

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

永磁同步馬達智慧型無感測位置控制技術之研究(1)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2213-E-009-144-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系

計畫主持人：鄒應嶼

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 21 日

永磁同步馬達智慧型無感測位置控制技術之研究 (1/3)

Research and Development of Intelligent Sensorless Position Control Technology for Permanent-Magnet Synchronous Motors (1/3)

計畫編號：NSC91-2213-E-009-144

執行期限：91/08/01 - 92/07/31

主持人：鄒應嶼 博士 國立交通大學電機與控制工程系 教授

一、中文摘要：(關鍵詞：永磁同步馬達、無感測位置控制、信號注入法、適應型換相相位補償、初始角自動偵測、DSP控制)

本計畫擬發展出一種智慧型的無感測位置控制方法，可應用於凸極式或非凸極式的永磁同步馬達。本階段研究重點為永磁同步馬達泛用型無感測控制技術之研究，發展一種在不知道馬達參數條件下的無感測換相技術，藉由反抗電動勢的換相與大小估計轉速。一般的反抗電動勢轉速估計法會受到反向二極體電流的干擾，同時在低轉速時，由於反抗電動勢也隨之降低，因此轉速估計的效果會變差。為了克服此一問題，本計畫將提出一種以訊號處理技術為基礎的信號注入鎖相迴路轉子位置估計方法，藉由轉子磁場的變化，偵測調變波之相角變化，藉此估計轉子位置。本研究以模擬與實驗進行分析與驗證，發展電腦模型與模擬方法，採用PSIM模擬軟體進行包含馬達、功率級與控制器的模擬與分析，並以實驗證實本研究所提出的適應型換相相位補償方法。

英文摘要：(keywords: integrated motor drive (IMD), permanent-magnet synchronous motor (PMSM), sensorless position control, signal-injection method, DSP control, adaptive commutation phase compensation, initial angle detection)

According to the rotor structure, the permanent-magnet synchronous motor (PMSM) can be classified as: salient pole and nonsalient pole. The development of sensorless control techniques for PMSM in applications to low-speed high-torque gas become an engineering challenge for motor control engineers. This research developed a new sensorless position estimation scheme with unknown motor parameters. The measured phase current and back emf will be used for the estimation of commutation signals. An adaptive commutation phase compensation scheme has been developed to eliminate voltage distortion induced by the reversed current through free-wheel diodes. A digital phase-locked loop technique has been developed to synchronize the commutation signals for rotor position control. Fixed-point realization of the sensorless estimation scheme will be studied. Computer simulation and DSP realization have been carried out to verify the proposed sensorless position estimation scheme.

二、計畫緣由與目的

無刷直流馬達通常需要藉由一個轉子絕對位置檢出器來偵測轉子磁場的位置，再藉由定子電流控制定子磁場使其與轉子磁場垂直，達到最佳的扭矩控制效果，最常使用的就是霍爾感測元件。但是在某些特別的應用場合，如冷凍壓縮機，此一回授元件不僅增加成本、易受撞擊，也難以承受惡劣的高溫環境。此外，在低轉速的操作情況時，由霍爾元件所到的轉速資訊相當有限，難以達到良好的速控效果。因此無刷直流馬達不論是否已使用霍爾元件，在不使用高解析度光電解碼器的前提下，如欲達到良好的速控效果，就必須發展無感測控制技術。

無刷直流馬達驅動技術的應用，可從兩個觀點來探討：一是採用具有位置回授元件的伺服控制技術，主要應用於需要快速的動態響應(數毫秒)、寬廣的速控範圍(1,000:1 至 10,000:1) 精密的轉速與定位控制的場合，如工具機主軸驅動器。另一則是不使用位置回授元件的無感測控制技術，主要應用於環境惡劣、低成本、但仍須具有快速的動態響應(數十毫秒)與寬廣的速控範圍(100:1)的場合，如壓縮機、電動車輛系統。

