

j. Rugi inti

$$P_c = I_o^2 \times R_o \text{ perfase dalam watt} \dots \dots \dots (2.34)$$

k. Daya masuk rotor atau daya yang ditarik rotor

$$P_2 = (I_2')^2 R_2' / S \text{ perfase dalam watt} \dots \dots \dots (2.35)$$

l. Rugi tembaga rotor

$$P_{cur} = (I_2')^2 \times R_2' \text{ perfase dalam watt} \dots \dots \dots (2.36)$$

m. Daya mekanik atau daya output yang masih kotor

$$P_m = (I_2')^2 \times R_2' \times ((1-S)/S) \text{ perfase dalam watt} \dots \dots \dots (2.37)$$

n. Daya output atau daya keluaran bersih atau daya rem (BHP = Brake horse power).

$$P_o = P_m - (\text{rugi-rugi angin dan geser}) \text{ perfase dalam watt} \dots \dots (2.38)$$

o. Efisiensi atau rendemen atau daya guna

$$\eta = (P_o / P_i) \times 100 \% \dots \dots \dots (2.39)$$

p. Untuk besaran dalam sistem tiga fase :

$P_1, P_2, P_{cus}, P_c, P_{cur}, P_m$  dan  $P_o$  dikalikan tiga .

Sedangkan :  $I_1, I_2$  dan  $I_o$  tetap.

q. Torsi pada saat rotor belum berputar / diam.

$$T_d = k_1 \times E_2 \times I_2 \times \cos \phi_2 \text{ ( N - m )} \dots \dots \dots (2.40)$$

r. Torsi maksimum:

$$T_{maks} = \frac{P_{mekanik}}{2\pi \times (Nr / 60)} \dots \dots \dots (2.41)$$

Keterangan:

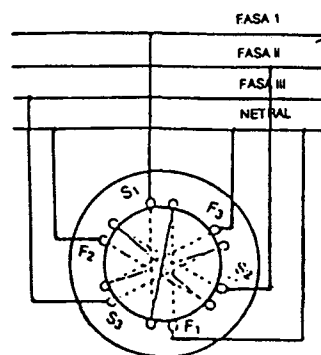
$E_2$  = EMF(ggl) atau tegangan induksi di rotor, waktu belum berputar perfase dalam volt.

$I_2$	= Arus rotor perfase dalam amper
$\cos \phi$	= Faktor kerja motor.
$R_2$	= Resistan rotor perfase dalam ohm.
$X_2$	= Reaktans rotor perfase dalam ohm
$S$	= Slip
$I_2'$	= Arus rotor yang ditinjau dari stator
$P_m$	= Daya mekanik
$a = R_2/X_2$	= (Resistans rotor/ reaktans rotor perfase waktu belumberputar)

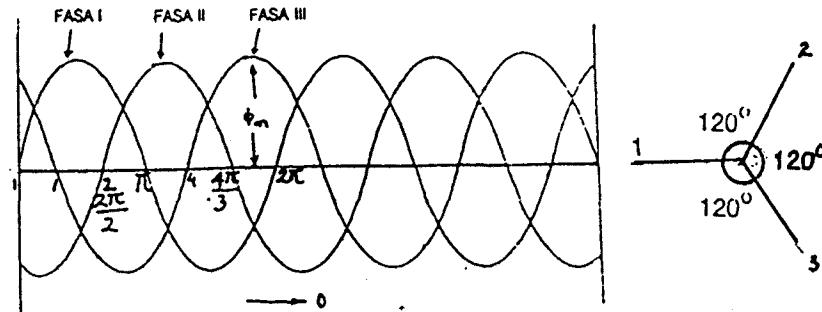
### 2.2.5 Medan putar tiga fase

Medan putar di timbulkan oleh kutub magnet yang diputar atau dapat juga ditimbulkan oleh tiga kumparan yang posisinya saling berbeda  $120^\circ$  dalam ruang dan dialiri arus dan tegangan bolak balik 3 fase dimana arus masing-masing fase berbeda  $120^\circ$ .

