu horizontal) dan efisiensi (sumbu vertikal) sebuah moto induksi tiga fasa, dengan dua skenario berbeda berdasarkan harga resistansinya.



Gambar 12. Karakteristik motor induksi slip vs efisiensi

Kurva yang bergaris hitam pada gambar 12 di atas mewakili kurva efisiensi untuk motor dengan resistansi rotor (R_r) sebesar $0,0001932 \Omega$ dan kurva yang bergaris hijau mewakili kurva efisiensi untuk motor dengan resistansi rotor (R_r) sebesar $0,058855 \Omega$. Efisiensi mencapai puncak dengan harga $0,9627$ untuk resistansi rotor (R_r) $0,0001932 \Omega$ pada slip sebesar $0,000198$. Selanjutnya untuk resistansi rotor (R_r) $0,058855 \Omega$ efisiensi meningkat secara cepat dengan harga sebesar $0,9081$ dan mulai meningkat secara perlahan ketika mencapai harga slip $0,0225$ (slip desain motor). Harga efisiensi yang sama yaitu sebesar $0,6184$ untuk kedua harga resistansi terjadi pada slip $0,004389$.

Grafik di atas mengilustrasikan bagaimana efisiensi motor bervariasi dengan perubahan slip dan resistansi rotor. Kurva yang bergaris hitam, mewakili resistansi rotor yang lebih rendah ($0,0001932 \Omega$), dimulai dengan efisiensi yang lebih tinggi pada nilai slip yang sangat rendah dan menurun tajam seiring dengan meningkatnya slip. Kurva yang bergaris hijau, mewakili resistansi rotor yang lebih tinggi ($0,058855 \Omega$), dimulai pada efisiensi yang lebih rendah, lalu meningkat secara cepat dan kemudian menjadi stabil seiring bertambahnya harga slip selanjutnya mempertahankan efisiensi yang lebih tinggi pada slip yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa motor dengan resistansi rotor yang lebih tinggi dapat bekerja lebih baik pada slip yang lebih tinggi dalam hal menjaga efisiensi.

V. KESIMPULAN

Hasil simulasi antara slip dan daya output pada motor induksi tiga fasa menggambarkan bahwa perbedaan yang signifikan pada daya keluaran antara dua nilai resistansi yang berbeda. Kinerja motor sangat sensitif terhadap perubahan resistansi rotor. Resistansi yang lebih rendah ($0,0001932 \Omega$) memungkinkan daya keluaran puncak yang jauh lebih tinggi, hal ini menandakan konversi energi yang lebih efisien pada resistansi yang lebih rendah dalam kondisi tertentu.

Pada kurva simulasi antara slip dan torsi pada motor induksi tiga fasa menunjukkan bahwa perubahan harga resistansi rotor dari yang kecil ke harga resistansi yang besar untuk dua resistansi dengan harga berbeda akan mengubah karakteristik torsi motor dan meningkatkan harga torsi secara linier terhadap slip motor, selain itu memperluas rentang slip. Harga resistansi yang lebih tinggi cenderung menurunkan torsi puncak namun membuat motor lebih stabil pada rentang nilai slip yang lebih luas, yang dapat menguntungkan dalam aplikasi yang memerlukan torsi stabil dalam berbagai kondisi beban.

Pemilihan resistansi rotor dalam desain motor dapat mempengaruhi efisiensi pada berbagai slip secara signifikan. Resistansi yang lebih rendah lebih efisien pada slip yang sangat rendah tetapi kehilangan efisiensi dengan cepat seiring dengan meningkatnya slip. Resistansi yang lebih tinggi mempertahankan efisiensi yang lebih baik pada rentang slip yang lebih luas, yang mungkin menguntungkan dalam aplikasi dimana beban variabel menyebabkan slip yang bervariasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardini, M. S. (2023). Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Menyelesaikan Mata Kuliah Kerja Praktek pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Padang.
- Aribowo, D., & Fauzan, D. A. (2020). Sistem Perawatan Mesin Genset Di PT. (Persero) Pelabuhan Indonesia II. 3.
- Evalina, N. (2019). Analisis Perubahan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Menggunakan Inverter 3G3MX2.
- Girsang, F. (2020). Analisis Gangguan Arus Hubung Singkat Pada Motor Induksi Tiga Phase Pada PT. Permata Hijau Palm Oleo Chemical KIM II Mabar. <https://eprints.pancabudi.ac.id/id/eprint/122/>
- Gonen, T. (2011). *Electrical Machines with MATLAB* (0 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11685>
- IGNATIUS DAMAS, A. (2019). Pengoperasian Dan Perawatan Altenator Pada Kapal Motor Portlink Ii. Karya Tulis. <http://repository.unimar-amni.ac.id/1650/>
- Irasari, P., Alam, H. S., & Kasim, M. (2012). Magnetic Simulation and Analysis of Radial Flux Permanent Magnet Generator using Finite Element Method. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 3(1), 23–30. <https://doi.org/10.14203/j.mev.2012.v3.23-30>
- Kim, S.-H. (2017). *Electric motor control: DC, AC, and BLDC motors*. Elsevier. [https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=ewKqDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Kim,+S.++\(2017\).+Electric+Motor+Control+DC,+AC,+and+BLDC+Motors&ots=oxuD232IN1&sig=oFlhW DdK48wFCryH2bmvSoD4Is8](https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=ewKqDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Kim,+S.++(2017).+Electric+Motor+Control+DC,+AC,+and+BLDC+Motors&ots=oxuD232IN1&sig=oFlhW DdK48wFCryH2bmvSoD4Is8)
- Konstruksi Motor Listrik 3 Fasa ~ Dunia Elektro. (2017). <https://elektro-unimal.blogspot.com/2013/05/konstruksi-motor-listrik-3-fasa.html>
- Lee, H. J., Im, S. H., Um, D. Y., & Park, G. S. (2017). A design of rotor bar for improving starting torque by analyzing rotor resistance and reactance in squirrel cage induction motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1–4.

- Smith, A. N., Gadoue, S. M., & Finch, J. W. (2015). Improved rotor flux estimation at low speeds for torque MRAS-based sensorless induction motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31(1), 270–282.
- Suherman, E., & Harumanto, K. (2016). *Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Dengan Inverter*. 2.
- Utomo, R. M. (2018). *Analisa pemilihan filter wavelet pada motor induksi tida fasa untuk deteksi ketidakseimbangan celah udara*. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. https://repository.its.ac.id/59066/1/07111550010001-Master_Thesis.pdf
- Wibowo, R. B. (2022). *Perancangan Kendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Variable Frequencydrives Menggunakan Kendali PID Berbasis PLC* [PhD Thesis, Universitas Siliwangi]. <http://repositori.unsil.ac.id/8492/>