

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

向量控制感應馬達之快速效率最佳化技術研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2213-E-002-134-

執行期間：93 年 08 月 01 日至 94 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學電機工程學系暨研究所

計畫主持人：劉志文

計畫參與人員：張天浩,何俊賢,李忠樹,成易達

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 9 月 15 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

☒ 成果報告

☐ 期中進度報告

向量控制感應馬達之快速效率最佳化技術之研究

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2213-E-002-134-

執行期間：93年 8月 1日至 94年 7月 31日

計畫主持人：劉志文

計畫參與人員：張天浩、何俊賢

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年 ☐ 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學電機系

中 華 民 國 九 十 四 年 九 月 五 日

行政院國家科學委員會
九十三年度專題研究計畫成果報告

數位訊號處理器為基礎之感應電動機最小輸入功率控制
DSP based Minimum Input Power Control of Induction Motors

計畫編號：NSC 93-2213-E-002-134-

執行期間：93年 8月 1日至 94年 7月 31日

計畫主持人：劉志文 國立台灣大學電機工程研究所

計畫參與人員：張天浩、何俊賢等

摘要

本計畫報告旨在要以 DSP TMS320LF2407A 為基礎實現感應電動機最小輸入功率控制系統，採用間接向量控制方式，藉由量測變頻器直流匯流排電壓及電流計算功率；最小輸入功率控制方法為損失模式控制加上搜尋控制組合而成的混合控制方式，先利用損失模式估測出搜尋控制所需的激磁電流起始值，在降低激磁電流的同時也量測匯流排電壓及電流做功率計算，直到量測的功率有向上的趨勢時，搜尋動作將停止，即搜尋到感應電動機的最佳工作點。此控制方式的優點為簡單、易實現及有較佳的收斂時間，再配合上電壓空間向量波寬調變技術，使切換損失達到最小。從實作結果來看，本計畫所提 DSP 為基礎感應電動機之最小輸入功率控制的有效，惟控制效果仍有改善空間。

關鍵字：損失模式，搜尋控制，電壓空間向量波寬調變

Abstract

The induction motor (IM) is a high-efficiency machine when working close to its rated operating point. However at torques and/or speeds far from the rated values the efficiency is greatly reduced. This thesis presents a simple and useful techniques for the minimum input power method of the indirect vector-controlled induction motor drives. The minimum input power method is named Hybrid Technique which combines Loss Model Control (LMC) and Search Control (SC) method. We use the LMC approach to obtain the initial value of the flux and subsequently adjust it by the Search Control method. The hybrid technique is simple, easily realizable, and offer fast convergence. The inverter switching method is Space Vector PWM which makes the lower harmonic losses. Experimental results show the effectiveness of the proposed technique. However, there is room for improvement.

Key words: Loss Model Control, Search Control, Space Vector PWM

一、緒論

現今有超過 50% 電能消耗均來自馬達使用，而這些消耗的能源中又有 50% 以上來自感應電動機。由於感應電動機的便宜、堅固耐用及維護費低等優點加上固態元件技術進步而取代了直流馬達；在高動態響應場合會使用高效率永磁馬達驅動器 (Permanent Magnet Motor Drives) 或直流無刷馬達驅動器 (Brushless DC Motor Drives) 來取代感應電機驅動器，但其意味著價格昂貴，且其應用在馬達速度控制場合不多並不實用。基於以上

因素感應電動機遂成為現今市場主流[1]。

一般而言，感應電動機在低於額定負載運轉時，若激磁依然維持在額定值，則其運轉效率會明顯降低。主要原因是感應電動機的電流須同時產生磁場與轉矩，而這兩個電流都會影響轉矩的大小，以此為出發點不論負載為何，均可藉由調整激磁電流使電動機處於最佳運轉點與高動態響應。所以不論是以變頻器 (Inverter) 或向量控制驅動的感應電動機，希望能以最簡單方式達到感應電動機最小輸入功率控制的目的[2-3]。