Prinsip dari kumparan tiga fase dua kutub dapat dilihat pada gambar fluks (sinusoida ) yang ditimbulkan dapat dilihat pada gambar 2.4, dan bentuk pulsa dari sumber tegangan bolak-balik 3 fase dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.4 Rangkaian sistem tiga fase



Gambar 2.5 Fluksi sistem tiga fase

## 2.3 Konstruksi Motor Induksi

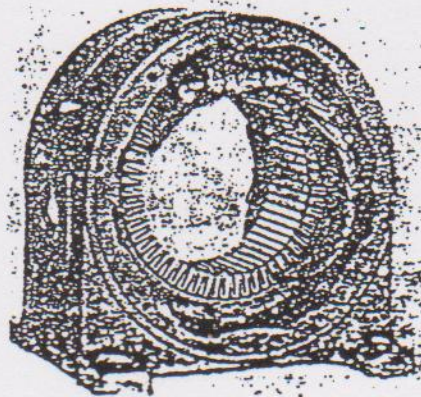
Konstruksi motor induksi terdiri dari tiga bagian utama yaitu:

### 2.3.1 Stator

Adapun bagian dari stator terdiri dari:

- Rumah / bodi stator yang terbuat dari logam besi.
- Inti stator terbuat dari besi lunak atau dari bahan baja silikon.
- Alur dan gigi, materialnya sama dengan inti stator. Alur merupakan tempat dimana diletakkannya belitan.
- Belitan stator terbuat dari bahan tembaga.

Belitan atau kumparan stator di rancang untuk motor induksi sistem tiga fase tetapi dapat juga dirancang untuk motor induksi sistem satu fase dan dapat juga dirancang untuk jumlah kutub tertentu.



Gambar 2.6 Stator motor induksi

### 2.3.2 Rotor

Adapun bagian dari rotor terdiri atas:

- a. Inti rotor bahan sama dengan inti stator terbuat dari bahan baja silikon.
- b. Alur dan gigi materialnya sama dengan inti, dimana alur merupakan bagian tempat meletakkan belitan.
- c. Belitan rotor bahannya terbuat dari tembaga. Ditinjau dari konstruksi lilitan maka ada dua macam jenis rotor yakni:
  1. Motor induksi dengan rotor sangkar atau rotor kurung.

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa hingga menyerupai sangkar tupai. Konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor mesin listrik lainnya. Dengan demikian harganya murah. Karena konstruksinya yang demikian, padanya tidak mungkin diberikan pengaturan tahanan luar seperti pada motor induksi dengan rotor belitan. Untuk membatasi arus mula yang besar, tegangan sumber harus dikurangi dan biasanya



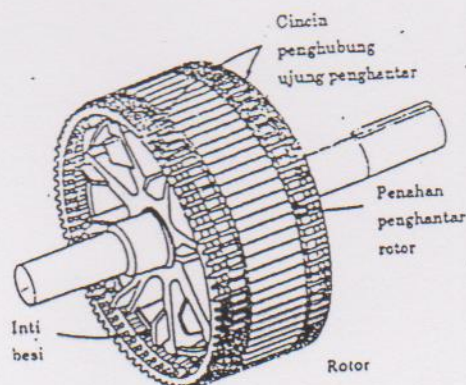
digunakan autotransformator atau saklar Y -  $\Delta$ . Tetapi berkurangnya arus akan berakibat berkurangnya kopel mula. Rotor jenis sangkar ganda dapat digunakan untuk mengatasi berkurangnya kopel mula tersebut.

## 2. Motor induksi dengan rotor belitan

Motor induksi ini mempunyai rotor dengan belitan tiga fase sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama. Pada gambar 2.8 motor induksi dengan rotor belitan memungkinkan penambahan tahanan luar. Tahanan luar yang dapat diatur ini dihubungkan ke rotor melalui cincin. Selain untuk menghasilkan kopel mula yang besar, tahanan luar tadi diperlukan untuk membatasi arus mula yang besar pada saat start, dan manfaat lainnya dengan mengubah-ubah tahanan luar, kecepatan motor dapat diatur.

