

感应电动机的控制

林 駒 編 譯

上海科学技术出版社

感应电动机的控制

林 駒 編 譯

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书分繞式感应电动机及鼠籠式感应电动机二部分，詳細介紹感应电动机的控制綫路、特性及电阻計算；并結合实际应用方面介紹了一些特殊电器結構与性能，本书专供高級技工、专科学学生及設計人員参考。

感 应 电 动 机 的 控 制

林 駒 編 譯

*

上海科学技术出版社出版

(上海漕金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

上海新华印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 4 12/32 字數 102,000

(原大系·科技類共印 8,120 册 1955 年 12 月第 1 版)

1959 年 1 月新 1 版 1962 年 1 月第 4 次印刷

印数 16,001—21,000

統一書号：15119·56

定 价：(十二) 0.64 元

目 錄

感應電動機概論	1
1. 概論	1
2. 額定電阻	4
3. 電動機的內電阻	5
第一編 線繞式感應電動機	9
第一章 自然特性與人造特性	9
4. 自然特性	9
5. 人造特性	18
6. 人造特性曲綫組	22
第二章 轉子三相內接有對稱電阻的起動	27
7. 起動電阻的用途及起動工作制	27
8. 起動電阻的接法	28
9. 起動電阻的計算	30
10. 不可反轉的與時間成函數關係的自動控制線路	39
11. 轉子三相內接有不對稱電阻的起動	42
第三章 轉子內接有電抗的起動	49
12. 串聯的電抗器	49
13. 並聯的電抗器	51
第四章 反接制動	55
14. 反接制動工作制	55
15. 反接段電阻的計算	58
16. 應用反接制動的線路	58
第五章 能耗制動	66

17. 定子磁通	67
18. 電動勢與轉子電流	69
19. 電動機的機械特性	70
20. 勵磁迴路的線路及計算	71
21. 機械特性的計算	73
22. 能耗制動迴路參數的計算	78
23. 利用能耗制動的線路	83
第六章 調節轉速	86
24. 單電動機拖動	86
25. 雙電動機拖動	87
第七章 帶飛輪的拖動機構中電動機的轉差率調節	90
26. 經常接入的電阻	92
27. 轉子電阻的計算	95
28. 轉差率繼電器的整定及其迴路參數的計算	96
29. 轉子外電阻接成雙星形的接觸轉差率調整器	97
第二編 鼠籠式感應電動機	101
第八章 自然特性及人造特性	101
第九章 定子內接有對稱電阻的起動	107
30. 計算自然機械特性	107
31. 起動電阻與電抗的計算	108
32. 定子內接有不對稱電阻的起動	109
33. 人造機械特性的計算	110
34. 起動電阻的計算	114
35. 電動機起動的控制線路	117
第十章 能耗制動	124
36. 有能耗制動的控制線路	126
37. 多速電動機的控制線路	130

附 錄

感應電動機概論

1. 概 論

所有電動機中，感應電動機在工業上的用途最廣，並愈來愈多的代替直流電動機的地位。現在已經有許多橋式吊車以感應電動機裝備；許多機床、許多軋鋼機的輔助機械，以及其他工業部門的機械，均以感應電動機裝備。像運輸機、功率不大的通風機及水泵等廣泛應用的拖動中，幾乎毫不例外地都採用感應電動機作為拖動電機。

僅在需要均勻調速的（龍門刨、校正機、軋鋼機等可調速的主拖動機構），以及在電力曳引、在功率極大的、反復短時工作制中運轉的拖動機構中（可逆軋鋼機），感應電動機才讓位給以發電機—電動機機組供電的直流電動機。

功率極大的、不可調速的、在長期工作制中運轉的拖動（發電機—電動機機組、壓縮機、水泵等等），同步電動機才較感應電動機為優越。

感應電動機由於下列優點而得到廣泛應用：價廉，結構簡單可靠，效率高，其變流裝置即變壓器較直流電動機所需的電動機—發電機機組或水銀整流器等便宜得多。

感應電動機的缺點為：（1）轉矩與電壓成正比，當網路電壓降低時，起動轉矩與疲倒轉矩均減小得很多；（2）當網路電壓增加時，定子有溫昇過高的危險，而當網路電壓降低時，轉子有溫昇過高的危險；（3）空隙小，多少降低了電動機的堅固性。

