

SIMULASI KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI TIGA FASA BERBASIS PROGRAM MATLAB

Yandri

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik
Universitas Tanjungpura
E-mail : yandri_4@yahoo.co.id

Abstract– Motor induksi sangat lazim digunakan pada kalangan industri. Dalam aplikasinya, pemilihan motor harus disesuaikan dengan kondisi beban mekanik. Untuk beban yang berat, motor harus memiliki torka asut yang besar agar mampu mengasut beban. Dengan demikian, pengetahuan atas karakteristik tiap motor perlu untuk diketahui agar dapat secara tepat peruntukannya sesuai dengan beban yang akan dilayani. Tulisan ini membahas tentang karakteristik motor induksi tiga fasa dengan mengacu pada hasil simulasi berbasis program MATLAB. Karakteristik yang ditinjau menitikberatkan pada karakteristik torka-kecepatan, di samping juga melakukan perhitungan besaran-besaran motor induksi yang mencakup torka asut, torka maksimum, dan kecepatan dimana terjadinya torka maksimum. Guna sebagai pembanding maka pada simulasi yang dilakukan digunakan 3 (tiga) spesifikasi motor dengan daya mekanik masing-masing sebesar 15 hp, 25 hp, dan 100 hp. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin besar daya mekanik motor maka torka asut dan torka maksimum yang dihasilkan akan semakin membesar. Sebaliknya, semakin besar daya mekanik motor maka kecepatan terjadinya torka maksimum akan semakin mengecil.

Keywords– motor induksi, simulasi, karakteristik, torka, kecepatan

1. Pendahuluan

Motor induksi, juga dikenal sebagai motor asinkron, merupakan motor arus bolak-balik (ac) yang paling luas digunakan khususnya di kalangan industri. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar stator.

Keuntungan dipergunakannya motor induksi adalah karena konstruksinya yang sederhana, kuat, harganya relatif murah, dan mudah dalam perawatan.

Dalam aplikasi penggerak listrik (*electric drive*), pemilihan motor listrik seyogyanya bersesuaian dengan unjuk kerja beban yang diinginkan. Sebagai contoh, untuk aplikasi kecepatan konstan, pemilihan motor sinkron bisa jadi merupakan pilihan yang terbaik. Motor-motor lain seperti motor induksi atau motor arus searah pada hakikatnya juga dapat digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan kecepatan konstan, asalkan

pada sistem terdapat rangkaian umpan balik guna mengkompensasi perubahan kecepatan apabila terjadi perubahan torka beban.

Pada dasarnya motor-motor listrik memiliki berbagai karakteristik torka-kecepatan. Dalam aplikasinya, adalah merupakan tugas *engineer* untuk memilih motor dengan karakteristik yang cocok, sesuai dengan beban yang digerakkan.

2. Kecepatan Sinkron dan Slip

Kecepatan sinkron atau kecepatan medan putar stator dapat dinyatakan sebagai:

$$n_{sync} = \frac{120 f_e}{P} \quad (1)$$

dimana :

n_{sync} = kecepatan sinkron (rpm)

f_e = frekuensi jala-jala (hertz)

P = jumlah kutub pada mesin

Sedangkan slip dapat dinyatakan sebagai:

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} (\times 100 \%) \quad (2)$$

dimana n_m merupakan kecepatan mekanik poros/shaft rotor (kecepatan rotor).

Apabila slip dinyatakan dalam bentuk kecepatan sudut ω (radian/detik) dirumuskan sebagai berikut :

$$s = \frac{\omega_{sync} - \omega_m}{\omega_{sync}} (\times 100 \%) \quad (3)$$

Dari pers.(2) dan (3) menghasilkan persamaan untuk kecepatan rotor :