至目前為止關於感應電動機最佳效率控制的技術，其主要的技術大概可分成以下三類：a. 損失模式控制，主要是在控制器內建一馬達損失的模式或已知的最小損失所對應之激磁電流方程式、轉子磁通方程式或滑差方程式等作為最佳效率控制法則，並藉著量測馬達電壓、電流與其他物理量以計算此損失，然後改變馬達激磁、轉子磁通或滑差量以達最佳效率控制目的[4]。b. 功因控制，當馬達在定速時，不論其負載為何，最佳效率點的功因也是定值。也就是說只要知道最佳效率點的功因與轉速之間的函數關係，通常量測量為馬達的電壓與電流，之後經由計算求得馬達功因回授量，藉著最佳功因命令與功因回授並控制激磁使馬達維持在最佳效率的狀態下運轉[5]。c. 搜尋控制，藉由尋找輸入功率的最小值為其控制目標，回授量為馬達的功率，控制法則使用最小輸入功率為最佳效率點的條件，反覆搜尋使輸入功率最小的馬達激磁電流，以達最佳效率控制[6-7]。而本計畫所採用的最小輸入功率控制方法為損失模式控制加上搜尋控制組合而成的混合控制方式，先利用損失模式估測出搜尋控制所需的激磁電流起始值，在降低激磁電流的同時也量測匯流排電壓及電流做功率計算，直到量測的功率有向上的趨勢時，搜尋動作將停止，即搜尋到感應電動機的最佳工作點。由於最小輸入功率控制的基礎是建立在速度控制上故不再詳談速度控制方法，以下將對最小輸入功率控制原理、時序規劃、模擬結果及實驗結果做說明。

二、最小輸入功率控制原理

(a) 損失模式理論推導

三相定子電壓與轉子電壓方程式利用參考座標軸轉換為兩軸模式，則在同步旋轉參考座標軸下轉換為(1)~(2)式[8]。

$$R_s i_{dqs} + L_s p i_{dqs} + j\omega_e L_s i_{dqs} + L_m p i_{dqr} + j\omega_e L_m i_{dqr} = v_{dqs} \quad (1)$$

$$R_r i_{dqr} + L_r p i_{dqr} + j(\omega_e - \omega_r) L_r i_{dqr} + L_m p i_{dqs} + j(\omega_e - \omega_r) L_m i_{dqs} = 0 \quad (2)$$

其中 v_{dqs} 為輸入定子電壓， $v_{dqs} = v_{ds} + jv_{qs}$

i_{dqs} ， i_{dqr} 分別為定子與轉子電流， $i_{dq} = i_d + ji_q$

R_s ， R_r ， L_s ， L_r ， L_m 為感應機電氣參數

$p = d/dt$ 為微分運算子

而三相感應電動機之電磁轉矩在同步旋轉座標的表示式為(3)式。

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (3)$$

其中 P 為感應機的極數

由(1)及(2)式為基礎，考慮鐵心損失可畫出電動機 d-q 軸等效電路，如圖1與2所示。圖中 v_{dls} 、 v_{dlr} 、 v_{qls} 及 v_{qlr} 均為穩態電壓而 R_c 為定子鐵損、 L_{ls} 定子漏電感、 L_{lr} 轉子漏電感、 R_{RC} 為轉子鐵損及 R_R 為轉子電阻。

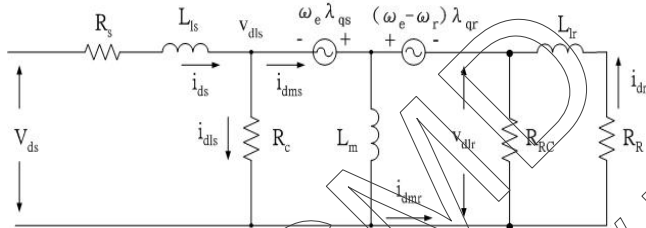


圖1 d軸等效電路模型

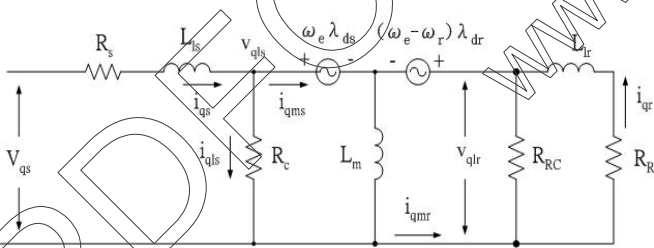


圖2 q軸等效電路模型

由於在同步旋轉參考座標軸之下的訊號可以直流流量分析且不須考慮相位差的問題，故以下皆在同步旋轉參考座標軸下進行轉子磁通導向向量控制之原理說明。為簡化推導過程，有以下的假設條件：