圖 1 所示是永磁同步馬達的構造示意圖，圖 2 是其轉子磁場的分佈圖。無刷直流馬達的轉子由永久磁鐵構成，根據轉子磁通的分佈，可分為：梯形與正弦波兩種。由於轉子磁通分佈的不同，無刷直流馬達的驅動方式也隨之而異，其轉速估測的方法也不同，因此發展出各種不同的無感測驅動技術[1]。本計畫主要針對永磁同步馬達，發展無感測驅動技術，並完成 sensorless drive 原型機之研製。

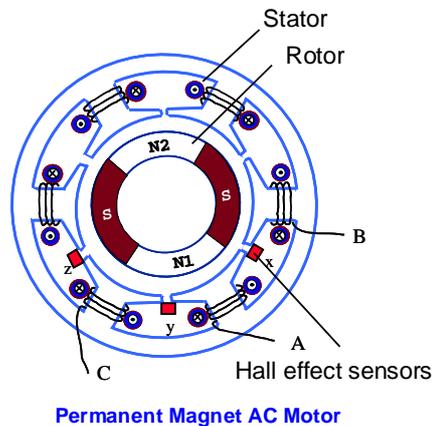


圖 1 永磁同步馬達的構造圖

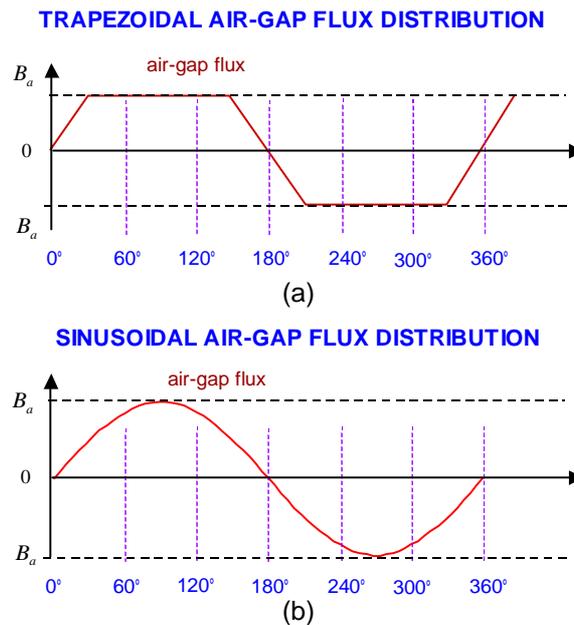


圖 2 永磁同步馬達的轉子磁場分佈圖(a)梯型波(b)正弦波

無感測驅動技術的主要關鍵在於能否精確且快速的估計馬達轉子的轉速，目前的轉速估測方法，大致可分為兩種：馬達參數模擬法與狀態估測法。馬達參數模擬法又可分為電壓模型(voltage model)與電流模型(current model)兩種。

不論何種估測方法，轉子轉速估測的準確性主要取決於下列三個前提：

1. 施於馬達電壓的確實數值
2. 量測馬達線電流的準確性
3. 轉速估測器中關鍵參數的準確性

在一個實際的驅動系統，往往因為量測誤差、參數不確定性、雜訊干擾、與電路的非線性等因素，影響了轉速估測的準確性。因此設計一個性能優越的無感測驅動器，不僅需要發展能夠抵抗雜訊干擾的強健性轉速估測法則，也必須具備良好的硬體架構與電路設計技巧，提高系統的訊號雜訊比。

無論是在有轉子位置回授或無的狀況下，無刷直流馬達控制的主要關鍵在於是否能有效的控制其瞬時扭矩(instantaneous torque)，而扭矩的控制則決定於定子電流平面分佈(stator current sheet distribution)與相對於轉子磁場向量相位的控制。

總結來說，無感測控制技術可概括分為三大類[2]-[14]：第一類是直接量測或估測一些與馬達轉速有關的參數，如反抗電動勢或是反抗電動勢的三次諧波，然而此類方法通常需要直接量測馬達的端電壓，故可能會產生一些電路的雜訊干擾，同時亦會降低整體系統的可靠度；此外，在低轉速與馬達靜止時，由於反抗電動勢的估測困難，再加上信號雜訊比較低，因此這一類的方法並無法適用在低轉速操作的情形下。