$$n_m = (1 - s) n_{sync} \quad (4)$$

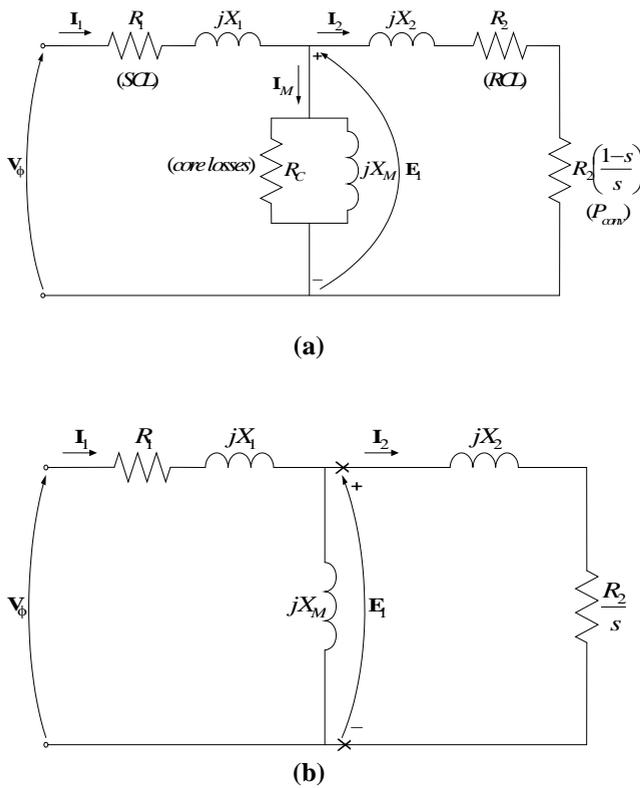
atau

$$\omega_m = (1 - s) \omega_{sync} \quad (5)$$

Persamaan-persamaan ini berguna untuk mendapatkan hubungan antara torka dan daya dari motor induksi.

3. Persamaan Torka Motor Induksi

Rangkaian ekuivalen per fasa dari motor induksi dapat dilihat pada Gambar 1(a) dan untuk penyederhanaannya adalah seperti tampak pada Gambar 1(b).



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Keterangan gambar :

- R_1 = tahanan stator
- X_1 = reaktansi bocor stator
- R_2 = tahanan rotor mengacu ke stator
- X_2 = reaktansi bocor rotor mengacu ke stator
- R_c = tahanan inti besi
- X_M = reaktansi magnetisasi
- I_1 = arus stator
- I_2 = arus rotor mengacu ke stator
- V_ϕ = tegangan jala-jala
- E_1 = tegangan induksi stator

Torka induksi didefinisikan sebagai torka yang dibangkitkan melalui konversi daya dari listrik ke mekanik. Torka induksi (τ_{ind}) dapat dinyatakan melalui persamaan berikut :

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \tag{6}$$

atau,

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \tag{7}$$

dimana P_{conv} merupakan daya yang dikonversikan (dari listrik ke mekanik) dan P_{AG} merupakan daya celah udara.

Pers.(7) sangat bermanfaat karena menyatakan secara langsung torka induksi dalam bentuk daya celah udara

dan kecepatan sinkron yang nilainya konstan. Dengan diketahuinya P_{AG} maka secara langsung dapat diperoleh τ_{ind} .

Dengan merujuk pada rangkaian ekuivalen gbr. 1(b) maka besarnya daya celah udara per fasa yang disuplai ke motor adalah :

$$P_{AG,1\phi} = I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

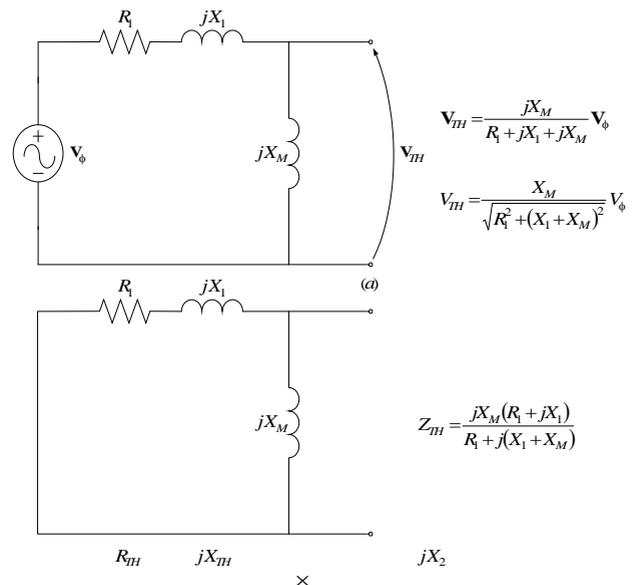
dengan demikian total daya celah udara adalah :

$$P_{AG} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} \tag{8}$$

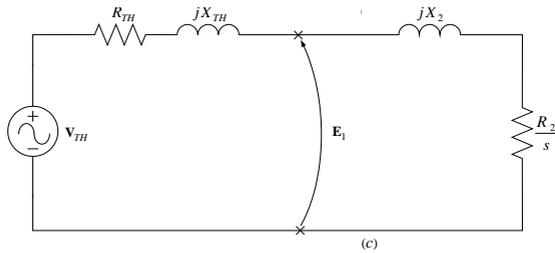
Terlihat bahwa jika I_2 diketahui maka daya celah udara dan torka induksi juga akan dapat diketahui.

