



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi¹³

Motor listrik yang paling umum digunakan dalam perindustrian industri adalah motor induksi. Berdasarkan fasa sumber daya yang digunakan, motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi motor 1 fasa dan motor fasa banyak. Karena sistem distribusi umumnya adalah 3 fasa maka motor fasa banyak biasanya adalah 3 fasa. Motor induksi 3 fasa banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri, sedangkan motor induksi 1 fasa banyak digunakan pada peralatan rumah tangga karena motor induksi 1 fasa mempunyai daya keluaran yang rendah.

Adapun beberapa keuntungan motor induksi dibandingkan motor lain adalah konstruksinya yang sederhana tetapi kuat dan padat, ukurannya lebih kecil dan lebih ringan sehingga harganya lebih murah, perawatan yang mudah dan memiliki efisiensi yang tinggi. Tetapi dalam hal pengaturan kecepatan lebih sulit dilakukan dibandingkan motor DC. Seiring perkembangan teknologi dalam bidang elektronika daya telah memungkinkan untuk menandingi motor DC dalam hal pengendalian kecepatan.

2.2 Konstruksi Motor Induksi¹²

Motor Induksi pada dasarnya mempunyai 3 bagian penting sebagai berikut :

1. Stator

Merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya.

2. Celah

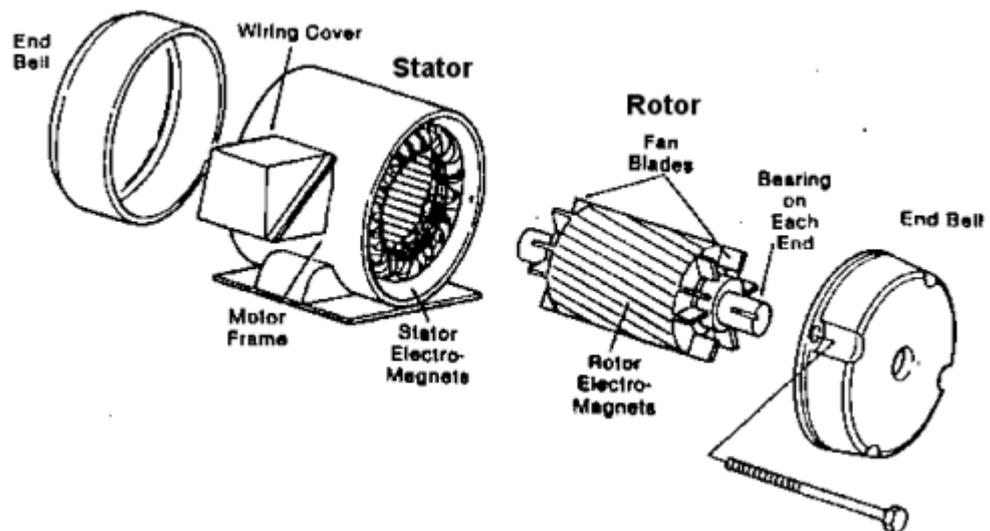
Merupakan celah udara, tempat berpindahnya energi dari stator ke rotor.

3. Rotor

Merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor.

Konstruksi stator motor induksi pada dasarnya terdiri dari bagian-bagian sebagai berikut :

1. Rumah stator (rangka stator) dari besi tuang.
2. Inti stator dari besi lunak atau baja silikon.
3. Alur, bahannya sama dengan inti dimana alur ini merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan stator).
4. Belitan (kumparan) stator dari tembaga.



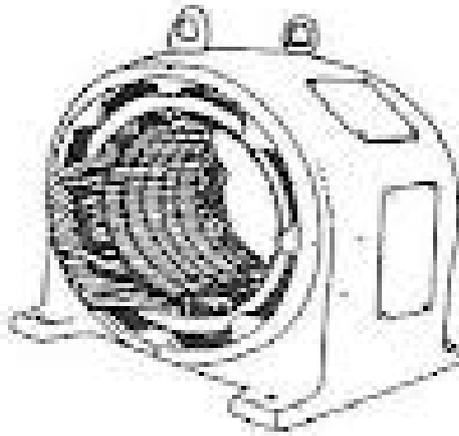
Gambar 2. 1. Konstruksi motor induksi

2.2.1 Stator

Adalah bagian dari mesin yang tidak berputar dan terletak pada bagian luar. Dibuat dari besi bundar berlaminasi dan mempunyai alur-alur sebagai tempat meletakkan kumparan.

Stator terbuat dari sejumlah stamping (kaki) yang membentuk slot, tempat belitan-belitannya. Belitan pada stator adalah satu fasa yang dihubungkan dengan sumber satu fasa. Belitannya dibelitkan untuk sejumlah kutub tertentu, dimana

jumlah pastinya ditentukan dari kecepatan yang dibutuhkan. Semakin besar jumlah kutub, kecepatan putarnya semakin berkurang dan sebaliknya.



Gambar 2. 2. Stator

2.2.2 Rotor

Berdasarkan jenis rotor yang digunakan, motor induksi dapat dibedakan menjadi dua type, yaitu :

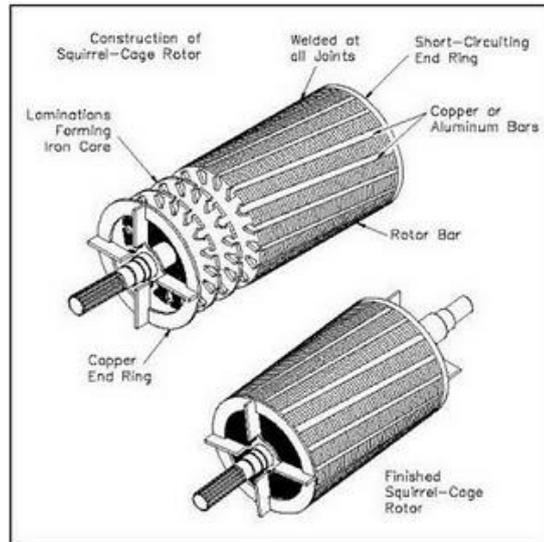
1. Rotor belitan

Motor Induksi jenis ini mempunyai rotor dengan belitan kumparan tiga fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama. Rotor yang mempunyai tiga belitan yang mirip dengan belitan stator. Ketiga belitan tersebut biasanya terhubung bintang. Ujung-ujung belitan tersebut dihubungkan dengan slipring yang terdapat pada poros rotor. Belitan-belitan tersebut dihubungkan dengan sikat (brush) yang menempel pada slipring.

2. Rotor Sangkar

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa hingga menyerupai sangkar tupai. Rotor yang terdiri dari sederetan batang-batang penghantar yang terletak pada alur-alur sekitar permukaan rotor. Ujung-ujung batang penghantar

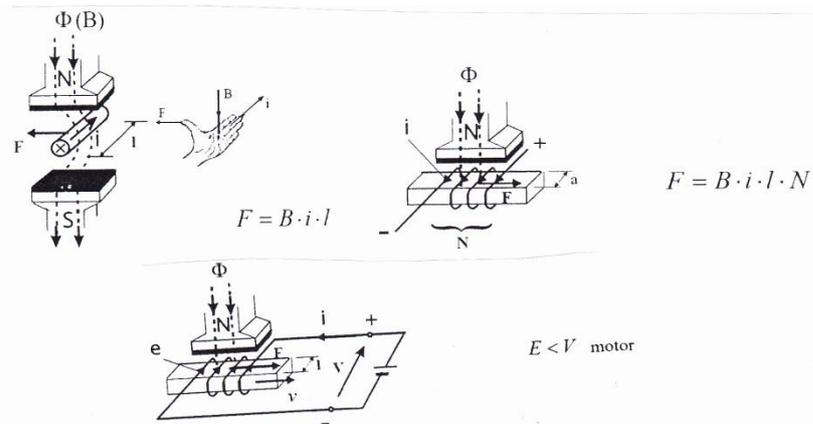
dihubung singkat dengan menggunakan cincin hubung singkat. Maka jenis rotor belitan dan rotor sangkar dapat dilihat pada gambar sebagai berikut :



Gambar 2. 3. Rotor belitan dan Rotor sangkar

2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi¹³

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator ke kumparan rotor. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul GGL atau tegangan induksi dan karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantaran (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator. Gaya Lorentz ditunjukkan seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.4. Gaya Lorentz

Arus listrik (I) yang dialirkan di dalam suatu medan magnet dengan kerapatan fluks (B) akan menghasilkan suatu gaya sebesar :

$$F = B \cdot I \cdot L \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

F = Gaya (Newton)

B = Kerapatan fluks (Weber)

I = Arus (Amper)

L = Konduktor (Meter)

Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot-slotnya yang dililitkan pada sejumlah kutub tertentu. Jumlah kutub ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi kemudian di induksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutub akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan medan stator dan sebaliknya. Kecepatan berputarnya medan putar ini disebut kecepatan sinkron.

