

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

交流馬達向量控制架構之研究與向量控制晶片之研製(3/3)

Research on the Decoupling Control Mechanism for AC Motors and Implementation of Vector Control ICs for AC Drives (3/3)

計畫編號：NSC 89-2213-E-009-045

執行期限：89年8月1日至90年7月31日

主持人：鄒應嶼博士 交通大學電機與控制工程系 教授

一、中文摘要

本計畫研究泛用型交流馬達的向量控制架構，以向量解耦控制為基礎，在有或無轉子感測器的情況下，可應用於感應馬達的伺服向量控制，達到高性能的快速動態響應與寬廣速控範圍。本階段研究感應馬達的直接轉矩控制法則，發展在有或無轉子感測器的情況下，均可適用於感應馬達解耦控制的直接轉矩控制法則。研究整數運算的直接轉矩控制法則，發展感應馬達的無轉速計回授控制晶片，並以實驗評估所發展的直接轉矩控制晶片的性能。本計畫發展完成一個以CPLD為基礎，可應用於數位馬達控制的實驗控制板，並完成所設計晶片之實際驗證。研究結果顯示，數位馬達控制晶片化，在小型馬達應用領域，具有極大的發展優勢與潛力。

關鍵詞：馬達控制IC、脈寬調變控制IC、電流向量解耦控制IC、直接轉矩控制IC、數位信號處理器、場規劃邏輯陣列、CPLD、ASIC

Abstract

This project focuses on the design and implementation of a series of motor control chips for high-performance induction drives. The designed chips can be used for both the induction servo drives and sensorless induction drives. In the third stage of this project, an integer based direct torque control scheme for induction motors will be developed. Bit-length effect and quantization error effect of the integer DTC controller will be studied. A DTC control structure suitable for IC realization will be developed. DSP-based software control technique and FPGA-based IC realization technique will be developed for advanced sensorless induction drives. An FPGA based DTC control IC for induction motors will be developed. Simulation and experimental verification will be carried out on a constructed induction drive testing system.

Keywords: Motor Control IC, PWM Inverter Control IC, Current Vector Control IC, FPGA, CPLD, ASIC.

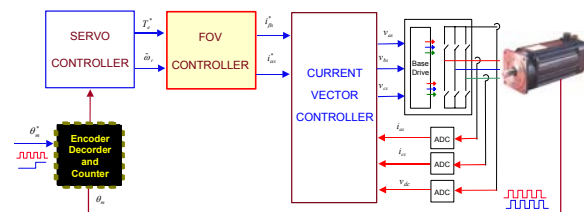


圖1 以電流向量控制為基礎的磁場導向控制架構

二、緣由與目的

隨著工業自動化技術之發展，伺服技術也不斷的提出，早年由於種種的限制，使得較複雜的控制策略一直無法得到應有的效果。近年來，由於半導體產業的快速發展，使得計算複雜的交流馬達磁場導向控制方法，得以藉由特殊設計之晶片予以實現[1]-[5]。

對於電流控制器的性能要求，主要是希望能達到快速的電流響應，並降低電流諧波，以抑制扭矩漣波及音頻噪音。電流迴路控制器依產生脈寬調變的方式，可分為三類：遲滯型控制、斜波比較控制及預測型控制。圖1是以電流向量控制為基礎的磁場導向控制架構，藉由一個獨立且快速反應的電流控制迴路，可將其與馬達磁場導向控制分離，這種控制架構的好處是控制器可分別設計與調整，但前提是必須具備足夠的電流迴路頻寬。

電流控制器若根據實現的方式可分為：類比式、微電腦數位式及ASIC/CPLD積體電路控制IC式。早期之電流控制方法主要以類比電路實現，當時微處理器尚未成熟，因此多以類比電路實現。類比電路雖有反應快及價格低廉的優點，但電路複雜、穩定度差、更改困難且功能受限，很

