

第五章 感應馬達之參數自動量測

5.1 簡介

感應馬達參數之量測方法已在許多電機機械的教科書中均有詳細說明之。感應馬達參數除了可用於系統模擬與分析外，對於需使用到電氣參數的控制方法，例如在向量控制、無量測控制或解耦合控制等架構下，在各個控制系統中精確的電氣參數是必須的，參數的準確性會直接影響到控制所估測的磁通、滑差、以及對於系統響應的穩定度。

一般來說傳統感應馬達的參數量測方法包括直流試驗、無載試驗及堵轉試驗等三項。當每次電動機的驅動器裝於新的馬達時，這些傳統的試驗將要重覆操作，這種方式是不利於感應電動機參數的取得。再者，當新馬達初次裝接時，技術人員要親自到現場進行傳統試驗，這在某一些場所是非常不方便的，為了要克服這些問題，電動機參數自動量測是可預期的[16-17、26-27]。

其中堵轉試驗因必須利用外加機械力堵住轉子轉動，較為不方便，因此就有虛擬堵轉試驗來取代傳統的堵轉試驗，希望在許多自動化量測或變頻器驅動中，不需要改變變頻器的輸出接線，而直接控制變頻器輸出，以達成變頻器自動化量測三相感應馬達的等效電路為目的。又無載試驗中的滑差率會因馬達存在的一些損失使得量測時有誤差存在，所以利用馬達等效T模型考慮有滑差存在，由於定子電阻、定子漏電感，轉子電阻與轉子漏電感可藉由直流試驗和堵轉試驗求得，再者，滑差率也可由磁場速度與轉子速度求得，因此由馬達T模型等效電路可求得互感量。這三種試驗可以獲得電壓、電流以及功率等參數值，然後再利用電動機等效電路，分別計算出電動機的各项電氣參數，其中直流試驗主要是量測定子電阻 r_s ，無載試驗是量測定子電感 L_s ，堵轉試驗則是量測定子電阻與轉子電阻之和 $(r_s + r_r)$ 以及定子漏電感與轉

子漏電感的和($L_{ls} + L_{lr}$)，而由於考慮了滑差率的無載試驗則是求出互感量 L_M 進而再加上堵轉試驗的漏電感可得到定子電感。本章將依感應馬達三項參數量測試的原理與方法作簡單介紹。

感應馬達 T 模型等效電路圖如圖 5.1 所示：

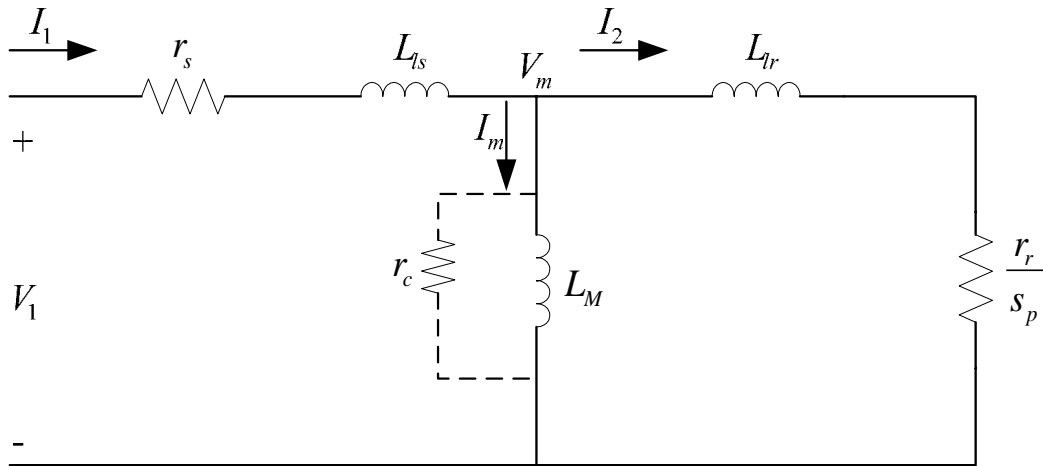


圖 5.1 感應馬達 T 模型等效電路圖

其中：

r_s 與 r_r ：定子和轉子電阻

L_{ls} 與 L_{lr} ：定子和轉子漏電感

L_M ：互感

s_p ：滑差率

r_c ：鐵損電阻

5.2 直流試驗(DC Test)