Jika pada belitan stator diberi tegangan 3 fasa, maka pada stator akan dihasilkan arus 3 fasa. Arus ini akan mengalir melalui belitan yang akan menimbulkan fluks dank karena adanya perbedaan sudut fasa sebesar 120^0 antara ketiga phasanya, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan sinkron n_s .

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \text{ (rpm)} \dots\dots\dots (2.2)$$



Dalam stator sendiri akan tegangan pada masing-masing fasa yang dinyatakan :

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_m \text{ (Volt)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dalam keadaan motor masih diam, medan putar stator akan memotong batang konduktor pada rotor. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (GGL) sebesar E_2 :

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_m \text{ (volt)} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

E_2 = Tegangan induksi pada rotor saat rotor dalam keadaan diam (Volt)

N_2 = Jumlah lilitan kumparan rotor

Φ_m = Fluks maksimum (Wb)

Karena kumparan rotor membentuk rangkaian tertutup, maka GGL tersebut akan menghasilkan arus I_2 . Adanya arus I_2 di dalam kumparan rotor akan menghasilkan medan magnet rotor. Interaksi medan magnet rotor dengan medan putar stator akan menimbulkan gaya F pada rotor.

Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya F cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah medan putar stator. Perputaran rotor akan semakin meningkat hingga mendekati kecepatan sinkron. Perbedaan kecepatan sinkron medan putar stator (n_s) dan kecepatan rotor (n_r) disebut Slip, dinyatakan dengan :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.5)$$

Pada saat rotor dalam keadaan berputar, besarnya tegangan yang terinduksi pada kumparan rotor akan bervariasi tergantung besarnya slip dan tegangan induksi ini dinyatakan dengan E_{2s} .

$$E_{2s} = 4,44 s f N_2 \Phi_m \text{ (volt)} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

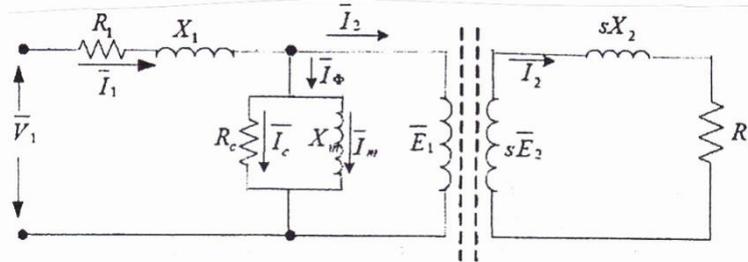
E_{2s} = Tegangan induksi pada rotor dalam keadaan berputar (volt).

$f_2 = s.f$ = Frekuensi rotor (frekuensi tegangan induksi pada rotor dalam keadaan berputar).

Bila $n_s = n_r$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak akan mengalir pada kumparan rotor, karenanya tidak dihasilkan kopel. Kopel dihasilkan jika $n_r < n_s$.

2.4 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi²

Kerja motor induksi seperti juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Oleh karena itu, motor induksi dapat dianggap transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Rangkaian pengganti motor induksi dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.5. Rangkaian pengganti motor induksi

Untuk menentukan rangkaian ekuivalen dari motor 3 fasa pertama-tama perhatikan keadaan pada stator. Gelombang fluks pada celah udara yang berputar sinkron membangkitkan GGL lawan 3 fasa yang seimbang di dalam fasa-fasa stator. Besarnya tegangan terminal stator berbeda dengan GGL lawan sebesar jatuh tegangan pada Impedansi (Z) bocor stator, sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{I}_1(R_1 + jX_1) \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

\bar{V}_1 = Tegangan terminal stator (Volt)

\bar{E}_1 = Ggl lawan yang dihasilkan oleh fluks celah udara resultan (Volt)

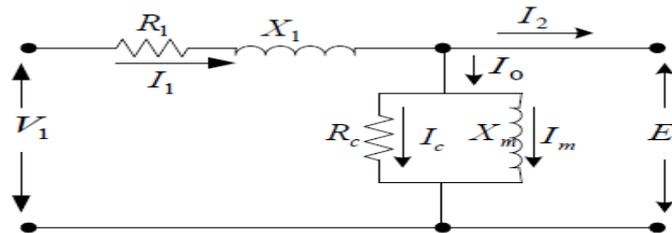
\bar{I}_1 = Arus stator (Amper)

R_1 = Resistansi efektif stator (Ohm)

X_1 = Reaktansi bocor stator (Ohm)

Seperti halnya transformator, arus stator dapat dipecah menjadi 2 komponen, yaitu komponen beban dan komponen peneralan. Komponen beban I_2 menghasilkan suatu fluks yang akan melawan fluks yang diakibatkan arus rotor.

Komponen peneralan $I\Phi$ merupakan arus stator tambahan yang diperlukan untuk menghasilkan fluks celah udara resultan. Arus peneralan dapat dipecah menjadi komponen rugi-rugi inti I_c yang se-fasa dengan E_1 dan komponen magnetisasi I_m yang tertinggal dari E_1 sebesar 90° . Sehingga dapat dibuat rangkaian ekuivalen pada stator seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.6. Rangkaian Ekuivalen Stator

Pada rotor belitan, belitan yang dililit sama banyaknya dengan jumlah kutub dan fasa stator. Jumlah lilitan efektif tiap fasa pada lilitan stator banyaknya $a \times$ jumlah lilitan rotor. Bandingkan efek magnetis rotor ini dengan yang terdapat pada rotor ekuivalen magnetic yang mempunyai jumlah lilitan yang sama seperti stator. Untuk kecepatan dan fluks yang sama, hubungan antara tegangan E_{rotor} yang diimbaskan pada rotor yang sebenarnya dan tegangan E_{2s} yang diimbaskan pada rotor ekuivalen adalah sebagai berikut :

$$E_{2s} = a E_{rotor} \dots \dots \dots (2.8)$$

Bila rotor-rotor akan diganti secara magnetis, lilitan amper masing-masing harus sama dan hubungan antara arus rotor sebenarnya I_{rotor} dan arus I_{2s} pada rotor ekuivalen haruslah :

$$\bar{I}_{2s} = \frac{I_{rotor}}{a} \dots \dots \dots (2.9)$$

Akibatnya hubungan antara Impedansi (Z) bocor frekuensi slip Z_{2s} dari rotor ekuivalen dan impedansi bocor frekuensi slip Z_{rotor} yang sebenarnya haruslah sebagai berikut :

$$Z_{2s} = \frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = \frac{a \bar{E}_{rotor}}{\bar{I}_{rotor}} = a^2 Z_{rotor} \text{ (ohm)} \dots \dots \dots (2.10)$$



Karena rotor terhubung singkat, hubungan fasor antara GGL frekwensi slip E_{2s} yang dibangkitkan pada phasa patokan dari rotor patokan dan arus I_{2s} pada phasa tersebut adalah :

$$\frac{\overline{E}_{2s}}{\overline{I}_{2s}} = Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

Z_{2s} = Impedansi bocor rotor frekuensi slip/fasa (ohm)

R_2 = Tahanan rotor (ohm)

X_{2s} = Reaktansi bocor patokan pada frekuensi slip (ohm)

Reaktansi yang didapat pada persamaan (2.10) dinyatakan dalam cara yang demikian karena sebanding dengan frekuensi rotor dan slip. Jadi X_2 didefinisikan sebagai harga yang akan dimiliki oleh reaktansi bocor pada rotor dengan patokan pada frekuensi stator.