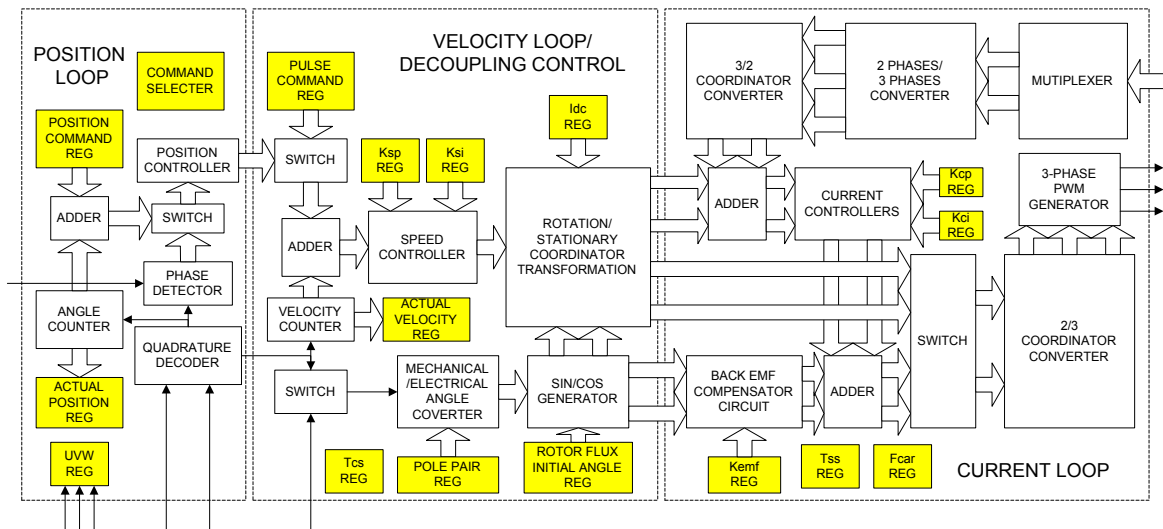


圖2 交流馬達控制IC的電路功能方塊圖

難實現複雜的控制。隨著微處理器技術的發展，開始有單晶片微處理器之應用，採用微處理器之優點在於控制策略以軟體程式實現，因此硬體電路結構簡單，控制器的修改彈性也較高。

近年來，數位信號處理器(DSP)的快速發展，更加速了微電腦數位式控制的發展。雖然單晶片微處理器有不少的優點，但用以製作頻寬較寬的控制器，如：電流迴路控制器，仍會受到指令執行時間的限制。近年來，隨著半導體製程技術的進步，促成了特殊應用積體電路(ASIC)及FPGA/CPLD的發展。ASIC適用於產品技術成熟且市場需求量大的情況，在產品研發階段，不論在技術發展、成本及時效上，採用FPGA/CPLD則是較佳的方式。電流控制與解耦控制在一個高性能的交流馬達驅動系統中扮演著重要的關鍵，由於兩者均需要較快之取樣速度及計算速度，因此本計畫採用數位硬體電路方式實現。

三、研究方法與成果

圖2是本計畫所提出的交流馬達控制IC的電路功能方塊圖，圖3是電壓/電流向量控制模組的控制方塊圖及接腳定義，此交流馬達控制IC由多個子電路模組所構成，以下說明各模組的實現方式。

3.1 二軸比例積分控制模組

類比式電流迴路PI控制器的轉移函數如下：

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (1)$$

其中， K_p 和 K_I 分別為比例常數及積分常數。採用前向差分(forward-rectangular integration)可將PI控制器數位化如下面兩式：

$$y(k) = TK_I x(k) + y(k-1) \quad (2)$$

$$u(k) = K_p x(k) + y(k) \quad (3)$$

其中， $x(k)$ 和 $u(k)$ 分別為控制器輸入和輸出， T 為系統取樣週期，由(2)、(3)可將單軸PI控制器實現如圖4，其中 TK_I 為取樣週期和積分常數乘積， $x(k)$ 為系統響應之誤差信號， CLK 則為系統時脈，時脈週期等於系統之取樣週期。若積分器持續輸入，將使積分器進入飽和狀態，此時加法器會發生溢位，積分器將輸出飽和值，而輸出是正飽和值或負飽和值則由加法器之溢位和進位決定；此外，整個PI控制器之輸出也必須限制在正飽和值和負飽和值之間。由方塊圖可知，整個二軸PI控制器需要四個乘法動作。