第二類的無感測控制技術是採用狀態觀測器的概念，即利用向量控制的理論來建立馬達的數學簡化模型，同時量測馬達的相電壓與相電流來得到馬達轉速與轉子磁極位置的資訊。然而由於狀態觀測器的響應與馬達參數有關，故此類方法最大的問題便是估測參數的準確性會隨著馬達的溫度變化與操作狀況而改變，為了避免這樣的問題，可以藉由線上參數鑑別與自動調整來修正狀態觀測器的變數，以得到較佳的估測準確性；此外，在低轉速操作與馬達靜止狀態下，此類方法同樣無法得到很好的效果，因為電壓電流量測時的信號雜訊比較低。

第三類的無感測控制技術是利用轉子的凸極性與磁飽和特性，利用高頻的激發訊號送至馬達定子線圈，並且藉由量測其電壓與電流的變化來得到馬達轉速與轉子磁極位置的資訊。通常是利用一些特殊的激發訊號，並且搭配適當的硬體檢測電路以及特殊的訊號處理技術才能得到有效的估測訊號；另外亦可利用一些特殊的脈寬調變方法，再藉由量測其訊號的諧波來估測轉子磁極位置。由於此類無感測控制方法所產生的高頻激發訊號與馬達轉速並沒有關係，故可利用在馬達低轉速與靜止操作的情況下，然而這些高頻激發訊號可能會造成一些馬達運作時的問題，例如扭矩輸出的波動與高頻諧波功率損失。

本研究主要目的在於展出一種智慧型的無感測位置控制(sensorless position control)方法，可應用於凸極式或非凸極式的永磁同步馬達。第一年著重於永磁同步馬達泛用型無感測控制技術之研究，第二年進行永磁同步馬達初始角自動偵測技術之研究，著重於 DSP 實現方法的研究，採用 32 位元的數位信號處理器 TMS320F28xx 進行無感測控制方法實現，並與模擬結果進行分析改善。第三年著重於智慧型無感測位置控制整合技術的發展，整合包含 PAM 功率級、DSP 控制器、無感測位置控制、訊號估計等軟硬體設計，實現一個智慧型無感測永磁同步馬達驅動器。

三、研究方法與成果

為了發展數位馬達控制技術，本研究建立了一個以 DSP 為基礎的數位馬達控制發展平台，其中包括一個以單晶片 DSP 為核心的數位控制板 PWM 功率板 PSIM-MATLAB 馬達控制整合模擬系統、PC Windows 監控軟體、以及馬達負載測試平台。本研究以此數位馬達控制發展平台為基礎發展有位置回授的閉迴路數位伺服控制技術，再發展無位置回授的無感測驅動技術，最後再發展具有具有參數自調功能的自調控制技術。

本階段研究重點在於研製一個適用於無刷同步馬達驅動器的低成本單晶片 DSP 控制板，並以此為基礎發展無刷同步馬達驅動器的數位電流控制器與扭矩控制器，根本的解決無刷同步馬達的瞬時扭矩控制問題。本計畫同時將針對無刷同步馬達在有電流回授與位置回授元件(Hall-effect sensor 或 encoder)的情況下，設計無刷同步馬達驅動器的數位速度迴路控制器，改善穩態與動態響應，發展 DSP 控制程式，並完成系統整合與測試。

目前已發展出應用於極低轉速的無感測控制技術主要可分為兩類：一類是以模型為基礎(model based)的轉子位置估計方法，另一類則是以信號注入(signal injection)為基礎的轉子位置估計方法。

圖 3 是永磁同步馬達無感測轉速控制系統方塊圖，主要問題在於如何在不藉由轉子回授信號的前提下，能達到良好的換相與轉速控制，甚至進一步的達到零轉速控制的目的。1985 年 Iizaka 與 Uzuhashi 等人即提出無刷直流馬達反抗電動勢端電壓量測法，利用端電壓的量測，估測反抗電動勢的零交越點，並配合一個時間延遲即可達到無感測換相控制[2]，其量測方法如圖 4 所示。

