

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化電路設計(1/3)

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

計畫編號：NSC 88-2212-E-009-029

執行期間：87/08/01 ~ 88/07/31

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

執行單位：國立交通大學電機與控制工程系

一、中文摘要

我們在本計畫分別用 FPGA 及 DSP240 兩種單晶片，兩種方法，實現了交流感應馬達及直流無刷馬達的空間向量脈寬調變 (SVPWM) 驅動器。在 FPGA 上的 SVPWM 採用的是所謂的直接-直流序列方式以同時兼顧較少的開關頻率以及較佳的高次諧波雜訊的分離，以減少 PWM 的開關雜訊干擾。在 DSP240 上則儘力採用其內特殊 SVPWM 設計用的指令，以最少開關法的 SVPWM 驅動方式推動後級的換流器 (Inverter)。除此之外，我們用 FPGA 輔助設計了柔性切換電路，以確保換流器所有的開關電晶體都能在零電壓或零電流下切換開關，以大大減少電磁雜訊，延長開關壽命，減少切換能量損失。

英文摘要

In this project, we have implemented space-vector-pulse-width-modulation (SVPWM) in FPGA Flex 10K and TMS320c240 DSP chip to drive an induction motor and a dc brushless motor through three-phase inverters. The approach method of SVPWM design in the Flex 10K is a so called direct-direct method. The objective of using this method is to obtain the compromised profits of minimum switching frequency and minimum modulation noise. In the TMS320C240 design, our design concerns are to maximize the usage of the special embedded SVPWM circuit and instruction codes in TMS320C240 and to minimize the switching times in each modulation cycle. Furthermore, we

also designed and fabricated a so called quasi-resonant dc link three-phase inverter. A reliable state machine for controlling the soft switching timing is designed in Flex 10K. Our experiments results have shown that the soft switching has worked very stable and well assured all the switches turned on/off at the zero-current of zero-voltage moments.

二、計劃緣由與目的

空間向量脈寬調變技術於 1974 年由 F. Bernet 首先提出，以空間向量法應用於三相電壓圖上[1]。而 1983 年 J.Holz 和 S.Stadfeld 在國際電力電子年會中 (IPEC) 第一次提出將空間向量法應用於 PWM 波形之表示式中[2]。磁通控制 PWM 法是由 Y. Murai 等人於 1981 年日本東京技術學院首先提出[3]，此後於又陸續發表出許多相關論文[4~5]，隨後應用空間向量觀念，伴隨使用磁通控制 PWM 方法蔚為風尚，又隨著單晶片微處理器的進步，今日空間向量 PWM 調變技術 (SV-PWM) 已成為變頻器波形調變之主流，且此種技術在工業發達國家已廣泛使用，由於控制方法並不複雜，因此相當適用於馬達變速驅動器。因而本計畫乃是要使用單晶片來整合馬達驅動技術，以求電路要更微小化，工作更穩定並且更可靠。

三、實驗方法

3.1 8 個基本電壓向量

換流器內含 6 個開關，分成 3 臂，每臂由上下兩個開關所組成。為避免上下兩個開關同時導通造成短路而使功率開關損毀，因此同一

臂中兩個開關之導通情形需恰巧相反，故這 6 個開關的切換狀態只剩 $8(2^3)$ 種狀態，此 8 種導通方法會形成圖 1 中的基本電壓向量 $\vec{v}_1 \sim \vec{v}_6$ 及兩個零向量 \vec{v}_0 、 \vec{v}_7 ， \vec{v}_0 代表所有下臂之開關皆導通， \vec{v}_7 則代表所有上臂之開關導通。若以“1”代表上臂的開關導通，以“0”代表下臂的開關導通，則 (100) 代表 (Q1 Q4 Q6) 導通，(Q2 Q3 Q5) 截止。

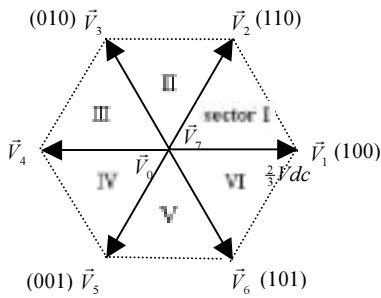


圖 1 8 種基本電壓向量

3.2 空間向量合成與分析

圖 2 中 \vec{v}_{ref} 為欲合成之電壓向量(參考電壓向量)，空間向量調變技術是要使該參考電壓向量等於切換週期 T_s 內的電壓切換向量平均值 \vec{v} 由式子(1)可求得組成該參考電壓向量的基本電壓態向量的工作時間，其中，的挑選原則是尋找在複數平面中與 \vec{v}_{ref} 相鄰的基本電壓向量。以圖 1 為例，若落於 sector 1 內，則取 $\vec{v}_x = \vec{v}_1$ ， $\vec{v}_y = \vec{v}_2$ ， \vec{v}_z 為零向量；若於 sector 2 則取 $\vec{v}_x = \vec{v}_2$ ， $\vec{v}_y = \vec{v}_3$ ， \vec{v}_z 為零向量，其餘依此類推。

