

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

電力電子推動小組：高性能交流馬達驅動器之分析，控制，量測與製作

子計畫五：無感測器向量控制電機之弱磁與最佳效率控制 (III)

Field Weakening Control and Optimal Control of Sensorless Induction Motor Drives

計畫編號：NSC 88-2213-E-032-020

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：楊勝明 副教授 淡江大學機械系

一、中文摘要

由於一般變速控制的感應馬達通常並非在全負載的狀態下運轉，因此若磁通可隨著負載而調整以減少馬達的損失，將可使馬達隨時在最佳效率點運作，以更有效利用電力資源。本計畫提出一以馬達之功率因數為控制變數，適合於向量控制感應馬達最佳效率控制方法，此方法最大的特色是簡單、容易實現，利用控制馬達的功因使馬達不論在任何負載下，激磁電流隨著負載改變而使馬達維持在最佳效率的狀態下運轉。除了理論分析與電腦模擬之外，並實作一馬達效率控制系統來驗證理論分析的結果。

關鍵詞：最佳效率、向量控制、感應馬達、功率因數

Abstract - Since the vector controlled drive for variable speed applications are usually not running with full-load, therefore if the rotor flux can be adjusted according to the load torque then the motor operating losses can be reduced. The purpose of this project is to develop a practical optimal efficiency control scheme that is suitable for the vector controlled drives in variable speed applications. The proposed control scheme utilized the power factor as the control variable to modify the motor magnetizing current in order to maintain a minimum loss operation. In addition to theoretical analysis and computer simulations, various experiments were also performed to verify the proposed control scheme.

Keywords: optimal efficiency, vector control, induction motor, power factor

二、緣由與目的

感應馬達的最佳效率控制不論是在學術界或產業界都一直受到重視。這些研究大部分以馬達在靜態運轉為主，在不考慮驅動器的損失下，不論是以變頻器或向量控制電機為驅動裝置，都是藉由調整馬達的激磁以達到最佳效率的目的。而這些控制方法約分成以下三類：損失模式控制[1-2]，搜尋控制[3-4]，以及功因控制[5-7]。功因控制方法是最簡單，也是最早被提出來改善馬達在變速驅動時的效率的方法[5]。主要的原理是當馬達在定速時，若馬達參數不變，則不論負載為何，最佳效率點的功因是定值。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，便可藉著量測功因並控制激磁使馬達維持在最佳效率的狀態下運轉。此方法在執行時並不需太多的計算，功因也可很容易由馬達壓和電流計算得到。

本計畫研究一以馬達之功率因數為控制變數的最佳效率控制方法，除了理論分析與設計控制法則外，並以電腦模擬控制器的性能，並實作一控制系統來驗證理論分析的結果。

三、預定完成之工作

預期完成的工作項目如下：

- 1) 馬達三相功率量測系統與資料擷取界面之製作
- 2) 最佳效率控制法則的設計與分析
- 3) 最佳效率控制的模擬分析
- 4) 最佳效率控制程式之撰寫
- 5) 最佳效率控制之性能之分析與測試

6) 馬達參數對最佳效率控制之影響的分析與量測

四、研究方法與結果

感應馬達在向量控制，即轉子磁場導向，下的運轉損失可以電流表示成以下形式：

$$P = \frac{3}{2} [(i_{qf}^{\circ 2} + i_{df}^{\circ 2}) R_r + \frac{L_m^2}{L_r} i_{qf}^{\circ 2} R_r + (k_h \omega_e + k_o \omega_e^2) (\frac{L_r^2 L_m^2}{L_r^2}) i_{qf}^{\circ 2} + L_m^2 i_{df}^{\circ 2}] \quad (1)$$

式中的 R_r 與 R_r 分別為定子與轉子電阻， ω_e 是電流頻率， K_h 與 K_o 分別是磁滯與渦電流損失係數。又經由理論推導，在轉子磁場導向及穩態運轉時，馬達的損失為最低時的轉子磁通與負載力矩關係可整理成以下之形式：

$$\lambda_{df}^{\circ*} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} T_e^{0.5} \quad (2)$$

上式中之 $\lambda_{df}^{\circ*}$ 為負載等於 T_e 時的最佳效率轉子磁通， K_1 、 K_2 值可參考附錄一。又因為馬達之功率因數可表示為：

$$PF = \cos\theta = \frac{V_{qf}^{\circ} i_{qf}^{\circ} + V_{df}^{\circ} i_{df}^{\circ}}{\sqrt{V_{qf}^{\circ 2} + V_{df}^{\circ 2}} \sqrt{i_{qf}^{\circ 2} + i_{df}^{\circ 2}}} \quad (3)$$