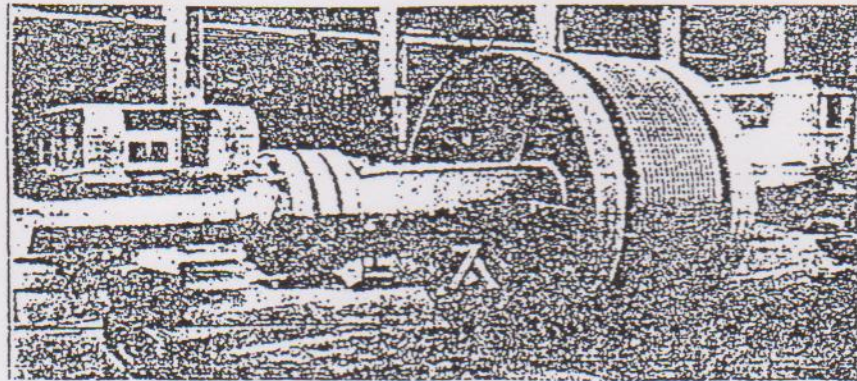
### d. Poros atau as rotor

Bentuk konstruksi dari dua jenis rotor yang telah disebutkan diatas:

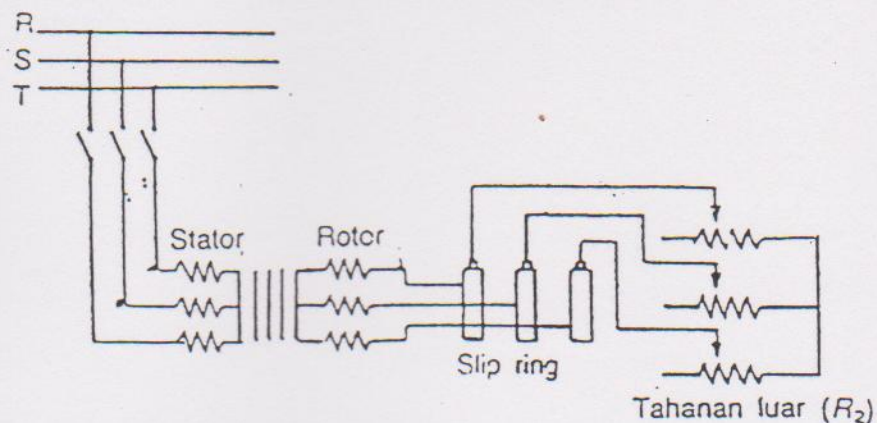


a. Rotor sangkar dari motor induksi





b. Rotor belitan dari motor induksi  
Gambar 2.7 Konstruksi rotor motor induksi



Gambar 2.8 Penambahan tahanan luar

### 2.3.3 Celah udara

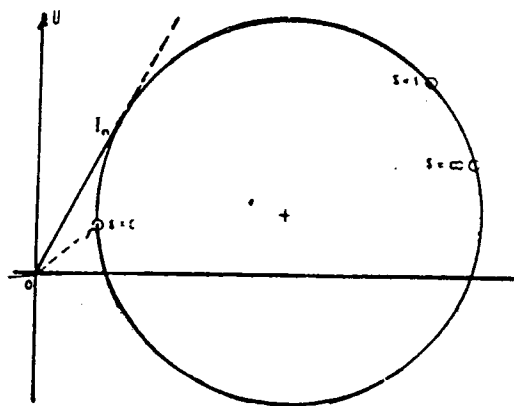
Merupakan bagian ruangan / celah yang ada antara stator dan rotor. Stator dan rotor membentuk rangkaian magnetis berbentuk silindris yang simetris dan diantaranya celah udara. Celah udara antara stator dan rotor, jika terlalu luas maka efisiensi mesin rendah, dan sebaliknya jika terlalu sempit akan menimbulkan kesulitan mekanis pada mesin.

