

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以模糊邏輯為基礎之切換式磁阻馬達強健速度控制

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2213-E-168-006-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：崑山科技大學電機工程系

計畫主持人：謝聰烈

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 6 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以模糊邏輯為基礎之切換式磁阻馬達強健速度控制

Robust speed control of switched reluctance motor drives via fuzzy logic

計畫編號：NSC91-2213-E-168-006

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：謝聰烈 崑山科技大學電機系

計畫參與人員：洪振傑 崑山科技大學電機系

一、中文摘要

本計畫提出具有模糊邏輯補償及具有模糊邏輯修正積分比例控制法則作為切換式磁阻馬達速度控制，其模糊邏輯法則為根據速度誤差值及其時間微分作為系統參數變動及負載干擾量多寡為依據，進而決定加入反饋迴路加權能量大小及積分比例控制器參數修正值，藉以降低系統響應超越量及減少上升時間，使驅動系統得到最佳暫態響應及負載干擾之消除。而驅動控制系統之實現，係利用數位訊號微處理器（TMS320C240）與電腦分工的特性，建立即時監控及人機操作系統，作為驗證本控制法則的正確性及可行性。

關鍵詞：模糊邏輯補償積分比例控制、模糊邏輯修正積分比例控制、切換式磁阻馬達、數位訊號處理器。

Abstract

A robust speed controller for a switched reluctance (SR) motor drive is proposed. IP structure controller with fuzzy logic compensation and with fuzzy logic modified controller parameters are employed to reduce the effects of motor and mechanical parameter variations and provide a good performance even under large load torque disturbance. A fuzzy logic inference is adopted to determine the value of the weight based on the velocity error and its derivative. In the proposed methods, both the overshoot and the rise time in tracking can be reduced. The designed SR motor controllers are implemented by a digital signal processor (TMS320C240) while the robustness of tracking performance subject to parameter uncertainties and load disturbance.

Keywords: IP structure controller with fuzzy logic compensation, IP structure

controller with fuzzy logic modified controller parameters, switched reluctance motor, digital signal processor.

二、緣由與目的

切換式磁阻馬達雖結構簡單，但難以做精密的定位控制，一般皆作為動力源用，由於其有轉矩漣波及噪音關係，因此在高性能工業應用驅動系統並未能廣泛被接受，為使運轉更平滑以減低噪音與轉矩漣波，並在變動負載下增加可調速範圍，則有賴於良好的控制設計。因雙凸結構特性雖輸出轉矩產生能力較大，但會隨著磁阻馬達極數多寡而影響輸出轉矩漣波大小，加上其轉矩產生是與激磁電流平方及電感對轉軸變化率成正比，而電感又隨激磁電流大小變化，所以轉矩有很高之非線性特性。文獻[1-8]中針對轉矩性能改善提出電力轉換、換向調整、直流昇壓、磁通向量控制、模糊邏輯法則及類神經控制法則等策略。文獻[9]根據速度誤差大小，利用模糊法則來調整 PI 參數值，藉以降低系統響應超越量，但對於負載干擾下，轉矩漣波亦隨之加大。文獻[10]針對切換式磁阻馬達參數變動及負載干擾，提出前饋式兩個自由度並結合一個強健控制器作速度控制，以得到較佳速度響應及負載干擾消除，但若負載干擾觀察器電流迴授量容易受到負載干擾過大而造成控制器輸出電流飽和，系統響應超越量將增加。

基於上述情形，為使切換式磁阻馬達驅動系統在系統參數變動及負載干擾情形下，得到較佳速度響應及負載干擾消除能力，因此本文利用積分比例控制(IP)的優點[11]加上模糊邏輯法則作切換式磁阻馬達速度控制，其模糊法則乃根據系統速度誤差值及其時間微分作為系統參數變動及負載干擾量多寡為依據，加入反饋迴路加權能量及修正 IP 控制器比例參數值，此兩種控制法則經由模糊邏輯修正控制器，其最大優點為降低系統超越量，使系統得到最佳暫態響應及負載干擾消除。