感應電動機所以能轉動的原理已經為大家所熟知，即由於在交流電機多相的定子上，若通以多相電流，則產生一旋轉磁場所致。為了更

明確起見，茲不厭求詳地再來討論這種旋轉磁場之所以產生的原理。要研究何以能產生旋轉磁場，可假定一簡單三相兩極電機，有三個線圈，而每個線圈的軸在空間互成 120° 角，圖 1 是該三線圈中三電流的波形，而圖 2 是在六個時刻以空間向量圖表示的各電流所生磁場的值。在時刻 (1) a 相中電流為極大，而 b 及 c 二相中電流則各為極大的 $\frac{1}{2}$ ，並為負值；在圖 2 的向量圖的 (1) 中三個向量： OA 的值為 1，方向為 oa ， OB 的值為 $\frac{1}{2}$ ，方向為 bo 及 OC 的值為 $\frac{1}{2}$ ，方向為 co ；以向量方法相加後所得的向量和 OC ，其數值為 $\frac{3}{2}$ ，方向則沿 a 相的軸。

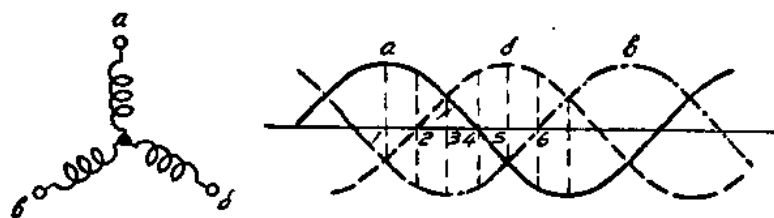


圖 1 三個線圈中三電流的波形

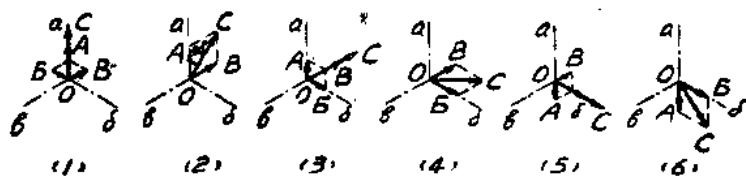


圖 2 三相繞組所產生的磁場向量圖

在時刻(2)：向量 OA 的值為 0.866，方向為 oa ； OB 的值為零； OC 的值亦為 0.866，但方向為 co ，即其值為 -0.866 ；相加後得一向量和 OC ，其值仍為 $\frac{3}{2}$ ，但方向則從 a 相的軸移過 30° 角。若繼續以此步驟作圖，得在時刻(3)的向量和，其值為恆定 $\frac{3}{2}$ ，而方向再移過 30° 角。

以上結果說明，若每線圈沿其軸的最大磁通密度為 B_m ，則三個線圈的合成效應是一旋轉磁場，其密度為 $\frac{3}{2} B_m$ 。當電流經過一週波時，

兩極電機中的旋轉磁場亦旋轉一週，這說明了磁場的角速度與電流的角速度同為 ω_0 。設磁通沿定子周緣空間的分佈是正弦形，則在任何向徑方向（例如圖3的 OA ），其磁通密度是：

$$B = \frac{2}{3} B_M \cos(\omega t + \beta)。 \quad (1)$$

式中 β 是 OA 半徑與 a 相軸線二者間夾角。方程式(1)亦可由每電流所生的通量密度的值依前述向量加法證實。設每電流沿其本身軸線所生磁通密度，分別以下標 a 、 b 、 c 區別，則任何一時刻 t 將有：

$$\begin{aligned} B_a &= B_M \cos \omega t, & B_b &= B_M \cos(\omega t - 120^\circ), \\ B_c &= B_M \cos(\omega t + 120^\circ)。 \end{aligned} \quad (2)$$

因為電流是平衡的，而每一方向的磁導是假定均相等。 OA 向徑與 a 相軸線間的夾角是 β ，而磁通密度又假定為正弦形，所以 A 點的磁通密度為：

$$\begin{aligned} B &= B_a \cos \beta + B_b \cos(120^\circ + \beta) + B_c \cos(120^\circ - \beta) \\ &= B_M \cos \omega t \cos \beta + B_M \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(120^\circ + \beta) \\ &\quad + B_M \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(120^\circ - \beta) \\ &= \frac{1}{2} B_M [\cos(\omega t - \beta) + \cos(\omega t + \beta)] \\ &\quad + \frac{1}{2} B_M [\cos(\omega t - \beta - 240^\circ) + \cos(\omega t + \beta)] \\ &\quad + \frac{1}{2} B_M [\cos(\omega t + \beta) + \cos(\omega t - \beta + 240^\circ)]。 \end{aligned} \quad (3)$$

