

BAB II

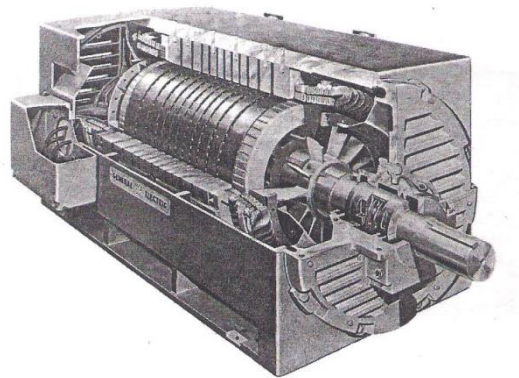
MOTOR INDUKSI TIGA FASA

2.1 Umum

Motor – motor listrik pada dasarnya digunakan sebagai sumber beban atau penggerak untuk menjalankan alat – alat tertentu, terutama dalam bidang perindustrian. Motor listrik memiliki beberapa klasifikasi berdasarkan pasokan input, konstruksi dan mekanisme operasi. 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 ditinjau dari karakteristik putaran terhadap perubahan bebannya dapat diklasifikasikan menjadi 2 macam yaitu motor AC induksi dan motor AC sinkron. Pada motor listrik jenis induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan, penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana 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 (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Skripsi ini akan membahas perhitungan rugi – rugi motor induksi penggerak *boiler feed pump* PLTU. Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi 3 fasa.

2.2 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

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. :

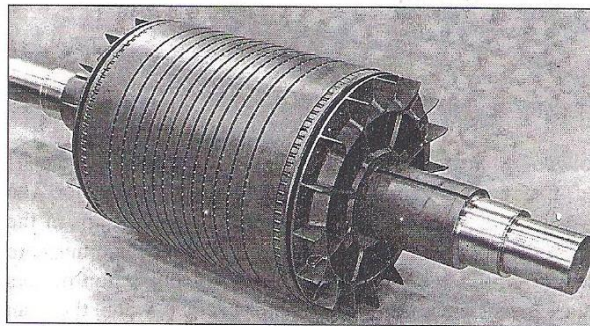


Gambar 2.1. Konstruksi Motor Induksi.

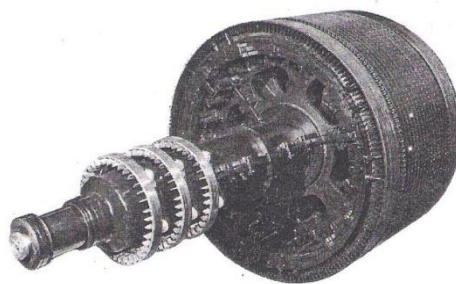
Stator tersebut dari bahan feromagnetik yang memiliki sifat permeabilitas tinggi. Karena bahan tersebut umumnya merupakan konduktor yang baik, maka untuk mengurangi arus eddy (*eddy current*) yang timbul, stator disusun dari lapisan-lapisan yang berbentuk cincin yang beralur pada bagian dalamnya. Pada 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 yang berputar mengelilingi rotor.

Pada Gambar 2.2. dan gambar 2.3. berdasarkan rotornya, motor induksi dapat dibedakan menjadi dua jenis. Pertama adalah motor induksi dengan rotor belitan (*wound rotor*), motor ini memiliki kumparan rotor dan stator yang sama,

baik pada jenis kumparan, jumlah fasa 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 Rotor Sangkar



Gambar 2.3. Rotor Belitan

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 almunium yang dihubung 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.

2.3 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 torsi. Torsi motor akan dihasilkan apabila $n_r < n_s$.

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

2.4 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 :

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

Dimana: n_s = kecepatan medan putar stator

p = Jumlah Kutub

Pada rotor berlaku hubungan :

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

Atau,

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

Karena,

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

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.

