

BAB II

TEORI MOTOR LISTRIK

2.1. UMUM

Hampir semua industri menggunakan tenaga listrik untuk menggerakkan motor-motor listrik, hal ini memiliki berbagai keuntungan dan kemudahan dalam melaksanakan pengaturan dan pengontrolannya. Untuk industri-industri yang lebih maju proses produksinya telah dilaksanakan dengan otomatisasi bahkan dengan menggunakan robot-robot. Begitu juga dalam bidang transportasi terutama untuk transportasi massal, seperti kereta api listrik (KRL). Beberapa penggerakannya juga menggunakan motor listrik. Motor listrik merupakan mesin yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran pada poros rotornya. Terdapat berbagai jenis motor listrik yaitu motor listrik AC (arus bolak-balik) dan motor listrik DC (arus searah). Ada beberapa macam motor listrik DC ditinjau dari rangkaian penguatnya terhadap rangkaian jangkarnya yaitu motor DC seri, motor DC shunt, dan motor DC kompon, motor listrik AC juga ada beberapa macam ditinjau dari karakteristik putaran terhadap perubahan bebannya yaitu motor AC induksi dan motor AC sinkron. Skripsi ini akan membahas penggunaan motor – motor listrik sebagai penggerak kereta api listrik. Ada beberapa jenis motor listrik yang digunakan sebagai penggerak KRL di Jabodetabek yaitu motor listrik DC seri dan motor AC induksi. Seperti telah diuraikan pada bab 1.3 mengenai batasan masalah skripsi ini hanya ditekankan pada motor listrik AC.

2.2 MOTOR LISTRIK

Seperti telah dijelaskan pada bab 2.1 ada dua jenis motor listrik yang digunakan untuk menggerakkan KRL yaitu motor AC induksi dan motor DC seri.

2.2.1 MOTOR LISTRIK AC

Motor listrik AC ada dua jenis yaitu motor AC sinkron dan motor AC induksi. Motor AC sinkron adalah motor listrik yang mempunyai putaran tetap walaupun bebannya berubah, motor sinkron biasa digunakan untuk industri – industri yang memerlukan putaran tetap, sedangkan motor induksi adalah motor listrik yang putarannya berubah – ubah terhadap perubahan beban, tegangan, dan frekuensi. Sehingga ke pusat induksi dapat diatur dengan mengubah tegangan masuk dan frekuensi masuk. Karena dalam operasinya KRL memerlukan pengaturan kecepatan, maka motor listrik yang digunakan adalah motor listrik AC induksi. Maka dalam pembahasannya ditekankan pada Motor AC induksi.

Motor induksi merupakan motor arus bolak balik (AC) yang paling banyak digunakan dan dapat dijumpai dalam setiap aplikasi industri maupun rumah tangga. 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 kecepatan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan arus stator dengan kecepatan putaran rotor (*motion of the rotor*). Selain itu motor induksi tidak memerlukan sistem eksitasi (peneralan).

Motor induksi ini memiliki konstruksi yang kuat, sederhana, handal serta berbiaya murah. Disamping itu motor ini juga memiliki efisiensi yang tinggi saat

berbeban penuh (*full load*) dan tidak membutuhkan perawatan yang banyak. Akan tetapi bila dibandingkan dengan motor lain, motor induksi masih memiliki kelemahan dalam hal pengaturan kecepatan. Dimana pada motor induksi terutama rotor sangkar pengaturan kecepatan sangat sulit untuk dilakukan, sementara pada motor lain hal yang sama tidak dijumpai. Pada KRL tipe VVVF BN – HOLEC menggunakan motor AC induksi 3 fasa sebagai motor penggerak utamanya. Motor induksi tiga fasa bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik yaitu bila kumparan stator diberi sumber tegangan bolak-balik 3 fasa maka arus akan mengalir pada kumparan tersebut. Sehingga menimbulkan medan putar(garis-garis gaya fluks) dengan kecepatan sinkron yang mengikuti persamaan :