## 2.4 Karakteristik Motor Induksi

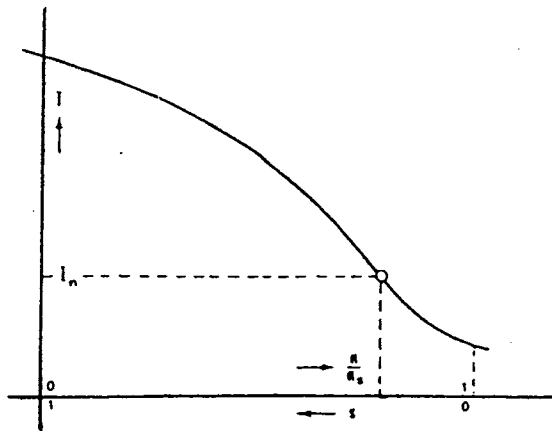
Motor induksi mempunyai beberapa karakteristik yaitu:

### a. Lengkung Arus Putaran; $I_1 = I_1(n)$ atau $I_1 = I_1(s)$

Lengkung arus putaran adalah arus primer sebagai fungsi dari pada putaran atau dari pada slip. Dari diagram Heyland secara grafis akan diperoleh lengkung arus putaran dengan cara arus diukur untuk tiap nilai dari putaran atau slip. Untuk mendapatkan komponen watt terbesar dari arus, maka diusahakan mendisain motor sedemikian rupa, hingga arus nominal, atau arus kerja merupakan garis singgung dari lingkaran diagram Heyland, sebagaimana terlihat pada gambar 2.9a. Gambar 2.9b memperlihatkan arus primer sebagai fungsi dari pada putaran dan slip yang dimaksud.



Gambar. 2.9a Diagram Heyland



Gambar 2.9b Arus primer sebagai fungsi dari putaran dan slip

Keterangan:

$S = 0$  ( keadaan sinkron )

$S = \infty$  ( kecepatan putaran tak terhingga )

$S = 1$  ( kadaan berhenti )

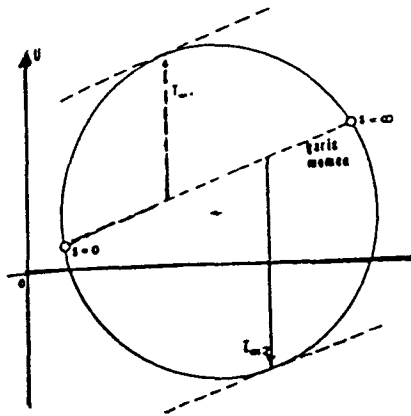
**b. Lengkung Kopel Putaran;  $T = T(n)$  atau  $T = T(s)$**

Lengkung kopel adalah kopel atau momen, sebagai fungsi dari pada putaran atau slip. Sebagaimana juga untuk lengkung arus putaran, titik tolak adalah juga diagram Heyland.

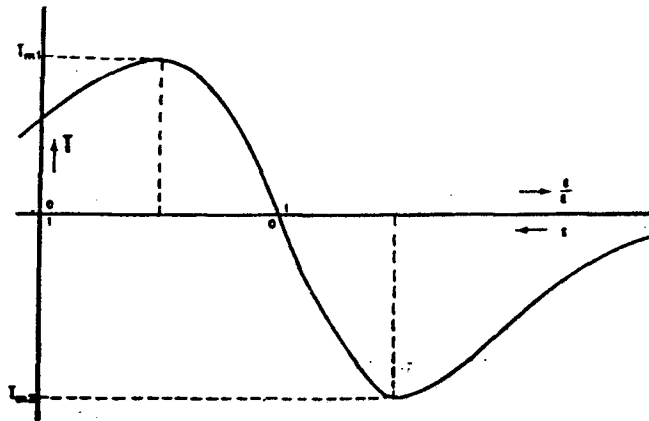
Jarak atau panjang garis tepi lingkaran dan garis momen, merupakan suatu ukuran ukuran bagi besarnya kopel. Karena garis momen tidak melalui titik tengah, maka nilai kopel positif tidak sama dengan negatif. Kiranya jelas bahwa bagian lingkaran sebelah atas garis kopel mempunyai tanda positif, dan bagian lingkaran sebelah bawah garis kopel, mempunyai tanda negatif. Gambar 2.10a memperlihatkan diagram Heyland dengan garis momen. Seperti juga halnya pada lengkung-lengkung sebelumnya, untuk tiap nilai dari  $s$ , diukur tinggi  $T$  pada tepi lingkaran. Data-data  $T = T(n)$  atau  $T = T(s)$  ini disusun sebagai grafik dengan ordinat biasa, sehingga diperoleh lengkung sebagaimana terlihat pada gambar