Terdapat beberapa cara untuk mendapatkan arus I_2 dengan mengacu pada rangkaian ekuivalen gbr. 1(b), akan tetapi salah satu cara yang termudah adalah dengan menentukan ekuivalen Thevenin dari bagian rangkaian yang terletak disebelah kiri tanda \times . Teorema Thevenin menyatakan bahwa suatu rangkaian linier dapat dipisahkan oleh dua terminal dan bagian rangkaian yang dipisah dapat digantikan dengan sumber tegangan tunggal yang dihubungkan seri dengan impedansi ekuivalennya. Jika ini kita lakukan pada rangkaian ekuivalen motor induksi maka rangkaian yang dihasilkan akan merupakan kombinasi sederhana elemen-elemen yang terhubung seri seperti tampak pada gbr. 2(c).

Untuk menerapkan metode Thevenin pada sisi masukan (*input*) dari rangkaian ekuivalen motor induksi maka langkah awal yang dilakukan adalah dengan membuat *open circuit* (rangkaiannya terbuka) terminal-terminal yang diberi tanda \times dan tentukan besarnya tegangan rangkaian terbuka antara kedua terminal tersebut. Selanjutnya untuk menentukan impedansi Thevenin, hubung singkatkan tegangan fasanya. Penentuan Z_{eq} dapat dilakukan dengan melihat ke arah dalam terminal. Untuk jelasnya dapat dilihat pada gbr. 2.



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



Gambar 2. (a) Tegangan ekuivalen Thevenin
(b) Impedansi ekuivalen Thevenin
(c) Penyederhanaan rangkaian ekuivalen motor induksi

Gbr. 2(a) menunjukkan terminal-terminal yang dibuka untuk menentukan tegangan Thevenin. Dengan menggunakan aturan pembagi tegangan (*voltage divider*), diperoleh :

$$V_{TH} = V_\phi \frac{Z_M}{Z_m + Z_1} = V_\phi \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M}$$

Besarnya tegangan Thevenin adalah :

$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (9a)$$

Karena reaktansi magnetisasi $X_M \gg X_1$ dan $X_M + X_1 \gg R_1$, maka besarnya tegangan Thevenin secara pendekatan adalah :

$$V_{TH} = V_\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (9b)$$

Gbr. 2(b) menunjukkan rangkaian dengan sumber tegangan masuknya dihubungkan singkat. Dua impedansi terhubung paralel dan impedansi Thevenin-nya adalah :

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (10)$$

Impedansi ini dapat diubah dalam bentuk lain menjadi :

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (11)$$

dimana :

$$R_{TH} = \frac{R_1 X_M^2}{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2} \quad (12a)$$

$$X_{TH} = \frac{X_M(R_1^2 + X_1^2 + X_1 X_M)}{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2} \quad (13a)$$

Karena $X_M \gg X_1$ dan $X_M + X_1 \gg R_1$, besarnya tahanan dan reaktansi Thevenin secara pendekatan adalah :

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (12b)$$

$$X_{TH} \approx X_1 \quad (13b)$$

Rangkaian ekuivalen yang diperoleh ditunjukkan pada gbr. 2(c). Dari rangkaian ini, arus I_2 adalah :

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (14)$$

$$= \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2} \quad (15)$$

Besarnya arus ini adalah :

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (16)$$

Dengan demikian daya celah udara (P_{AG}) adalah :

$$P_{AG} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{3 V_{TH}^2 R_2/s}{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (17)$$

dan besarnya torka yang diinduksikan/torka induksi adalah :

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3 V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (18)$$

4. Torka Asut Motor Induksi

Torka asut dapat ditentukan dengan menset $s = 1$ pers.(18).

$$\tau_{start} = \frac{3 V_{TH}^2 R_2}{\omega_{sync} [(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (19)$$

5. Torka Maksimum Motor Induksi

Karena torka induksi sama dengan P_{AG}/ω_{sync} , maka torka maksimum akan terjadi apabila daya celah udara bernilai maksimum. Karena daya celah udara sama dengan daya yang dikonsumsi pada tahanan R_2/s (atau diserap oleh tahanan R_2/s), maka torka maksimum akan terjadi apabila daya yang diserap oleh tahanan bernilai maksimum.