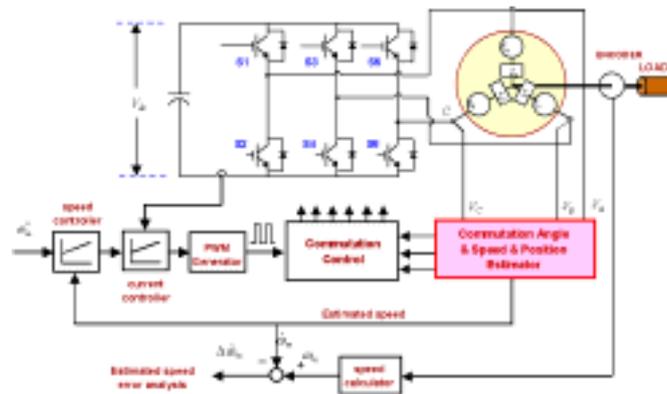


圖 3 永磁同步馬達無感測轉速控制系統方塊圖

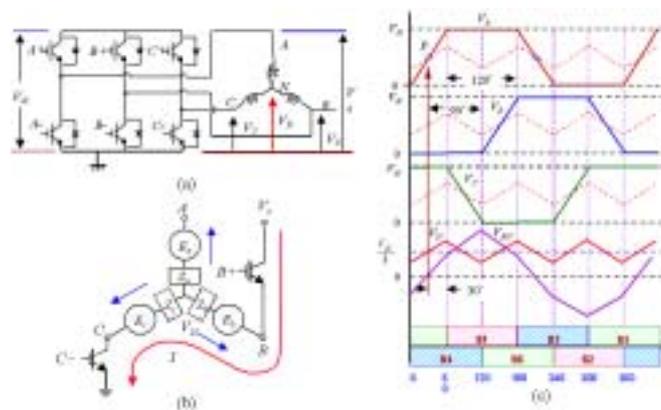


圖 4 反抗電動勢端電壓量測法

反抗電動勢端電壓量測法主要是藉由無刷直流馬達的未激發定子線圈，量測其感應電壓藉此估算轉子轉速與相位換相角度，由於反抗電動勢的零交越點可用來控制相位換相角，因此如何偵測反抗電動勢的零交越點即為無刷直流馬達無感測控制的重要關鍵。

在實際操作狀況時，由於馬達相電感對電流具有延遲效應，換相電流無法瞬時完成換相，因此造成換相電流漣波，圖 5 所示是換相扭矩漣波的產生機制，此扭矩漣波的大小正比於相電流，圖 6 是電腦模擬結果，由於此換相電流漣波是由於電感性負載所導致，因此不易以控制方法予以去除。有些研究提出以週期性補