由三角學原理， $2\cos x \cos y = \cos(x - y) + \cos(x + y)$

所以由(3)即可得(1)因為：

$$\cos(\omega t - \beta) + \cos(\omega t - \beta - 240^\circ) + \cos(\omega t - \beta + 240^\circ) = 0$$

由於定子上所產生的旋轉磁場轉子即隨之而旋轉。

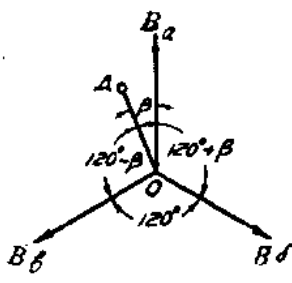


圖3 在任何時刻的合成磁通密度

2. 額定電阻

線繞式感應電動機的轉子額定電阻，是由轉子內電阻與外電阻所組成，其值等於當轉子靜止不動，定子上施一額定頻率的額定電壓時使轉子內通過一額定電流的電阻。為便於解釋起見，繪製圖4。該圖是註有外電阻、內電阻、電壓及電流等記號的感應電動機的接線圖。

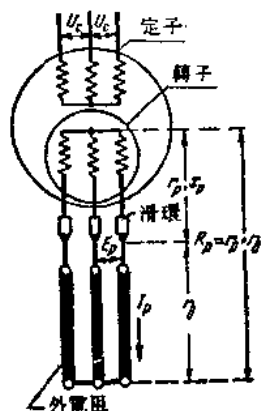


圖4 轉子內接有外電阻的感應電動機接線圖

轉子三相接成星形的中點與外電阻的中點間的迴路，稱為轉子的線。若轉子三相接成三角形時，可以理解為等值星形者。

在轉子靜止時，在每線內欲得一額定電流 $I_{p.n}$ 時，每相電阻值應為：

$$R_{p.n} = \frac{E_{p.n}}{\sqrt{3} I_{p.n}} \quad (4)$$

式中 $E_{p.n}$ ——轉子靜止時開路滑環間的應電勢。

根據圖4在公式(4)內不應是電阻 $R_{p.n}$ ，而應是阻抗 $Z_{p.n}$ ，但由於外電阻與內電阻所組成的感應電動機轉子電阻值幾乎等於全部阻抗，因此在計算中可以用 $R_{p.n}$ 代替 $Z_{p.n}$ 。

轉子繞組接成星形或接成三角形，對測定 $R_{p.n}$ 而言，是沒有區別的。由公式(4)所求得的 $R_{p.n}$ 是轉子三相接成星形者真實的轉子線電阻值，若三相接成三角形時，則 $R_{p.n}$ 是換算到接成星形的等值。

對作為長期工作制運轉的感應電動機求 $R_{p.n}$ 時， $I_{p.n}$ 的值應根據出品目錄中取相當於長期工作制的值。若作為反復短時工作制或短時工作制運轉時， $I_{p.n}$ 值須取相當於 25% ΠВ 的值。

在以標么值計算時，取轉子額定電阻值為 1。

任何電阻 r 可根據公式(5)以標么值^①表示：

①詳見薩本棟著“交流電機”第12頁。

$$r^{\lambda} = \frac{r}{R_{p.n}} \quad (5)$$

例 1. 求 MT61-10 電動機電阻 $r=0.31$ 歐的標么值, MT61-10 的規格如下: 30 仟瓦, 380 伏, 574 轉/分, $E_{p.n}=142$ 伏, $I_{p.n}=133$ 安。

解: 轉子額定電阻: $R_{p.n} = \frac{E_{p.n}}{\sqrt{3} I_{p.n}} = \frac{142}{\sqrt{3} \cdot 133} = 0.62$ 歐,

電阻 r 以標么值表示: $r^{\lambda} = \frac{r}{R_{p.n}} = \frac{0.31}{0.62} = 0.5$ 。

3. 電動機的內電阻

現在分別來討論定子與轉子迴路。

轉子: 轉子的內電阻由下列電阻組成:

$r_{\phi.p}$ = 轉子相電阻;

$x_{\phi.p}$ = 轉子相電抗;

r_w = 轉子滑環與炭刷電阻。

圖 5 表示接有外電阻的轉子接線圖, 外電阻經常接成星形; 而轉子相可以接成星形, 亦可以接成三角形。

為計算感應電動機的特性及其外電阻, 必須對轉子每相求外電阻與內電阻的和。

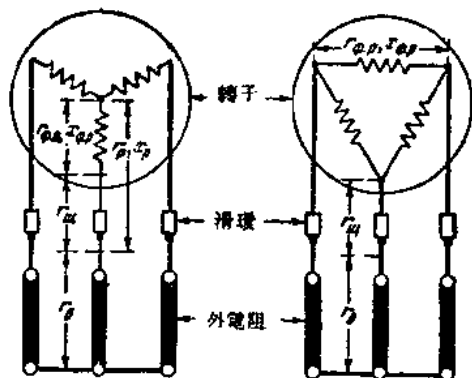


圖 5 接成星形的與接成三角形的轉子繞組及其外電阻

轉子接成星形時線內電阻等於:

$$\left. \begin{aligned} r_p &= r_{\phi \cdot p\lambda} + r_{u_1} \\ x_p &= x_{\phi \cdot p\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

轉子每線的總電阻 R_p 等於內電阻 r_p 與外電阻 r_o 的和。

當轉子三相接成三角形時，不能採用像公式(6)中所表示的代數和，在這種情況下，須預先將接成三角形的相電阻折算到等值星形電阻。

從所得轉矩相同的出發點來看，不論三相接成三角形或等值星形，在轉子相內電的損耗應相等：

$$3I_{\phi \cdot p\Delta}^2 r_{\phi \cdot p\Delta} = 3I_{\phi \cdot p\lambda}^2 r_{\phi \cdot p\lambda}$$

由於
$$I_{\phi \cdot p\Delta} = \frac{I_p}{\sqrt{3}} \text{ 與 } I_{\phi \cdot p\lambda} = I_p,$$

經代入與移項後得：
$$r_{\phi \cdot p\lambda} = \frac{1}{3} r_{\phi \cdot p\Delta} \quad (7)$$

即接成星形的每相電阻較接成三角形的每相電阻小三倍。

接成三角形的轉子，其阻抗已知時，求接成星形的等值阻抗的方法如下：

$$Z_{\phi \cdot p\Delta} = \frac{E_{\phi \cdot p\Delta}}{I_{\phi \cdot p\Delta}} = \frac{E_p}{I_p / \sqrt{3}},$$

$$Z_{\phi \cdot p\lambda} = \frac{E_{\phi \cdot p\lambda}}{I_{\phi \cdot p\lambda}} = \frac{E_p / \sqrt{3}}{I_p},$$

由此
$$Z_{\phi \cdot p\lambda} = \frac{1}{3} Z_{\phi \cdot p\Delta} \quad (8)$$

利用了上面所推論的等式(7)將這些阻抗以電阻與電抗表示，得二者電抗的比例與電阻的比例相同：

$$x_{\phi \cdot p\lambda} = \frac{1}{3} x_{\phi \cdot p\Delta} \quad (9)$$

利用上述比例，可寫出轉子接成三角形時的等值線內電阻：

$$\left. \begin{aligned} r_p &= \frac{1}{3} r_{\phi \cdot p\Delta} + r_{u_1} \\ x_p &= \frac{1}{3} x_{\phi \cdot p\Delta} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在 r_p 的等式內，滑環與炭刷的接觸電阻 r_{uc} ，可假設電壓降約等於 1 伏求得。

