

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

結合尖端機電技術與資訊智慧之開放式控制器-子計畫二

伺服馬達控制之電力電子單晶片化電路設計(3/3)

**The Single Chip Design and Implementation of the Power
Electronics of a Motor Servo System**

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC90 - 2212 - E - 009 - 009 -

執行期間： 89 年 08 月 01 日至 90 年 07 月 31 日

計畫主持人：張隆國

共同主持人：

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

執行單位：國立交通大學電機與控制工程系

中 華 民 國 90 年 07 月 31 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

結合尖端機電技術與資訊智慧之開放式控制器-子計畫二 伺服馬達控制之電力電子單晶片化電路設計(3/3)

The Single Chip Design and Implementation of the Power Electronics of a Motor Servo System

計畫編號：NSC 90-2212-E-009-009

執行期間：89年08月01日至90年07月31日

主持人 & E-mail：張隆國 lkchang@cc.nctu.edu.tw

電話/傳真：(03)5731715/(03)5725784

執行單位：國立交通大學電機與控制工程系

一、中文摘要

本報告的馬達控制理論是採用針對交流馬達發展的磁場導向閉迴路控制系統架構，馬達控制器的輸出是以空間向量脈寬調變法產生一組大小可控制的旋轉磁場，再加上電流迴路控制器以控制馬達的扭力，並以 TI 生產的 TMS320F240 DSP 單晶片驗證其可行性。

在驅動器部分，使用 HP 生產的 HCPL-3120 晶片驅動 3 臂開關以及光耦合元件來隔離市電及控制電路電源，降低地線雜訊干擾。並且應用柔性切換技術（切換於零電壓或零電流）於功率換流器上可以有效的改善其性能，降低電磁干擾（EMI），減少切換損及限制功率開關元件之 dv/dt 、 di/dt 等切換應力，柔性切換機制以狀態機的技术來做控制，在實作上主體是以 FPGA 實現之。整個驅動器設計有過電流、過溫、上下臂同時導通、電源過電壓等保護功能，以提升系統可靠性。

關鍵詞：空間向量脈寬調變、驅動器、柔性切換

Abstract

In this project, we adopt field-oriented closed loop control for the system using an PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). A current control in a synchronous rotating frame was designed in our control system for decreasing the steady state error of the AC motor driven system. Our controller can produce a rotating space field-vector with the size controlled by a PWM generator. Using this way we can control the torque of motor. All our designs are implemented in using TMS320F240 DSP chip.

For the driver part, we use the HP photo isolated driver, HCPL-3120, to drive three arms of

the inverter and isolate the power ground from signal ground to minimize the interference noise. We also design a soft-switching circuit for our inverter to minimize the EMI interference, the switching stress yielded by dv/dt and di/dt . The soft-switching mechanism is controlled by using state-machine. The primary functions are implemented by FPGA. Our whole drive system contains the protection functions of over-current, over-voltage, over-temperature, and shorted-circuit in any arm. These functions can greatly promote the reliability of the drive system.

Keywords: space vector PWM, inverter, soft switching.

二、計畫緣由與目的

近年來已經有許多交流馬達的應用與研究，針對交流馬達而發展的磁場導向閉迴路控制系統架構，而換流器的脈寬調變方式則採用空間向量脈寬調變技術。傳統之脈寬調變乃採硬式切換方法（PWM hard switching），而近來常被用來當開關的 MOSFET 及 IGBT 元件，其上升時間（rising time）及下降時間（falling time）可低到 200ns~300ns。如此的快速開關易造成功率元件開關得承受很高之切換損（switching loss）及切換應力（switching stress），且由於切換時高 dv/dt 、 di/dt 會造成嚴重之電磁輻射干擾（electron-magnetic interference, EMI）[1-3]，甚至使系統當機。本報告中採用半共振式直流鏈換流器（Quasi-Resonant dc link inverter, QRDCI）[4]，使開關切換於零電壓，可以克服上述之切換應力、切換損及 EMI 等問題，而且不需使用緩衝電路，效率可以提高[5-6]。而所加入之半共振式電路中的開關皆切換於零電壓或零電流，且無使用損耗性之元件（如電阻）故此半

共振式電路所耗之功率很小，不會因增加此共振電路而增加了能量之損失。

其次，設計一個安全、可靠的馬達驅動轉換器也是極重要工作。馬達驅動轉換器使用不當時極易燒毀，其常遇到的問題有：(1)過載驅動，這時很容易產生過電流而燒毀開關。(2)過溫工作可能發生在上下臂開關同時導通，也可能發生在長時間高承載工作。雖未達過電流工作，但因高功率工作而生高溫，這也會引發開關元件燒毀。(3)上下臂開關有同時導通的現象，此時溫度會急速上升，而至過溫燒毀元件。(4)電源過電壓時很容易產生負載超過額定電壓工作，或開關元件的承受電壓加大，為免損壞系統，我們加上過壓停止工作的機制。