2.10b. Kopel maksimum  $T_{m1}$  dan kopel minimum  $T_{m2}$  diperoleh pada garis-garis singgung lingkaran yang ditarik sejajar dengan garis momen. Tampak bahwa  $T_{m1}$  dan  $T_{m2}$  tidaklah sama besarnya.



Gambar 2.10a Diagram Heyland



Gambar 2.10b. Grafik torsi

## BAB II

### MOTOR INDUKSI

#### 2.1 Umum

Motor induksi merupakan jenis motor arus bolak-balik yang paling banyak digunakan dalam berbagai bidang industri. Penggunaan motor induksi didasarkan pada beberapa keuntungan yang dimiliki oleh motor induksi jika dibandingkan dengan jenis motor listrik lainnya.

Keuntungan-keuntungan dan kekurangan dari motor induksi antara lain sebagai berikut:

#### **Keuntungan:**

- a. Memiliki konstruksi yang sederhana dan tidak mudah rusak.
- b. Memiliki efisiensi yang cukup tinggi dan handal, tidak perlu menggunakan sikat sehingga kerugian akibat gesekan menjadi lebih berkurang.
- c. Pengasutan motor mudah.
- d. Pemeliharaan dan perbaikan mudah dilakukan.
- e. Tidak mengeluarkan biaya banyak dalam pemeliharaan dan perbaikan.
- f. Lebih ekonomis, karena harganya relatif terjangkau.
- g. Mudah didapat dipasaran umum serta ketersediaan suku cadang yang baik.

**Kekurangan:**

- a. Kecepatan putar motor induksi akan turun jika beban bertambah, sehingga bebanpun sangat berpengaruh pada kecepatan putar motor induksi.
- b. Efisiensi pada motor induksi berpengaruh pada kecepatan putar motor induksi.

**2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi**

Motor induksi, penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor induksi ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator.

Belitan stator yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga phase akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron ( $N_s = 120 \times f / p$ ). Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus dan sesuai dengan *Hukum Lenz* rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun.

Dikenal dua tipe motor induksi yaitu: motor induksi dengan rotor belitan dan motor induksi dengan rotor sangkar.

Prinsip kerja motor induksi dapat dijabarkan seperti dibawah ini:

- a. Apabila sumber tegangan tiga phase dipasang pada kumparan stator akan timbul medan putar stator dengan kecepatan;

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan:  $N_s$  = Kecepatan medan putar stator  
 $f$  = Frekuensi jala-jala  
 $p$  = jumlah kutub

- b. Medan putar stator tersebut akan memotong batang-batang konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus dan sesuai dengan hukum Lentz, rotor akan turut berputar mengikuti medan putar stator.

- c. Akibatnya pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (  $ggI$  ) sebesar:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot F_m \text{ (satu phase)} \dots\dots\dots(2.2)$$

$E_{2s}$  adalah tegangan induksi pada rotor berputar.

- d. Tegangan induksi pada kumparan rotor akan menghasilkan arus rotor ( $I_2$ ).
- e. Adanya arus ( $I$ ) di dalam medan magnet menimbulkan gaya ( $F$ ) pada rotor.
- f. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya ( $F$ ) pada rotor yang cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
- g. Seperti telah dijelaskan pada (point c) 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 (  $N_r$  ).



- h. Perbedaan kecepatan antara medan putar stator dan medan putar rotor disebut *slip* (S) dinyatakan dengan:

$$S = \left( \frac{N_s - N_r}{N_s} \right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

- i. 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 ditimbulkan apabila  $N_r$  lebih kecil dari  $N_s$ .
- j. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.