➤ 實際上漏感磁通遠小於互感磁通，可忽略定子及轉

子漏感 L_{ls} 及 L_{lr} 。

➤ 轉子鐵損(R_{RC})與轉子電阻(R_R)可合併成為新轉子電阻 R_r 即 $R_r = R_{RC} // R_R$ 。

➤ 感應電動機的參數均視為常數，且忽略磁飽合及溫昇效應。

則此時 q 軸的磁通為：

$$\lambda_{qr} = L_m (i_{qms} + i_{qmr}) \quad (4)$$

考慮穩態的時候，如果轉子磁通都要落在 d 軸上，則 λ_{qr} 需為零，代入(4)式及整理後可得：

$$i_{qms} = -i_{qmr} \quad (5)$$

由於 λ_{qr} 為零，d 軸電路中之速度電壓為零。因 q 軸電路處於穩態，則跨在 L_{md} 兩端和 L_{mq} 兩端的穩態電壓為零，即 $v_{dls} = v_{dlr} = 0$ ，故

d 軸定子電流為

$$i_{dms} = i_{ds} \quad (6)$$

d 軸鐵損穩態電流為零

$$i_{dls} = i_{dmr} = 0 \quad (7)$$

由第一個假設條件可知

$$\lambda_{ds} = \lambda_{dr} = L_m (i_{dms} + i_{dmr}) \quad (8)$$

將(6)及(7)式代入(8)式中

$$\lambda_{ds} = \lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (9)$$

由公式(5)-(9)可再簡化圖1、2為圖3、4，在同步旋轉參考座標軸下 d-q 軸穩態等效電路模型。

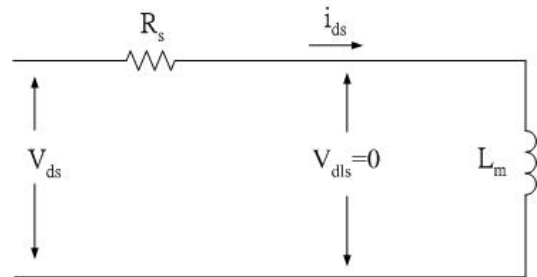


圖3 d軸穩態等效電路模型

根據克希荷夫電壓定律，由圖4等效電路模型中可知

$$(\omega_e - \omega_r) L_m i_{ds} = R_r i_{qms} \quad (10)$$

簡化(10)式可得(11)公式

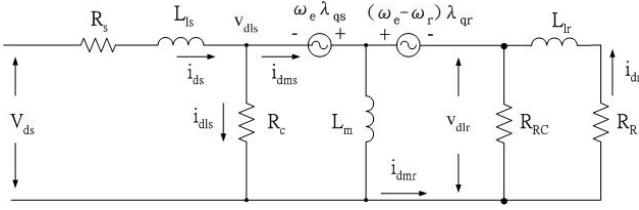


圖4 q軸穩態等效電路模型

$$\omega_e = \frac{R_r i_{qms}}{L_m i_{ds}} + \omega_r \quad (11)$$

其中 $\frac{R_r i_{qms}}{L_m i_{ds}} = \omega_{sl}$ 稱為滑差角頻率

圖2中依據節點電流法可求得：

$$i_{qms} = i_{qs} - \frac{\omega_e L_m i_{ds}}{R_c} \quad (12)$$

將(11)式代入(12)中並整理後可得

$$i_{qms} = \left(\frac{R_c}{R_c + R_r} \right) i_{qs} - \left(\frac{L_m \omega_r}{R_c + R_r} \right) i_{ds} \quad (13)$$

有以上的公式之後，即可以 i_{ds} 、 i_{qs} 來計算感應電動機的銅損、鐵損與馬達轉矩。

定子銅損：

$$P_{cus} = R_s (i_{qs}^2 + i_{ds}^2) \quad (14)$$

鐵損：

$$P_{fe} = R_c (i_{qs} - i_{qms})^2 \quad (15)$$

轉子銅損：

$$P_{cur} = R_r i_{qr}^2 \quad (16)$$

由(14)、(15)及(16)式可計算出感應電動機的總損失： $P_t = P_{cus} + P_{fe} + P_{cur}$

$$P_t = \left(R_s + \frac{R_c R_r}{R_c + R_r} \right) i_{qs}^2 + \left(R_s + \frac{L_m^2 \omega_r^2}{R_c + R_r} \right) i_{ds}^2$$

$$P_t = R_q i_{qs}^2 + R_{d(\omega)} i_{ds}^2 \quad (17)$$

$$\text{式中 } R_q = R_s + \frac{R_c R_r}{R_c + R_r}, \quad R_{d(\omega)} = R_s + \frac{L_m^2 \omega_r^2}{R_c + R_r}$$