若電動機至控制板或控制器間距離遠時，外部導線的電阻亦必須計算在內。

定子：從圖 6 可以看出定子內電阻由下列電阻組成：

$r_{\phi.c}$ —一定子相電阻；

$x_{\phi.c}$ —一定子相電抗。

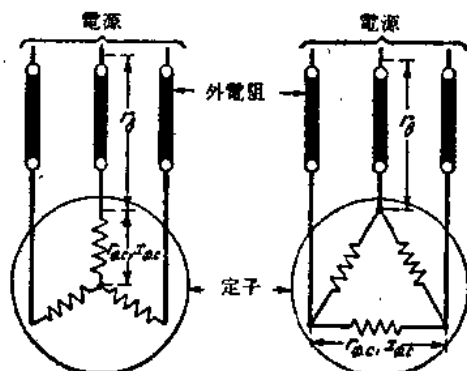


圖 6 經外電阻接至電源的，接成星形的與接成三角形的定子繞組接法

在計算中，我們所注意者為定子線電阻 r_c 與線電抗 x_c ；在三相接成星形時，它等於相電阻：

$$\left. \begin{aligned} r_c &= r_{\phi.c} \lambda, \\ x_c &= x_{\phi.c} \lambda. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

而在三相接成三角形時，同轉子迴路一樣，較相電阻、電抗小三倍：

$$\left. \begin{aligned} r_c &= \frac{1}{3} r_{\phi.c} \Delta, \\ x_c &= \frac{1}{3} x_{\phi.c} \Delta. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

當感應電動機在轉子滑環短路時接至電源，則其線路內好像有下列電阻與電抗值：

$$\left. \begin{aligned} r_K &\approx r_c + r_p', \\ x_K &\approx x_c + x_p'. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 r_k 與 x_k —短路電阻與電抗；

r_p' 與 x_p' —折算至定子的轉子線內電阻、內電抗。

若電阻折算係數已知時，則折算至定子的轉子電阻值為：

$$\left. \begin{aligned} r_p' &= r_p k_r, \\ x_p' &= x_p k_r. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

電阻折算係數值：

$$k_r = \frac{m_c}{m_p} \left(\frac{\omega_c}{\omega_p} \cdot \frac{k_c}{k_p} \right)^2 = \frac{m_c}{m_p} \cdot k_c^2,$$

式中 m_c, m_p —定子轉子相數；

ω_c, ω_p —定子與轉子每相內匝數；

k_c, k_p —定子與轉子的繞組係數；

k_c —電動勢折算係數，若定子額定線電壓 $U_{c.n}$ 及轉子靜止並開路時滑環間的電動勢 $E_{p.n}$ 已知時， k_c 的近似值可以下式求得：

$$k_c = \frac{\omega_c}{\omega_p} \cdot \frac{k_c}{k_p} = \frac{E_c}{E_{p.n}} \approx \frac{U_{c.n}}{E_{p.n}}.$$

對鼠籠式感應電動機 r_k 與 x_k 的近似值，可利用起動電流及起動功率因數求得。

短路阻抗（即電動機靜止時接入電源）對星形聯結者：

$$Z_k = \frac{U_{c.n}}{\sqrt{3} I_{c.n}}. \quad (15)$$

而短路電阻與短路電抗可由下式求得：

$$\left. \begin{aligned} r_k &= Z_k \cos \varphi_n, \\ x_k &= \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

MTK 型吊車-冶金用鼠籠式感應電動機的起動電流 $I_{c.n}$ 為額定電流的 3.3—5.2 倍， $\cos \varphi_n = 0.86 - 0.6$ ，而短路電阻與電抗間的比為：

$$x_k = (0.6 - 1.3) r_k$$

A 型鼠籠式感應電動機：

$$I_{c.n} = (4 - 7) I_{c.n}, \quad \cos \varphi_n = 0.7 - 0.125, \quad x_k = (1 - 8) r_k.$$

第一編 線繞式感應電動機

應當儘可能選擇鼠籠式感應電動機；在無法採用鼠籠式感應電動機時才採用線繞式電動機。

在下列主要情況中應用線繞式電動機證實是正確的：

(a) 常速與高速橋式吊車中需要調節速度的橋，小車與提昇的拖動；

(b) 以附加轉差率(較電動機原有的轉差率更大)運轉的及有飛輪的拖動機構：如剪刀車、壓床與軋鋼機的主拖動機構等等；

(c) 在軋鋼車間經常開停的拖動機構，鼠籠式感應電動機由於發熱情況，而不能得到所需的動力制動特性而不允許應用時，在這種情況下，往往採用轉子迴路中經常接有電阻(其值等於額定值的0.15至0.4倍)的線繞式電動機能得到合適的特性。轉差率大的鼠籠式感應電動機，雖亦能得到同樣的結果，但電的損耗在轉子能承受的能力之外。