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \text{ (rpm)}$$

dimana :

n_s : kecepatan sinkron motor

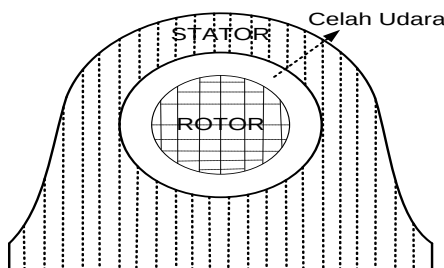
f : frekuensi stator

p : jumlah kutub

garis-garis gaya fluks dari stator akan memotong penghantar-penghantar rotor sehingga timbul tegangan induksi pada penghantar rotor tersebut. Kumparan rotor merupakan suatu rangkaian tertutup maka pada kumparan tersebut timbul arus, adanya arus dalam medan magnet akan menghasilkan gaya pada rotor. Bila kopel yang dihasilkan oleh gaya pada rotor cukup besar untuk memikul beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.

2.2.2. Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi terdiri dari dua bagian utama, yaitu bagian yang tidak bergerak disebut stator dan bagian yang bergerak disebut rotor. Diantara stator dan rotor tersebut terdapat celah udara (*air gap*) yang memisahkan keduanya. Hal ini di perlihatkan pada Gambar 2.1. :

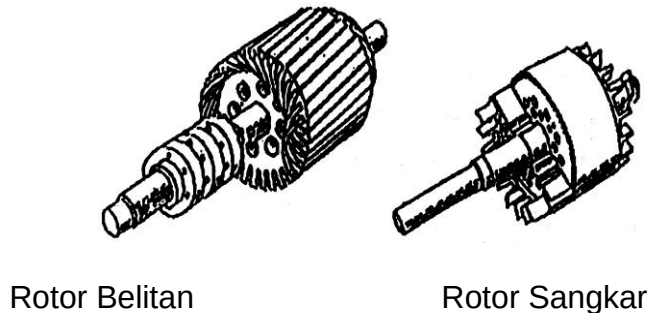


Gambar 2.1. Konstruksi Motor Induksi.

Stator tersebut dari bahan feromagnetik yang memiliki sifat permeabilitas tinggi. Karena bahan tersebut umumnya merupakan konduktor yang baik, maka untuk mengurangi arus pusar (*eddy current*) yang timbul, stator disusun dari lapisan-lapisan yang berbentuk cincin yang beralur pada bagian dalamnya. Pada alur-alur inilah lilitan-lilitan (*coils*) penghantar ditempatkan. Penghantar-penghantar yang ditempatkan pada alur-alur tersebut dihubungkan dengan pola tertentu yang akan membentuk lilitan stator. Jika lilitan ini dialiri arus listrik bolak-balik tiga fasa, maka akan timbul medan magnet (*magnetic field*) yang berputar mengelilingi rotor.

Pada Gambar 2.2. berdasarkan rotornya, motor induksi dapat dibedakan menjadi dua jenis. Pertama adalah motor induksi dengan rotor belitan (*wound rotor*), motor ini memiliki hamparan rotor dan stator yang sama, baik pada jenis kumparan, jumlah phasa maupun jumlah kutubnya. Ujung-ujung dari setiap kumparan rotor

dihubungkan pada tahanan luar melalui cincin slip (*slip ring*) yang dipatri pada sumbu rotor. Pada motor induksi rotor belitan, rangkaian rotornya dirancang untuk dapat disisipkan dengan tahanan eksternal, yang mana hal ini akan memberikan keuntungan dalam memodifikasi karakteristik torsi - slip dari motor induksi.



Gambar 2.2. Jenis Rotor.

Sedangkan jenis yang kedua adalah motor induksi dengan rotor sangkar (*squirrel cage rotor*). Dinamakan rotor sangkar karena rotor jenis ini sama bentuknya seperti sangkar.

Dimana rotornya terbuat dari batang-batang tembaga atau aluminium yang dihubungkan singkat pada kedua ujungnya melalui cincin hubung (*shorting ring*).

Motor jenis ini lebih sederhana dalam konstruksinya dan kuat dibandingkan dengan motor induksi dengan rotor belitan, karena itu lebih banyak digunakan pada pemakaian umum.