Pada stator ada gelombang fluks yang berputar pada kecepatan sinkron. Gelombang fluks ini akan mengimbangkan tegangan pada rotor dengan frekuensi slip sebesar E_{2s} dan GGL lawan stator E_1 . Bila bukan karena efek kecepatan, tegangan rotor akan sama dengan tegangan stator karena lilitan rotor identik dengan lilitan stator. Kecepatan relative gelombang fluks terhadap rotor adalah s kali kecepatan stator, hubungan antara GGL efektif pada stator dan rotor adalah :

$$\overline{E}_{2s} = s\overline{E}_2 \dots\dots\dots (2.12)$$

Gelombang fluks magnetik pada rotor dilawan oleh fluks magnetik yang dihasilkan komponen beban I_2 dari arus stator dan karenanya untuk harga efektifnya adalah :

$$\overline{I}_{2s} = \overline{I}_2 \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan membagi persamaan (2.12) dengan persamaan (2.13) didapatkan :

$$\frac{\overline{E}_{2s}}{\overline{I}_{2s}} = \frac{s\overline{E}_2}{\overline{I}_2} \dots\dots\dots (2.14)$$

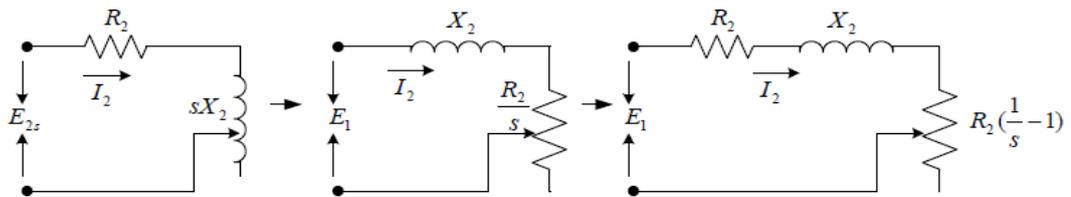
Didapat hubungan antara persamaan (2.13) dengan persamaan (2.14), yaitu :

$$\frac{\overline{E}_{2s}}{\overline{I}_{2s}} = \frac{s\overline{E}_2}{\overline{I}_2} = R_2 + jsX_2 \dots\dots\dots (2.15)$$

Dengan membagi persamaan (2.15) dengan S, maka di dapat :

$$\frac{\bar{E}_{2s}}{\bar{I}_{2s}} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \dots\dots\dots (2.16)$$

Dari persamaan (2.11), (2.12) dan (2.16) maka dapat digambarkan rangkaian ekivalen pada rotor seperti pada gambar dibawah ini :

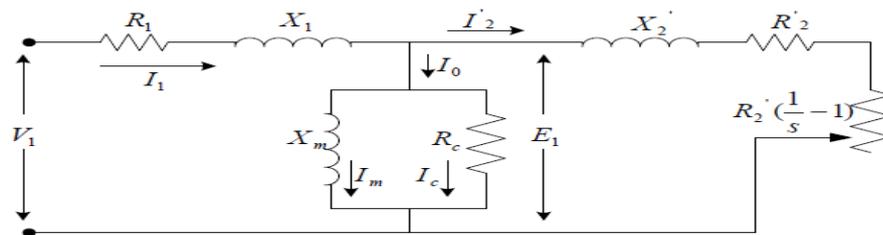


Gambar 2.7. Rangkaian ekivalen rotor

$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2}{s} + R_2 - R_2$$

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R\left(\frac{1}{s} - 1\right) \dots\dots\dots (2.17)$$

Dari penjelasan mengenai rangkaian ekivalen pada stator dan rotor diatas, maka dapat dibuat rangkaian ekivalen motor induksi 3 phasa pada masing-masing phasanya dan untuk mempermudah perhitungan maka rangkaian ekivalen dilihat dari sisi stator. Seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.8. Rangkaian ekivalen motor induksi sisi stator

Dimana :

$$X_2 = a^2 X_2$$

$$R_2 = a^2 X_2$$

2.5 Pengaturan Slip Motor Induksi³

Motor induksi adalah alat listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan menggunakan gandingan medan listrik dan mempunyai slip antara medan stator dan medan rotor.

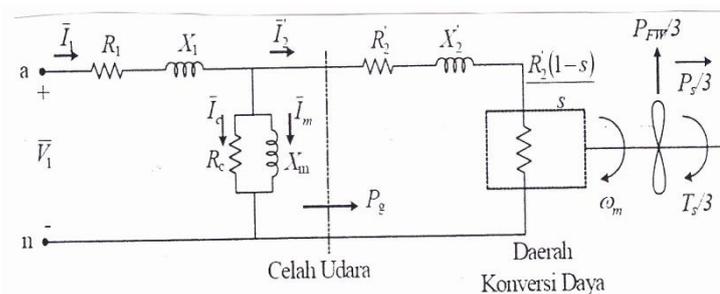
Untuk membangkitkan tegangan induksi E_2s agar tetap ada, maka diperlukan adanya perbedaan relative antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan rotor (n_r). Perbedaan antara kecepatan (n_r) dengan (n_s) disebut dengan slip (S) yang dinyatakan dengan persamaan :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \dots\dots\dots (2.18)$$

Jika $n_s = n_r$ tegangan akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada rotor, dengan demikian tidak ada torsi yang dapat dihasilkan. Torsi suatu motor akan timbul apabila $n_s \neq n_r$ dan dilihat dari cara kerjanya motor 3 fasa yang disebut juga dengan motor tak serempak (Asinkron).

2.6 Aliran Daya Pada Motor Induksi

Pada motor induksi tidak ada sumber tegangan yang langsung terhubung ke rotor, sehingga daya yang melewati celah udara sama dengan daya yang diinputkan ke rotor.



Gambar 2. 9. Rangkaian ekivalen perphasa motor induksi 3 phasa

Dimana :

P_{FW} = Rugi-rugi gesek dan angin motor

P_s = Daya penggerak poros

T_s = Torsi penggerak poros

Model rangkaian ekivalen perphasa motor induksi 3 phasa pada gambar diatas menggambarkan proses pengubahan daya elektromekanik pada motor induksi 3 phasa. Daya total yang diinputkan pada kumparan stator (P_1) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_1 = 3 V_1 I_1 \cos \theta \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana :

P_1 = Daya akif (Watt)

V_1 = Tegangan sumber (Volt)

I_1 = Arus masukan (Amper)

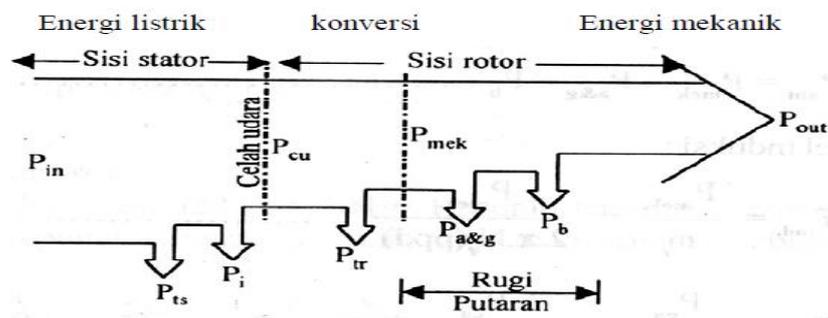
θ = Perbedaan susut phasa antara arus masukan dan tegangan arus sumber (Derajat)