三、實驗方法

3.1 柔性切換

一般馬達驅動電路如圖 1，我們可以發現 Q1-Q6 (可用 IGBT 或 MOSFET) 要做切換時，由於開關內的電荷釋放需要時間，使得開關切換路徑如圖 2 切換式。

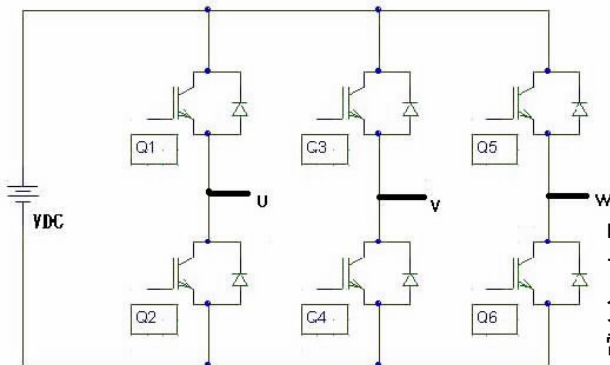


圖 1 一般馬達驅動電路

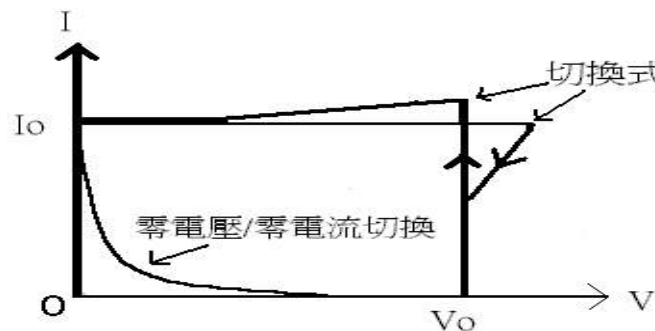


圖 2 一般開關切換路徑

由圖 2 我們可以看出切換式時開關會有一段時間同時面臨高電壓與大電流，因此開關需承受較高之切換應力，並損耗能量。這裡的解決方法是使用一種稱為半共振式直流鏈換流

器，它可結合換流器結構與共振電路，使開關切換時直流鏈電壓為零 (ZVS) 或開關電流為零 (ZCS)，即所謂之柔性切換。其開關切換曲線如圖 2 所示，與切換式換流器相較，其切換應力、切換損及 EMI 等問題可大幅改善，且不需使用緩衝電路，開關的工作效率可以提高。

3.2 半共振式直流鏈換流器電路介紹

考慮圖 3 之結構 (Quasi Resonant DC Link INVERTER)，所謂之半共振式乃是因為於切換週期內，包含了共振與非共振部分，故稱之。該電路之截止緩衝電路只使用了緩衝電容 (Cs)。

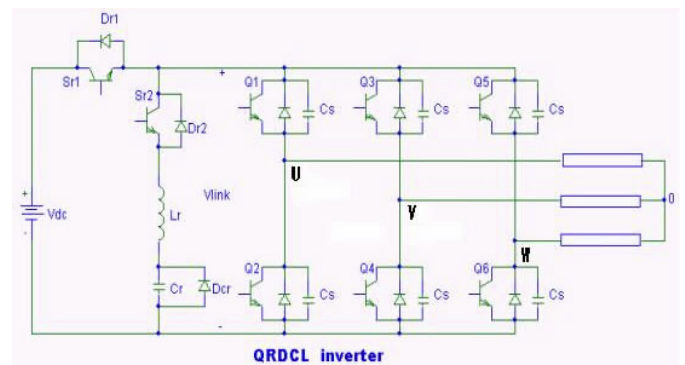


圖 3 半共振式直流鏈換流器

圖 4 簡化之 QRDCI 電路

圖 3 之結構可以簡化成圖 4 來作分析，其中圖 4 中的 Sr2、Dr2、Lr、Cr、Dcr、Cst 構成了共振迴路，當 Sr1 導通時能量可由電源送至負載，先送一觸發信號給 Sr2 使 Sr2 導通，電感電流開始由零上升，因此 Sr2 導通於零電流。此時 Lr、Cr 開始儲存共振所需之能量。於是將 i_L 設定一額定值，當 i_L 到達額定值時便使 Sr1 截止，停止電源對 Lr 及 Cr 之儲能，此時 Lr、Cr 內所存之能量要足夠共振週期之完成，Lr、Cr、Cs 開始執行共振。Sr1 截止後此開關元件集極與射極兩端之壓差不會急速增加，而維持零壓差一段時間，乃是因為 Cst、Cr、Lr 等儲能元件使電壓不會作瞬間變化，故 Sr1 為零電壓截止。