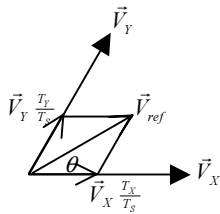


圖 2 空間向量的合成

$$\int_0^{T_x} \vec{v}_x dt + \int_{T_x}^{T_x+T_y} \vec{v}_y dt + \int_{T_x+T_y}^{T_s} \vec{v}_z dt = \int_0^{T_s} \vec{v}_{ref} dt = \int_0^{T_s} \vec{v} dt$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_x T_x + \vec{v}_y T_y &= \vec{v}_{ref} T_s \\ T_z &= T_s - T_x - T_y \end{aligned} \quad (1)$$

T_x 為基本電壓向量 \vec{v}_x 的工作時間

T_y 為基本電壓向量 \vec{v}_y 的工作時間

T_z 為基本電壓向量 \vec{v}_z 的工作時間

T_s 為切換週期的時間長

⇒

$$T_x = \frac{|\vec{v}_{ref}| T_s \sin(60^\circ - \theta)}{\frac{2}{3} V_{dc} \sin 60^\circ} = \frac{|\vec{v}_{ref}|}{R} T_s \sin(60^\circ - \theta) = M T_s \sin(60^\circ - \theta)$$

$$T_y = \frac{|\vec{v}_{ref}| T_s \sin \theta}{\frac{2}{3} V_{dc} \sin 60^\circ} = \frac{|\vec{v}_{ref}|}{R} T_s \sin \theta = M T_s \sin \theta$$

$$T_z = T_s - T_x - T_y$$

$$R = \frac{2}{3} V_{dc} \sin 60^\circ$$

(2)

M 是振幅調變因子

3.3 SV-PWM 於 FPGA 上之規劃

SV-PWM 程式流程圖顯示於圖 7，切換週期 (T_s) 為 128us，FPGA 於每個切換週期會將角度作累加，以便求參考出電壓向量所在之 sector 及與 \vec{v}_x 之夾角，並決定輸出向量 \vec{v}_x 、 \vec{v}_y 、 \vec{v}_z 與其導通時間。因為 FPGA 無法計算 $\sin \theta$ 值，因此事先將 $T_s * \sin \theta$ 及 $T_s * \sin(60^\circ - \theta)$ 建表。因為每個 sector 皆佔 60° ，故將 60° 分成 256 格 (亦即每格為 0.234°)，建成兩個皆為 256 筆資料之正弦函數表，程式再依計算來之角度值，找出所對應位址內的之資料，再乘上振幅命令，即可找出式子(2)中的 T_x 、 T_y 、 T_z ，而程式所計算出來之 sector 值，則用來決定 \vec{v}_x 、 \vec{v}_y 為何個基本電壓向量。