若將馬達的電壓與電流以式(2)之轉子磁通及 T_e 表示，並將結果帶入(3)，則可得到一不包含 T_e 之功因方程式，此結果可參考附錄及 [8]。因為此式中僅有馬達的參數與轉速 ω_r ，而與負載無關，也就是說在固定轉速下最佳效率點之功因為一定值。因此若預先計算不同轉速時的最佳效率功因，並以函數或 Table 的形式儲存於控制程式內，則可以很容易地實現最佳效率控制。而這也是本計畫採用的方法。

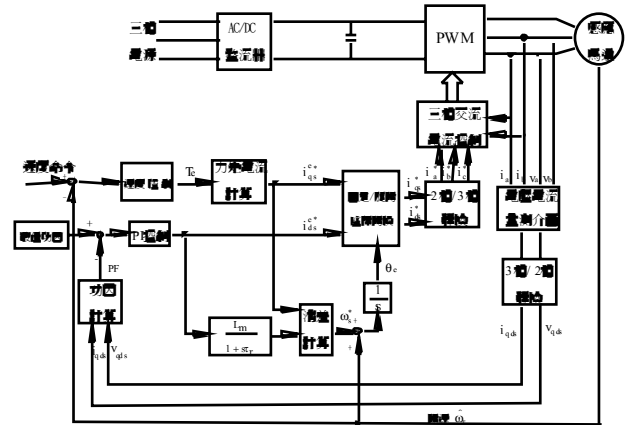
實驗系統

實驗系統主要是利用 TMS320C50 之 DSP 控制板進行控制程式的撰寫與測試。圖一是實現控制理論時的最佳效率控制架構方塊圖。最佳效率功因已預先算出並以函數形式儲存於控制程式中，控制程式利用量測的馬達回授電壓與電流計算出功因的大小，兩者的誤差量再經過一 PI 控制器後用來修正激磁電流。重要的實驗結果與討論如下。

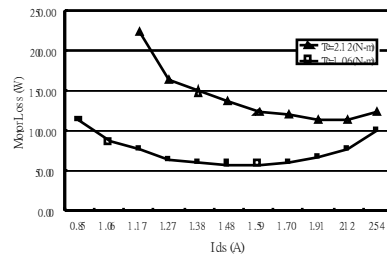
馬達損失與功率因數之特性曲線

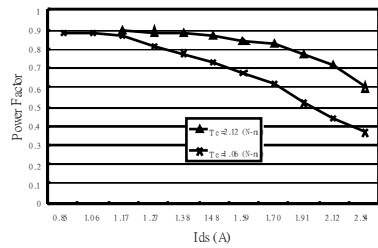
此實驗主要目的是驗證馬達的損失與功因之間的關係。典型的結果如圖二所示，當轉速為 1200 rpm，負載力矩分別為 0.2 及 0.5 pu 時，改變激磁電流所得到運轉損失與功因。由損失曲線可大約看出最佳效率點之位置，但當負載較小時此點的位置較平坦，因此若以搜尋法尋找此點時控制器較易發生震盪現象。反之觀察功因曲線在最佳效率點附近則相當明顯，因此以功因為控制參數時控制器較容易穩定。又此圖雖只顯示兩個負載力矩的結果，但由實驗知，不同負載下的最佳效率功因皆大約在 0.7 左右。同時，其它轉速的實驗結果亦相同，即在相同轉速下的最佳效率點之功因約為定值。實驗得到最佳效率功因與轉速之間的關係如圖三所示。

以上實驗結果雖可驗證前節描述的控制方法，但有一點必須注意的就是因為激磁電流不論在此實驗或是下面的實驗都有相當大的變化，所以控制器必需包含磁心飽和的補償，否則結果會有誤差。因此以下的實驗所用到的最佳效率功因計算與向量控制，皆將互感視為一激磁電流的函數以補償磁心飽和現象。