損失最小化的演算法：

想要感應電動機效率為最大，就必需先獲得馬達銅損與鐵損的平衡或是d軸損失與q軸損失的平衡，所以由

(17)中可知當 $R_q i_{qs}^2 = R_{d(\omega)} i_{ds}^2$ 時，馬達效率為最大。

$$\text{即 } \left(R_s + \frac{R_c R_r}{R_c + R_r} \right) i_{qs}^2 = \left(R_s + \frac{L_m^2 \omega_r^2}{R_c + R_r} \right) i_{ds}^2, \text{ 化簡後可得：}$$

$$i_{ds} = K_{\min} |i_{qs}| \quad (18)$$

$$\text{式中 } K_{\min} = \sqrt{\frac{R_s (R_c + R_r) + R_c R_r}{R_s (R_c + R_r) + L_m^2 \omega_r^2}} \quad (19)$$

(b) 搜尋控制理論

搜尋控制為根據輸入功率而改變控制變數大小，而此控制變數即激磁電流，搜尋控制開始條件會假設磁通電流為額定電流大小(1 pu)，在總時間T秒內每次以一小步階往所設定最小磁通電流限制點下降，其斜坡搜尋的斜率為 $(1 - i_{\min})/T$ ，另外假設小步階時間為 T_{STEP} ，則其磁通電流每次下降的大小為(20)式所示。其收斂速度的快慢取決於 T_{STEP} 步階的大小，若 T_{STEP} 設太大將無法收斂到實際最佳條件，可能還會造成不穩定的情況發生。此控制的方法非常簡單，當 T_{STEP} 夠小時，可使轉矩漣波降至最低。

$$I_{ds}(k) = (1 - i_{\min}) * T_{\text{step}} / T \quad (20)$$

最小輸入功率控制方法為(a)損失模式控制加上(b)搜尋控制組合而成的混合控制方式，先利用損失模式估測出搜尋控制所需的激磁電流起始值，在降低激磁電流的同時也量測匯流排電壓及電流做功率計算，直到量測的功率有向上的趨勢時，搜尋動作將停止，即搜尋到感應電動機的最佳工作點。其計算的流程圖如圖5所示。

圖6表示整個DSP程式設計的流程，最左邊為主程式部分，在空迴圈等待計時器2(GP TIMER2)欠位中斷，中斷發生後隨即執行中斷服務程式 (ISR)，即中斷週期為 $50 \mu\text{S}$ ，在中斷服務程式中計算包含電流回授訊號、速度計算、最佳磁通電流命令控制法則、電流控制器及電壓空間向量的PWM訊號設定，之後便返回主程式中的空迴圈等待下一次的中斷發生。其中速度計算週期設為 $30 * 50 \mu\text{S} = 1.5 \text{ ms}$ 。