Sebelum daya ditransfer melewati celah udara, motor induksi mengalami beberapa rugi-rugi tembaga stator ($3 I_1 R_1$) dan rugi-rugi inti stator ($3 E_1/R_C$). Daya yang ditransfer melalui celah udara ($3 P_{AG}$) sama dengan penjumlahan rugi-rugi tembaga rotor ($3 P_{rcu}$) dan daya mekanik ($3 P_d$). Daya yang ditransfer melalui celah udara ini sering disebut juga dengan daya input rotor.

$$3P_{AG} = 3P_{rcu} + 3P_{in}$$

$$3 (I_2)^2 = \frac{R2}{s} = 3(I_2^1)^2 R_2^1 + 3(I_2^1)^2 \frac{(1-s)}{s} R_2 \dots\dots\dots (2.20)$$

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini yang menggambarkan diagram aliran daya pada motor induksi 3 phasa.



Gambar 2. 10. Diagram aliran daya pada motor induksi 3 phasa



Hubungan antara rugi-rugi tembaga rotor dan daya mekanik dengan daya input rotor masing-masing dalam besaran perphasa dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{rcu} = (I_2^1)^2 R_2^1 = sP_{AG} \dots\dots\dots (2.21)$$

$$P_d = (I_2^1)^2 \frac{(1-s)}{s} R_2^1 = (1-s) P_{AG} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa motor induksi juga mengalami rugi-rugi gesek dan angin (P_{FW}) sehingga daya out put mekanik yang merupakan daya penggerak poros (P_s) sama dengan daya mekanik total ($3P_d$) dikurangi rugi-rugi gesek dan angin (P_{FW}).

$$P_s = 3P_d - P_{FW} = T_s \omega_m \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana :

T_s = Torsi penggerak poros

ω_m = Kecepatan sudut poros

2.7 Perhitungan Torsi Pada Motor Induksi 3 Phasa¹

Torsi mekanik (T_d) dapat dihitung dengan membagi persamaan (2.22) dengan kecepatan sudut poros (ω_m).

$$T_d = \frac{Pd}{\omega_m} = \frac{(1-s)}{\omega_m} (I_2^1)^2 \frac{R_2^1}{s} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$S = \frac{ns - nm}{\omega_m} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_s} \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana :

ω_s = Kecepatan sudut sinkron (radian/detik)

ω_m = Kecepatan sudut poros rotor (radian/detik)

$$\omega_m = (1-s) \omega_s$$

Sehingga :

$$T_d = \frac{ns - nr}{ns} \times 100\%$$

Rangkaian ekivalen pada gambar 2.8 Dapat disederhanakan menjadi rangkaian Thevenin. Dengan rangkaian ini harga arus rotor (I_2^1) dapat dihitung, sehingga persamaan torsi yang diinginkan dapat diperoleh.



$$V_{Th} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_1} V_\phi$$

$$Z_M = \frac{R_c j X_m}{R_c + j X_m} : Z_1 = R_1 + j X_1$$

$$Z_{Th} = R_{Th} + j X_{Th} = \frac{Z_1 Z_m}{Z_1 + Z_m}$$

Sehingga :

$$I_2' = \frac{V_{Th}}{Z_{Th} + Z_2}$$

$$I_2' = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_2 / S + j X_{Th} + j X_2} \dots\dots\dots (2.26)$$

Besar arus ini adalah :

$$|I_2'| = \frac{V_{Th}}{\sqrt{(R_{Th} + R_2 / S)^2 + (j X_{Th} + j X_2)^2}} \dots\dots\dots (2.27)$$

Substitusi persamaan (2.25) ke persamaan (2.24) dan pengalihan dengan 3 (untuk torsi 3 phasa) diperoleh persamaan torsi mekanik total :

$$T_{d3} \phi = \frac{3 V_{Th}^2 \frac{R_2}{S}}{\cos \left[(R_{Th} + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_{Th} + X_2')^2 \right]} \dots\dots\dots (2.28)$$

2.8 Efisiensi Motor Induksi Tiga Phasa

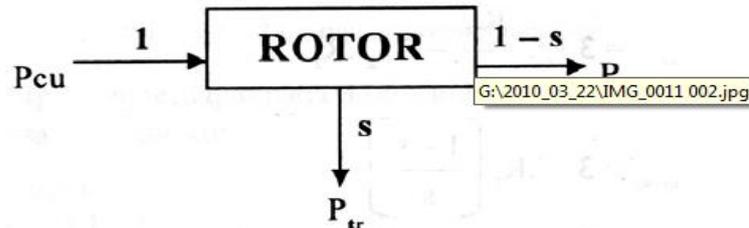
Efisiensi dari suatu motor induksi didefinisikan sebagai ukuran keefektifan motor induksi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang dinyatakan sebagai perbandingan/ rasio daya *output* (keluaran) dengan daya *input* (masukan), atau dapat juga dirumuskan dengan :

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.29)$$

$$P_{loss} = P_{in} + P_i + P_{tr} + P_{a\&g} + P_b \dots\dots\dots (2.30)$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1 \dots\dots\dots (2.31)$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa efisiensi motor tergantung pada besarnya rugi-rugi. Pada dasarnya metode yang digunakan untuk menentukan efisiensi motor induksi bergantung pada dua hal apakah motor itu dapat dibebani secara penuh atau pembebanan simulasi yang harus digunakan.



Gambar 2.11. Efisiensi pada motor induksi

Dimana:

P_{cu} = daya yang diinputkan ke rotor (Watt)

P_{tr} = rugi-rugi tembaga rotor (Watt)

P_{mek} = daya mekanik dalam bentuk putaran (Watt)

Efisiensi dari motor induksi dapat diperoleh dengan melakukan pengujian beban nol dan pengujian hubung singkat. Dari pengujian beban nol akan diperoleh rugi-rugi mekanik dan rugi-rugi inti. Rugi-rugi tembaga stator tidak dapat diabaikan sekalipun motor berbeban ringan maupun tanpa beban.

2.9 Parameter Motor Induksi Tiga Fasa⁸

Parameter rangkaian ekuivalen dapat dicari dengan melakukan pengukuran pada percobaan tahanan DC, percobaan beban nol, dan percobaan rotor tertahan (block-rotor). Dengan menyelidikan pada setiap rangkaian ekuivalen, percobaan beban nol motor induksi dapat disimulasikan dengan memaksimalkan tahanan rotor $\frac{R^2}{s}$. Hal ini bisa terjadi pada keadaan normal jika slip dalam nilai yang minimum. Slip yang mendekati nol terjadi ketika tidak ada beban mekanis, dan mesin dikatakan dalam keadaan ringan.

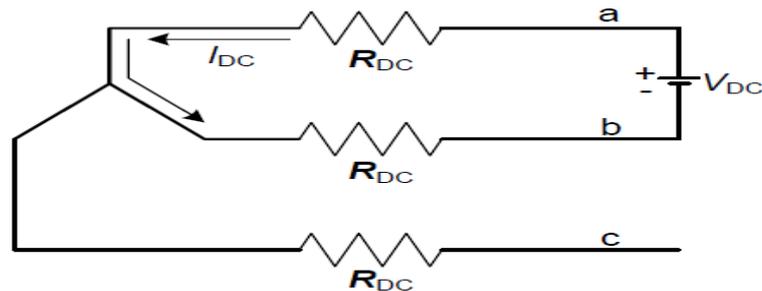
Pengukuran rotor tertahan dilakukan dengan menahan rotor tetap diam. Pada kondisi ini slip bernilai satu yang merupakan nilai slip tertinggi untuk kondisi

motor, jadi nilai $\frac{R^2}{s}$ bernilai minimum. Untuk menentukan bentuk rangkaian ekuivalen, pola fluksi dianggap sinusoidal, demikian juga rugi-rugi yang diukur proporsional terhadap fluksi utama, dan kejenuhan diabaikan.