償式電流方法消除穩態的漣波電流，但此一方法一方面會降低系統的頻寬，另一方面對瞬間負載干擾也可能造成過度反應，在實用性方面需進一步的解決這些問題。

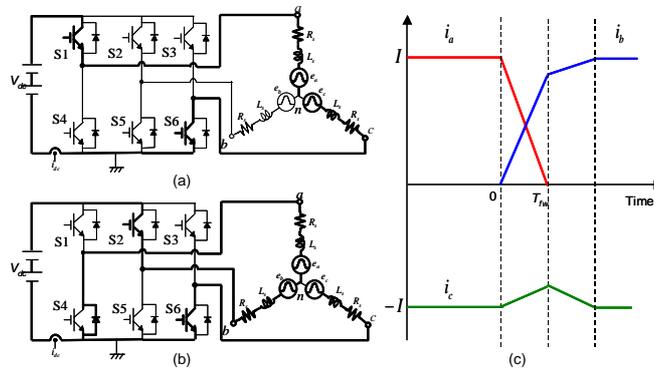


圖 5 換相扭矩漣波電流的產生

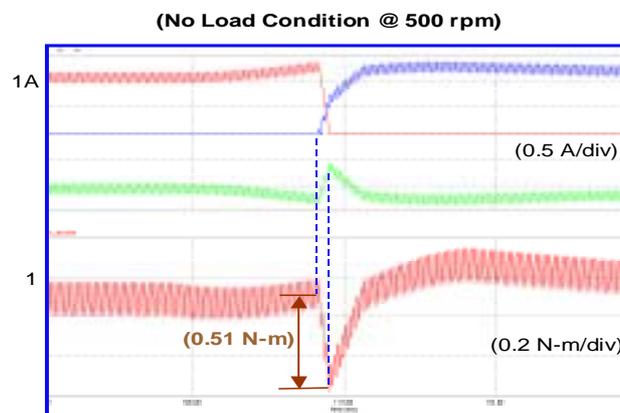


圖 6 換相扭矩漣波電流的模擬結果

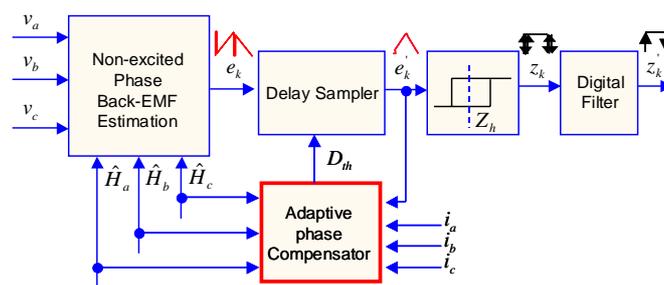


圖 7 新型梯型波無刷直流馬達無感測換相控制的方塊圖

無刷直流馬達的無感測換相控制，除了必須精確的偵測反抗電動勢的零交越點，也必須產生一個 30° 的相位移，才能正確的產生換相控制信號。參考文獻[3]提出一種數位式相位移器，此相位移器改善了之前所提到相位落後會與轉速有關的問題，是一個不受馬達轉速影響的相位移器，將之稱為「與頻率無關的相位移器」(frequency-independent phase shifter, FIPS)。但是這種方法，仍然會受到反抗

電動勢訊號干擾的影響。為了克服此一問題，本研究提出一種以訊號處理技術為基礎的信號注入鎖相迴路轉子位置估計方法，藉由轉子磁場的變化，偵測調變波之相角變化，藉此估計轉子位置。

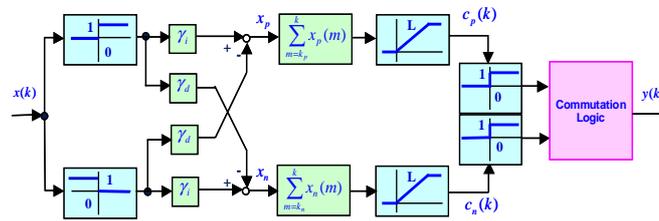


圖 8 新型適應型相位移補償器的方塊圖

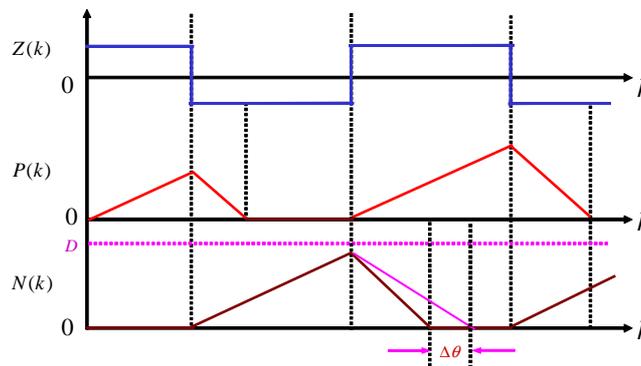


圖 9 適應型相位移補償器相位調整示意圖

圖 7 是本研究所提出的一種新型的無感測換相控制架構，此架構同樣是利用量測端電壓來偵測反抗電動勢的 ZCP，不同的是採用了一個改良 FIPS 的數位相位移器(modified-type digital frequency-independent phase shifter, MDFIPS), 主要是簡化了 FIPS 的換相條件，採用了兩個可獨立運作的計數器，此數位式相位移器不僅實現方式簡單，同時亦可應用在無刷直流馬達相位領先或弱後控制的方法上。

圖 8 所示是本研究提出的新型適應型相位移補償器的方塊圖，圖 9 是相位移補償器相位調整的示意圖，其中 $\Delta\theta$ 是位移補償角，圖 10 是數位式相位移補償器的相位誤差模擬結果，由圖中可看出適應型相位移補償器對換相信號修正所得到的改善。

