

### **III. VEKTOR KONTROL PADA MOTOR INDUKSI**

#### **1. TINJAUAN UMUM**

Motor induksi adalah jenis motor penggerak yang paling banyak digunakan di industri. Hal ini karena motor induksi memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan motor listrik lainnya. Khususnya untuk motor jenis sangkar bajing (Squirrel Cage), yaitu : harga yang lebih murah dibandingkan jenis motor yang lainnya untuk daya yang sama, tidak memerlukan banyak perawatan, konstruksinya kuat dan ukurannya lebih kecil. Namun salah satu kelemahannya motor jenis ini memiliki putaran yang relatif kecil biasanya kurang dari 3000 rpm

#### **2. PRINSIP KERJA DAN KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI**

##### **2.1 Prinsip Kerja Motor Induksi**

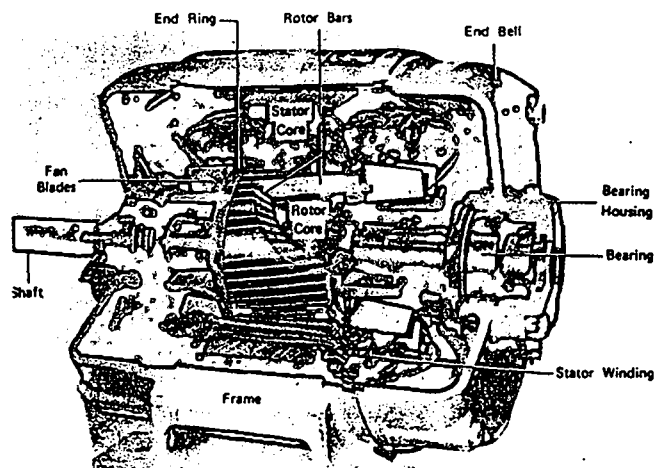
Saat kumparan 3 fasa diberi tegangan 3 fasa dengan frekuensi konstan, maka timbul fluks putar yang konstan. Fluks ini melalui celah udara memotong permukaan rotor dan batang rotor yang masih diam. Karena kecepatan relatif antara fluks putar dan batang konduktor ini, maka terinduksilah emf pada batang-batang tersebut.

Dengan bentuk rotor yang demikian ( masing-masing ujung batang dihubungkan magnet ), berarti rotor tersebut membentuk

suatu rangkaian tertutup , sehingga arus dapat mengalir pada batang konduktor tersebut.

Interaksi antar medan putar dan arus yang mengalir itu dapat menimbulkan gaya dan menyebabkan rotor berputar searah dengan dengan medan magnet putar, seolah-olah mengikuti medan putar. Pada kenyataan, rotor tidak dapat mengikuti kecepatan medan putar. Kalau rotor dapat mengikuti kecepatan medan putar , maka kecepatan relatif diantara keduanya sama dengan nol, akibatnya emf terinduksinya sama dengan nol, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada rotor.

Dengan demikian tidak ada torsi yang dihasilkan oleh karena itu, rotor selalu berputar pada kecepatan yang lebih kecil daripada medan putar statornya. Perbedaan kecepatan ini tergantung pada beban dan motor tersebut.



Gambar 3.1

### Konstruksi Motor induksi

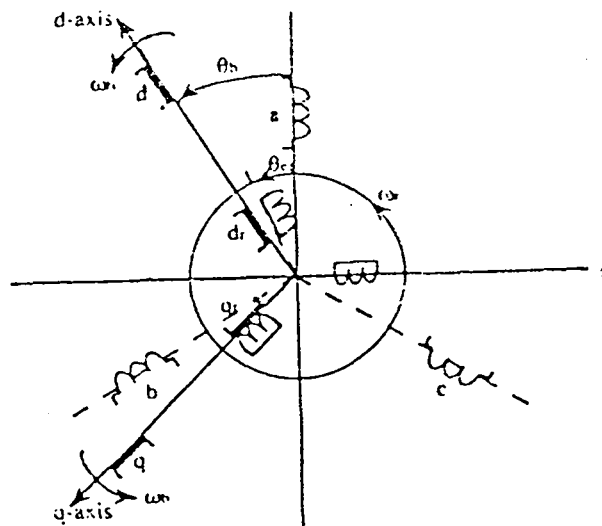
## 2.2 Karakteristik Motor Induksi

Adapun karakteristik dari motor induksi yang di gunakan untuk analisa performance vektor kontrol ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- Jumlah phasa : 3 phasa
- Jumlah Kutub : 2 pasang
- Jenis Rotor : squirrel cage
- Daya output : 1.5 HP ( 1.1 KW )
- Tegangan line : 220 V AC ( $\Delta$ ) ; 380 V AC (Y)
- Arus/phasa : 1.9 A (  $\Delta$  ) ; 1.1 A ( Y )
- N nominal : 1400 rpm
- Frekuensi : 50 Hz
- Kelas Isolasi : C