三、切換式磁阻馬達之數學模式

對於 m 相開關式磁阻馬達，當不計磁滯、渦流及繞組間互感時，其系統動態微分方程式由電路、機械及機電耦合方程式三部組成，其相電壓及電流方程式可表示為：

$$v(t) = Ri(t) + \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (1)$$

其中， $v(t)$ 為相繞組端電壓， $i(t)$ 為相繞組之電流， R 為每相之繞線電阻， $\lambda(t)$ 為每相之磁通鏈。由馬達電磁轉矩和負載轉矩作用下，其扭矩方程式為：

$$T_e(i, \theta) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (2)$$

其中， $T_e(i, \theta)$ 為電磁扭矩， J 為等效之轉動慣量， D 為黏性摩擦係數， T_L 為負載扭矩。若忽略磁路之飽和效應，且假設磁通鏈與電流於瞬間轉子角位置 θ 間的關係為線性，且其斜率為瞬時電感 L ，可得電磁轉矩方程式為：

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3)$$

實際應用上鐵蕊會有飽和現象，所以在飽和區轉矩不再與電流平方成正比，但仍會隨電流之增加而增加，此時上式需加修正，藉由伴隨能量或儲存場能對 θ 之導函數以推導出轉矩方程式。

四、切換式磁阻馬達之驅動

依照轉距公式(3)要產生切換式磁阻馬達轉矩，必須要在馬達電感斜率正值時給予該相一電流值，如此才能產生轉動轉矩或反轉制動，當電感斜率為零時給予相電流，則會造成定子與轉子間互相吸住而堵轉。切換式磁阻馬達電感，若不考慮馬達磁路飽和之影響，且假設相電感與相電流大小無關，則理想電感是隨轉子與定子位置角不同而變化(如圖 1 所示)。也因此可利用轉子與定子的位置來判斷各相的導通時間，又因相電路為電感性所以有電流上升時間問題。所以導通角就必需提前，所以我們在定子上使用兩個感測器，來估測轉子與定子之關係，且將感測器至於提前一角度，如此依據此感測信號就可以避免導通角提前而產生負轉矩。

本文使用 8/6 之四相磁阻馬達，所用驅動電路為四相之驅動結構，每相使用一個功率晶體與飛輪二極體組成如圖 2 所示，此種驅動電路在每一相導通區間都有提供電感釋能之路徑，其導通方式及換相過程可以發現截止的線圈能量，可以幫助導通的線圈電流建立，對於能源的節省及效率的提高有良好效果。驅動信號則由數位訊號處理器 TMS320C240 針對感測器之導通信號來對各功率電晶體驅動。

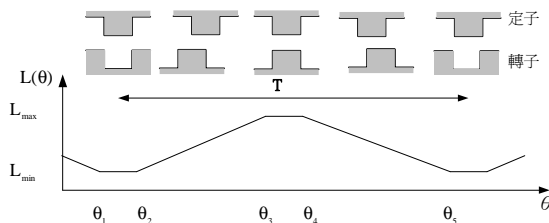


圖 1：轉子位置電感曲線圖

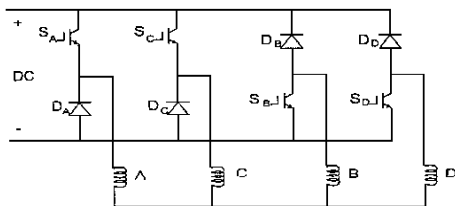


圖 2：四相之功率級驅動架構圖

五、切換式磁阻馬達強健速度控制

本計劃提出具有模糊邏輯補償及具有模糊邏輯修正積分比例控制，兩種以模糊邏輯為基礎之切換式磁阻馬達強健速度控制法，作為切換式磁阻馬達強健速度控制器之架構如圖 3 及圖 4 所示。其兩種控制器架構皆利用模糊邏輯來估測系統參數變動及負載干擾量。

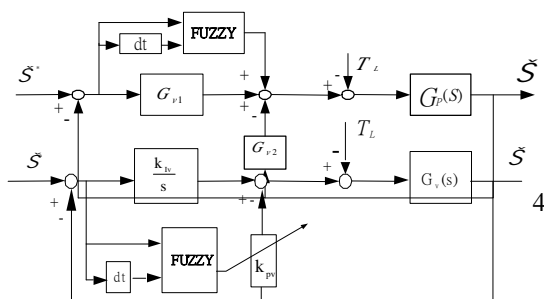


圖 3 具模糊邏輯補償控制架構圖

圖 4 具模糊邏輯修正積分比例控制架構圖

1. 模糊邏輯

由於切換式磁阻馬達電感隨馬達旋轉角度而變化，加上負載干擾，故依據原本馬達系統參數所設計之 IP 控制器，無法提供即時補償之功能，大大減低系統之強健性能。有鑑於此本文使用模糊控制器來提供 IP 控制架構無法提供即時補償或修正之功能，使控制器執行及設計較為簡單，且使系統達到強健性能要求。