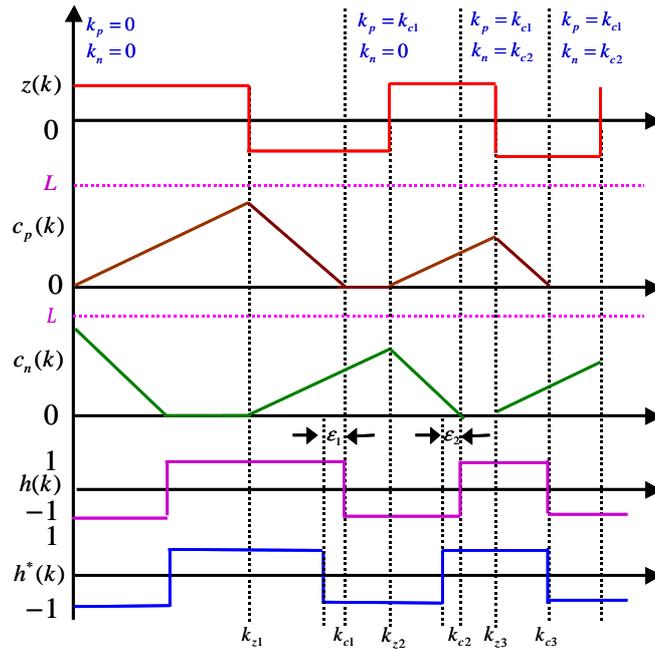


圖 10 數位式相位移補償器的相位誤差模擬結果

實驗驗證與結果分析

本計畫發展無刷同步馬達的無感測控制技術，採用單晶片 DSP 控制器，發展以軟體控制為基礎的無感測控制技術，研製完成一個單晶片 DSP 控制為基礎的無刷同步馬達無感測驅動器原型機。圖 11 是本研究所建立的無刷直流馬達無感測控制實驗系統，包含一個馬達、電磁煞車、驅動器、與電腦監控軟體，驅動器包含一個自行研製的 DSP 數位控制板，採用 TMS320F2407A 單晶片 DSP 數位控制器。實驗對象是一個額定功率 550W、額定轉速 3000 RPM 的無刷直流馬達。

圖 12(a)所示是反向二極體電流所造成的反抗電動勢干擾，由圖中可以看出梯型波無刷直流馬達無的反抗電動勢感量測會受到嚴重的雜干擾，未激發相的相電壓在零交越時會因為電晶體的盲時補償造成電壓震盪，在相電流的零交越時也會因二極體的換相延遲造成像電壓的干擾，此干擾情況在低速高扭矩的操作情況尤其嚴重，因此使得無刷直流馬達的低轉速控制操作範圍受到限制，圖 12(b)是經過本文提出適應型換相相位補償控制方法所得到的實驗結果，由圖中可以看出在相同的操作狀況下，換相信號得到了明顯的改善，在相同的干擾情況下，經由適應型換相相位補償器產生的換相信號幾乎不會受到干擾的影響。