3.2 旋轉/靜止座標轉換模組

以旋轉座標實現之電流控制器，電流命令必須由旋轉座標兩軸信號轉換至靜止座標兩軸信號，此座標轉換包含正弦與餘

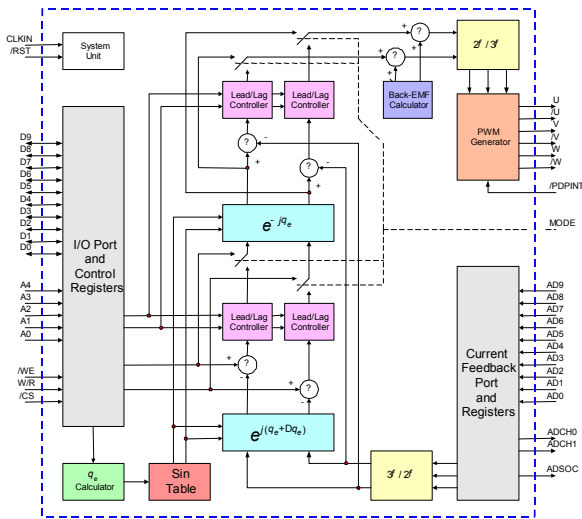


圖3 電壓/電流向量控制模組方塊圖

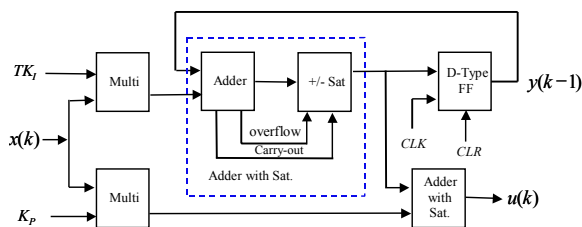


圖4 單軸PI控制器實現方塊圖

弦函數，可以查表方式實現。

完成同步旋轉座標至靜止座標轉換需要四個乘法動作。同理，回授的兩軸電流信號要進入PI控制器之前，也需要從靜止座標兩軸信號轉換回旋轉座標兩軸信號，實現方式與同步旋轉座標至靜止座標轉換相同，也需要四個乘法動作。上述旋轉座標系至靜止座標系的轉換，可以同一組正弦表完成，大幅簡化硬體電路設計。

3.3 二軸/三相座標轉換模組

座標轉換其實只是進行映射的動作，二軸和三相間之轉換其實比旋轉座標和靜止座標間之轉換要來得容易許多。後者之映射函數是與電器角度有關之弦波函數，因此實現上必須使用乘法器；前者之轉換是個常數，設計此種轉換電路不必用到乘法器，畢竟乘法器佔用太多邏輯資源，因此採用移位相加原理實現此種常數乘法，在座標轉換的計算式中的常數 $1/\sqrt{3}$ ，可以近似法實現。表 1 為此方式實現座標轉換之誤差分析，考量電流漣波和 PWM 的解析，這些誤差是可以接受的。

表1 座標軸轉換誤差分析表

	實際值	實現近似值	誤差
$1/\sqrt{3}$	0.57735	$1/2+1/16+1/64$	0.134%
$1/2$	0.5	$1/2$	0.5
$\sqrt{3}/2$	0.866	$1/2+1/4+1/8-1/64+1/128$	0.134%