傳統的直流試驗是決定每個線圈的電阻，外加的可調整直流電源接至感應馬達接線端點中的兩個，而另一接線端點則斷路，進行試驗時先將直流電源的電流調整至定子繞組電流額定值，然後量測兩端點的電壓，而將定子繞組電流調整至額定值，是為了要加熱繞組使得它們的溫度可與正常運轉時相同，如圖 5.2 所示。

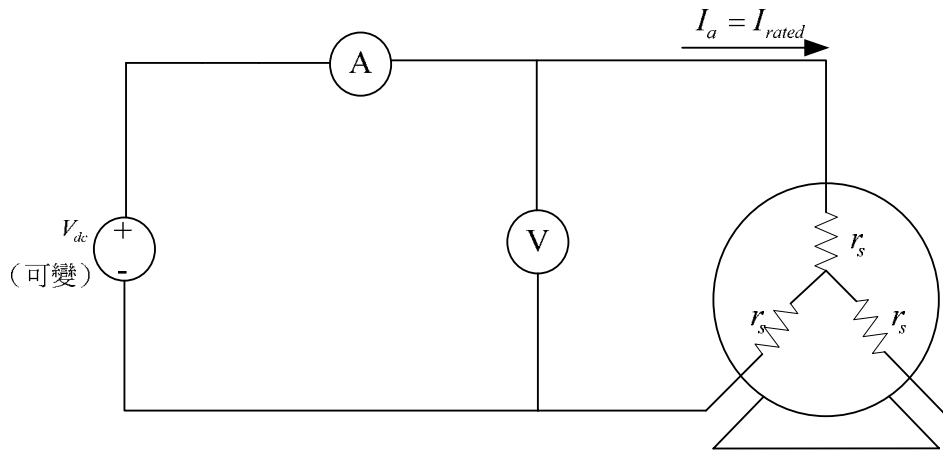


圖 5.2 傳統直流試驗接線圖

自動參數量測的方法是利用變頻器為額外的可調整直流電源，在感應馬達的定子繞組端加入直流電壓，此時因為電流是直流（頻率為零），在轉子電路上沒有感應電壓也不會產生轉子電流。同時，馬達的電抗在直流時等於零，所以在電動機中定子電流的大小由定子電阻 r_s 所限制。根據外加電壓和量測到的電流，便可以計算出定子電阻值。

直流試驗的接線圖如圖 5.3 所示，變頻器的 a 相輸出直流電流是送入 a 相的定子側線圈後，再分流至 b 相與 c 相。先調整定子繞組中的電流 I_a 等於馬達電流額定值 I_{rated} ，然後量測端點之間的電壓。