本文所使用模糊控制器輸入為速度誤差及其變化量，兩個輸入量根據系統要求而對其歸屬函數之定義有所不同，誤差輸入(E)是為系統命令值與實際輸出值誤差量，而速度誤差變化量(ΔE)實際物理量為速度曲線之斜率可預估系統變化，因此依照系統速度誤差及其誤差變化量可判斷出其系統狀態，進而決定反饋及修正控制量。本文採用PD形式模糊控制法，使控制器能快速反應系統變動，其速度誤差及其變化量論域皆取五個歸屬函數等級，分別為pb(positive big)、ps(positive small)、zo(zero)、nb(negative big)、ns(negative small)，其正規化歸屬函數圖如圖5、6所示。

根據兩個模糊輸入論域狀態，且為了將速度誤差及其變化量控制到同時驅近於零，並配合輸出論域(模糊法則結論部)也取五個歸屬函數如圖7所示，則定出表1所示25條模糊法則。在決定模糊法則後使用加權平均重心法將模糊法則解模糊化，由兩個模糊輸入推出之各隸屬函數之歸屬度，依照每一條模糊法則將兩輸入之隸屬函數值取小後，此取小後之值定義為W又稱為適合度，乘上每一條法則之結論部重心大小，此重心我們定義為B如圖7所示，將所有乘積全部加起來除以所有適合度W之和，即可得到模糊控制器輸出值為

$$U_F = \sum \frac{W \times B}{W} \quad (4)$$

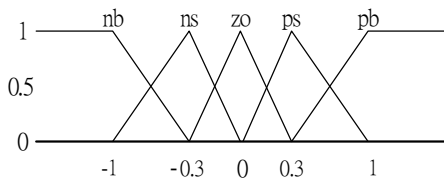


圖 5 正規化之誤差論域歸屬函數圖

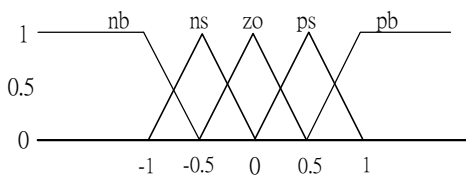


圖 6 正規化之誤差變化量論域歸屬函數圖

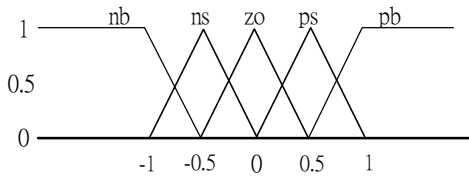


圖 7 正規化之輸出電流結論部(B)歸屬函數圖

表1: 模糊法則表

de \ e	Pb	Ps	Zo	Ns	Nb
Pb	Nb	Nb	Nb	Ns	Ns
Ps	Nb	Ns	Nb	Zo	Nb
No	Nb	Ns	Zo	Ps	Pb
Ns	Ns	Zo	Ps	Ps	Pb
Nb	Ns	Ps	Pb	Pb	Pb

2. 積分比例數值控制器設計控制

在電流迴路控制系統中，適當選擇 IP 控制器中的參數值，可得到最佳的電流響應，由於電流迴路系統頻寬設計遠大於馬達機械系統之頻寬，故結合馬達的機械方程式(2)式，可將電流迴路增益視為 1，則切換式磁阻馬達電流至速度的無載轉移函數(nominal model)可近似為一階系統

$$G_v(s) = \frac{b_v}{s + a_v} = \frac{2197.5}{s + 2.71} \quad (5)$$

若設計馬達驅動系統穩定時間和阻尼比規格分別為 $t_s = 0.3$ 秒及 $g = 1$ ，則可得 IP 速度控制器積分比例參數值。

3. 具有模糊邏輯補償控制

模糊邏輯輸出補償電流量其目的為補償 IP 控制器對負載干擾及系統參數變動時不足之電流量，所以配合模糊邏輯輸出對應出一實際補償電流量且，其補償電流範圍設定在 -0.8~0.8 間，則將 IP 控制器輸出電流命令值和模糊之補償電流值相加後為整體控制器輸出，以此推算出之值作為切換式磁阻馬達強健速度控制器之輸出量。