### 3. PENURUNAN RUMUS-RUMUS VEKTOR KONTROL

Konsep vektor kontrol pada prinsipnya adalah pentransformasian besaran arus dan tegangan tiga fasa menjadi menjadi besaran dalam sumbu ortogonal dengan kordinat *direct* dan *quadrature*.



Gambar 2.10

Transisi dari 3-fasa(abc) ke dq- model

Dengan menganggap bahwa tiga fasa di wakili oleh tiga sumbu (sumbu a, b, c), maka dalam keadaan stationer serta terhubung dengan sumber 3 fasa, dapat di rumuskan sebagai berikut:

Tegangan dalam rangkaian :

$$V_{as} = V_s \cos \omega_e t \quad (3.1)$$

$$V_{bs} = V_s \cos (\omega_e t - 2\pi/3) \quad (3.2)$$

$$V_{cs} = V_s \cos (\omega_e t + 2\pi/3) \quad (3.3)$$

Arus dalam rangkaian :

$$I_{as} = I_s \cos (\omega_e t - \psi) \quad (3.4)$$

$$I_{bs} = I_s \cos (\omega_e t - 2\pi/3 - \psi) \quad (3.5)$$

$$I_{cs} = I_s \cos (\omega_e t + 2\pi/3 - \psi) \quad (3.6)$$

$$I_s = V_s / Z_s \quad (3.7)$$

$$Z_s = \sqrt{r_s^2 + (\omega_e L_s)^2} \quad (3.8)$$

$$\psi = \tan^{-1}(\omega_e L_s / r_s) \quad (3.9)$$

Sehingga:

$$\bar{V}_{abcs} = V_{as} \bar{u}_{as} + V_{bs} \bar{u}_{bs} + V_{cs} \bar{u}_{cs} \quad (3.10)$$

Keadaan diatas menunjukkan bahwa rangkaian ini dalam posisi stasioner ('s).

Model di atas dapat di ubah ke bentuk direct dan quadrature (dq model) dengan menggunakan dimana bentuk ini sangat ideal untuk meneliti perubahan pada kerja motor yang berbeban . Adapun bentuk persamaan

$$\bar{V}_{abcs} = V_{qs} \bar{u}_q + V_{ds} \bar{u}_d + V_{ns} \bar{u}_{cs} \quad (3.11)$$

Dimana

$$V_{qs} = \sqrt{2/3} [V_{as} \cos \theta_e + V_{bs} \cos(\theta_e - 2\pi/3) + V_{cs} \cos(\theta_e + 2\pi/3)] \quad (3.12)$$

$$V_{ds} = \sqrt{2/3} [V_{as} \sin \theta_e + V_{bs} \sin(\theta_e - 2\pi/3) + V_{cs} \sin(\theta_e + 2\pi/3)] \quad (3.13)$$

$$V_{ns} = \sqrt{1/3} [V_{as} + V_{bs} + V_{cs}] \quad (3.14)$$

dan  $\bar{u}_q$ ,  $\bar{u}_d$ ,  $\bar{u}_n$  adalah vektor satuan dalam arah d-q-n.

Penerapan sistem kordinat dq pada motor induksi di implementasikan dalam 3 komponen yaitu Stator, Rotor dan Airgap. Dimana sistem koordinat dq dianggap sebagai fasa tandingan terhadap tiga fasa dari motor induksi. Tujuannya adalah untuk mempermudah dalam analisa ( digital simulation ) kecepatan serta dalam desain driver control system ( inverter).