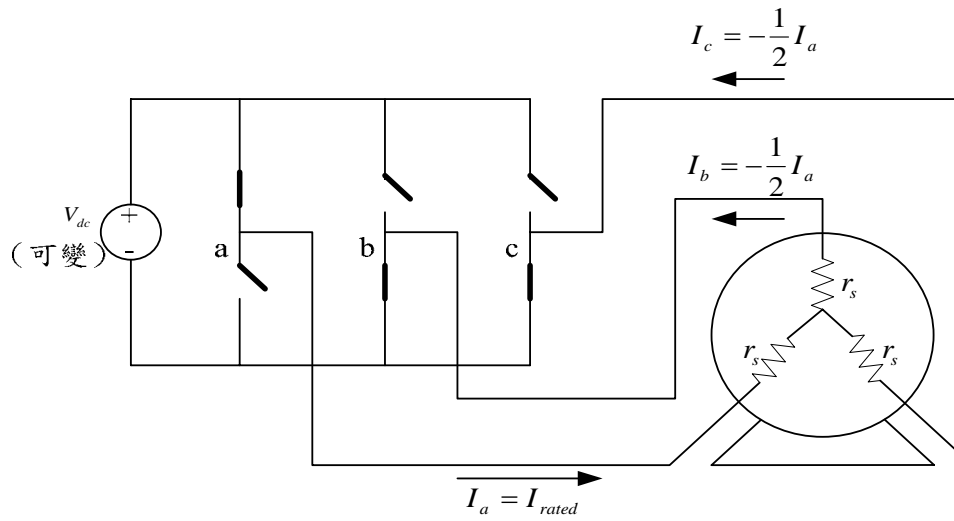


圖 5.3 感應馬達參數自動量測之直流試驗接線圖

由上可得知其等效電路如圖 5.4 所示

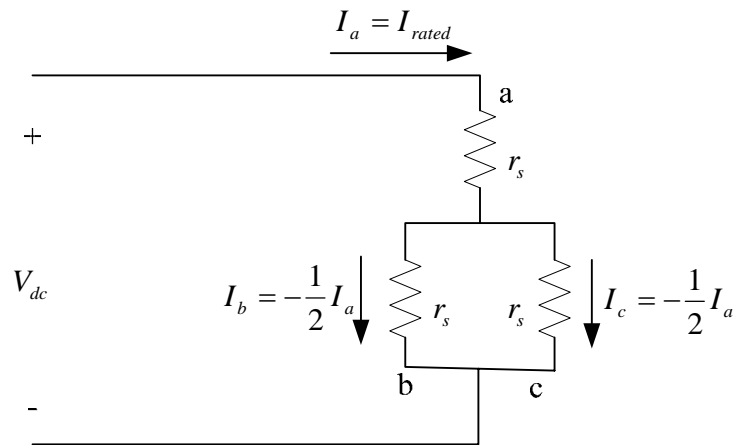


圖 5.4 直流試驗等效電路圖

由等效電路圖可計算求得定子電阻

$$V_{dc} = \frac{3}{2} r_s \times I_a \quad (5.1)$$

$$r_s = \frac{2 V_{dc}}{3 I_a} \quad (5.2)$$

其中：

V_{dc} 與 I_a 是利用平均值去運算

另外，量測定子電阻的最簡單方法是控制q軸直流電壓 V_{qs} ，令d軸電壓 $V_{ds} = 0$ ，使q軸定子電流 I_{qs} 接近額定激磁電流，並量測其值大小，由(5.3)式可以計算求得定子電阻 r_s 。

$$r_s = \frac{V_{qs}}{I_{qs}} \quad (5.3)$$

5.3 堵轉試驗(Locked-Rotor Test)

堵轉試驗主要是量測馬達的定子與轉子電阻之和 ($r_s + r_r$) 及定子與轉子漏電感之和 ($L_{ls} + L_{lr}$)，這種測試類似於變壓器的短路試驗。試驗的方法是利用外力或機械設備使馬達轉子鎖住或堵住無法運轉，加一個電壓到電動機定子上，然後調整電壓源使線電流為馬達的額定電流，當電流達到額定值時，測量電動機的電壓、電流與功率，其傳統堵轉試驗接線圖如圖5.5所示。

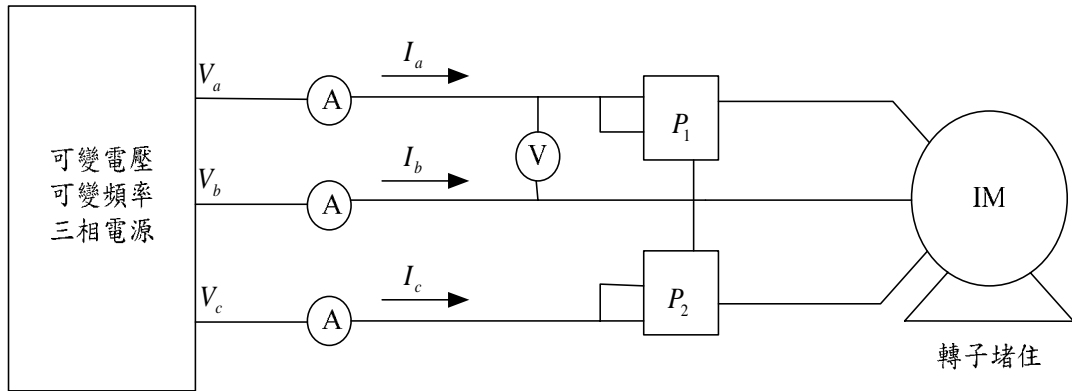


圖5.5 傳統之堵轉試驗接線圖

由於馬達轉子沒有轉動，滑差頻率等於電源頻率，即滑差率 $s_p = 1$ ，且轉子電阻 $\frac{r_r}{s_p}$ 正好等於 r_r (相當小的值)，由於轉子電阻 r_r 及轉子漏電抗 ωL_{lr} 都很小，互感抗 ωL_M 很大，因為是並聯的關係，互感抗 ωL_M 可忽略不計，在這情況下感應馬達堵轉試驗等效電路看似如圖5.6所示。