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 \emptyset m$$

$$E_{2s} = 4.44 s f_1 N_2 \emptyset m$$

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

E_2 = tegangan induksi pada saat start (diam)

E_{2s} = tegangan induksi saat motor berputar

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

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

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

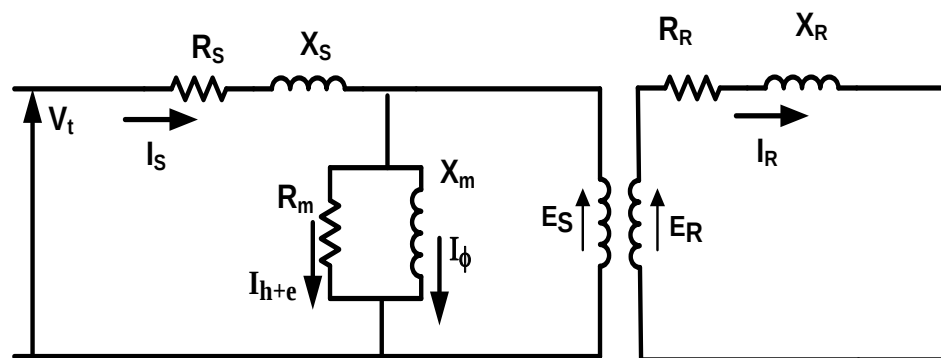
X_2 = adalah reaktansi pada saat rotor berputar

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

2.5 Rangkaian Pengganti Motor Induksi

Operasi dari motor induksi tergantung pada induksi arus dan ggl di dalam rangkaian rotor yang berasal dari rangkaian stator. karena induksi arus dan ggl pada motor induksi pada dasarnya sama dengan operasi transformator, maka rangkaian ekivalen motor induksi akan sangat menyerupai rangkaian ekivalen transformator. Motor induksi disebut juga *singly excited machine* sebab daya hanya disuplai dari rangkaian stator.

Rangkaian ekivalen perfasa dari transformator dapat menggantikan operasi dari motor induksi. Hal ini ditunjukkan seperti pada gambar 2.4. Sebagaimana halnya pada transformator, maka terdapat tahanan (R_s) dan induktansi (X_s) pada belitan stator yang direpresentasikan dalam rangkaian mesin.

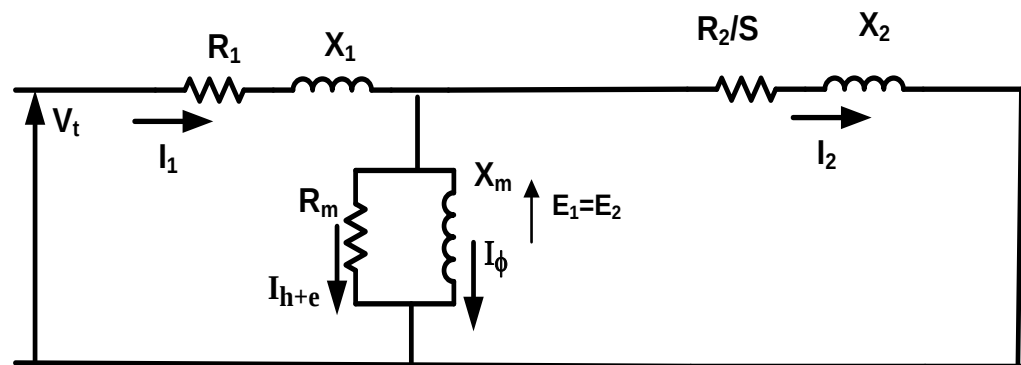


Gambar 2.4. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Sebagai Model Transformator dengan Rotor Diam.

Tegangan stator E_s ditorsi terhadap sisi sekunder E_R sebagaimana halnya transformator ideal dengan rasio belitan efektif α_{eff} . Rasio belitan ini dengan mudah dapat ditentukan pada motor induksi rotor belitan, yang mana pada dasarnya rasio ini merupakan banyaknya konduktor perfasa pada stator terhadap

jumlah konduktor perfasa pada rotor. Akan tetapi tidak demikian halnya pada motor induksi sangkar tupai, karena tidak terdapat belitan pada rotor motor tersebut.