### 2.2.1 Slip

Slip suatu motor induksi adalah tergantung dari besar atau kecilnya beban motor, makin besar beban makin besar pula slip. Slip adalah perbedaan antara kecepatan medan putar stator dan kecepatan medan putar rotor, dapat ditulis:

$$Slip = N_s - N_r \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

Ada tiga macam slip yaitu: Slip mutlak, Slip pecahan dan Slip dalam persentase, atau dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut:

- a. Slip mutlak, dinyatakan oleh persamaan:

$$S = N_s - N_r \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

- b. Slip pecahan, dinyatakan oleh persamaan:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

- c. Slip dalam persentase ( % ), dinyatakan oleh persamaan:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

### 2.2.2 Frekuensi arus rotor

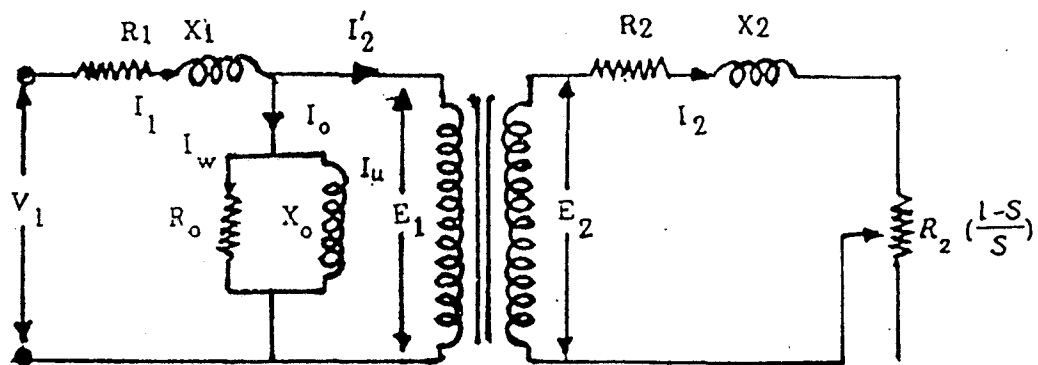
Apabila motor diam, frekuensi arus rotor adalah sama seperti frekuensi penyedia. Tetapi apabila rotor start atau jalan maka frekuensi tergantung atas kecepatan relatif atau kecepatan slip.

$$f = \frac{N_s - N_r}{N_s} = S \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

Maka:  $f = S \cdot f \quad \dots\dots\dots(2.9)$

### 2.2.3 Rangkaian Ekuivalen Sebenarnya

Rangkaian ini dapat diturunkan dari rangkaian listrik motor induksi berikut pada gambar 2.1:



Gambar 2.1. Rangkaian listrik motor induksi

**Rangkaian listrik motor induksi terdiri dari:**

#### a. Rangkaian kumparan stator

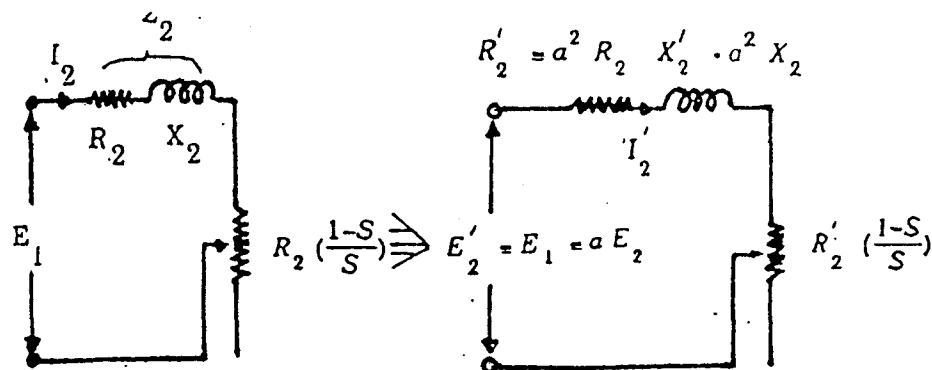
Rangkaian stator mempunyai besaran-besaran sebagai berikut:

- $R_1$  = Resistans atau hambatan kumparan stator dalam ohm ( $\Omega$ ) perfase.
- $X_1$  = Reaktans kumparan stator dalam ohm ( $\Omega$ ) perfase.
- $R_0$  = Resistans rangkaian penguat dalam ohm ( $\Omega$ ) perfase atau disebut konduktans yang besarnya sama dengan  $1/R_0$
- $X_0$  = Reaktans rangkaian penguat dalam, ohm( $\Omega$ )perfase atau disebut suseptans( $B_0$ ) =  $1/X_0$ .

- $I_1$  = Arus yang mengalir dalam kumparan stator dalam ampere perfase jika motor berbeban.  
 $I_o$  = Arus yang mengalir pada kumparan stator bila motor tidak berbeban dalam ampere perfase.  
 $V_1$  = Tegangan masuk atau tegangan yang diberikan ke kumparan stator dari jala-jala dalam besaran volt perfase.  
 $E_1$  = EMF atau ggl atau tegangan induksi pada kumparan stator dalam volt perfase

### b. Rangkaian kumparan rotor

Untuk mendapatkan rangkaian ekivalen maka rangkaian kumparan rotor harus disesuaikan besaran dari komponen-komponennya yakni dipindahkan pada sisi stator dengan memperhatikan perbandingan transformasi, berikut lihat gambar dibawah ini:



Gambar 2.2. Rangkaian rotor motor induksi yang dipindahkan ke sisi stator

Keterangan:

- $R_2$  = Resistan atau tahanan dari kumparan rotor dalam ohm perfase.  
 $X_2$  = Reaktans dari kumparan rotor dalam ohm perfase.  
 $R_2((1-S)/S)$  = simulasi beban dari motor induksi  
 $I_2$  = Arus yang mengalir pada kumparan rotor.  
 $E_2$  = EMF atau tegangan induksi yang dibangkitkan oleh kumparan rotor dalam volt.

Pada waktu rotor berputar maka EMF atau tegangan induksi pada kumparan rotor diberi simbol dengan  $E_{2s}$ , yang mengikuti persamaan:

$$E_{2s} = S \cdot E_2 \dots \dots \dots (2.10)$$

Dan pada reaktans disimbolkan dengan  $X_{2s}$ , mengikuti persamaan:

$$X_{2s} = S \cdot E_2 \dots\dots\dots(2.11)$$

Pada saat rotor berputar maka arus rotor

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{(R_2)^2 + (X_2)^2}} = \frac{S \times E_2}{\sqrt{(R_2)^2 + (S \times X_2)^2}}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/S)^2 + (X_2)^2}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dari rangkaian rotor tersebut dapat ditulis:

$$R_2/S = R_2 + R_2 \cdot ((1-S)/S) \dots\dots\dots(2.13)$$

Persamaan tersebut dikalikan dengan  $I_2^2$  menghasilkan:

$$I_2^2 R_2/S = (I_2^2 \cdot R_2) + (I_2^2 \cdot R_2) \dots\dots\dots (2.14)$$

Dengan:

1.  $I_2^2 \cdot (R_2/S)$  : Daya yang diterima rotor ( $P_2$ ) atau daya input rotor atau daya yang ditarik rotor.....(2.15)

2.  $I_2^2 \cdot R_2$  : Rugi-rugi tembaga rotor atau daya yang hilang berupa panas ( $P_{cur}$ ).....(2.16)