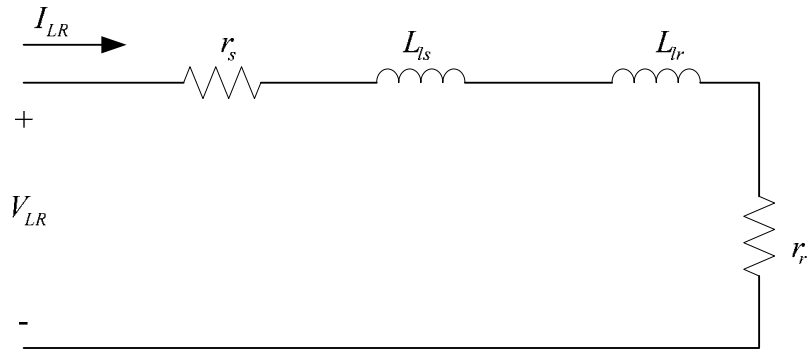


圖5.6 堵轉試驗等效電路圖

由圖 5.5 接線圖可知：

$$\text{總消耗功率： } P_{LR} = P_1 + P_2 \quad (5.4)$$

$$\text{相電流： } I_{LR} = \left[\frac{I_a + I_b + I_c}{3} \right] \quad (5.5)$$

$$\text{相電壓： } V_{LR} = \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (5.6)$$

$$\text{功率因數： } \cos \phi = \frac{P_{LR}}{3 \cdot V_{LR} \cdot I_{LR}} \quad (5.7)$$

$$\text{總阻抗： } Z_{LR} = \frac{V_{LR}}{I_{LR}} \quad (5.8)$$

將上述所求得參數代入圖 5.6，可以獲得如下：

$$\text{總阻抗： } Z_{LR} = R_{LR} + jX_{LR} \quad (5.9)$$

$$\text{堵轉電阻： } R_{LR} = r_s + r_r = Z_{LR} \cdot \cos \phi \quad (5.10)$$

$$\text{堵轉漏電抗： } X_{LR} = j\omega_{LR} \cdot (L_{ls} + L_{lr}) = \sqrt{Z_{LR}^2 - R_{LR}^2} \quad (5.11)$$

$$\text{堵轉漏電感： } L_{LR} = L_{ls} + L_{lr} = \frac{X_{LR}}{2 \cdot \pi \cdot f_{LR}} \quad (5.12)$$

假設已知定子電阻(r_s)且定子及轉子漏電感相等($L_{ls} = L_{lr}$)，則經由試驗公式(5.4)~(5.12)可推得轉子電阻(r_r)。

$$\text{轉子電阻： } r_r = R_{LR} - r_s \quad (5.13)$$

$$\text{定子與轉子漏電感： } L_{ls} = L_{lr} = \frac{1}{2} L_{LR} \quad (5.14)$$

由於傳統堵轉試驗最大缺點是必須使用機械外力使電動機轉子鎖住不動，就使用者觀點而言是相當不方便。所以在自動量測不額外加入堵轉設備時，最簡單的方法就有提出虛擬堵轉試驗[17]，如圖 5.7 所示，因為感應電動機為三相，而虛擬堵轉試驗是將三相感應電動機的三相輸入接線端點的兩相短路，並加入單相電源以保證感應馬達無轉矩產生，使得馬達無法產生平衡的旋轉磁場，因此感應馬達在這情況下是不需要外力堵住轉子，此試驗的電氣行為幾乎等效於傳統堵轉試驗，量測計算過程如下所示。