Dengan mengacu pada 3 komponen di atas maka dijabarkan sejumlah rumus dalam penentuan parameter pada motor induksi, yaitu<sup>1</sup> :

◆ Parameter Stator

$$\bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d}{dt} \bar{\lambda}_s + j_s \bar{\lambda}_s \quad (3.15)$$

dimana

$$\bar{V}_s = V_{ds} + jV_{qs} \quad (3.16)$$

$$\bar{I}_s = i_{ds} + ji_{qs} \quad (3.17)$$

$$\bar{\lambda}_s = \lambda_{ds} + j\lambda_{qs} \quad (3.18)$$

◆ Parameter Rotor

$$\bar{V}_r = R_r \bar{I}_r + \frac{d}{dt} \bar{\lambda}_r + j(\omega_s - \omega_r) \bar{\lambda}_e \quad (3.19)$$

atau :

$$\bar{V}_r = V_{dr} + jV_{qr} \quad (3.20)$$

$$\bar{\lambda}_r = \lambda_{dr} + j\lambda_{qr} \quad (3.21)$$

$$\bar{I}_r = i_{dr} + ji_{qr} \quad (3.22)$$

◆ Torsi Elektromagnetik

Torsi Elektromagnetik (  $T_e$  ) merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor , di definisikan sebagai berikut :

$$T_e = \frac{3}{2} \rho (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.23)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \rho M (i_{dr} i_q - i_{qr} i_d) \quad (3.24)$$

<sup>1</sup> Boldea ,Ian and Nasar, A.Syed, Vector Control of AC Drives. ( Florida : CRC Press,1992) p.34

◆ Kecepatan Anguler

Kecepatan anguler dinyatakan sebagai fungsi dari torsi elektromagnetik, torsi beban sebagai berikut:

$$T_e - T_l = \frac{2J}{\rho} \frac{d}{dt} \omega_r + \frac{2f}{\rho} \omega_r \quad (3.25)$$

Dimana  $T_l$  adalah kopel beban,  $J$  adalah momen inersia dan  $f$  adalah koefisien peredam (jika ada).

◆ Flux Linkage

Flux linkage adalah besarnya flux pada kumparan sebagai besarnya flux pada kumparan (stator dan rotor) dengan jumlah  $N$  jumlah lilitan. Besar flux untuk stator dan rotor adalah:

$$\bar{\lambda}_s = L_s \bar{I}_s + M \bar{I}_r \quad (3.26)$$

$$\bar{\lambda}_r = L_r \bar{I}_r + M \bar{I}_s \quad (3.27)$$

Dengan melihat parameter – parameter diatas maka dapat disimpulkan bahwa perubahan salah satu parameter diatas dapat mempengaruhi performansi dari motor induksi.

Selain itu parameter diatas erat hubungannya dengan penurunan rumus – rumus vektor kontrol sebagai berikut:

### 3.1 Voltage vektor control:

Persamaan umum Voltage vector control :

$$\bar{V}_{sb} = V_d + jV_q \quad (3.28)$$

dimana:

$$V_d = \text{Re}(\bar{V}_{sb}) = \frac{2}{3} \left[ V_a \cos(-\theta_b) + V_b \cos\left(-\theta_b + \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \cos\left(-\theta_b + \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (3.29)$$

$$V_q = \text{Im}(\bar{V}_{sb}) = \frac{2}{3} \left[ V_a \sin(-\theta_b) + V_b \sin\left(-\theta_b + \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \sin\left(-\theta_b + \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (3.30)$$

$$[P(\theta_b)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_b) & \cos\left(-\theta_b + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta_b + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta_b) & \sin\left(-\theta_b + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta_b + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

sehingga dapat di tuliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{pmatrix} = P(\theta_b) \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

dimana model diatas merupakan model pengukuran langsung (real

type) dengan varian voltage vektor control. Sedangkan untuk

model simulasinya dapat dilihat pada persamaan di bawah ini :

dimana dengan mensubstitusikan persamaan (3.26) ke persamaan

(3.15) dan persamaan (3.27) disubstitusikan persamaan(3.19) maka

akan diperoleh

:

$$\bar{V}_s = R_s I_s + L_s \frac{d}{dt} I_s + M \frac{d}{dt} I_s + j\omega_s L_s I_s + j\omega_s M I_r \quad (3.33)$$

$$\bar{V}_r = R_r I_r + L_r \frac{d}{dt} I_r + M \frac{d}{dt} I_s + j(\omega_s - \omega_r) L_r I_r + j(\omega_s - \omega_r) M I_s \quad (3.34)$$