2.9.1 Percobaan DC

Untuk memperoleh harga R_1 dilakukan dengan pengukuran DC yaitu dengan menghubungkan sumber tegangan DC (V_{DC}) pada dua terminal input dan arus DC-nya (I_{DC}) lalu diukur. Disini tidak mengalir arus rotor karena tidak ada tegangan yang terinduksi.

Gambar rangkaian ketika kumparan motor induksi tiga fasa terhubung Y, dan diberi suplai DC dapat dilihat pada Gambar 2.12 dibawah ini.



Gambar 2.12 Rangkaian fasa stator saat pengukuran dc hubungan bintang.

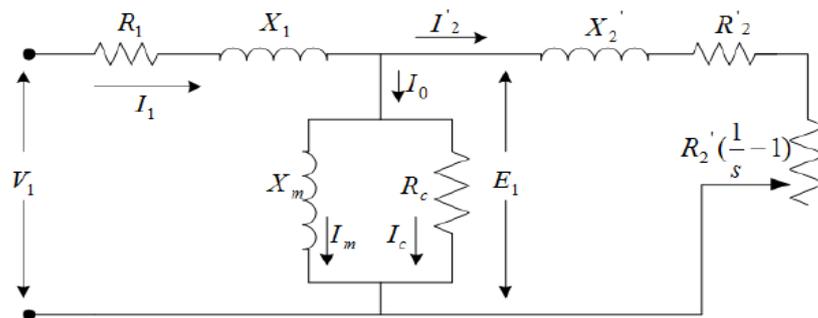
Harga R_{IDC} dapat dihitung, untuk kumparan dengan hubungan Y, adalah sebagai berikut :

$$R_{IDC} = \frac{1}{2} \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.32)$$

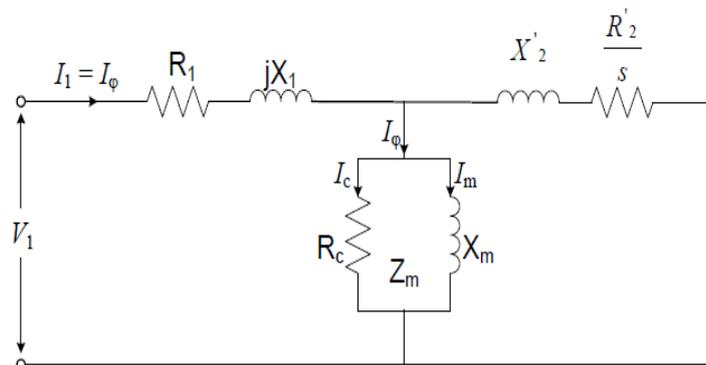
2.9.2 Percobaan Beban Nol

Motor induksi dalam keadaan beban nol dibuat dalam keadaan berputar tanpa memikul beban pada rating tegangan dan frekuensinya. Besar tegangan yang digunakan kebelitan stator perphasanya adalah V_1 (tegangan nominal), arus masukan sebesar I_0 dan dayanya P_0 . Nilai ini semua didapat dengan melihat alat ukur pada saat percobaan beban nol.

Dalam percobaan beban nol, kecepatan motor induksi mendekati kecepatan sinkronnya. Dimana besar $s \rightarrow 0$, sehingga $\frac{R_2'}{s} \rightarrow \infty$ sehingga besar impedansi total bernilai tak terhingga yang menyebabkan arus I_2' pada Gambar 2.15 bernilai nol sehingga rangkaian ekuivalen motor induksi pada pengukuran beban nol ditunjukkan pada Gambar 2.13, namun karena pada umumnya nilai kecepatan motor pada pengukuran ini n_{r0} yang diperoleh tidak sama dengan n_s , maka slip tidak sama dengan nol sehingga ada arus I_2' yang sangat kecil mengalir pada rangkaian rotor, arus I_2' tidak diabaikan tetapi digunakan untuk menghitung rugi-rugi gesek + angin dan rugi-rugi pada percobaan beban nol. Pada pengukuran ini didapat data-data antara lain : arus input ($I_1 = I_0$), tegangan input ($V_1 = V_0$), daya input perphasa (P_0) dan kecepatan poros motor (n_{r0}). Frekuensi yang digunakan untuk eksitasi adalah frekuensi sumber f .



Gambar 2.13 Rangkaian pada saat beban nol



Gambar 2.14 Rangkaian ekuivalen pada saat beban nol

Dengan tidak adanya beban mekanis yang terhubung ke rotor dan tegangan normal diberikan ke terminal, dari gambar 2.14 didapat besar sudut phasa antara arus antara I_0 dan V_0 adalah :

$$\theta_0 = \text{Cos}^{-1} \left(\frac{P_0}{V_0 I_0} \right) \dots\dots\dots (2.34)$$

Dimana : $P_0 = P_{nl}$ = daya saat beban nol perphasa

$V_0 = V_1$ = tegangan masukan saat beban nol

$I_0 = I_{nl}$ = arus beban nol

Dengan P_0 adalah daya input perphasa. Sehingga besar E_1 dapat dinyatakan dengan

$$E_1 = V_{1l} \angle 0^\circ - (I \varphi \angle \theta_0) (R_1 + jX_1) \text{ (Volt)} \dots\dots\dots (2.35)$$

n_{ro} adalah kecepatan rotor pada saat beban nol. Daya yang didissopasikan oleh R_c dinyatakan dengan :

$$P_c = P_0 - I_0^2 R_1 \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.36)$$

R_1 didapat pada saat percobaan dengan tegangan DC.

Harga R_c dapat ditentukan dengan

$$R_c = \frac{E_1^2}{P_0} \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.37)$$

Dalam keadaan yang sebenarnya R_1 lebih kecil jika dibandingkan dengan X_m dan juga R_c jauh lebih besar dari X_m , sehingga impedansi yang didapat dari percobaan beban nol dianggap jX_1 dan $jX_m =$ yang diserikan.

$$|Z_{nl}| = \frac{V_1}{I_{nl} \sqrt{3}} = j(X_1 + X_m) \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.38)$$

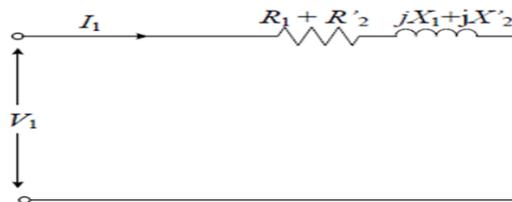
Sehingga didapat

$$X_m = \frac{V_1}{I_{nl} \sqrt{3}} - X_1 \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.39)$$

2.9.3 Percobaan Rotor Tertahan

Pada pengukuran ini rotor dipaksa tidak berputar ($n_r = 0$, sehingga $s = 1$) dan kumparan stator dihubungkan dengan tegangan seimbang. Karena slip $s = 1$, maka pada Gambar 2.15, harga $\frac{R'_2}{s} = R'_2$. Karena $|R'_2 + jX'_2| \ll |R_c|/|jX_m|$ maka arus yang melewati $|R_c|/|jX_m|$ dapat diabaikan.