2.2.3. Prinsip Kerja Motor Induksi

Pada prinsipnya motor induksi 3 fasa bekerja berdasarkan interaksi antara medan elektromagnetik dengan arus pada rotor yang memotong medan listrik sebagai berikut :

a) Apabila sumber tegangan 3 fasa dipasang pada kumparan stator akan timbul

medan putar dengan kecepatan $n_s = \frac{120 \times f}{p} \text{ (rpm)}$

b) Medan putar stator tersebut akan memotong arus pada kumparan rotor.

c) Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (ggl) sebesar :

$$E_{2s} = 4,44 f_2 N_2 \phi_m \text{ (untuk satu fasa)}$$

E_{2s} = adalah tegangan induksi pada saat rotor berputar

d) Kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka ggl (E) akan menghasilkan arus(I).

e) Adanya arus I didalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.

f) Tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi, diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan putar rotor (n_r).

g) Perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut slip (s) yang dinyatakan dengan

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\%$$

h) Bila $n_r = n_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan dihasilkan apabila $n_r < n_s$.

i) Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau motor asinkron.

2.2.4. Prinsip Dari Slip dan Frekuensi Pada Rotor

Berubah-ubahnya kecepatan motor induksi (n_r) mengakibatkan berubahnya harga *slip* dari 100% pada saat start sampai 0% saat motor diam ($n_r = n_s$).

Hubungan frekuensi dengan slip dapat dilihat sebagai berikut :

Bila frekuensi (f_1) = frekuensi jala-jala, maka :

$$n_s = \frac{120 f_1}{p} \text{ atau } f_1 = \frac{p n_s}{120}$$

Pada rotor berlaku hubungan :

$$f_2 = \frac{p(n_s - n_r)}{120}; f_2 = \text{frekuensi arus rotor}$$

Atau

$$f_2 = \frac{p n_s}{120} \times \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Karena

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \text{ dan } f_1 = \frac{p n_s}{120}$$

maka

$$f_2 = f_1 \times s$$

Pada saat start

$$s = 100\%; f_2 = f_1$$

Dengan demikian terlihat bahwa pada saat start, rotor belum berputar, frekuensi pada rotor dan stator sama. Dalam keadaan rotor berputar, frekuensi pada rotor dipengaruhi oleh slip ($f_2 = s f_1$). Karena tegangan induksi dan reaktansi

kumparan rotor merupakan fungsi frekuensi, maka harganya turut pula dipengaruhi oleh slip.

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \phi_m$$

$$E_{2s} = 4.44 s f_1 N_2 \phi_m$$

$$E_{2s} = s E_2$$

E_2 = tegangan induksi pada saat start (diam)

E_{2s} = tegangan induksi saat motor berputar

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_{2s}$$

$$X_{2s} = 2\pi s f_1 L_{2s}$$

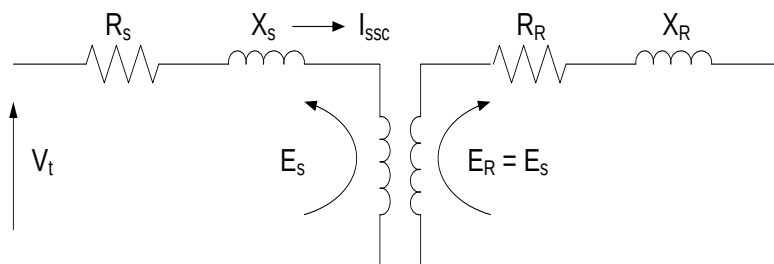
$$X_{2s} = s X_2$$

X_2 = adalah reaktansi pada saat rotor berputar

X_{2s} = adalah reaktansi pada saat start (diam)