當直流鏈電壓震盪至零電壓時使 Sr3 導通，零電壓之時間長度可由 Sr3 之導通時間來控制，亦即 Sr3 導通時間長即零電壓時間長。而 Sr2 則截止 i_L 反流期間，因電流反流時會流經 Dr2 使 Dr2 順偏，而此功率二極體之順向導通電壓幾乎為零，如此使 Sr2 為零電壓截止。

當共振結束時我們希望 Lr 及 Cr 之淨能量為零，即 Lr 及 Cr 無儲能，因此當 V_{cr} 電壓下降至零時使 Sr3 截止。而後 Lr 中所存之能量釋

放給 Cst，執行 Lr、Cst 共振，造成 Vlink 電壓由零開始往上上升，當上升至電源電壓時使 Sr1 導通，因此 Sr1 為零電壓導通。此時 Vlink 的電壓弱高於 Vdc 則 Dr1 二極體將毀導通，而 Lx Cst 繼續共振直到 Lr 所存之能量完全釋放回 Vlink 及 Vdc，至此完成了一週期之共振。

由以上之分析可以發現此共振電路提供一短暫時間使 Vlink 電壓變成零，並且利用此一時間允許開關切換，最後再使電壓回到 Vdc，完成一次的柔性切換，值得一提的是，在共振電路中的開關亦是柔性切換，且無使用耗能性元件（如電阻），因此整個系統不會因為增加了共振電路而造成額外之能量損失。Sr1、Sr2、Sr3 之柔性切換情形如下所列：

- (1) Sr1 導通、截止於零電壓。
- (2) Sr2 導通於零電流、截止於零電壓及零電流。
- (3) Sr3（可以為換流器 3 臂中之其中一臂，兩臂或全部）導通、截止於零電壓。

3.3 硬體架構簡介

本報告的向量控制交流驅動器之架構採用圖 5 所示的永磁式交流伺服馬達控制架構，其主控制器為 TMS320C240，整體硬體架構如圖 6 所示，而 FPGA 架構圖則由圖 7 所示，而我們 FPGA 則是選用 Altera 公司所出產的 EPF10K10LC84-4 這顆晶片，在下兩小節，我們將詳細介紹 FPGA 裡各方塊的功能和 POWER STAGE 電路的製作。