Sehingga rangkaian ekivalen motor induksi dalam keadaan rotor tertahan atau hubung singkat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.15 Rangkaian ekivalen pada saat rotor tertahan (S=1)

Impedansi perphasa pada saat rotor tertahan (Z_{BR}) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Z_{BR} = R_1 + R'_2 + j(X_1 + X'_2) = R_{BR} + jX_{BR} \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.40)$$

Pengukuran ini dilakukan pada arus mendekati arus rating motor. Data hasil pengukuran ini meliputi : arus input ($I_1 = I_{BR}$), tegangan input ($V_1 = V_{BR}$) dan daya input perphasa ($P_{BR} = P_{in}$). Karena adanya distribusi arus yang tidak merata pada batang rotor akibat efek kulit, harga R'_2 menjadi tergantung frekuensi. Maka umumnya dalam praktek, pengaturan rotor tertahan dilakukan dengan mengurangi frekuensi eksitasi menjadi f_{BR} untuk mendapatkan harga R'_2 yang sesuai dengan frekuensi rotor pada saat slip rating. Dari data-data tersebut, harga R_{BR} dan X_{BR} dapat dihitung :

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{I_1^2} \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.41)$$

$$R_{BR} = R_1 + R'_2 \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.42)$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{I_{BR}} \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.43)$$

$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.44)$$

Untuk menentukan harga X_1 dan X_2 digunakan metode empiris berdasarkan IEEE standar 112, hubungan X_1 dan X_2 terhadap X_{BR} dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Distribusi empiris dari X_{BR} ⁵

Disain Kelas Motor	X_1	X'_2
A	$0,5 X_{BR}$	$0,5 X_{BR}$
B	$0,4 X_{BR}$	$0,6 X_{BR}$
C	$0,3 X_{BR}$	$0,7 X_{BR}$
D	$0,5 X_{BR}$	$0,5 X_{BR}$
Rotor Belitan	$0,5 X_{BR}$	$0,5 X_{BR}$

Di sini besar X_{BR} harus disesuaikan dahulu dengan frekuensi rating f .

$$X'_{BR} = \frac{f}{f_{BR}} X_{BR} \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.45)$$

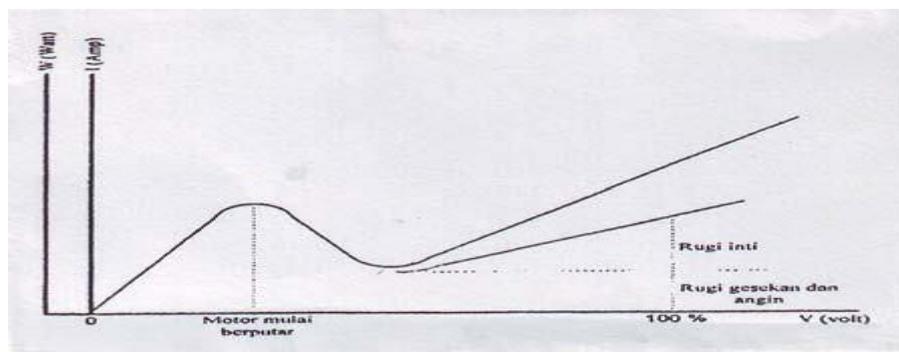
$$X'_{BR} = X_1 - X'_2 \text{ (Ohm)} \dots\dots\dots (2.46)$$

2.10 Karakteristik Motor Induksi¹¹

Secara umum motor induksi yang baik mempunyai standar bentuk karakteristik tertentu. yang menggambarkan hubungan antara suatu parameter dan mesin yang lain, yaitu :

a. Karakteristik Beban Nol

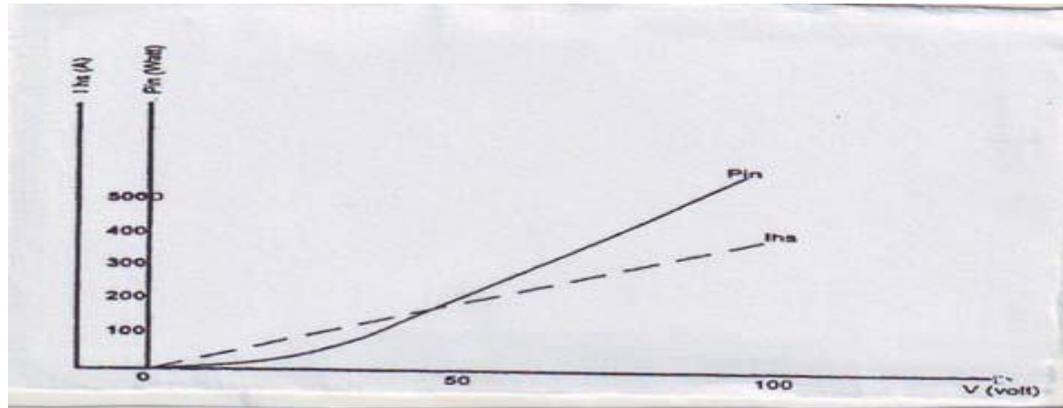
Karakteristik beban nol adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan ke motor dengan arus daya $\cos \phi$ motor pada keadaan tanpa beban, jadi putaran mendekati sinkron atau sama.



Gambar 2.16 Karakteristik Beban Nol

b. Karakteristik Rotor yang diblok

Karakteristik motor yang diblok adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan masuk dan arus yang masuk, $\cos \phi$, daya masuk. Seperti yang ditampilkan pada gambar dibawah ini :

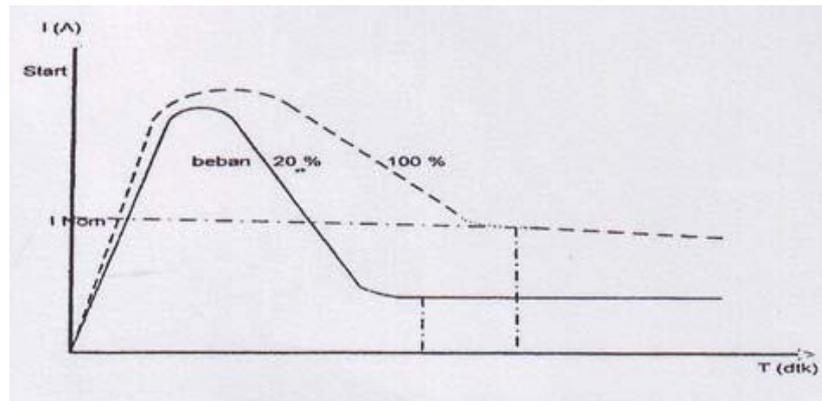


Gambar 2.17 Karakteristik Rotor yang Diblok

c. Karakteristik Start

Karakteristik start ini dipakai untuk menggambarkan hubungan antara waktu dan arus. Putaran untuk macam – macam beban pada tegangan masuk konstan. Dari gambar dibawah berikut (Gambar 2.18) dapat dijelaskan bahwa :

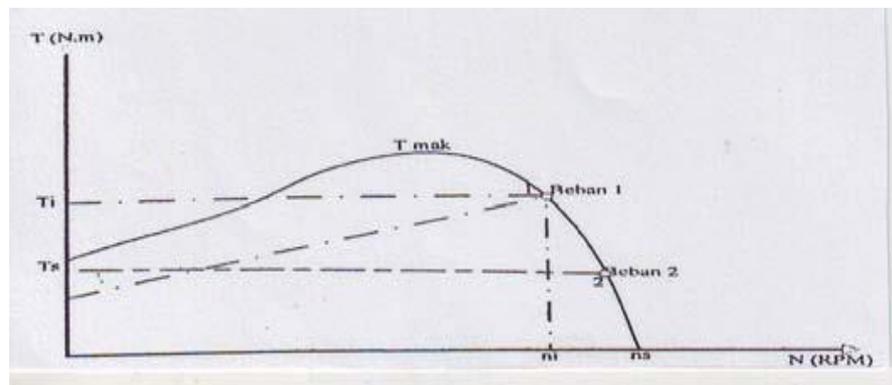
1. Jika waktu start dari motor induksi makin lama, maka pemanas pada belitan akan lebih besar pula pada elemen pengaman. Hal ini akan berpengaruh terhadap lifetime dari motor.
2. Arus akhir ke motor lebih tinggi.
3. Putaran akhir motor akan lebih rendah.