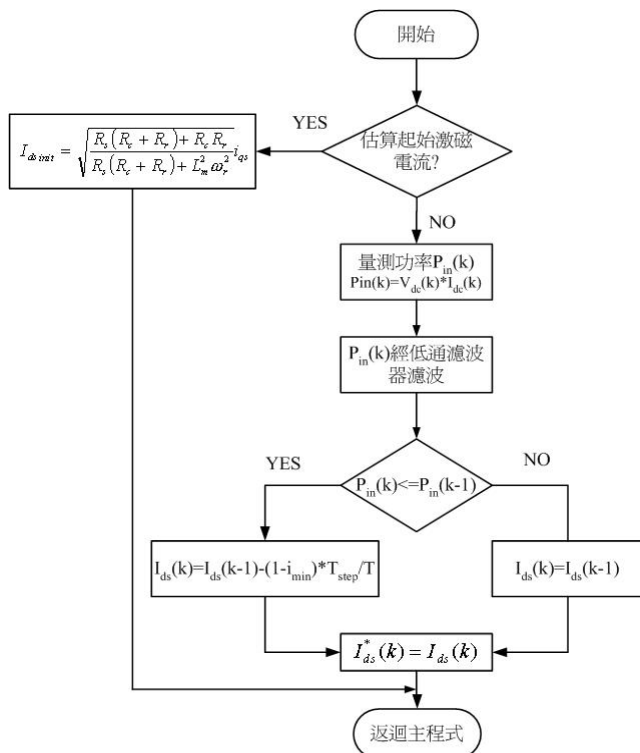


圖5 混合控制方式之最小輸入功率控制演算法流程圖

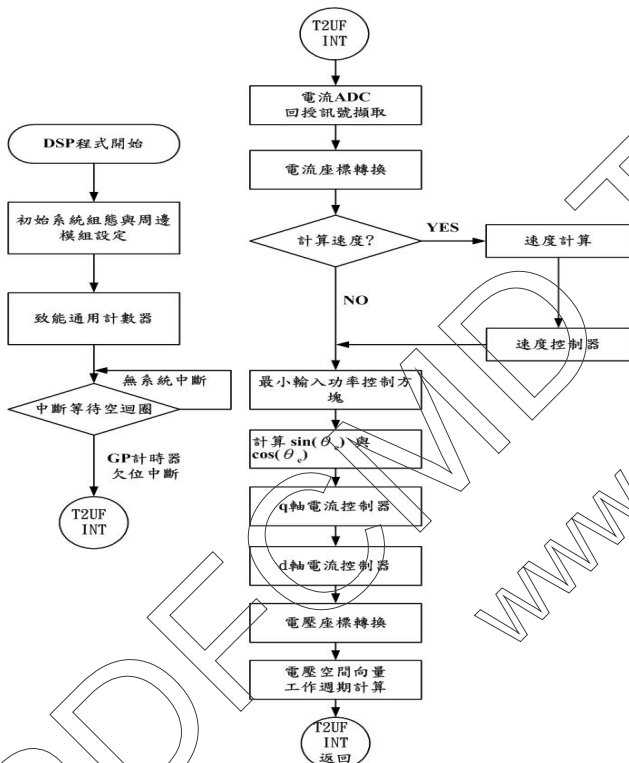


圖6 DSP程式流程圖

三. 最小輸入功率控制架構

圖7為感應電動機最小輸入功率控制架構圖。馬達的參數列於附錄中。感應電動機由寧茂公司生產的變頻器供給電壓空間向量波寬調變切換電壓，最左方的六個隔離開電晶體的功能與整流器(RECTIFIER)相同，而變頻器

切換信號的來源由數位信號處理器DSP來提供。LOAD方塊為馬達負載為電磁制動器由外加直流電源電壓來加載，在不加電源的情況下為無載，若外加電壓愈高負載則愈大。感應電動機最小輸入功率控制架構圖中的MIN. I. P. CONTROL方塊為最小輸入功率演算法的核心部分，藉由DSP中ADC模組將變頻器直流匯流排直流電壓與電流轉成數位信號，計算輸入功率為最小輸入功率的判斷條件，其計算方式如(21)式所示

$$P_{DC} = V_{DC} * I_{DC} \quad (21)$$

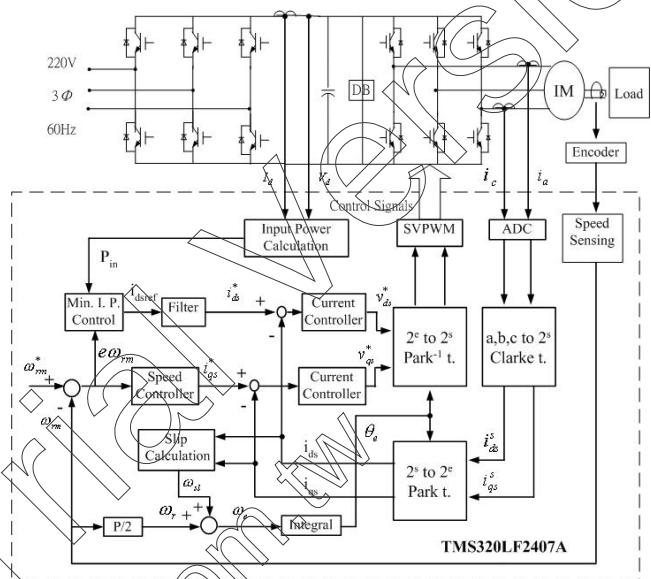


圖7 感應電動機最小輸入功率控制架構圖

四、模擬與實測結果

圖8為混合方式來控制輸入功率模擬結果，速度命令設為800rpm，負載0.5 N·m，最小輸入功率控制前的磁通電流設為額定電流1.8 A，在時間於4秒時啟動最小輸入功率控制，其中(a)為速度命令、(b)為速度回授命令、(c)、(d)為磁通電流命令、(e)為轉子磁通、(f)為速度命令誤差值、(g)為轉矩電流、(h)為電磁轉矩及(i)為輸入功率。由圖(c)可知最小輸入功率控制前的磁通電流為1.8 A，控制後降為0.9 A，圖(i)可知最小輸入功率控制前的輸入功率為78.09 W，控制後的輸入功率降為59.12 W，兩者相差18.97 W即功率下降了24.3%。圖9為感應電動機最小輸入功率控制實驗結果，速度命令設為800rpm，無載，最小輸入功率控制啟動的時間為第10秒，(b)圖為速度、(c)圖為磁通電流命令，由圖(d)及(e)可看出磁通流降低，轉矩電流微微上昇，(f)圖為輸入功率曲線，但此曲線不易觀察出功率變化，若將輸入功率經低通濾波器後可得較平緩的曲線，即可發現功率有降低的趨勢。