4. 具有模糊邏輯修正積分比例控制

模糊邏輯修正 IP 控制法則，乃利用模糊邏輯即時調整 IP 速度控制器中的比例參數 k_{pv} 值，使得 IP 控制器性能在消除干擾最佳化與系統超越量最小化間作即時調整。即系統瞬時加入一負載干擾時，模糊邏輯修正控制器能調整系統根軌跡極點位置，配合 IP 控制法則優點，適時調整控制器輸出電流大小，提升系統響應速度，且當系統輸出接近目標值時，模糊邏輯調整控制器使系統超越量減至最小之狀態。而修正 IP 控制器 k_{pv} 參數值，即等於調整速系統阻尼比 ζ 及系統頻寬 (BW) 值如(6)及(7)式

$$\zeta = \frac{a_v + b_v k_{pv}}{2\sqrt{b_v k_{Iv}}} \quad (6)$$

$$BW = \sqrt{b_v k_{Iv}} [(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{\zeta^4 + 4\zeta^2 + 2}]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

有關 k_{pv} 值變化對 IP 控制系統極點位置如圖 8 所示，其模糊邏輯修正範圍在 -0.001~0.001 之間，則系統 k_{pv} 最大值為 0.00925 及最小值為 0.00725。圖中 A1 與 A2 為系統 k_{pv} 最小值時兩個極點位置，B1 和 B2 則為 k_{pv} 最大值時兩個極點位置。故可知藉由模糊邏輯修正 IP 控制器 k_{pv} 值，可使得 IP 系統響應速度能及時

調整至最佳響應狀態。

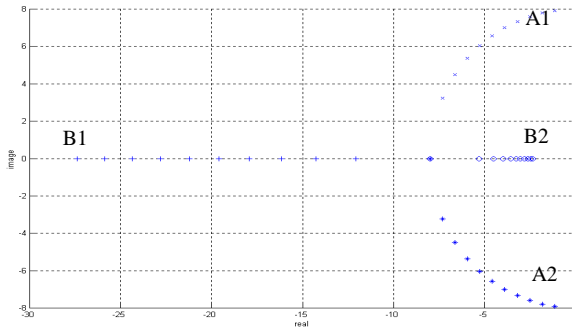


圖 8 IP 控制器參數 k_{pv} 值與系統根之關係圖

六、系統製作與實驗結果

本文所使用之全數位切換式磁阻馬達可調速系統架構如圖 9 所示，系統架構大致可分為硬體及軟體即時控制兩大部分，系統之硬體架構是由切換式磁阻馬達 (8/6 極 750W 220V)、功率級、數位訊號處理器控制系統模組、介面電路等所組成，其中功率級由功率晶體與飛輪二極體組成，介面電路包含數位訊號處理器換相邏輯與脈波寬度調變訊號之邏輯電路，其即時控制包含換相邏輯估測、電流迴路控制、速度迴路控制，而電流迴路及速度路控制器取樣時間分別為 $100 \mu s$ 及 $500 \mu s$ 。

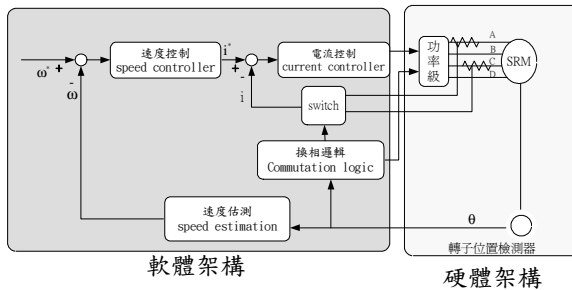


圖 9 全數位切換式磁阻馬達可調速系統架構

1. 參數變動實驗

將切換式磁阻馬達連結一直流馬達負載變動量測系統，則系統轉動慣量約增加一倍，摩擦係數約增加三倍，實測驅動系統速度響應和控制器輸出電流命令如圖 10 所示。與 IP 控制比較，得知具有模糊邏輯補償控制及具模糊邏輯修正 IP 速度控制有較佳的暫態響應及微小的超越量。