2.2.5. Rangkaian Pengganti Motor Induksi

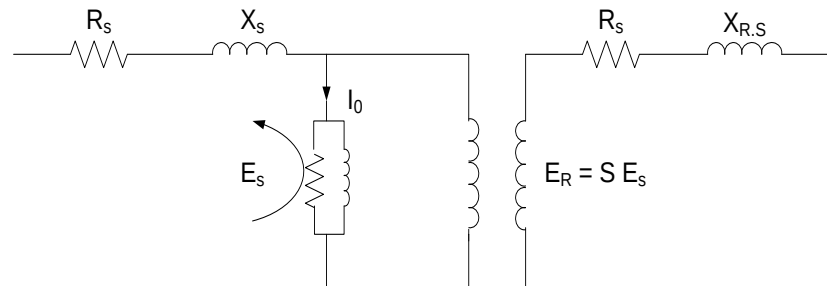
Operasi dari motor induksi tergantung pada induksi arus dan ggl didalam rangkaian rotor yang berasal dari rangkaian stator. Pada gambar 2.3. untuk mesin induksi dengan rotor sangkar dihubung singkat. Sirkuit magnetisasi di abaikan karena arus sirkuit magnetisasi lebih kecil dari arus hubung singkat.



Gambar 2.3. Sirkuit Ekvivalen Dihubung Singkat

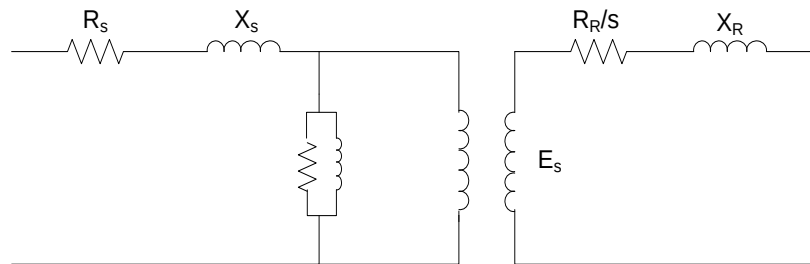
Sesudah poros dilepas arus I_s berkurang sehingga tidak boleh diabaikan.

Pada gambar 2.4. gambar sirkit ekivalen setelah poros dilepas.



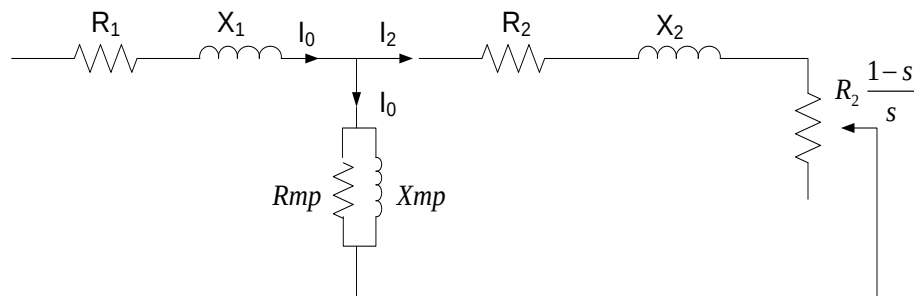
Gambar 2.4. Sirkit Ekivalen Setelah Poros Dilepas

Setelah itu sisi kanan boleh dibagi s , seperti pada gambar 2.5. dibawah ini :



Gambar 2.5. Sirkit Ekivalen Setelah Dibagi Slip

Jadi sirkit ekivalen untuk motor induksi jenis rotor sangkar ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Sirkit Ekivalen Untuk Motor Induksi Jenis Rotor Sangkar

2.2.6. Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

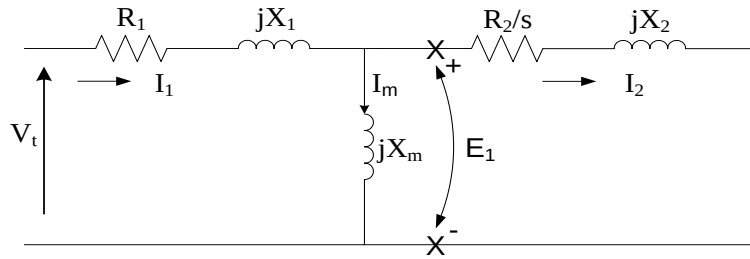
Dari rangkaian ekivalen induksi tiga phasa yang telah diperoleh sebelumnya dapat diturunkan suatu rumusan umum untuk torsi induksi sebagai fungsi dari kecepatan. Torsi motor induksi diberikan oleh persamaan:

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

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

Persaman terakhir diatas sangat berguna, karena kecepatan sinkron selalu bernilai konstan untuk tiap-tiap frekwensi dan jumlah kutub yang diberikan motor. Karena kecepatan sinkron selalu tetap, maka daya pada celah udara akan menentukan besar torsi induksi pada motor.