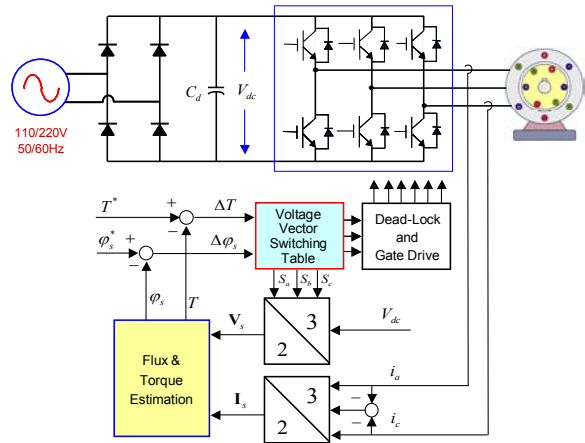


圖5 向量切換表直接轉矩控制的控制架構圖

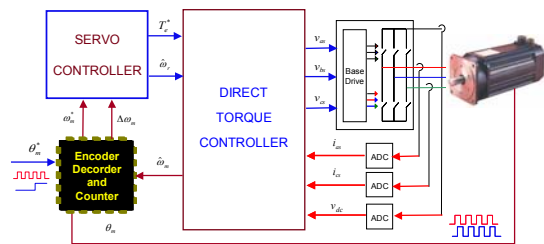


圖6 感應馬達直接轉矩控制晶片之系統架構

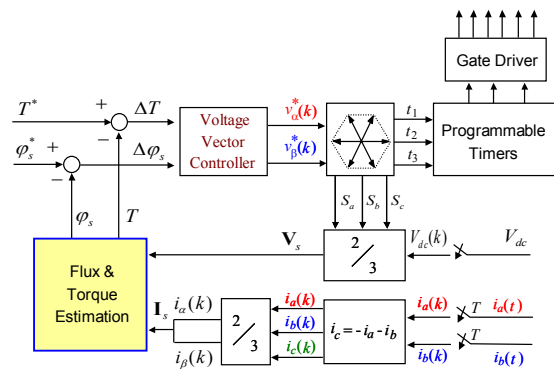


圖7 DTC控制晶片架構圖

3.4 空間向量PWM產生模組

空間向量脈寬調變(space vector pulse width modulation, SVPWM)就是利用空間向量原理，決定六個開關的開啟與關閉。

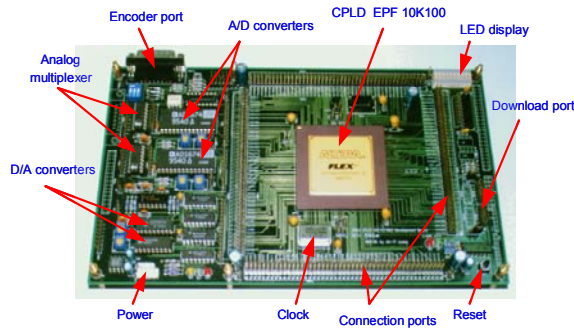


圖8 完成之CPLD IC設計與驗證電路板

表2 實現資源分析表

模組名稱	Logic Cells	Embedded Cells	EABs
兩軸/三相轉換	112	0	0
三相/兩軸轉換	81	0	0
A/D轉換器界面	46	0	0
數位輸入界面	61	0	0
PWM產生器	60	0	0
控制單元 (含正弦表)	279	20	3
核心單元 (含靜止/旋轉座標 轉換、旋轉/靜止 座標轉換、兩軸PI 控制器等)	795	0	0
整個控制器	1171	20	3
資源使用率(%) FLEX10K30	67	41	50

表3 參數範圍及其意義

名稱	範圍	意義
K_{cp}	0 ~ 127	0 ~ 127
T_{cs}	0 ~ 255	28 μ sec ~ 510 μ sec
F_{car}	1 ~ 255	308 Hz ~ 78.431 kHz
K_{sp}	0 ~ 127	0 ~ 127
K_{sit}	0 ~ 127	0 ~ 127
T_{ss}	1 ~ 31	0 ~ 31 · T_{cs}
θ_{ini}/θ_{sl}	0 ~ 249	0 ~ 2 π