Kapan daya yang disuplai ke R_2/s berada pada nilai maksimumnya ? Lihat kembali gbr. 2(c). Pada situasi dimana sudut impedansi beban bernilai tetap, teorema transfer daya maksimum menyatakan bahwa transfer daya maksimum ke tahanan beban R_2/s akan terjadi apabila besar impedansi tersebut sama dengan besarnya impedansi sumber (Z_{source}). Impedansi ekuivalen sumber adalah :

$$Z_{source} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2 \quad (20)$$

jadi transfer daya maksimum terjadi apabila :

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (21)$$

dari pers.(21) dapat kita simpulkan bahwa slip dimana terjadinya torka maksimum (s_{max}) adalah :

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \tag{22}$$

Dari pers.(22) ini tampak bahwa hanya tahanan R_2 yang terletak di bagian pembilang, jadi slip terjadinya torka maksimum berbanding lurus dengan R_2 .

Nilai torka maksimum dapat ditentukan dengan mensubstitusikan pers.(22) ke pers.(18). Diperoleh :

$$\tau_{max} = \frac{3 V_{TH}^2}{2 \omega_{sync} \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \tag{23}$$

Torka ini berbanding lurus dengan tegangan suplai dan juga berbanding terbalik dengan impedansi stator dan reaktansi rotor. Semakin kecil reaktansi mesin maka semakin besar torka maksimum yang dapat dihasilkan.

6. Hasil Simulasi

Data motor yang dijadikan sampel simulasi adalah sebagai berikut :

a) Motor induksi 3 fasa, 208 V, 15 hp, 60 Hz, 4 kutub, hubungan Y (bintang). Parameter rangkaian ekivalen adalah sbb :

$$R_1 = 0,210 \Omega \quad R_2 = 0,137 \Omega$$

$$X_1 = 0,442 \Omega \quad X_2 = 0,442 \Omega \quad X_M = 13,2 \Omega$$

b) Motor induksi 3 fasa, 460 V, 25 hp, 60 Hz, 4 kutub, hubungan Y (bintang). Parameter rangkaian ekivalen adalah sbb :

$$R_1 = 0,641 \Omega \quad R_2 = 0,332 \Omega$$

$$X_1 = 1,106 \Omega \quad X_2 = 0,464 \Omega \quad X_M = 26,3 \Omega$$

c) Motor induksi 3 fasa, 440 V, 100 hp, 50 Hz, 6 kutub, hubungan Y (bintang). Parameter rangkaian ekivalen adalah sbb :

$$R_1 = 0,084 \Omega \quad R_2 = 0,066 \Omega$$

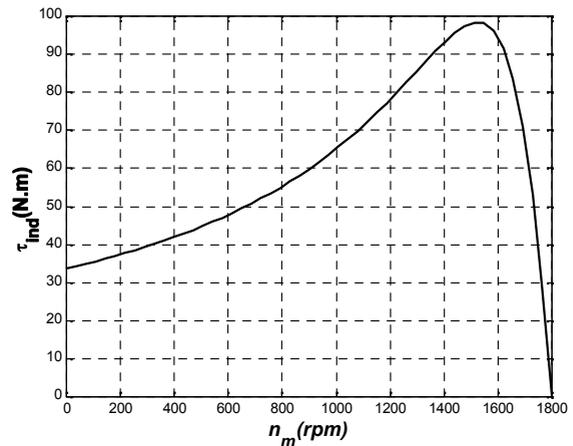
$$X_1 = 0,200 \Omega \quad X_2 = 0,165 \Omega \quad X_M = 6,9 \Omega$$

Berikut adalah hasil eksekusi M-file dari program MATLAB yang dibuat.

Motor 15 hp

Tabel 1. Torka dan kecepatan motor induksi 15 hp

Besaran motor	Nilai
Torka asut	33.7186 N.m
Torka maksimum	98.4455 N.m
Kecepatan terjadinya torka maksimum	1524.3363 rpm

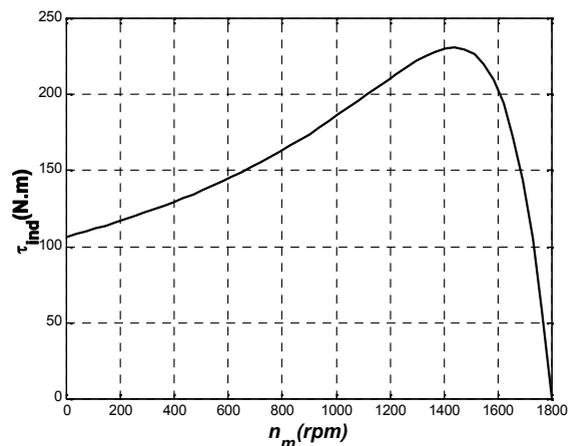


Gambar 3. Karakteristik torka-kecepatan motor induksi 15 hp

Motor 25 hp

Tabel 2. Torka dan kecepatan motor induksi 25 hp

Besaran motor	Nilai
Torka asut	106.5596 N.m
Torka maksimum	230.7963 N.m
Kecepatan terjadinya torka maksimum	1437.4592 rpm