3.4 SV-PWM 在 DSP 上的實現

在 DSP 的實現上我們所採取的開關切換時序形式如下(以第一區間為例)：

A. $V_1(100) \Rightarrow V_2(110) \Rightarrow V_7(111) \Rightarrow V_2(110) \Rightarrow V_1(100)$

B. $V_2(110) \Rightarrow V_1(100) \Rightarrow V_0(000) \Rightarrow V_1(100) \Rightarrow V_2(110)$

這種切換時序同時擁有最低切換損失及最小切換頻率。

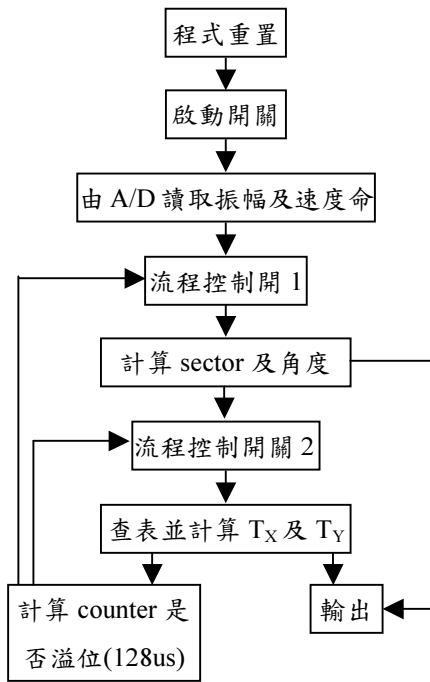


圖 3 SVPWM 在 FPGA 實現之流程圖

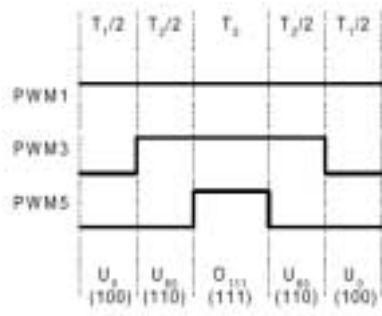


圖 4 形式 A 開關切換時序圖

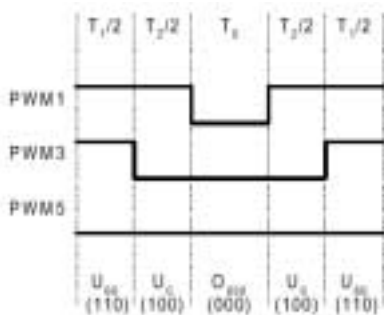


圖 5 形式 B 開關切換時序圖

由圖 4 及圖 5 中可以看出在 $T_s / 2$ 的週期內三個開關作了兩次切換，故開關切換頻率為取樣頻率的兩倍。

在這裡我們採用 DSP-TMS320F240 晶片，以下就是我們將 SVPWM 實現在 DSP 的方塊流程圖：

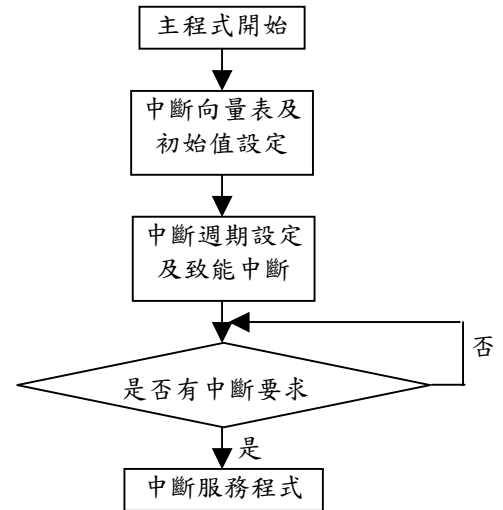


圖 6 SVPWM 在 DSP 上實現之主程式

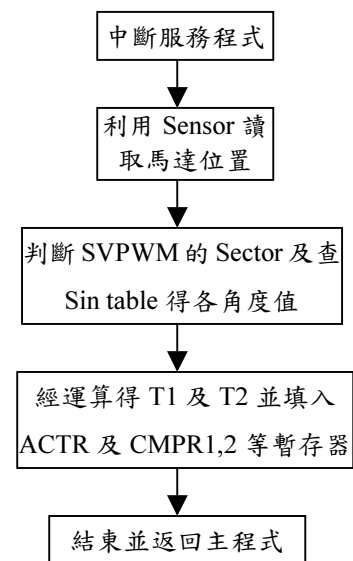


圖 7 SVPWM 在 DSP 上實現之中斷服務程式

3.5 柔性切換電路

所使用之半共振式柔性切換電路如圖 8 中之虛線所示，等效之電路如圖 9 所示。我們在 FPGA 上為開關電路設計了安全保護的狀態機器，以確保開關安全啟動，並持續工作下去。

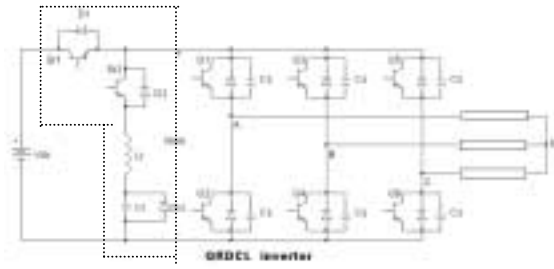


圖 8 半共振式直流鏈換流器(QRDCI Inverter)