3.  $I_2^2 \cdot R_2 \cdot ((1-S)/S)$  : Daya output rotor berupa daya mekanik ( $P_m$ ).....(2.17)

$$\text{Maka : } * P_{cur} = S \times P_2 \dots\dots\dots(2.18)$$

$$* P_m = (1 - S) \times P_2 \dots\dots\dots(2.19)$$

Dari gambar tersebut maka hubungan komponennya sebelum dan sesudah dipindahkan ke stator akan mengikuti persamaan-persamaan:

$$E'_2 = a E_2 = E_1 \dots\dots\dots(2.20)$$

$$I'_2 = I_2 / a \dots\dots\dots(2.21)$$

$$R'_2/S = a^2 R_2^2/S \dots\dots\dots(2.22)$$

$$X'_2 = a^2 X_2 \dots\dots\dots(2.23)$$

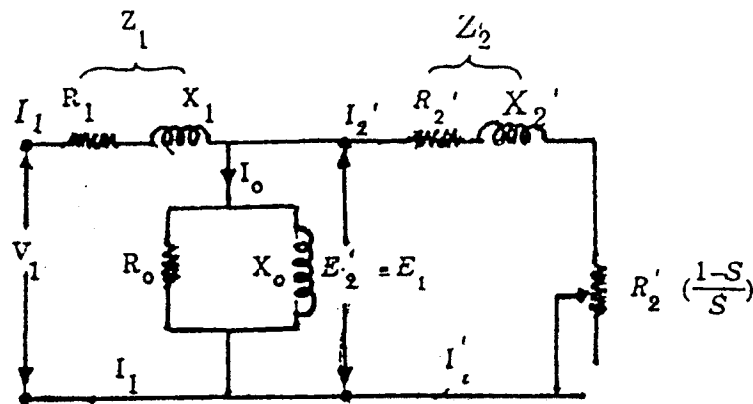
Keterangan persamaan diatas:



$$a = \frac{N_1}{N_2} \frac{Kw_1}{Kw_2} \dots\dots\dots(2.24)$$

- $N_1$  = banyaknya lilitan kumparan stator
- $N_2$  = banyaknya lilitan kumparan rotor
- $Kw_1$  = faktor belitan stator ( $Kp_1 - Kd_1$ )
- $Kw_2$  = faktor belitan rotor ( $Kp_2 - Kd_2$ )
- $Kp$  = faktor kisar belitan
- $Kd$  = faktor distribusi dari belitan

Setelah besaran dari komponen kumparan rotor diubah yakni dilihat ke stator maka rangkaian ekivalen yang sebenarnya dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.3. Rangkaian ekivalen yang sebenarnya dari motor induksi

**2.2.4 Persamaan rangkaian ekivalen yang sebenarnya**

a. Impedans rangkaian stator

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \angle \text{tg}^{-1} \frac{X_1}{R_1} \dots\dots\dots(2.25)$$

b. Impedans rangkaian penguat

$$Z_0 = \frac{1}{Y_0} = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + j \frac{1}{X_0}}$$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (1/X_0)^2}} \angle \text{tg}^{-1}(X_0/R_0) \dots\dots\dots(2.26)$$

- c. Impedans rotor yang telah dipindahkan ke stator

$$Z_2' = R_2' / S + jX_2'$$

$$Z_2 = \sqrt{\left(\frac{R_2'}{S}\right)^2 + (X_2')^2} \angle \text{tg}^{-1} \cdot \frac{X_2'}{(R_2'/S)} \dots\dots\dots(2.27)$$

- d. Impedans total dari rangkaian yang diberikan kesumber tegangan  $V_1$

$$Z_{total} = Z_1 + \frac{Z_0 - Z_2'}{Z_0 + Z_2'} = |Z_{total}| \angle \phi \dots\dots\dots(2.28)$$

- e. Daya input stator atau daya masuk stator atau daya yang ditarik stator

$$P_1 = V_1 \times I_1 \times \cos \phi \text{ perfase dalam watt} \dots\dots\dots(2.29)$$

- f. Faktor daya input

$$(p \times f)_{input} = \cos \phi \dots\dots\dots(2.30)$$

- g. Arus yang mengalir pada rotor

$$I_2 = I_1 \times \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2'} \dots\dots\dots(2.31)$$

- h. Arus beban nol

$$I_0 = I_1 \times \frac{Z_2'}{Z_0 + Z_2'} \dots\dots\dots(2.32)$$

- i. Rugi tembaga stator