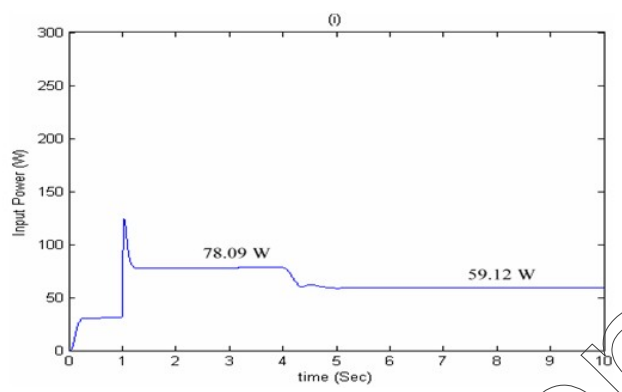
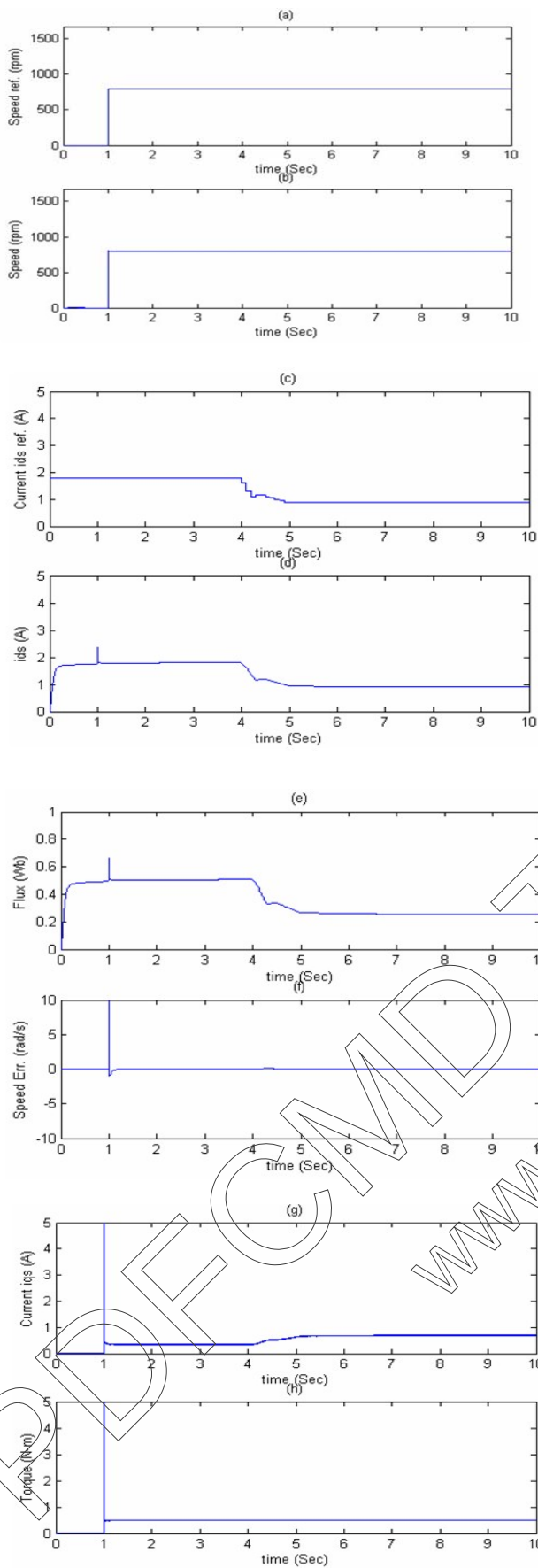
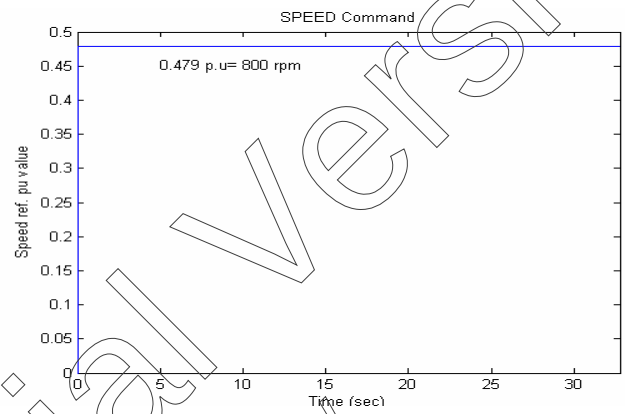
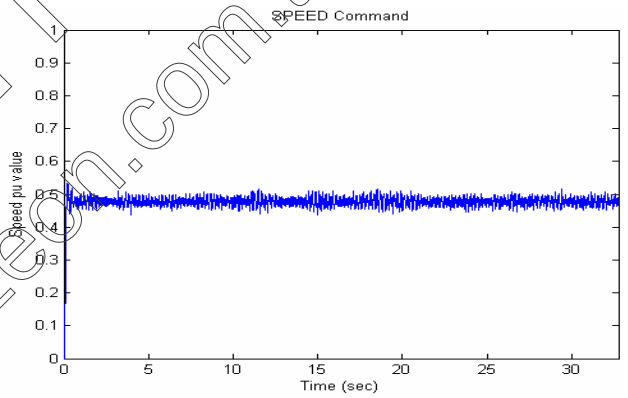