Untuk mempermudah penganalisaan, maka rangkaian ekivalen motor induksi pada gambar 2.4, dapat dilihat dari sisi stator seperti gambar 2.5 dengan kondisi rotor tidak berputar atau $n_r = 0$ dan $s = 1$.



Gambar 2.5. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Pada Kondisi Rotor Diam

Dimana :

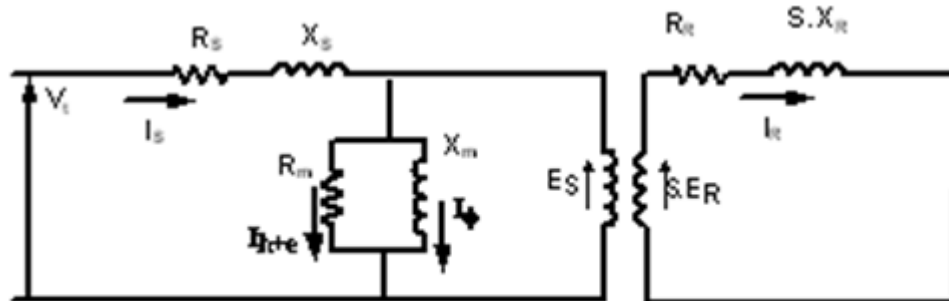
$$E_1 = E_s, I_1 = I_s, R_1 = R_s, X_1 = X_s,$$

$$E_2 = E_R \times a, \quad I_2 = I_R \frac{1}{a}, \quad R_2 = R_R \times a^2,$$

$$X_2 = X_R \times a^2$$

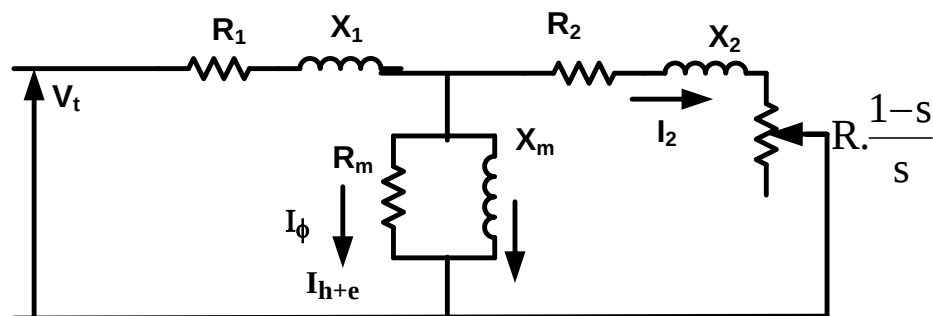
$$E_2 = E_R \times a$$

Apabila rotor berputar, maka rangkaian ekivalen motor induksi menjadi:



Gambar 2.6. Rangkaian ekivalen motor induksi pada kondisi rotor berputar

Sedangkan apabila rugi-rugi tembaga dan rugi-rugi inti dipisahkan dengan besarnya daya yang dikonversikan menjadi daya mekanik, maka rangkaian ekivalennya adalah seperti gambar 2.7.



Gambar 2.7. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Dengan Adanya Pemisahan Rugi-rugi

2.6 Torsi Motor Induksi

Torsi dihasilkan dalam motor induksi oleh interaksi antara fluks stator dan arus pada rotor. Fluks yang dihasilkan oleh arus stator berputar pada kecepatan sinkron, agar arus rotor dapat diinduksi dan menghasilkan torsi, maka rotor harus berputar pada kecepatan yang lebih rendah dari pada kecepatan sinkron.

Pada keadaan tanpa beban, fluks rotor hanya sedikit tertinggal oleh fluks stator, karena torsi yang dibutuhkan hanya untuk mengatasi rugi-rugi motor. Jika beban mekanis ditambah, maka kecepatan rotor berkurang, sehingga memungkinkan medan putar stator berkecepatan konstan memotong konduktor pada laju kecepatan yang lebih cepat, sehingga arus rotor yang diinduksikan lebih besar.