Analisa rangkaian ekivalen sering disederhanakan dengan mengabaikan seluruh cabang magnetisasi. Pendekatan demikian tidak dibenarkan dalam motor induksi yang bekerja dalam keadaan normal, karena adanya celah udara yang menjadikan perlunya arus magnetisasi yang sangat besar (30% sampai 40% dari arus beban penuh). Sehingga rangkaian ekivalennya adalah seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Jika Rugi Inti Diabaikan.

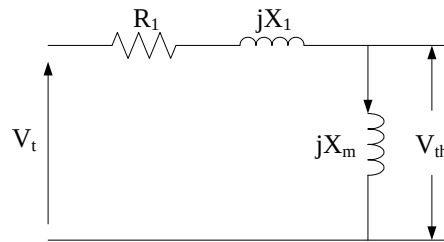
Meskipun terdapat berbagai cara menyelesaikan rangkaian seperti Gambar 2.7. untuk menentukan besarnya arus, namun penyelesaian yang paling mudah dapat dilakukan dengan menentukan rangkaian ekuivalen Thevenin dari gambar tersebut.

Agar dapat menghitung ekuivalen Thevenin dari sisi input rangkaian ekuivalen motor induksi, pertama-tama terminal dihubung buka (*open-circuit*), kemudian tegangan *open circuit* di terminal tersebut ditentukan. Untuk menentukan impedansi Thevenin, maka tegangan phasa dihubung singkat (*short-circuit*) kemudian ditentukan dengan melihat kedalam sisi terminal.

Dari Gambar 2.8. ditunjukkan bahwa terminal di *open-circuit* untuk mendapatkan tegangan ekuivalen Thevenin. Oleh karena itu dengan aturan pembagian tegangan diperoleh :

$$V_{th} = V_t \frac{Z_m}{Z_m + Z_1}$$

$$V_{th} = V_t \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m}$$



Gambar 2.8. Tegangan Ekvivalen Thevenin Pada Sisi Rangkaian Input.

Besarnya nilai dari tegangan Thevenin menjadi :

$$V_{th} = V_t \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}}$$

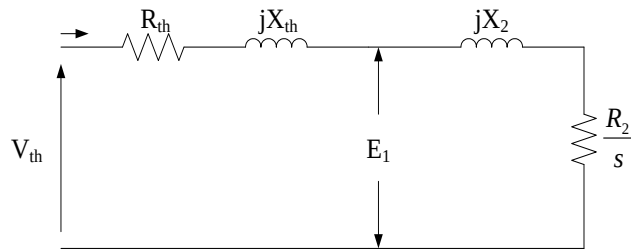
Karena reaktansi magnetisasi dan, maka harga pendekatan dari besarnya tegangan ekvalen Thevenin menjadi :

$$V_{th} \approx V_t \frac{X_m}{X_1 + X_m}$$

Gambar 2.9. menunjukkan rangkaian ekvalen Thevenin dari gambar ini besarnya arus adalah :

$$I_2 = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_2} \quad ; \quad I_2 = \frac{V_{th}}{R_{th} + \frac{R_2}{s} + jX_{th} + jX_2}$$

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$



Gambar 2.9. Rangkaian Ekivalen Thevenin Motor Induksi.