此種開關控制的目地不外乎希望得到一種開關策略，使得切換出來的波形諧波最少，同時亦將開關之切換次數減至最少。

3.5 解耦控制模組

解耦控制器包含正弦參考信號產生器、轉子磁通模型、弱磁控制器、轉子磁通初始角暫存器、機械至電氣角度轉換比例暫存器、以及一個負責解耦控制的同步角暫存器。解耦控制器藉由同步角暫存器控制轉子磁軸與轉子轉軸間的電氣夾角，

應用於永磁式交流馬達時，可經由轉子磁軸相位的偵測設定其值。當馬達運轉於高速定功率區時，可由外部的微處理器設定適當的磁場電流命令。

3.6 直接轉矩控制模組

直接轉矩控制(direct torque control, DTC)的觀念最先由Takahashi與 Noguchi於1986 [6]年提出，隨後發展成為direct self control [7]，90年代之後，芬蘭的ABB公司率先應用於感應馬達驅動器，強調其快速的動態響應，之後引發了DTC的廣泛研究與應用。

DTC的基本架構如圖5所示，主要的優點是計算簡單、易於以全數位硬體電路實現、可以應用於無感測速度控制，結合SVPWM可產生最佳定子電壓向量的切換時序，降低開關損失。圖6是本研究所發展的感應馬達直接轉矩控制晶片之系統架構，圖7是所設計的DTC控制晶片架構圖，所有的控制功能均以CPLD實現，DTC模組可與其他的控制模組結合，形成一個完整的感應馬達伺服向量控制晶片，實際應用時，只需經由一般通用型的微控制器進行參數設定即可。由於所有功能均以數位硬體電路實現，因此幾乎不受計算時間的限制，系統具有簡單、易於實現的得優點。

3.7 實作與實驗結果

為了驗證所提出的交流馬達控制晶片架構，本計畫研製了一個以CPLD為基礎的馬達控制晶片驗證電路板(參考圖8)，藉由此電路板，可以進行設計晶片的實驗測試。所設計的晶片晶片驗證電路採用Altera FLEX10K30-4，本計畫所提出的電流向量解耦控制晶片，採用10位元運算，使用的CPLD資源如表2所示，控制器的參數說明與調整範圍如表3所示。

實驗測試是以一顆三相四極750W的感應馬達為對象，馬達的定子電阻為1.4 Ω ，定子電感為8.2mH，功率級之直流鏈電壓為300V，開關頻率為20kHz。

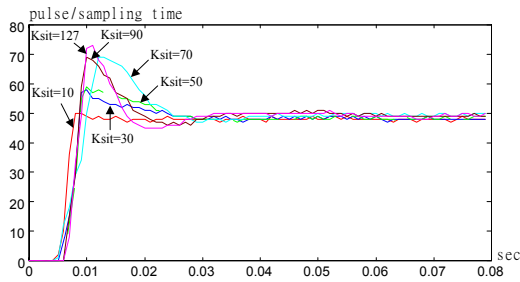


圖9 不同控制參數下的暫態響應

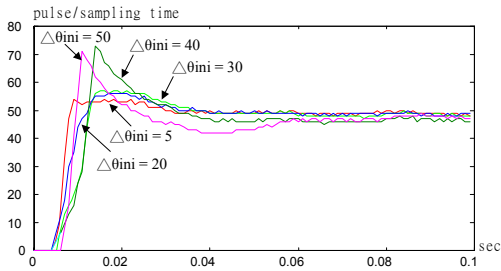


圖10 不同偏移角度之暫態響應

圖9(a)至圖9(c)為轉速在1800 rpm時使用靜止座標實現電流控制器之模擬結果，圖9(d)至圖9(f)為使用同步旋轉座標實現電流控制器之模擬結果。值得注意的是： q -軸電流在靜止座標實現時無法達到零穩態誤差，且 I_α 響應會有相位延遲，這將使得在相同的控制器參數之下，靜止座標實現之速度響應超越量較大。

圖10(a)為馬達相電流響應圖，圖10(b)為兩軸電流響應軌跡圖，其中切換頻率20kHz，電流頻率60 Hz，電流控制參數 $K_p=500$ 、 $T_{K_I}=60$ 、 $I_{dc}=75$ 、 $I_{qc}=75$ 。