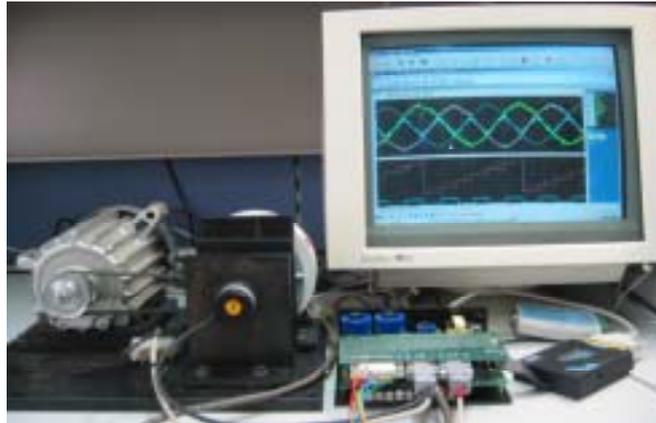
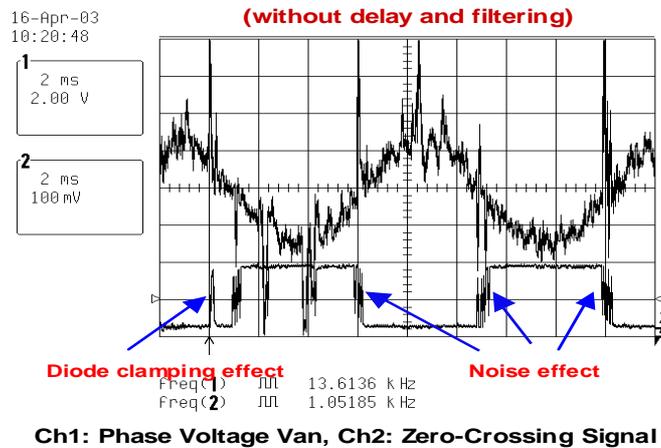
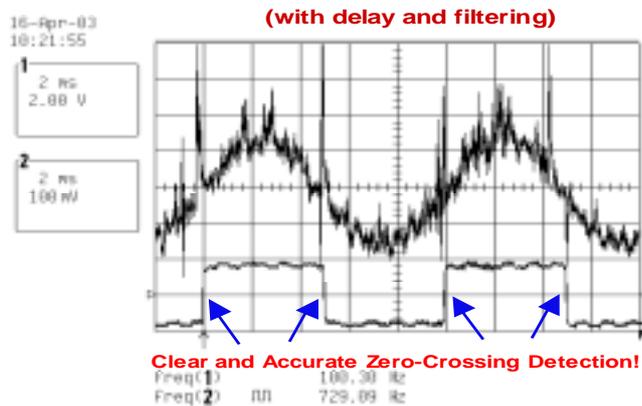


圖 11 無刷直流馬達無感測控制實驗系統



(a)



(b)

圖 12 反向二極體電流所造成的反抗電動勢干擾(a)改善前(b)改善後 (比較換相信號的改善)

圖 13 是無刷直流馬達無感測速度控制的實驗結果,圖 13(a)是從靜止到 3000 RPM 在不同斜坡轉速命令下的無感測轉速響應實驗結果,實驗結果顯示馬達轉速在 30,000 RPM/sec 的速度變化率仍能達到平穩的速控效果。圖 13(b)是在相同情況下所量測到的換相相位誤差,由圖中可看出在穩態情況換相誤差可控制在

5°以內速度變化率愈大，所造成的瞬間換相誤差也愈大，當速度變化率為 30,000 RPM/sec 時，所造成的啟動換相相位誤差約為 33°。相位誤差應控制在 45°以內，避免因反向扭矩造成馬達失速現象。