第一章 自然特性與人造特性

4. 自然特性

感應電動機的定子接到一電壓為 $U_{\phi.c}$ 的網路上時，以同步轉速 ω_1 旋轉的主磁通 ϕ_c 在定子繞組內感應一主電勢 E_c ，此外在定子內還有漏磁電抗電壓降 $-jI_c x_c$ 和電阻電壓降 $-I_c r_c$ ，它們與 E_c 一起平衡了外加電壓 $U_{\phi.c}$ 即：

$$\dot{U}_{\phi.c} = -\dot{E}_c + \dot{I}_c r_c + j\dot{I}_c x_c = -\dot{E}_c + \dot{I}_c Z_c. \quad (17)$$

在靜止的轉子內由定子的主磁通感應一電動勢 $E_{p.k}$ 。當轉子電

路接通時，它裏面將有電流 I_p' ，因而產生了漏磁通 Φ_p ，並通過電阻 $R_p = r_p + r_a$ ，除主磁通 Φ_c 所感應的電動勢 E_p 外，還有漏磁電抗電壓降 $-jI_p'x_p$ 和電阻電壓降 $-I_p'l_p$ 。所以：

$$\dot{E}_p = I_p R_p + j I_p' x_p = I_p Z_p. \quad (18)$$

當轉子以轉差率 S 轉動時，方程式(18)變為：

$$\dot{E}_{ps} = I_p R_p + j I_p' x_{ps} = I_p Z_{ps}. \quad (19)$$

方程式(18)與(19)折算至定子方時變為：

$$\dot{E}'_p = I'_p R_p + j I'_p x'_p = I'_p Z'_p, \quad (20)$$

$$\text{與} \quad \dot{E}'_p s = I'_p R'_p + j I'_p x'_p s = I'_p Z'_p s. \quad (21)$$

$$\text{或} \quad I'_p = \frac{\dot{E}'_p s}{R'_p + j x'_p s}, \quad (22)$$

$$\text{或} \quad I'_p = \frac{E'_p s}{Z'_p s} = \frac{E'_p s}{\sqrt{R_p'^2 + x_p'^2 s^2}} = \frac{E'_p}{\sqrt{\left(\frac{R_p'}{s}\right)^2 + x_p'^2}}. \quad (23)$$

令 P 為饋送到電動機定子的電能，其中一部分消耗在定子的銅耗 P_{mc} 及鐵芯內的鐵耗 P_c ，其餘的轉化為旋轉磁通的能量 P_M ，所以電磁功率：

$$P_M = P - P_{mc} - P_c. \quad (24)$$

電動機的電磁功率是由主磁通 Φ_c 在空間以角速 ω_c 旋轉所產生的。

$$\text{因此} \quad P_M = M \omega_c. \quad (25)$$

$$M = \frac{P_M}{\omega_c} = \frac{P_M}{\frac{2\pi n_c}{60}}. \quad (26)$$

式中 $n_c = 60f/p$ ， f 為網路的頻率， p 為電動機極的對數。

電磁功率經空隙傳至轉子，除去轉子中銅耗 P_{mp} 外，其餘為在電動機軸上所產生的全部機械功率：

$$P_{Mx} = P_M - P_{mp}. \quad (27)$$

$$\text{與靜轉矩對應} \quad P_{Mx} = M \omega. \quad (28)$$

$$M = \frac{P_{\text{Mx}}}{\omega} = \frac{P_{\text{Mz}}}{\frac{2\pi n}{60}} \quad (29)$$

式中 n 為轉子轉速。

以公式(26)與(27)代入(29)並折算至定子方得：

$$M\omega_c - M\omega = M(\omega_c - \omega) = m_c I_p'^2 R_p' \quad (30)$$

$$\text{因此 } M = \frac{m_c I_p'^2 R_p'}{\omega_c - \omega} = \frac{m_c I_p'^2 R_p'}{\omega_c \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c}} = \frac{m_c I_p'^2 \frac{R_p'}{S}}{\omega_c} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{以公式(23)代入得：} \quad M &= \frac{m_c \dot{E}_p'^2 \frac{R_p'}{S}}{\omega_c \left[\left(\frac{R_p'}{S} \right)^2 + x_p'^2 \right]}, \\ &= \frac{m_c E_c^2 \frac{R_p'}{S}}{\omega_c \left[\left(\frac{R_p'}{S} \right)^2 + x_p'^2 \right]} \quad (32) \end{aligned}$$