bila persamaan 3.29 dan 3.30 dinyatakan dalam sumbu d-q maka dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ds} \\ U_{qs} \\ U_{dr} \\ U_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

sehingga jika di tinjau pada keadaan stasioner(  $\omega_s = 0$  ) maka, dapat dituliskan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pL_m \\ pL_m & \omega L_m & R_s + pL_r & \omega_s L_r \\ -\omega_r L_m & pL_m & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

dimana dalam menyelesaikannya diperlukan data karakteristik motor mengenai:  $R_s$  ,  $L_s$ ,  $M$ ,  $L_r$  ,  $R_r$  dan  $\omega_r$ . dengan informasi ini maka penyelesaian dapat diselesaikan.

### 3.2 Current vektor control:

Persamaan umum Current vector control :

$$\bar{i}_{sb} = i_d + j i_q \quad (3.37)$$

Dimana:

$$i_a = i_d \cos(-\theta_b) + i_q \sin(-\theta_b) \quad (3.38)$$

$$i_b = i_d \cos\left(-\theta_b + \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \sin\left(-\theta_b + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.39)$$

$$i_c = i_d \cos\left(-\theta_b + \frac{4\pi}{3}\right) + i_q \sin\left(-\theta_b + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3.40)$$

### 3.3 Flux vektor kontrol :

$$\bar{\lambda}_{sb} = \lambda_d + j\lambda_q \quad (3.41)$$

Dimana:

$$V_{dr} = R_r' i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_b - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (3.42)$$

$$V_{qr} = R_r' i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_b - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (3.43)$$

Sehingga:

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d)$$

Dengan melihat penurunan rumus-rumus vektor control untuk tegangan, arus maupun flux maka dapat disimpulkan bahwa vektor kontrol sangat memegang peranan penting dalam peralatan-peralatan listrik AC terutama yang berkaitan dengan industri.

## 4. TEORI DASAR VEKTOR KONTROL INVERTER PADA MOTOR INDUKSI

Implementasi Vektor kontrol pada motor induksi meliputi komponen flux stator dengan variasi kontrolnya. Untuk itu di perlukan tahanan rotor pada koordinat utama transformasi pada posisi flux rotor, leading pada performansi

yang tinggi lewat skema control yang sederhana. Dimana komponen vektor kontrol ini terdapat pada inverter, dengan kuantitas yang dapat di kontrol tergantung pada konfigurasi dari switch pada inverternya.

Jadi pada intinya pada stator, rotor dan airgap merupakan parameter-parameter acuan dalam kerangka menentukan pengaruh vektor kontrol pada motor induksi melalui inverter.

Untuk lebih jelasnya dapat di gambarkan pada tabel di bawah<sup>2</sup> :

Orientasi Flux	Current Control	Voltage Control	Kombinasi Voltage dan Current control	Metode Langsung/ Tidak langsung
Flux rotor Orientasi	⊕	+	⊕	⊕ / +
Flux stator Orientasi	+	⊕	+	+ / ⊕
Flux airgap Orientasi	⊕	+	+	+ / ⊕

Tabel 3.1 Dasar analisa Vektor kontrol pada Motor Induksi

Keterangan: + = mungkin dan ⊕ = sangat tepat

Artinya untuk menganalisa vektor kontrol pada motor induksi terutama yang berorientasi pada fluks seperti untuk kontrol arus (current control),

<sup>2</sup> Boldea, Ian and Nasar, a syed, op.cit, p.71

lebih diutamakan orientasi terhadap flux rotor dan flux airgap di bandingkan flux stator.

Hal diatas tergantung pada kondisi operasinya dalam keadaan steady state atau linier. Kemudian dari tabel diatas dapat diperoleh beberapa cara dalam analisa dasar vektor kontrol pada motor induksi:

1. Orientasi Flux Rotor meliputi:

- Kontrol arus secara langsung(direct) dan tidak langsung (indirect).
- Kombinasi Kontrol arus – tegangan secara langsung dan tidak langsung.

2. Orientasi Flux Stator meliputi:

- Kontrol arus secara langsung(direct) dan tidak langsung (indirect).
- Kombinasi Kontrol arus – tegangan secara langsung dan tidak langsung.

3. Torsi vektor kontrol meliputi:

- Kontrol langsung untuk flux stator dan torsi.