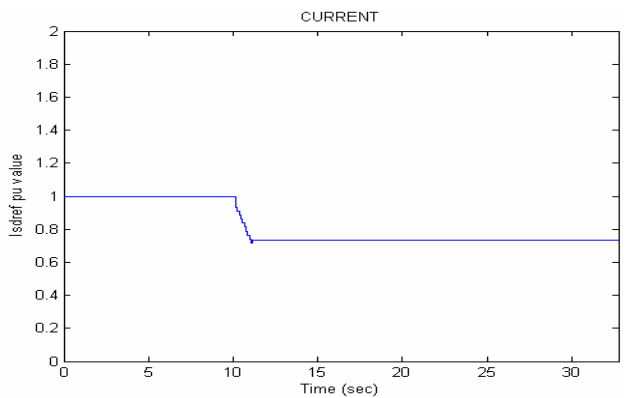
圖8 800rpm時之混合方式模擬結果圖



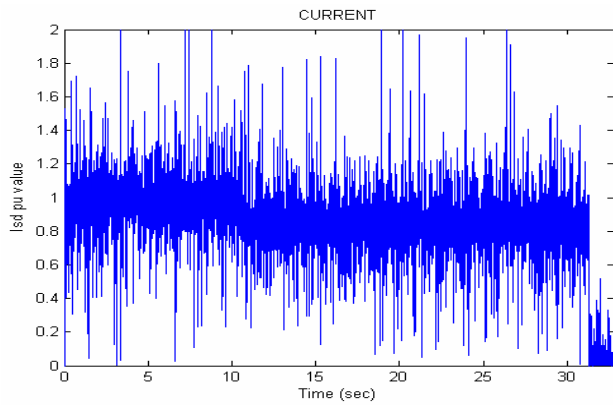
(a) 速度命令



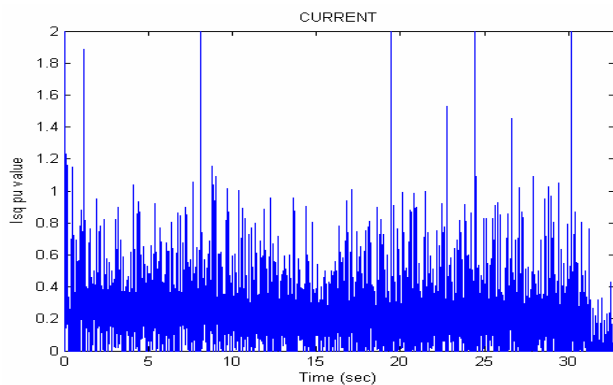
(b) 速度



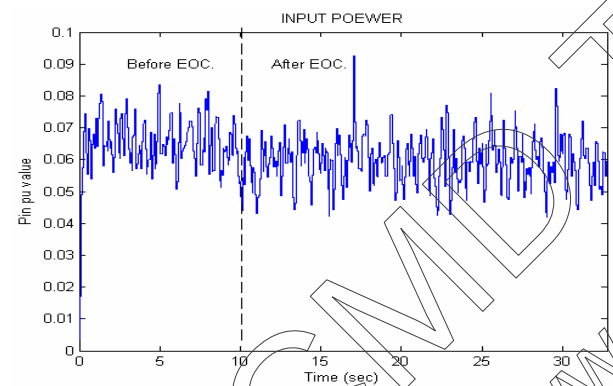
(c) 磁通電流命令



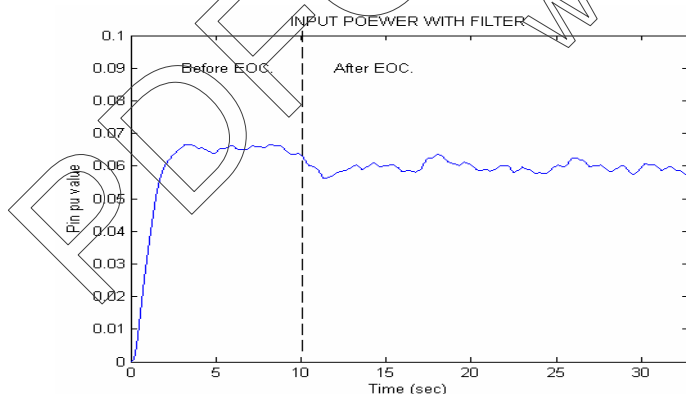
(d) 磁通電流



(e) 轉矩電流



(f) 輸入功率



(g) 濾波後之輸入功率

圖 9 感應電動機最小輸入功率控制實驗結果

五、結論

本計畫的目的在於探討感應電動機的最小輸入功率控制，並嘗試發展一套簡單且實用的最小輸入功率系統，藉由調整電動機的激磁電流，再配合最佳的 PI 控制器及電壓空間向量波寬調變策略而實現系統的最小輸入功率，其中另一優點為所研發的演算法將實現於 DSP(TMS320LF2407A)控制器中，最後研究馬達最小輸入功率控制方法、以模擬及實驗的方法驗證理論結果。從實作結果來看，本計畫所提 DSP 為基礎感應電動機之最小輸入功率控制的確有效，惟控制效果仍有改善空間。

附錄

感應電動機的參數：

三相 Y 接 4 極，1/2 hp，額定頻率：60Hz，額定電壓：220 V，額定電流：1.8 A，額定速度：1670 rpm，滿載滑差率：0.066，額定轉矩：2.12 N·m，定子電阻：6.8513 Ω ，定子漏感：0.025319 H，定子電感：0.307411 H，轉子電阻：4.3466 Ω ，鐵損等效電阻：1913.04 Ω ，轉子漏感：0.013924 H，轉子電感：0.295944 H，磁化電感：0.28202 H，慣量常數：0.005 Kg·m²

參考文獻

- [1] Abrahamsen, F., Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., Grabowski, P.Z., Thøgersen, P., "On the Energy Optimized Control of Standard and High-Efficiency Induction Motors in CT and HVAC Applications," Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume:34, Issue:4, July-Aug., 1998.