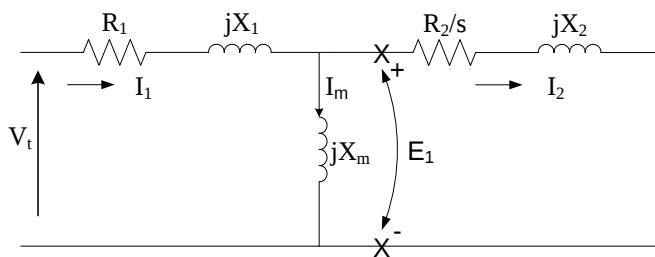
Dengan bertambahnya beban, maka arus rotor akan bertambah, dengan bertambahnya arus maka fluks stator akan berkurang dan akan mengurangi ggl lawan pada lilitan stator. Berkurangnya ggl lawan pada stator memungkinkan bertambahnya aliran arus stator, sehingga menyebabkan daya masukan pada motor bertambah besar. Torsi motor induksi ada karena interaksi medan stator dan arus rotor tergantung pada kekuatan medan tersebut dan hubungan fasa – fasanya. 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:

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

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

Persamaan 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 Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Jika Rugi Inti Diabaikan.

Meskipun terdapat berbagai cara menyelesaikan rangkaian seperti Gambar 2.8. untuk menentukan besarnya arus, namun penyelesaian yang paling mudah dapat dilakukan dengan menentukan rangkaian ekivalen Thevenin dari gambar tersebut.

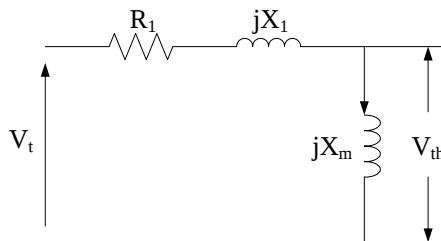
Agar dapat menghitung ekivalen Thevenin dari sisi input rangkaian ekivalen motor induksi, pertama-tama terminal dihubung buka (open-circuit), kemudian tegangan *open circuit* di terminal tersebut ditentukan. Untuk

menentukan impedansi Thevenin, maka tegangan phasa dihubung singkat (*short-circuit*) kemudian ditentukan dengan melihat kedalam sisi terminal.

Dari Gambar 2.9. ditunjukkan bahwa terminal di open-circuit untuk mendapatkan tegangan ekivalen 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 2.9. Tegangan Ekivalen Thevenin Pada Sisi Rangkaian Input.

Besarnya nilai dari tegangan Thevenin menjadi :

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

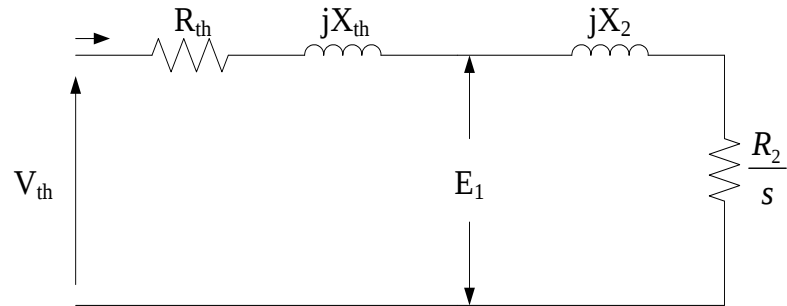
Karena reaktansi magnetisasi dan, maka harga pendekatan dari besarnya tegangan ekivalen Thevenin menjadi :

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

Gambar 2.10. menunjukkan rangkaian ekivalen 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 2.10. Rangkaian Ekuivalen Thevenin Motor Induksi.