2. 負載干擾測試

當驅動系統在 3 秒時加入滿載干擾量，系統響應如圖 12 所示，與 IP 控制比較，得知所設計兩種控制法則有良好的干擾消除能力。

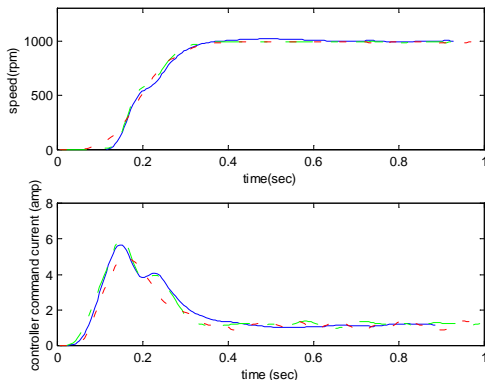


圖 10 三種控制速度響應圖('-' : IP 控制, '·-' : 具模糊邏輯補償 IP 控制, '·' : 具模糊邏輯修正

IP 控制，1000rpm)

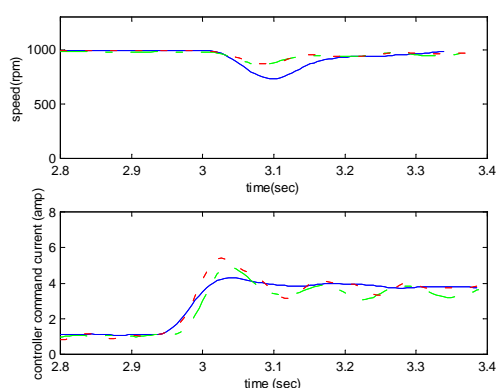


圖 11 三種控制負載干擾速度響應圖(‘-’:IP 控制，‘.’:模糊邏輯補償 IP 控制，‘.-’:具模糊邏輯修正 IP 控制，1000rpm 3 秒加全載)

七、結論

本文結合兩種控制器之架構，改善了積分比例控制器對於參數變動及容易受外部負載干擾的缺點，系統無論在加載、無載、或參數變動時都能有好的動態響應。此結構設計簡單，且實際使用訊號處理器執行時，由於無複雜之數學式所以大大減低程式之複雜度，由實驗結果說明所設計之以模糊邏輯為基礎加上 IP 控制之控制器能減少系統干擾及改善追蹤能力。

八、參考文獻

- [1] R. S. Wallace and D. G. Taylor, "A balanced commutator for switched reluctance motors to reduce torque ripple," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 7, pp. 617-626, 1992.
- [2] N. Matsui, N. Akao, and T. Wakino, "High-precision torque control of reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 27, pp. 902-907, 1991.
- [3] P. C. Kjaer, J.J. Gribble and T.J.E. Miller, "High-grade control of switched reluctance machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, pp. 1585-1593, 1997.
- [4] A. D. Cheok and P. H. Hoon "A new torque control method for switched reluctance motor drives," *IEEE Proceeding of IECON'2000*, vol. 1, pp. 387 -392, 2000.
- [5] Y. G. Dessouky, B. W. Williams and J. E. Fletcher, "A new novel power converter with voltage-boosting capacitors for a four-phase SRM drive," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 45 (5), pp. 815-823, 1998.
- [6] I. Husain and M. Ehsani, "Error analysis in indirect rotor position sensing of switched reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 41 (3), pp.301-307, 1994.
- [7] T. T. Borges, H. R. D. Azevedo, D. A. D. Andrade and A. C. S. Goncalves, "An application of fuzzy logic for reluctance motor drive," *IEEE Electric Machines and Drives Conference*, pp. TB1/10.1 -TB1/10.3, 1997.
- [8]D. S. Reay, T. C. Green and B. W. Williams, "Neural network used for torque ripple minimization of switched reluctance motor," *5th European conference on Power Electronics and Application*, vol. 6, Drives 2,IEE, EPE'Brighton, pp. 1-6, 1993.
- [9] S. K. Panda, X. M. Zhu and P. K. Dash, "Fuzzy gain scheduled PI speed controller for switched reluctance motor drive," *IEEE Proceeding of IECON'97*, vol. 3, pp. 989 -994, 1997.
- [10] K. I. Hwu and C. M. liaw, "Robust quantitative speed control of a switched reluctance motor drive," *IEE, Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 148, no. 4, 2001.

- [11] P. K. Nandam and P. C. Sen, "Analog and digital speed control of DC drives using proportional-integral and integral- proportional control technique," IEEE Trans. on Inds. Elec., vol. IE-34, no. 2, May, pp. 227-233, Nov. 1987.