Gambar 18 Karakteristik Start

4. Karakteristik Kopel dan Putaran

Daerah kerja motor terletak pada daerah perputaran mendekati n_s . Kopel lawan beban 1 dan 2 pada waktu start $< T_s$ maka motor dapat distart, masing-masing dengan titik kerja 1 (kopel kerja = T_1 dan putaran kerja n_1) dan titik kerja 2. Bila kopel lawan beban pada saat start $> T_s$ maka motor tidak dapat distart. Selama motor belum berputar, arus motor tinggi. Seperti yang terlihat pada gambar 2.19 berikut ini :



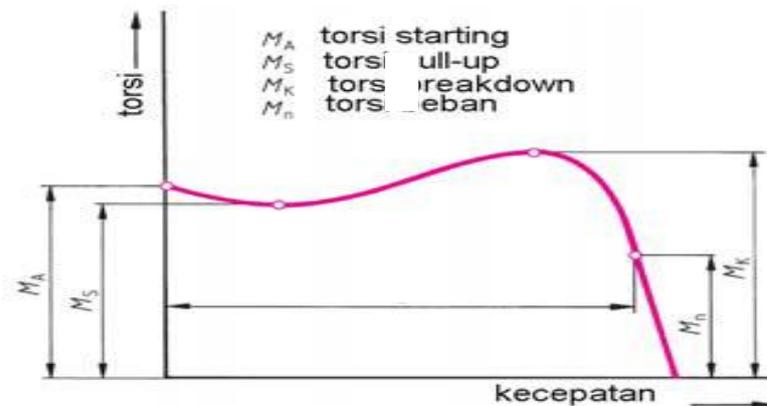
Gambar 2.19 Karakteristik Kopel dan Putaran

2.11 Karakteristik Torsi Motor Induksi⁷

Karakteristik torsi motor induksi gambar 2.20, disebut torsi fungsi dari slip ($T=f(slip)$). Garis vertikal merupakan parameter torsi (0–100%) dan garis horizontal parameter slip (1,0–0,0).

Dikenal ada empat jenis torsi, yaitu :

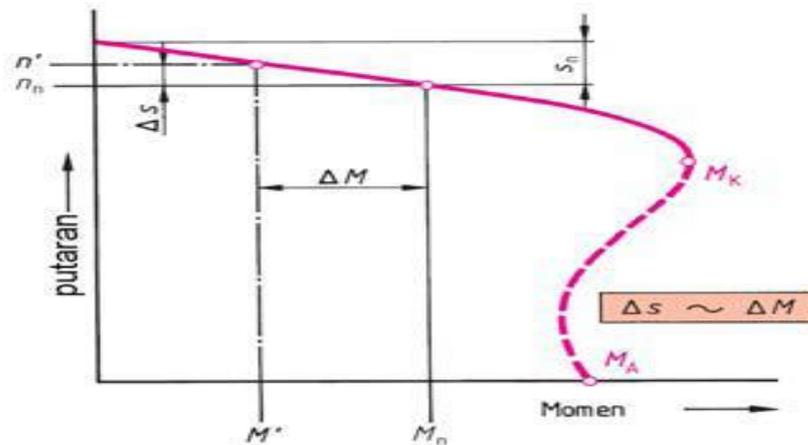
1. M_A , momen torsi awal,
2. M_S , momen torsi pull-up,
3. M_K , momen torsi maksimum
4. M_B , momen torsi kerja.



Gambar 2.20 Karakteristik Torsi motor induksi

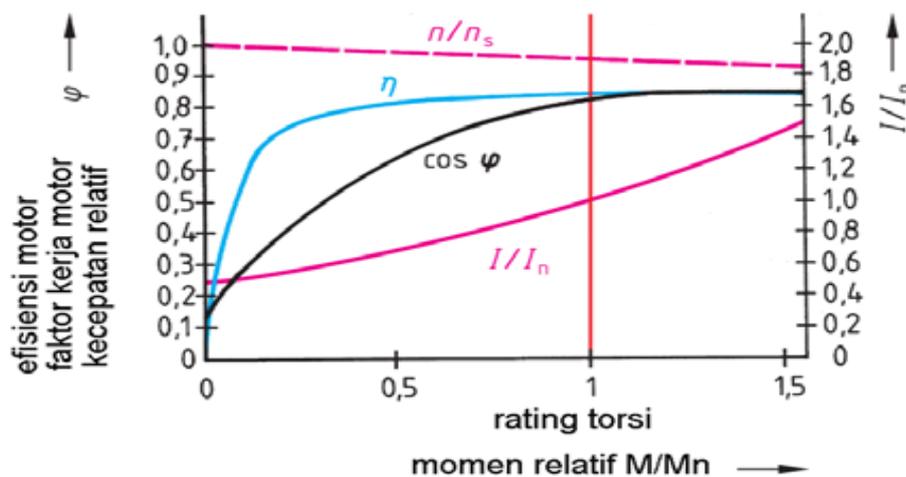
Torsi awal terjadi saat motor pertama dijalankan (slip 1,0), torsi pull-up terjadi saat slip 0,7, torsi maksimum terjadi slip 0,2 dan torsi kerja berada ketika slip 0,05. Torsi beban harus lebih kecil dari torsi motor. Bila torsi beban lebih besar dari torsi motor, akibatnya motor dalam kondisi kelebihan beban dan berakibat belitan stator terbakar. Untuk mengatasi kondisi beban lebih dalam rangkaian kontrol dilengkapi dengan pengaman beban lebih disebut thermal overload, yang dipasang dengan kontaktor.

Karakteristik torsi juga bisa disajikan dalam bentuk lain, kita kenal karakteristik putaran = fungsi torsi, $n = f(\text{torsi})$ lihat gambar 2.21



Gambar 2.21 Karakteristik putaran fungsi torsi beban

Garis vertikal menunjukkan parameter putaran, garis horizontal menunjukkan parameter torsi. Ketika motor berputar pada garis n' didapatkan torsi di titik M' . Ketika putaran berada di nn didapatkan torsi motor di Mn . Daerah kerja putaran motor induksi berada pada area n' dan nn sehingga torsi kerja motor induksi juga berada pada area M' dan Mn . Berdasarkan grafik $n =$ fungsi (torsi) dapat juga disimpulkan ketika putaran rotor turun dari n' ke nn pada torsi justru terjadi peningkatan dari M' ke Mn .



Gambar 2.22 Karakteristik parameter efisiensi, putaran, faktor kerja dan arus beban



Karakteristik motor induksi lainnya lihat gambar 2.22 mencakup parameter efisiensi, faktor kerja, ratio arus dan ratio putaran. Dengan membaca karakteristik motor induksi dapat diketahui setiap parameter yang dibutuhkan. Saat torsi mencapai 100% dapat dibaca ratio arus $I/I_0 = 1$; faktor kerja $\cos \varphi : 0,8$, efisiensi motor $0,85$ dan ratio putaran $n/n_s : 0,92$.

2.12 Pemrograman MATLAB⁴

MATLAB adalah kependekan dari matrix laboratory, dimana MATLAB merupakan perangkat lunak untuk komputasi teknis dan saintifik. MATLAB merupakan integrasi komputasi, visualisasi, dan pemrograman yang mudah digunakan.