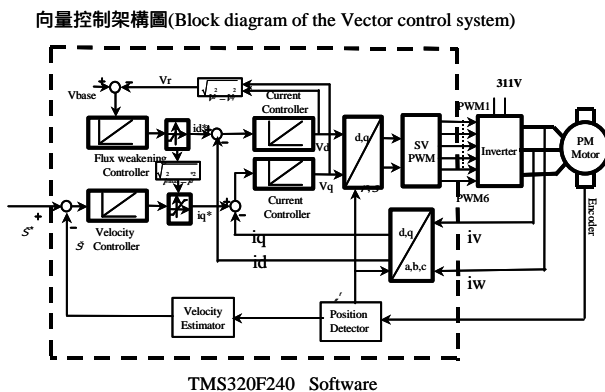


圖 5 永磁式交流伺服馬達控制架構圖

圖 6 實驗系統硬體架構圖

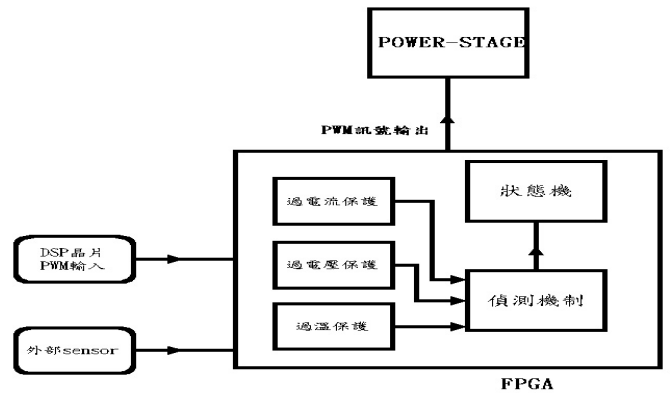


圖 7 FPGA 價構圖

Part.1 FPGA 功能說明

DSP 輸出六個 PWM 控制訊號後，我們將其訊號先送入 FPGA 裡處理，然後再送入 power-stage 控制六個開關，而 FPGA 提供下面幾項功能：

- (1) 過電流保護：當負載電流大於 15 安培時，FPGA 立刻將六個 PWM 輸出訊號變成 0，使六個開關截止，直到 DSP 送來重新啟動訊號，才又使六個開關正常工作。
- (2) 過電壓保護：當市電經由橋式整流後超過 400 伏特，FPGA 立刻使六個開關截止，避免整個系統處於過壓的機制而導致不正常工作。
- (3) 過溫保護：當 6 個 IGBT 散熱片溫度超過 80 度時，立刻將開關截止，直到系統溫度降低到 70 度，才重新恢復正常工作。
- (4) 偵測機制：偵測 DSP 3 臂開關控制訊號是否有上下導通的情形，如果有將六個開關截止，並且通知使用者；另一個功能則是偵測 3 臂開關是否有轉態，如果有則通知狀態機，使其進入軟切換模式。
- (5) 狀態機：平時不介入整個系統工作，直到偵測機制送來觸發訊號，通知系統必須進入軟切換模式才啟動，藉由控制 Sr1 和 Sr2 兩個開關，使整個系統完成軟切換週期，並且提供適當的雜訊保護。

控制三臂開關的訊號由 DSP 送出，經由 FPGA 處理後再送進 power-stage 裡最慢大約延遲 8us，由於整個系統 PWM 訊號是工作在 16KHz，所以這短暫延遲並不會影響整個系統正常工作。

四、結論與討論

馬達驅動轉換器加上各樣的保護電路，可使轉換器免於意外的損壞。如圖 4.1 所示，當馬達運轉之初，控制器極可能送出過大的電流命令 i_q^* ，這時馬達轉換驅動器的限流功

能發揮工作(例如 i_q 限流在 15A), 馬達驅動轉換器就此被保護住, 免於燒毀。由此可見, 我們的設計可提高馬達驅動轉換器的可靠性。

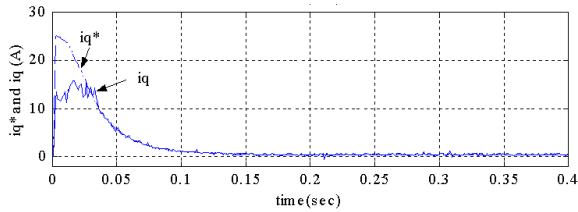


圖 4.1 馬達驅動轉換器的限流結果

若馬達驅動轉換器的 Vlink 直流電壓源在每次 PWM 信號來時, 能用能量搬移的方式, 把 Vlink 電壓拉至極低電壓(如圖 4.2 的 channel 1 波形所示), 則在此低電壓時段可達成幾乎零耗能的更換驅動臂的開關狀態, 如此也可降低 EMI 即開關的變換應力, 延長使用壽命。因此也驗證軟切換設計的好處。

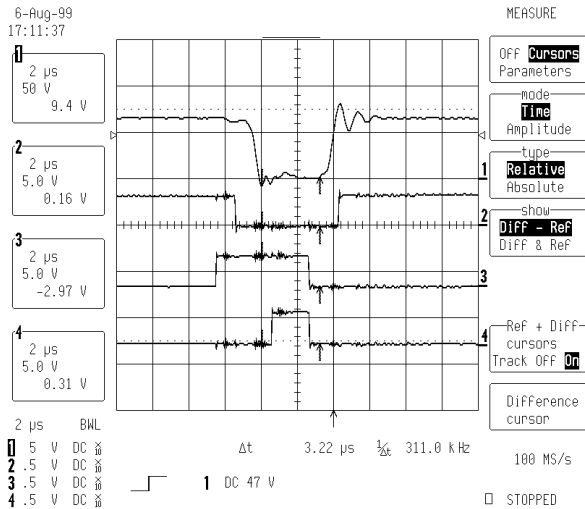


圖 4.2 軟切換的實驗波形

五、參考文獻

[1] H. Emphill and T. Wiesman, "The influence of motor cable parameters on conducted EMI and motor reliability," Power Conversion and Intelligent Motion, October, pp.92~101, 1993.

[2] B. Mokrytzki, "Filters for adjustable frequency devices," Ninth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp.542~548, 1994.

[3] S. Chen and T. A. Lipo, "Modeling of Motor Bearing Currents In PWM Inverter Drives," IEEE Transactions on industry application, vol. 32, No. 6, Nov/Dec 1996.

[4] D. M. Divan, "The Resonant dc Link Converter – A New Concept in Static Power Conversion," IEEE Trans. Ind. Applicant, vol. 25, No. 2, pp. 317~325, March 1989.

[5] J. G. CHO, H. S. KIM, and G. H. CHO, "Novel soft switching PWM converter Using A New Parallel Resonant DC-Link," IEEE Power Electron. Specialists Conf. Rec, pp. 241~247, Jun. 1991.

[6] L. Malaseni, P. Tenti, P. Tomasin, and V. Toigo, "High Efficiency Quasi-Resonant DC Link Three-phase Inverter Full-Range PWM," In Applied Power Electron. Conf. Rec, pp. 472~478, Feb. 1992.