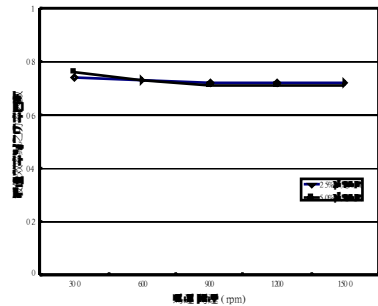


圖一、控制系統架構方塊圖

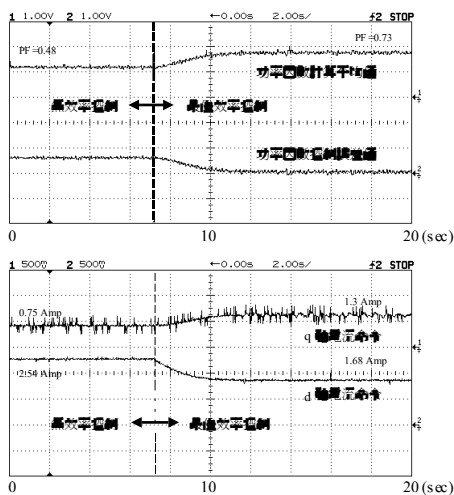




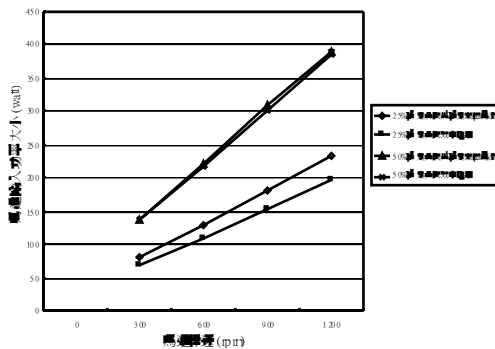
圖二、轉速為 1200 rpm 時激磁電流分別與運轉損失和功率因數之關係



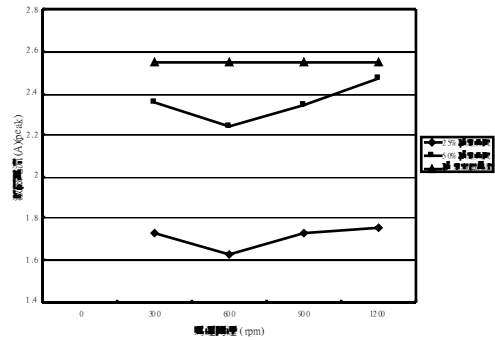
圖三、不同轉速下的最佳效率點功因



圖四、轉速為 1200 rpm，負載為 0.25 pu 時，功因與功因誤差(上圖)，q-d 軸電流之暫態響應(下圖)



圖五、不同轉速下，最佳效率控制/固定激磁電流控制下，馬達轉速與輸入功率之關係比較



圖六、不同轉速下，最佳效率控制/固定激磁電流控制下，馬達轉速與激磁電流之關係比較

最佳效率控制

為了驗證前節提出的效率控制方法，實驗前已預先算出最佳效率功因函數並儲存於控制程式中作為控制命令。首先說明的實驗是在馬達運轉之初將激磁電流設定在其額定值，等待馬達穩定運轉後，再開始最佳效率控制；然後觀察量測的功因、功因誤差量、及 q-d 軸電流之暫態響應，結果如圖四所示。此結果顯示出控制系統可以很平順地調節功因至其命令值，且在到達命令值之後亦不會有震盪的現象。

又待控制系統穩定後，利用三相電力計分別量測在最佳效率控制時，以及當激磁電流設定在其額定值時，兩種控制方法的馬達的輸入功率，比較此二結果可得知最佳效率控制法則對馬達轉效率改善的程度，同時亦可與先前損失實驗中馬達電流與輸入功率數據比較，以驗證最佳效率控制方法的正確性。結果如圖五所示，以 900 rpm 時為例，負載為 50% 額定力矩時，使用最佳效率控制與固定激磁電流控制比較可提昇效率約 3% 左右；但在 25% 額定力矩的時候，經由效率控制所提昇的比例約為 17%。圖六則顯示在最佳效率控制時的轉速與激磁電流之比較。由此結果可看出最佳效率控制時之激磁電流與負載成正比，且當負載相同其值並不會隨轉速產生大變化，而大約維持在一定值。