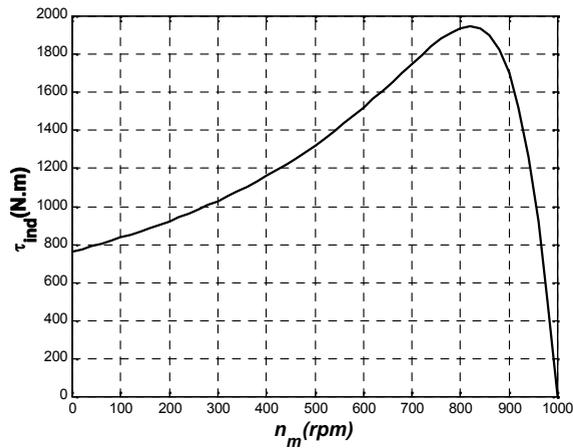


Gambar 4. Karakteristik torka-kecepatan motor induksi 25 hp

Motor 100 hp

Tabel 3. Torka dan kecepatan motor induksi 100 hp

Besaran motor	Nilai
Torka asut	763.3803 N.m
Torka maksimum	1947.3324 N.m
Kecepatan terjadinya torka maksimum	821.1058 rpm



Gambar 5. Karakteristik torka-kecepatan motor induksi 100 hp

Dari hasil simulasi terlihat jelas bahwa motor 100 hp memiliki torka asut dan torka maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan motor 25 hp dan 15 hp. Demikian juga, motor 25 hp memiliki torka asut dan torka maksimum yang lebih besar dibandingkan motor 15 hp. Sebaliknya, motor 100 hp akan menghasilkan kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan motor 25 hp dan 15 hp. Demikian juga halnya dengan motor 25 hp dimana akan menghasilkan kecepatan yang lebih rendah dibandingkan motor 15 hp.

7. Kesimpulan

Semakin besar daya mekanik motor maka torka asut dan torka maksimum yang dihasilkan juga akan semakin besar. Sebaliknya, semakin besar daya mekanik motor maka kecepatan terjadinya torka maksimum malah semakin mengecil.

Motor dengan daya mekanik yang besar sangat dibutuhkan guna menjalankan beban yang berat. Hal ini dikarenakan torka asut yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan motor dengan daya mekanik yang kecil.

Untuk daya yang sama, motor berkecepatan rendah biasanya berukuran lebih besar, lebih berat, dan lebih mahal dibandingkan dengan motor berkecepatan tinggi.

Referensi

- [1] Chapman, S.J., *Electric Machinery Fundamentals*, Second Edition, McGraw-Hill, USA, 1991.
- [2] Deshpande, M.V., *Electric Motors Applications and Control*, A.H. Wheeler & Co.Ltd, Allahabad, 1990.
- [3] El-Sharkawi, M., *Fundamentals of Electric Drives*, Brooks/Cole Publishing Company, USA, 2000.
- [4] Hanselman, D., B. Littlefield, Alih Bahasa: Jozep Edyanto, *MATLAB-Bahasa Komputasi Teknis*, Penerbit ANDI, Yogyakarta, 2000.
- [5] Nagrath, I.J., D.P. Kothari, *Electric Machines*, McGraw-Hill, New Delhi, 1999.
- [6] Petruzella, *Industrial Electronics*, McGraw - Hill, USA, 1996.
- [7] Wildi, T., *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, Sixth Edition, Prentice Hall, 2006.
- [8] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Penerbit Gramedia, Jakarta, 1988.

Biografi

Yandri, lahir di Singkawang pada tanggal 29 Maret 1969. Gelar S1 diperoleh dari Universitas Tanjungpura (UNTAN), Pontianak, pada tahun 1994. Sedangkan Gelar S2 diperoleh dari Institut Teknologi Bandung (ITB) pada tahun 2005. Sejak tahun 1999 hingga sekarang menjadi staf pengajar pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UNTAN, Pontianak. Bidang riset yang diminati mencakup Mesin-Mesin Listrik dan Pembangkit Listrik Non Konvensional.