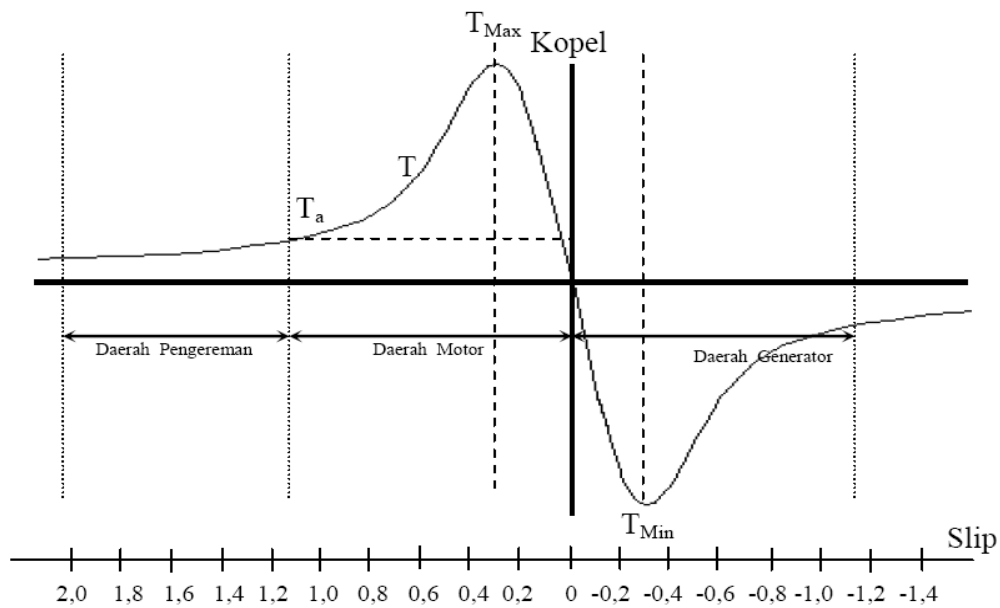
Besarnya daya pada celah udara adalah sebagai berikut :

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

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

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 2.11. Kurva Karakteristik Torsi-Slip Motor Induksi.

2.6.1 Torsi Maksimum Motor Induksi Tiga Fasa

Besarnya torsi maksimum motor induksi yang 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 ekuivalen 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 :

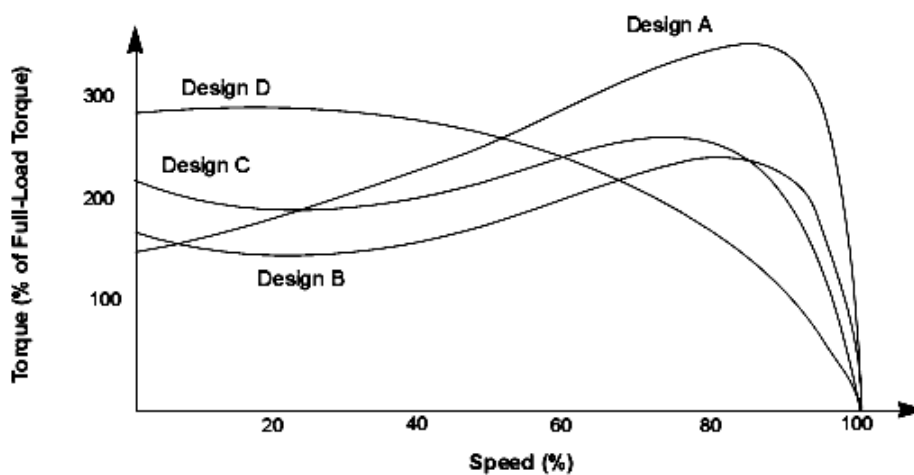
$$s_{maks} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$