五、結論與成果

綜合以上的理論分析與實驗驗證結果，結論如下：

- 1) 以馬達之功因為控制變數的最佳效率控制法則為一穩定、準確性高、且容易實現的方法。

- 2) 由實驗結果知此控制法則在低負載時可以明顯地提昇馬達的運轉效率。以轉速為 900 rpm 時為例，負載為 25% 額定力矩時經由效率控制可提昇約 17% 的運轉效率。
- 3) 實驗亦顯示磁心飽和對控制系統會產生很大的影響。因此最佳效率功因計算以及向量控制時都必須考慮互感的變化以降低誤差。
- 4) 又電流控制器的頻寬若太低會使向量控制產生錯誤，因而導致最佳效率控制的誤差。所以選用電流控制器時必須注意其穩態誤差必須愈小愈好。
- 5) 因為此控制方法需預先算出最佳效率功因函數並儲存於控制程式中作為控制命令，而計算此函數時需用到馬達的參數，包含 K_e 與 K_h ，因此如何正確的測得這些參數為後續研究的重要課題之一。

這一年度計畫的成果如下：

- 1) 設計與製作一馬達三相功率量測系統與資料擷取界面。
- 2) 建立感應馬達的損失模式，並設計、分析一以馬達之功率因數為控制變數的最佳效率控制法則。
- 3) 分析馬達參數對效率控制法則的影響，並針對影響最大的參數，即互感，提出補償方法。
- 4) 製作控制系統軟硬體，並以模擬和實驗驗證最佳效率控制法則。由實驗結果知此控制法則在低負載時可以明顯地提昇馬達的運轉效率。

六、參考文獻

- [1] S.K. Sul and M.H. Park, "A Novel Technique for Optimal Efficiency Control of Motor Drive", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.1, pp. 70-76,

Mar. 1987.

- [2] G.O. Garcia, J.C. Mendes Luis, R.M. Stephan, and E.H. Watanabe, "An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive", IEEE Trans. on IE, Vol. 41, No.5, pp. 533-539, Oct., 1994.
- [3] Iordanis Kioskeridis and Nikos Margaris, "Loss Minimization in Induction Motor Adjustable-Speed Drives", IEEE Trans. on IE, Vol. 43, No. 1, pp.226-231, February 1996.
- [4] Gilberto C. D. Sousa, Bimal K. Bose, and John G. Cleland, "Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization Control of an Indirect Vector-Controller Induction Motor Drive", IEEE Trans. on IE, Vol. 42, No. 2, pp.192-198, April 1995.
- [5] F. Nola, "Power Factor Controller - An Energy Saver", Conference Record of the 1980 IEEE IAS Annual Meeting, pp.194-198, Oct. 1980.
- [6] Henrik R. Anderson, John K. Pedersen, "On the Energy Optimized Control of Standard and High-Efficiency Induction Motors in CT and HVAC Applications", Conference Record of the 1997 IEEE IAS Annual Meeting, pp.621-628., Oct. 1997.
- [7] Henrik R. Anderson, John 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.
- [8] 白景文，"感應馬達之最佳效率控制"，淡江大學碩士論文，1999 年 7 月。

附錄一：

$$K_1 = \frac{16}{3P^2} (r_r + K_e r_r^2 + \frac{L_r^2}{L_m^2} r_s) \quad , \quad K_2 = 3 \left(\frac{r_s}{L_m^2} + K_h \omega_r + K_e \omega_r^2 \right)$$

$$\text{PF} = \frac{\frac{4\omega_r}{3p} \left(1 + \sigma \frac{L_s L_r}{L_m^2}\right) + \frac{16}{9p^2} \left[r_s \frac{L_r^2}{L_m^2} + r_r \left(1 + \frac{L_s L_r}{L_m^2}\right) \right] \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \frac{r_s}{L_m^2} \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} - \frac{4}{3p} \sigma \frac{L_s L_r}{L_m^2} \left(\frac{4}{3p} r_r \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \omega_r \right)}{\sqrt{\left[\omega_r \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \left(\frac{L_m}{L_r} + \sigma \frac{L_s}{L_m} \right) + \frac{4}{3p} \left[\frac{L_r}{L_m} r_s + r_r \left(\frac{L_m}{L_r} + \sigma \frac{L_s}{L_m} \right) \right] \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \right]^2} + \left[-\frac{r_s}{L_m} \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} + \frac{4}{3p} \sigma \frac{L_s L_r}{L_m} \left(\frac{4}{3p} r_r \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \omega_r \right) \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \right]^2 \sqrt{\left(\frac{4}{3p} \frac{L_r}{L_m} \right)^2 \frac{K_2}{K_1} + \left(\frac{1}{L_m} \right)^2 \frac{K_1}{K_2}}$$