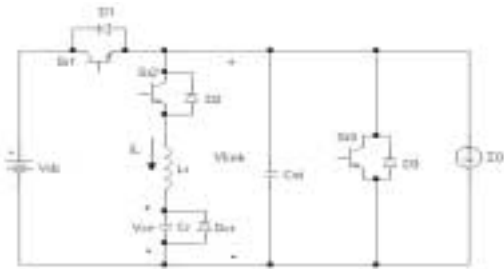


圖 9 QRDCI 之簡化電路

四、結論與討論

4.1 在 FPGA 上之實驗結果

以下是我們在 FPGA 實驗的結果，圖 10 為線對線調變波波形，圖 11 為相電流波形，100mV 代表 1A。

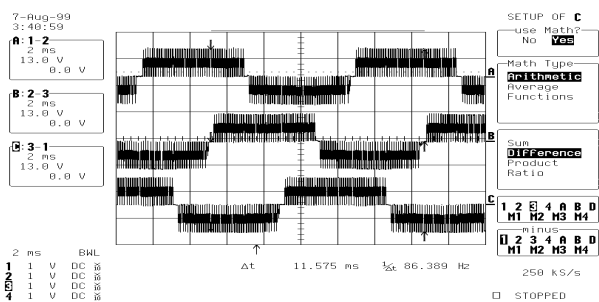


圖 10 SV-PWM 之線對線調變波波形

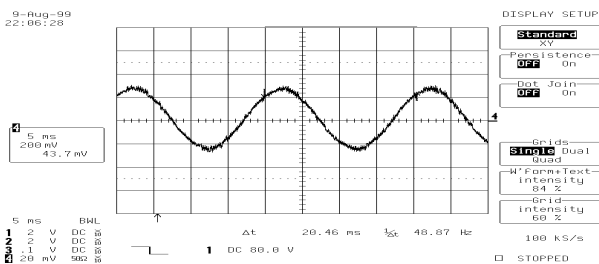


圖 11 相電流波形

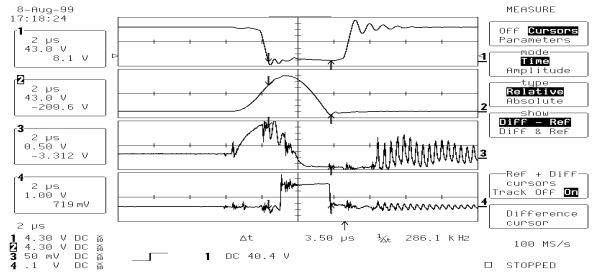


圖 12 Vlink、Vcr、iL 與 Sr3 驅動訊號關係圖--為 QRDCI 電路之實驗波形。

4.2 在 DSP 上之實驗結果

在我們用 DSP 實現 SVPWM 的部分，我們將 DSP 輸出的波形經由示波器觀察，由圖 13 可以我們可以看出一個 period 內的六種情形，這裡我們所用的 SVPWM 切換方式是以減少切換次數(減少切換損)為目的。但各 channel 的諧波則無法減至最少，所以在各 channel 中我們看到仍不是個 sin wave，但我們將其相減即可得 sin wave 波形，即是圖 14 中的波形。



圖 13 U、V channel 經低通濾波器所得波形。

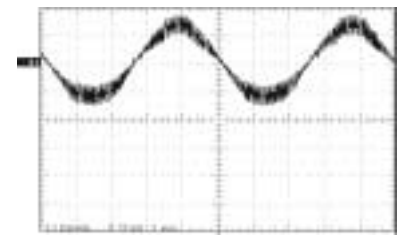


圖 14 由圖 13 中兩 channel 相減所得波形。

五、参考文献

- [1] F. Bernet, "Diminishing Torque Pulsation In Induction Motors Powered By Pulsewidth Modulated Inverters," Conf. Rec. 1st IFAC Symp. Contr. Power Electron Drives, pp. 615~634, 1974.
- [2] J. Holtz and S. Stadtfeld, "A Predictive Controller For Stator Current Vector Of AC Machines Fed From A Switched Voltage Source," Conf. Rec. IPEC-Tokyo'83, pp. 1665~1675, 1983.
- [3] Y. Murai, k. Asano and Y. Tsunehiro, "Discussion On PWM Method For Reduction Of Torque Pulsations On An Inverter Fed Induction Motor," Trans. IEEJ, vol. 101B, pp. 315~322, 1981.
- [4] T. Takeshita and N. Matsui, "One-Chip Microcomputer-Based Flux-Controlled Real Time PWM," Trans. IEEJ, vol. 105B, pp. 531~538, 1985.
- [5] V. R. Stefanovic and S.N. Vukosavic, "Space-Vector PWM Voltage Control With Optimized Switching Strategy," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Conference, pp. 1025~1033, 1992.
- [6] Zhenyu Yu, "Implementation of Vector Control for PMSM Using the TMS320F240 DSP", Texas Instruments Literature Number SPRA494.