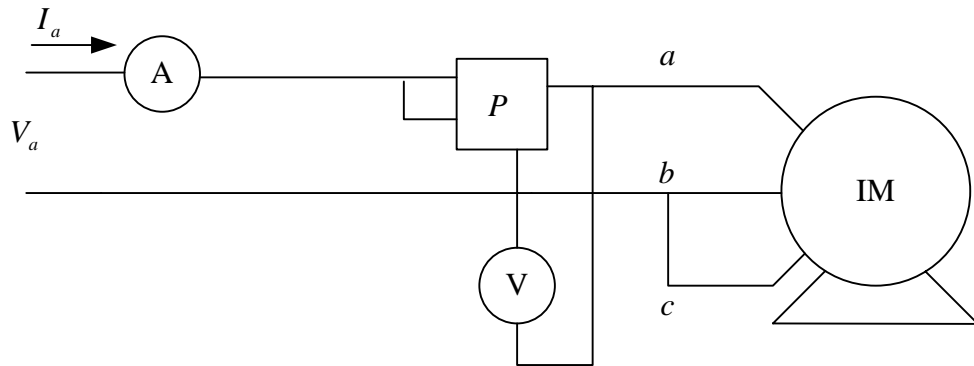


圖 5.7 虛擬堵轉試驗電路圖

其中等效電路如圖 5.8 所示

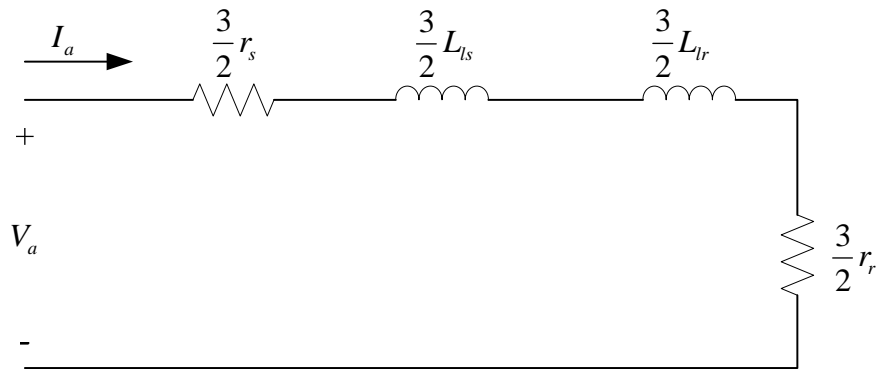


圖 5.8 虛擬堵轉試驗等效電路圖

由試驗中，可得等效阻抗、等效電阻及等效電抗

$$Z_{eq} = \frac{V_a}{I_a} \quad (5.15)$$

$$R_{eq} = \frac{P_a}{I_a^2} \quad (5.16)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (5.17)$$

$$L_{ls} = \frac{2}{3} \frac{1}{2\omega} X_{eq} \quad (5.18)$$

$$r_r = \frac{2}{3} R_{eq} - r_s \quad (5.19)$$

其中：

輸入電壓、量測電流與功率均使用有效值進行參數運算

$$I_{a(rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_a^2(t) dt}$$

$$V_{a(rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_a^2(t) dt}$$

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) \cdot I_a(t) dt$$

經由上述公式(5.15)~(5.19)運算求得轉子電阻與定子漏電感

5.4 無載試驗(No-Load Test)

無載試驗主要是量測馬達的定子電感 L_s ，傳統無載試驗接線圖如圖5.9所示。瓦特計、電壓計和三個電流計連接至可以自由旋轉的感應馬達，由調整輸入三相電源之額定電壓與額定頻率，經獲取之電壓與電流值計算求出定子電感。

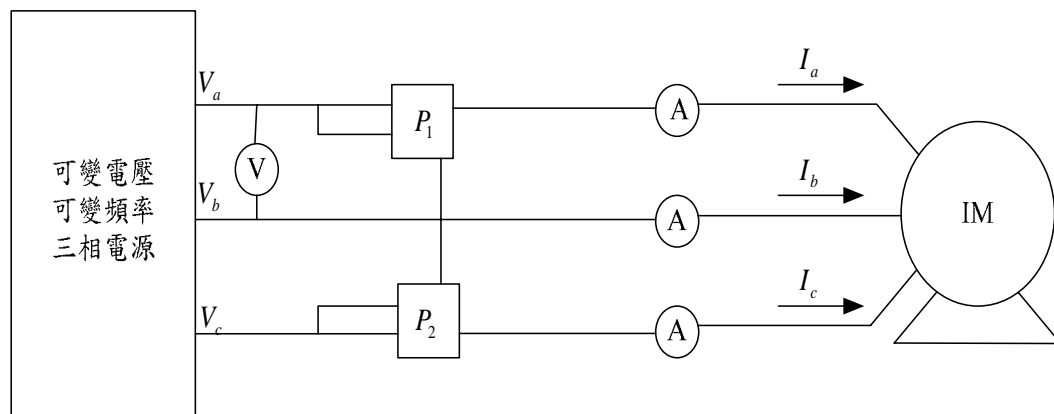


圖5.9 傳統之無載試驗接線圖

由於在無載試驗時，馬達所產生的功率都是消耗於機械損失，而且電動機的滑差率非常小，因此 $\frac{r_r}{s_p} \gg r_r$ 、 X_r 及 X_m ，即轉子側的阻抗極大，因此無載試驗之等效