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

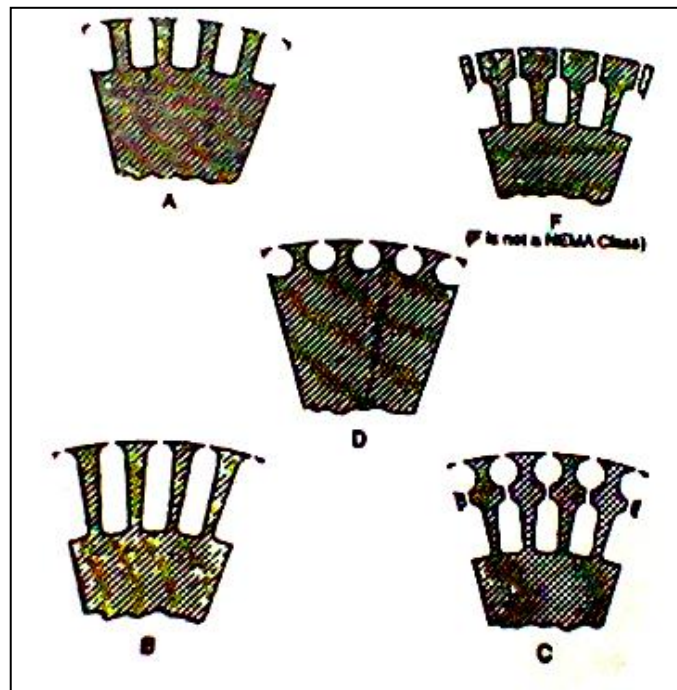
$$\tau_{maks} = \frac{3 V_{th}^2}{2\omega_{sync} \left[(R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}) \right]}$$

2.6.2 Karakteristik Torsi Motor Induksi Rotor sangkar

Karakteristik torsi motor induksi sangat diperlukan dalam pemilihan atau penggunaan motor untuk pengoperasian beban, khususnya motor induksi rotor sangkar. Berdasarkan konstruksi rotornya, karakteristik torsi dapat dibedakan seperti terlihat pada gambar 2.12 sebagai berikut.



Gambar 2.12. Karakteristik torsi - kecepatan motor induksi pada berbagai desain.



Gambar 2.13. Penampang rotor

Keterangan :

Desain A : batang rotor yang besar dekat permukaan rotor

Desain B : batang rotor yang besar lokasi didalam (deep bar)

Desain C : sangkar ganda

Desain D : batang rotor yang kecil dekat permukaan rotor

Desain F : soft start dengan batang tertanam sangat dalam.

1. Desain A : desain ini memiliki torsi start normal (150 – 170% dari nilai ratingnya) dan arus start relatif tinggi. Torsi *break down* nya merupakan yang paling tinggi dari semua desain NEMA. Motor ini mampu menangani beban lebih dalam jumlah besar selama waktu yang singkat. Slip $\leq 5\%$

2. Desain B : merupakan desain yang paling sering dijumpai di pasaran. Motor ini memiliki torsi start yang normal seperti halnya desain kelas A, akan tetapi motor ini memberikan arus start yang rendah. Torsi locked rotor cukup baik untuk menstart berbagai beban yang dijumpai dalam aplikasi industri. Slip motor ini $\leq 5\%$. Efisiensi dan faktor dayanya pada saat berbeban penuh tinggi sehingga desain ini merupakan yang paling populer. Aplikasinya dapat dijumpai pada pompa, kipas angin/ *fan*, dan peralatan – peralatan mesin.
3. Desain C : memiliki torsi start lebih tinggi (200 % dari nilai ratingnya) dari dua desain yang sebelumnya. Aplikasinya dijumpai pada beban – beban seperti konveyor, mesin penghancur (*crusher*), komperessor,dll. Operasi dari motor ini mendekati kecepatan penuh tanpa overload dalam jumlah besar. Arus startnya rendah, slipnya $\leq 5\%$
4. Desain D : memiliki torsi start yang paling tinggi. Arus start dan kecepatan beban penuhnya rendah. Memiliki nilai slip yang tinggi (5 - 13 %), sehingga motor ini cocok untuk aplikasi dengan perubahan beban dan perubahan kecepatan secara mendadak pada motor. Contoh aplikasinya : elevator, crane, dan ekstraktor.
5. Desain F : motor dengan desain F menggunakan rotor dengan sangkar ganda. Torsi mulanya 1,25 kali torsi nominal dengan arus mula 2 sampai 4 kali arus nominal. Motor ini mempunyai efisiensi kerja yang rendah dan slip yang normal pada beban penuh. Motor klasifikasi F ini dibuat dalam ukuran diatas 25 Hp.