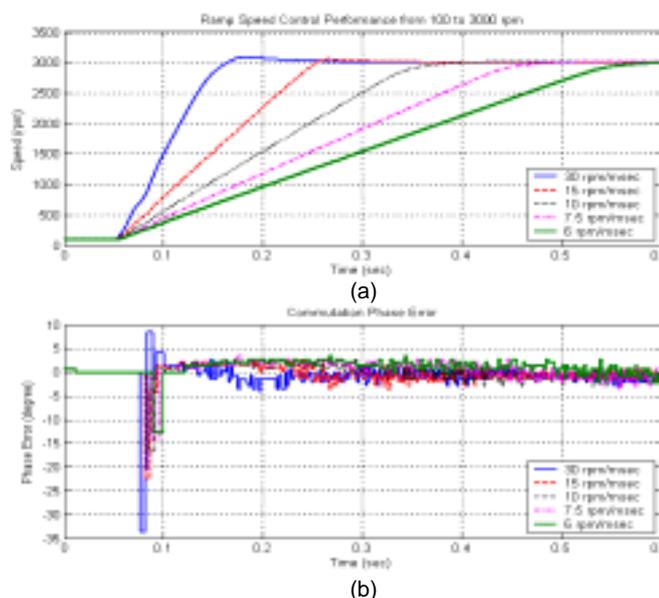


圖 13 無刷直流馬達無感測速度控制的實驗結果(a)斜坡速度響應(b)換相相位誤差

四、結論與討論

本階段之研究著重於針對所提出的方法進行電腦模型與模擬方法的發展，採用 PSIM 模擬軟體進行包含馬達、功率級與控制器的模擬與分析，其中將特別著重於分析控制器在軟硬體實現時因量化誤差所造成的估計誤差。本研究已建立了以 PSIM-DSP 為基礎的永磁同步馬達無感測控制發展平台，可進行結合 C-語言控制法則、功率電路、調變方法、與無刷直流馬達的電腦模擬。數位控制方法的整數化效應可以模擬方式與浮點運算比對其量化效應，若控制方法可行，以 C-語言為基礎的控制法則可以直接下載至目標 DSP 控制晶片完成整合控制。

本研究發展出一種不需要知道馬達參數的無刷直流馬無感測換相技術，藉由反抗電動勢的換相與大小估計轉速，一般的反抗電動勢轉速估計法會受到反向二極體電流的干擾，同時在低轉速時，由於反抗電動勢也隨之降低，因此轉速估計的效果會變差。本研究提出一種新型無感測換相控制方法，可以大幅降低二極體反向電流所造成的反抗電動勢量測誤差，避免在低轉速高電流所造成的換相錯誤。

由於無刷直流馬達具有低成本、高效率、高功率密度、高扭矩的優點，再加上驅動技術的進步，其在小型電機應用的比重日益提升，因此進一步的擴大了市場規模。展望未來，發展低成本、中高性能的專用型無刷直流馬達無感測驅動器將成為變頻器廠商重要的產品研發策略。

五、參考文獻

- [1] J. P. Johnson, M. Ehsani, and Y. Guzelgunler, "Review of sensorless methods for brushless DC," *IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec.*, vol. 2, pp. 1033-1040, 1999.
- [2] K. Iizaka, H. Uzuhashi, et. al., "Microcomputer control for sensorless brushless DC motor," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 21, no. 4, pp. 595-601, May/June 1985.
- [3] D. H. Jung and I. J. Ha, "Low-cost sensorless control of brushless DC motors using frequency-independent phase shifter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 4, pp. 744-752, July 2000.
- [4] J. C. Moreira, "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet AC motors operating in a wide speed range," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 32, no. 6, pp. 1394-1401, Nov./Dec. 1996.
- [5] S. Ogasawara and H. Akagi, "An approach to position sensorless drive for brushless DC motor," *IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec.*, pp. 443-447, 1990.
- [6] A. Consoli, S. Musumeci, A. Raciti, and A. Testa, "Sensorless vector and speed control of brushless motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 41, pp. 91-96, Feb 1994.
- [7] K. Tatemarus, D. Hamada, K. Uchida, S. Wakao, and T. Onuki, "New approaches with sensorless drives," *IEEE Ind. Applicat. Magazine*, vol. 6, pp. 44-50, July/Aug. 2000.
- [8] T. Furuhashi, S. Sangwongwanich, and S. Okuma, "A position-and-velocity sensorless control for brushless dc motors using an adaptive sliding mode observer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 39, pp. 89-95, April 1992.
- [9] B. Terzic and M. Jadric, "Design and implementation of the extended Kalman filter for the speed and rotor position estimation of brushless dc motor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, pp. 1065-1073, Dec. 2001.
- [10] N. Matsui, "Sensorless PM brushless DC motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, pp. 300-308, April 1996.
- [11] F. Huang and D. Tieh, "A neural network approach to position sensorless control of brushless DC motors," *IEEE IECON Conf. Rec.*, pp. 1167-1170, Aug. 1996.
- [12] M J. Corley and R. D. Lorenz, "Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 34, no. 4, pp. 784-789, July/Aug. 1998.
- [13] R. Mizutani, T. Takeshita, and N. Matsui, "Current model-based sensorless drives of salient-pole PMSM at low-speed and standstill," *IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec.*, pp. 445-450, 1997.
- [14] S. Ogasawara and H. Akagi, "An approach to real-time position estimation at zero and low speed for a PM motor based on saliency," *IEEE IAS Annual Meeting Conf. Rec.*, pp. 29-35, 1996.