電路如圖 5.10 所示：

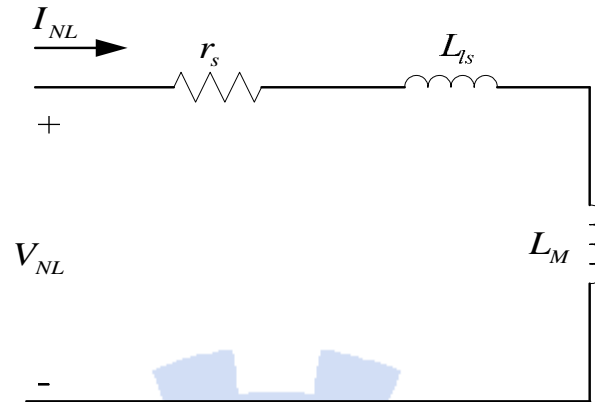


圖 5.10 無載試驗之等效電路圖

由圖 5.9 接線圖可得：

$$\text{總消耗功率： } P_{NL} = P_1 + P_2 \quad (5.20)$$

$$\text{相電流： } I_{NL} = \left[\frac{I_a + I_b + I_c}{3} \right] \quad (5.21)$$

$$\text{相電壓： } V_{NL} = \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (5.22)$$

$$\text{功率因數： } \cos \phi = \frac{P_{NL}}{3 \cdot V_{NL} \cdot I_{NL}} \quad (5.23)$$

$$\text{總阻抗： } Z_{NL} = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} \quad (5.24)$$

將上述所求得參數代入圖 5.10，可以獲得如下：

$$\text{總阻抗： } Z_{NL} = R_{NL} + jX_{NL} \quad (5.25)$$

$$\text{定子電抗： } X_s = X_{NL} = \sqrt{Z_{NL}^2 - (Z_{NL} \cdot \cos \phi)^2} \quad (5.26)$$

$$\text{定子電感： } L_s = L_{NL} = \frac{X_{NL}}{2 \cdot \pi \cdot f_{NL}} \quad (5.27)$$

假設定子電感與轉子電感相等 ($L_s = L_r$)，經由公式(5.20)~(5.27)的計算即可以求得 L_s 及 L_r 的電感值。

另外一種量測方法也是應用於額定頻率、額定電流與考慮三相電壓是否平衡，試驗計算過程如下所示：

$$Z_{eq} = \frac{V_a}{I_a} \quad (5.28)$$

$$R_{eq} = \frac{P_a}{I_a^2} \quad (5.29)$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (5.30)$$

$$L_s = L_{ls} + L_M = \frac{X_{eq}}{\omega} \quad (5.31)$$

其中：

輸入電壓、量測電流與功率均使用有效值進行參數運算

$$I_{a(rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_a^2(t) dt}$$

$$V_{a(rms)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_a^2(t) dt}$$

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t) \cdot I_a(t) dt$$

經由上述公式(5.28)~(5.31)運算求得定子電感與轉子電感

由於感應馬達中存在摩擦係數所以會有些損失產生，以致無載試驗時假設滑差率很小近似於零是會產生量測的誤差，所以在不忽略滑差率狀況下，利用感應馬達等效 T 型電路如圖 5.1 去求互感量。由圖 5.1 可知定子電阻、定子漏電感、轉子電阻、轉子漏電感和滑差率分別可由直流試驗、堵轉試驗與磁場速度與轉子速度求得，所以計算如下：

$$P_{av} = V_1(t) \cdot I_1(t) \quad (5.32)$$

$$S = V_1(rms) \cdot I_1(rms) \quad (5.33)$$

$$\frac{P_{av}}{S} = \cos \theta \quad (5.34)$$

其中：

$$\text{實部 } V_1 = V_1(rms) \cdot \cos \theta$$

$$\text{虛部 } V_1 = V_1(rms) \cdot \sin \theta$$

$$\text{實部 } I_1 = I_1(rms)$$

$$\text{虛部 } I_1 = 0$$

$$V_m = V_1 - I_1 \cdot (r_s + j\omega L_{ls}) \quad (5.35)$$

$$I_2 = \frac{V_m}{\frac{r_r}{s_p} + j\omega L_{lr}} \quad (5.36)$$

$$I_m = I_1 - I_2 \quad (5.37)$$

$$\frac{I_m}{V_m} = Y = \frac{1}{r_c} + \frac{1}{j\omega L_M} \quad (5.38)$$

$$L_M = \frac{\omega L_M}{\omega} \quad (5.39)$$

由 5.32 式至 5.39 式可以算出感應馬達互感量，則再由堵轉試驗所得到定子漏電感相加可以得到定子電感量，同時也假設定子電感和轉子電感值是相同。