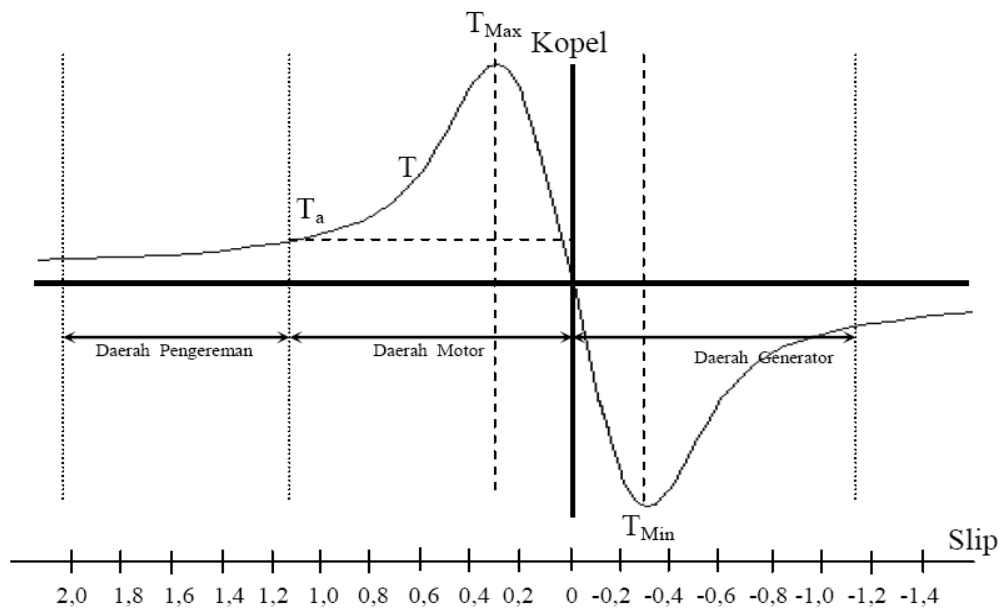
Besarnya daya pada celah udara adalah sebagai berikut :

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

$$P_{AG} = \frac{3 V_{th}^2 \frac{R_2}{s}}{[(R_{th} + R_2/s)^2 + (X_{th} + X_2)^2]}$$

Sedangkan torsi induksi pada rotor menjadi :

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



Gambar 2.10. Kurva Karakteristik Torsi-Slip Motor Induksi.

2.2.7. Torsi Maksimun Motor Induksi Tiga Fasa

Karena besarnya torsi induksi adalah, maka torsi maksimum yang mungkin terbentuk jika daya pada celah udara maksimum. Karena daya pada celah udara sama dengan daya yang dikonsumsi oleh resistor, torsi induksi akan maksimum ketika daya yang dikonsumsi oleh resistor tersebut maksimum.

Transfer daya terhadap resistor akan maksimum jika besarnya impedansi sama dengan besarnya impedansi sumber. Dari rangkaian ekivalen Thevenin, besarnya impedansi sumber dari rangkaian adalah :

$$Z_{source} = R_{th} + jX_{th} + jX_2$$

Oleh karena itu transfer daya maksimum menjadi :

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{th}^2 + (jX_{th} + jX_2)^2}$$

Atau slip pada saat torsi maksimum adalah :

$$s_{maks} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$

Oleh karena itu slip dari rotor saat torsi maksimum secara langsung sebanding dengan tahanan rotor. Sedangkan torsi maksimum dapat ditentukan sebagai berikut :

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

2.2.8. Effisiensi motor induksi tiga fasa

Effisiensi dari suatu motor induksi didefinisikan sebagai ukuran keeffektifan motor induksi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang dinyatakan sebagai perbandingan/rasio daya output (keluaran) dengan daya input (masukan), atau dapat juga dirumuskan dengan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses} + P_{gesekan\&angin}} \times 100\%$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa effisiensi motor tergantung pada besarnya rugi-rugi. Apabila rugi-rugi dari motor induksi kecil semakin efisien motor tersebut. Sebaliknya jika rugi-rugi besar maka tingkat efisiensinya semakin kecil. Untuk menentukan besarnya rugi-rugi dari motor induksi dapat diketahui dengan melakukan percobaan pada motor induksi seperti percobaan arus searah, percobaan hubung singkat dan percobaan tanpa beban.