本計畫所研製的電流向量解耦控制晶片其控制參數可經由外部為處理器設定，因此可經由扭矩與速度控制之動態響應觀察其參數調整的控制效果。首先僅改變速度控制器之比例增益，將速度控制器之積分常數 K_{sit} 設為零，其實驗結果如圖9所示。接著令速度控制器之比例增益 K_{sp} 為30，改變積分常數 K_{sit} ，實驗結果如圖11。最後改變 θ_{ini} ，在初始動作完成後加入一 $\Delta\theta_{ini}$ ，不同的角度偏移量造成的速度步級暫態響應如圖12所示。

為了測試數位電流控制迴路的快速動態響應特性，可將馬達轉子鎖住，此馬達之定子電阻為1.4Ω，定子電感為8.2 mH，

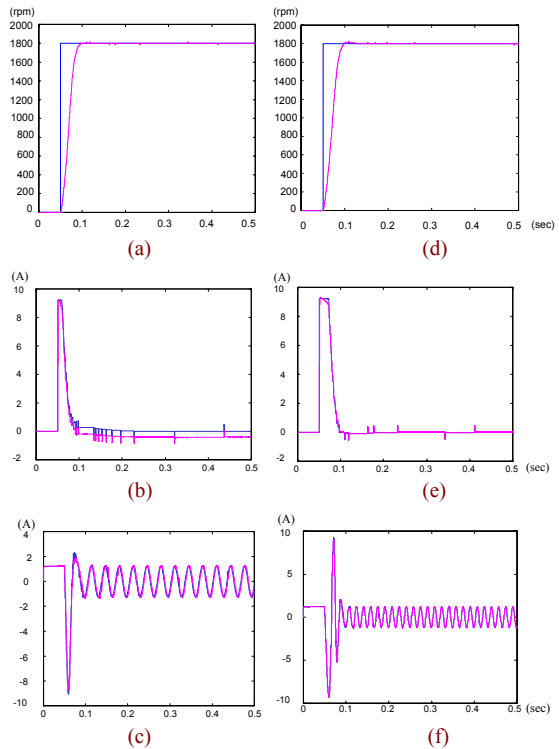


圖11 電流控制器轉速1800rpm之模擬響應圖 (a) 靜止座標速度響應，(b)靜止座標轉矩電流 I_q 響應，(c)靜止座標 I_α 響應，(d)同步旋轉座標速度響應，(e) 同步旋轉座標轉矩電流 I_q 響應，(f)同步旋轉座標 I_α 響應

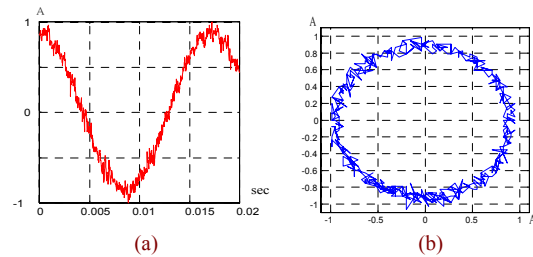


圖12 (a)馬達相電流響應圖，(b)兩軸電流響應軌跡圖 (切換頻率=19.5kHz,電流頻率=60Hz,電流控制參數 $K_p=500$, $T_{K_I}=60$, $I_{dc}=75$, $I_{qc}=75$)

電流控制解析度為40 mA，圖13為載波頻率為20 kHz，電流取樣時間為50 μsec，在不同控制參數下的 d 軸與 q 軸電流步級響應，由圖中可看出電流控制的快速響應。

四、結論與討論

馬達控制晶片的設計已經有不少商品，但是大部分的控制 IC 功能並不完整，尤其是感應馬達控制 IC，尚未有功能完整的 IC。控制 IC 設計的目的，主要是簡化系統、降低成本，然而功能不完整的