MATLAB merupakan suatu sistem interaktif yang memiliki elemen data dalam suatu array sehingga tidak lagi kita dipusingkan dengan masalah dimensi. Hal ini memungkinkan kita untuk memecahkan banyak masalah teknis yang terkait dengan komputasi, khususnya yang berhubungan dengan matrix dan formula vektor, yang mana masalah tersebut merupakan sebuah ketakutan apabila kita harus menyelesaikannya dengan menggunakan bahasa level rendah seperti Pascal, C dan Basic. Sehingga MATLAB dapat bertindak sebagai :

➤ Kalkulator

Ketika bertindak sebagai kalkulator, MATLAB memberikan hasil seketika setelah perintah operasi diberikan.

➤ Bahasa Pemrograman

Perintah-perintah operasi dengan urutan dan logika tertentu, serta digunakan berulang-ulang dapat dibuat sebagai suatu program yang akan

dijelaskan pada unit selanjutnya.

Sebagai kalkulator, MATLAB mempunyai berbagai fungsi umum yang penting untuk matematika, teknik, dan ilmu pengetahuan. Sebagai tambahan atas fungsi-fungsi tersebut, MATLAB juga menyediakan

raturan fungsi yang berguna untuk menyelesaikan permasalahan tertentu. Beberapa fungsi matematis yang tersedia antara lain fungsi trigonometri, fungsi eksponensial dan fungsi pembulatan.

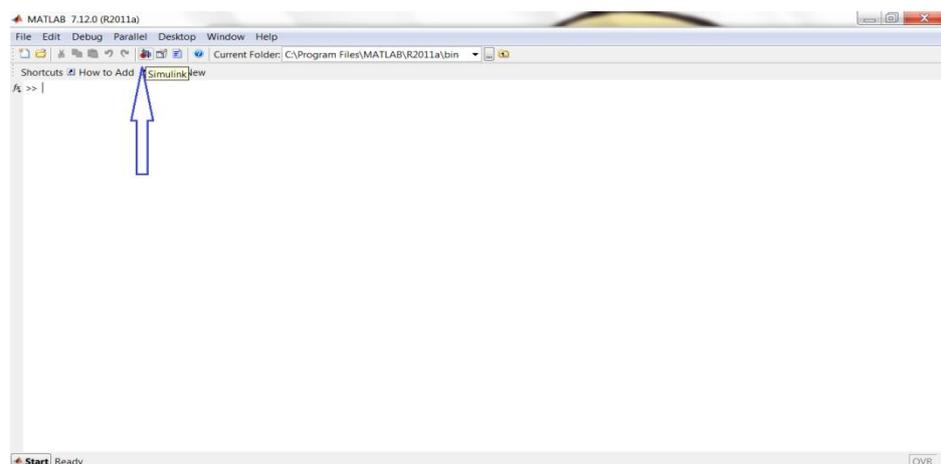
Data dan variabel yang dibuat dalam command windows tersimpan dalam workspace MATLAB. Suatu runtun data yang banyak, sulit untuk diperiksa hanya dengan mengamati angka-angka yang ditampilkan. Penampilan data dalam bentuk grafik dapat memudahkan analisis.

Simulink MATLAB

Simulink adalah sebuah kumpulan aplikasi dalam MATLAB untuk melakukan modeling, simulasi, dan untuk melakukan analisis dinamik pada suatu sistem. Dengan simulink kita dimudahkan untuk membuat sebuah simulasi secara lebih interaktif. Sehingga dengan simulink ini kita dapat lebih mudah atau dengan kata lain memperoleh sense atau taste dari suatu modelling atau simulasi.

a. Cara membuat suatu Simulink

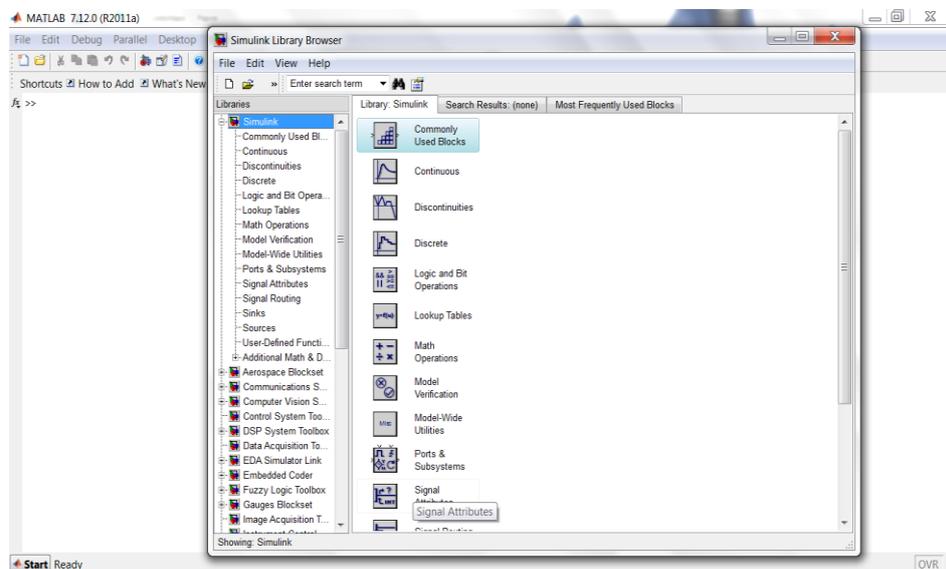
Pertama-tama jalankan MATLAB anda, sehingga tampil seperti tampilan dibawah ini.



Gambar 2.23 tampilan matlab

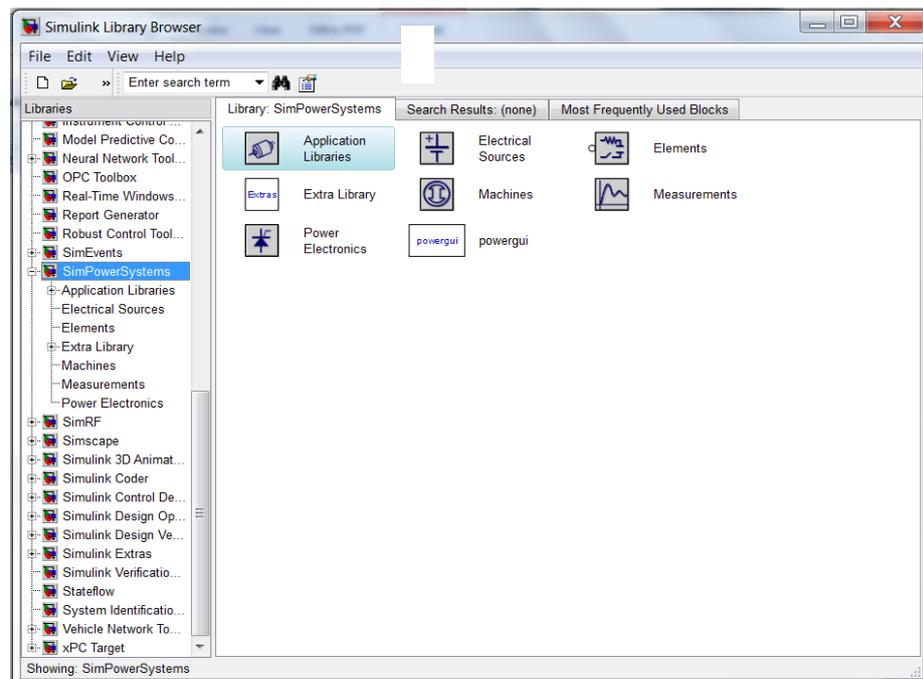
Kemudian klik ikon seperti yang ditunjukkan tanda panah pada gambar, sehingga akan ditampilkan simulink Simulink Library

Browser seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.24 simulink library browser

Setelah muncul jendela simulink tersebut, selanjutnya pilih SimPowerSystems pada jendela simulink tersebut. SimPowerSystems adalah salah satu blok blok simulasi khusus untuk sistem tenaga listrik yang terdapat dalam toolbox aplikasi simulink.



Gambar 2.25 simpowersystem