因為在感應電動機中定子磁動勢 F_c 與轉子磁動勢 F_p 在空間以同一速度向同一方向旋轉，因此它們在空間的相互關係是不變的，這時空間中正弦形磁動勢 F_p 與正弦形磁動勢 F_c 間有一定相角使其合成磁動勢 $F_{x,x}$ 。能產生一主波磁通 Φ_m 。

$$\text{或} \quad \dot{F}_c + \dot{F}_p = \dot{F}_{x,x} \quad (33)$$

由一般公式知磁動勢 $F = 0.9mI\omega k$ ； m 、 ω 、 I 、 k 的符號意義與第 8 頁中同，因此：

$$\begin{aligned} 0.9m_c \dot{I}_c \omega_c k_c + 0.9m_p \dot{I}_p \omega_p k_p &= 0.9m_c \dot{I}_{x,x} \omega_c k_c, \\ \text{或 } \dot{I}_c + \frac{m_p \omega_p k_p}{m_c \omega_c k_c} \dot{I}_p &= \dot{I}_x + \frac{m_p}{m_c} \frac{1}{k_e} \dot{I}_p = \dot{I}_c + \dot{I}'_p = \dot{I}_{x,x} \quad (34) \end{aligned}$$

I_{xx} 為空載勵磁電流，可令等於 $\frac{-\dot{E}_p}{Z_m} = \frac{-\dot{E}_c}{Z_m}$ 。 Z_m 為激磁迴路的阻抗。

由以上的敘述，可把電動勢及磁動勢方程式寫成下面的式樣：

$$\dot{U}_{\phi,c} = -\dot{E}_c + \dot{I}_c Z_c \quad (17)$$

$$\dot{E}'_p = -\dot{E}_c = \dot{I}'_p Z'_{p0} \quad (18)$$

$$\dot{I}_c + \dot{I}'_p = \dot{I}_{xx} \quad (34)$$

由這些方程式可給一與變壓器相類似的等值電路圖 7，以便於分析研究，圖 8 是相當於這個等值電路的向量圖。

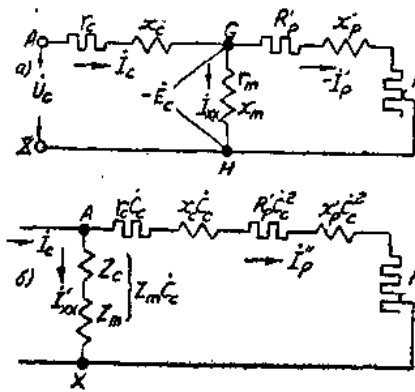


圖 7 感應電動機的等值電路

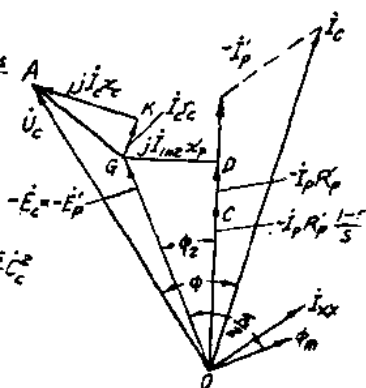


圖 8 相當於圖 7 的向量圖

由這些方程式可以由電壓 U_c 及電機的參數來求電流 I_c 。

$$\text{由公式(34)得 } \dot{I}_c = \dot{I}_{xx} + (-\dot{I}'_p) = \frac{-\dot{E}_c}{Z_m} + \frac{-\dot{E}'_p}{Z'_p} \quad (35)$$

$$\text{所以 } -\dot{E}_c = \dot{I}_c \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_p}} \quad (36)$$

將公式(36)代入公式(17)並移項得：

$$\dot{I}_c = \dot{U}_{\phi \cdot c} \frac{1}{Z_c + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_p}}} \quad (37)$$

代入(36)移項後得：

$$\begin{aligned} -\dot{E}_c &= \frac{\dot{U}_{\phi \cdot c}}{Z_c + \frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_p}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_p}} \\ &= \frac{\dot{U}_{\phi \cdot c}}{1 + \frac{Z_c}{Z_m} + \frac{Z_c}{Z'_p}} \end{aligned}$$