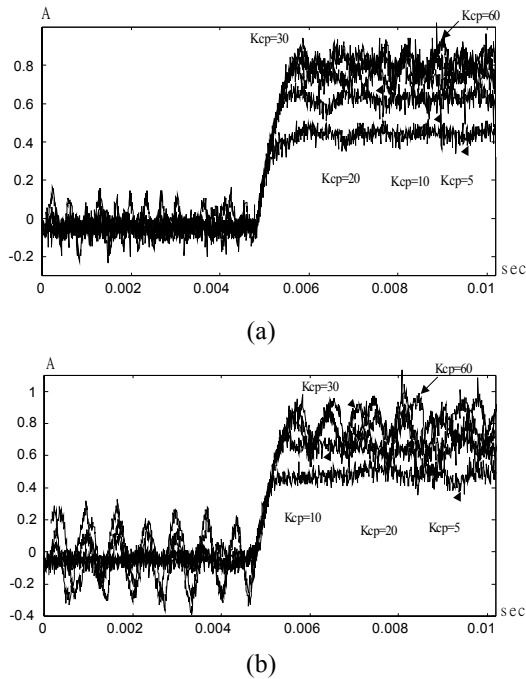


圖 13 不同參數之(a)d軸與(b)q軸電流步級響應(0.83 A)

控制 IC 將使其應用受限。本研究針對電流迴路設計專用 IC，主要的原因就是因為電流迴路需要較快的處理速度，這將使整個控制器設計更加不易，應用此類 IC 來設計控制器，設計者只需考量外迴路，對於需要較高頻寬的電流迴路就完全交給此類 IC 直接控制，使用者不必擔心因為外迴路設計，影響電流迴路的取樣頻率。電流迴路控制在馬達控制及不斷電電源供應系統裡是相當重要的一環，由於採用數位硬體電路實現有高速的特性，將可有效提高系統頻寬。未來之應用，若能將馬達的解耦控制、速度迴路及位置迴路一併設計，將使馬達控制的工作大幅簡化。

本研究完成感應馬達的直接轉矩控制法則，發展在有或無轉子感測器的情況下，均可適用於感應馬達解耦控制的直接轉矩控制法則。研究整數運算的直接轉矩控制法則，發展感應馬達的無轉速計回授控制晶片，並以實驗評估所發展的直接轉矩控制晶片的性能。

全數位馬達控制 IC 化方式實現，對於長久受限於類比缺點或處理器計算速度限制的實現方式而言，本文提出另一種解

決的方式—數位硬體電路實現及一個適合此種方式的架構。利用此控制 IC 除了大幅簡化交流伺服馬達控制架構外，並將複雜的向量控制簡化為參數調整問題。本研究所研製的交流馬達向量控制是以 10 位元實現，使用約 32,000 邏輯閘，是國內首度發展成功且具有完整功能的交流馬達向量控制 IC，利用泛用型控制 IC 搭配智慧型功率模組，交流伺服驅動器微小化的目標將可實現。

五、參考文獻

- [1] T. Y. Chang, K. L. Lo, and C. T. Pan, "A novel vector controller for induction motor drives," *IEEE Trans. on energy conversion*, vol. 9, no. 2, pp. 297-303, June 1994.
- [2] J. V. Oldfield and R. C. Dorf, *Field Programmable Gate Arrays*, John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [3] 林翎永, "鼠籠式感應馬達 DSP 向量控制伺服驅動器之研製," 碩士論文, 國立交通大學控制工程研究所, 民國八十六年六月.
- [4] Y. Y. Tzou, H. J. Hsu, and T. S. Kuo, "FPGA-base SVPWM control IC for 3-phase PWM inverters," *IEEE IECON, Conf. Rec.*, Taipei, Taiwan, Aug. 5-9, 1996.
- [5] 郭天送, "交流伺服馬達 FPGA 控制 IC 之研製," 碩士論文, 國立交通大學控制工程研究所, 民國八十六年六月.
- [6] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor," *IEEE Tran. Ind Appl.*, vol. 22, no. 5, pp. 820-827, Sept./Oct. 1986.
- [7] M. Depenbrock, "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine," *IEEE Tran. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 420-429, Oct. 1988.