- [2] 白景文，"感應馬達之最佳效率控制，" 碩士論文，私立淡江大學，1999 年七月。
- [3] 林達傑及楊勝明，"感應馬達最效率控制法則分析，" 中華民國第二十三屆電力工程研討會論文集，2002。
- [4] G. O. Garcia, I. C. M. Luis, R. M. Stephan, and E. H. Watanabe, "An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 41, pp. 533-539, Oct, 1994.
- [5] H. R. Anderson, and J. K. Pedersen, "Low Cost Energy Optimized Control Strategy for a Variable Speed Three-Phase Induction Motor," Proceedings of the 1996 IEEE-PESC, vol.1, pp.920-924.
- [6] Wei Li, and Zongyuan Mao, "Efficient Control of an Induction Motor Based on the Decoupling Variable Structure Strategy," Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, vol. 4, pp. 2845-2848, June 2002.
- [7] C. -M. Liaw, C. -T. Pan and Y. C. Chen, "Design and Implementation of an Adaptive Controller for Current-Fed Induction Motor," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.35, Aug. 1988, pp.393-401.
- [8] 劉昌煥，"交流電動控制-向量控制與直接轉矩控制原理，" 東華書局，2001 年 9 月。

計畫成果自評

本計畫之目的要以 DSP TMS320LF2407A 為基礎實現感應電動機最小輸入功率控制系統，採用間接向量

控制方式，藉由量測變頻器直流匯流排電壓及電流計算功率，結果如預期：從實作結果來看本計畫所提 DSP 為基礎感應電動機之最小輸入功率控制的有效，可達到控制方式為簡單、易實現及有較佳的收斂時間的目的，再配合上電壓空間向量波寬調變技術，使切換損失達到最小，此計畫證明應用上有高度的實用上。

PDFCND Trial Version
www.zeon.com.tw