

# 應FPGA於線性永磁式同步馬達驅動系統之分析與設計

陳義明、陳昭雄

E-mail: 9419864@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本文提出應用FPGA於線性永磁式同步馬達驅動系統之分析與設計，以FPGA（內建DSP，eMotion控制器）為控制平台，分別建構換流器電路、光學尺電路和電流迴授等電路，以組成線性永磁式同步馬達驅動系統。換流器電路，由IGBT和光耦合器HCPL-3120組成。光學尺電路，將光學尺信號轉換成介面電路之電壓準位。電流迴授電路，迴授線性永磁式同步馬達的V、W相電流。控制器設計分別利用古典控制P-PI-PI控制器和模糊控制器以控制線性永磁式同步馬達的動子位置，並經由模擬比較其優劣。本論文實驗方面，以eMotion控制器和組合語言實現所設計之控制器，經由所設計之驅動系統來完成線性馬達之定位。透過模擬和實驗結果證明P-PI-PI控制器和模糊控制器的有效性和可行性，及可達到驅動電路的最精簡。

關鍵詞：FPGA；線性永磁式同步馬達；驅動系統；模糊控制

## 目錄

目錄封面內頁	簽名頁	授權書	iii	中文摘要	v	英文摘要	vi	誌謝	vii	目錄	viii	圖目錄	x	表目錄	xiv	第一章 緒論	1	1.1 研究動機	1	1.2 文獻回顧	2	1.3 研究方法	4	1.4 論文大綱	5	第二章 線性永磁式同步馬達數學模型	7	2.1 座標轉換	7	2.1.1 三相座標與兩軸座標轉換	11	2.1.2 三相座標與兩軸座標轉換	12	2.2 馬達數學模型	14	第三章 線性永磁式同步馬達驅動系統架構	18	3.1 線性永磁式同步馬達驅動系統硬體架構	18	3.2 eMotion控制器	21	3.2.1 操作模式	23	3.2.2 模組程式設計	26	3.2.3 系統程式設計	28	3.3 線性永磁式同步馬達驅動電路及周邊電路設計	29	3.3.1 換流器	30	3.3.2 光學尺電路	36	3.3.3 電流迴授電路	39	第四章 古典控制理論之控制器設計	42	4.1 P-PI-PI控制器設計	42	4.2 P-PI-PI控制器模擬	51	第五章 模糊控制器設計	55	5.1 系統描述	55	5.2 模糊控制器規則庫	56	5.3 穩定的模糊控制器設計	58	5.4 模糊控制器模擬	68	第六章 實驗成果	75	6.1 eMotion控制器模組	75	6.2 P-PI-PI控制器	84	第七章 結論與未來展望	92	參考文獻	93	圖目錄		圖1.1 XILINX FPGA晶片外觀圖	2	圖2.1 空間向量	圖7	圖2.2 三相靜止座標與軸座標	8	圖2.3 三相靜止座標與軸座標	9	圖2.4 兩軸座標轉換關係圖	12	圖2.5 線性永磁同步馬達結構圖	14	圖2.6 線性永磁同步馬達控制方塊圖	17	圖3.1 線性永磁同步馬達驅動系統方塊圖	18	圖3.2 eMotion控制器方塊圖	21	圖3.3 eMotion控制器	22	圖3.4 eMotion控制器電路配置圖	22	圖3.5 eMotion控制器連線程序圖	24	圖3.6 Telnet文字模式之操作畫面	24	圖3.7 Simulink中自建的控制方塊函數庫	25	圖3.8 Simulink中自建的控制系統實驗	26	圖3.9 模組程式之系統方塊圖	26	圖3.10 模組程式之程式結構圖	27	圖3.11 線性永磁同步馬達驅動電路及週邊電路圖	29	圖3.12 換流器電路圖	30	圖3.13 IGBT寄生電容	31	圖3.14 HCPL-3120光耦合器	32	圖3.15 HCPL-3120驅動IGBT電路圖	33	圖3.16 上、下臂PWM波形圖	34	圖3.17 上、下臂PWM延遲波形圖	35	圖3.18 IGBT驅動波形圖	35	圖3.19 IGBT驅動電路版	36	圖3.20 光學尺電路圖	37	圖3.21 光學尺輸出正弦波波形圖	37	圖3.22 光學尺輸出A、B相波形圖	38	圖3.23 光學尺輸出A、B相且相差90度波形圖	38	圖3.24 光學尺電路版	39	圖3.25 電流迴授電路圖	40	圖3.26 電流迴授電路版	40	圖3.27 電流迴授波形圖	41	圖4.1 q軸電流控制迴路方塊圖	42	圖4.2 q軸電流控制迴路波德圖	44	圖4.3 q軸電流控制迴路之單位步階響應圖	44	圖4.4 d軸電流控制迴路方塊圖	45	圖4.5 速度控制迴路方塊圖	46	圖4.6 簡化後的速度控制迴路方塊圖	46	圖4.7 速度控制迴路波德圖	48	圖4.8 速度控制迴路之單位步階響應圖	48	圖4.9 位置控制迴路方塊圖	49	圖4.10 位置控制迴路波德圖	50	圖4.11 位置控制迴路之單位步階響應圖	50	圖4.12 單位步階命令之位置響應圖	52	圖4.13 單位步階命令之速度響應圖	52	圖4.14 單位步階命令之位置誤差	53	圖4.15 單位步階命令之電流響應圖	53	圖4.16 單位步階命令之電流響應圖	54	圖5.1 模糊控制系統架構圖	56	圖5.2 輸入模糊集合的歸屬函數	57	圖5.3 觸發條模糊規則	57	圖5.4 穩定範圍 (n=2)	63	圖5.5 模糊超空間之三個不同的區域 (n=2)	64	圖5.6 模糊控制器控制方塊圖	68	圖5.7 輸入模糊集合之歸屬函數	70	圖5.8 模糊控制器之相位平面圖	72	圖5.9 模糊控制器之輸入	72	圖5.10 模糊控制器之輸入	73	圖5.11 模糊控制器之電流響應圖	73	圖5.12 模糊控制器之電流響應圖	74	圖5.13 模糊控制器之輸出	74	圖6.1 P-PI-PI控制器架構	75	圖6.2 驅動級保護模組	76	圖6.3 PWM電壓輸出模組	76	圖6.4 電流量測模組	77	圖6.5 位置量測模組	78	圖6.6 相位量測模組	79	圖6.7 位置迴路控制模組	80	圖6.8 速度迴路控制模組	81	圖6.9 電流迴路控制模組	81	圖6.10 差分計算模組	82	圖6.11 三相靜止座標轉兩軸靜止座標	82	圖6.12 兩軸靜止座標轉兩軸同步旋轉座標	82	圖6.13 兩軸同步旋轉座標轉兩軸靜止座	83	圖6.14 兩軸靜止座標轉三相靜止座標	83	圖6.15 解耦合模組	83	圖6.16 調整電流量測的偏移量之模組	84	圖6.17 調整後之線性馬達電流	85	圖6.18 線性馬達霍爾感測器訊號	86	圖6.19 線性馬達電氣角	87	圖6.20 線性馬達位置迴授 (方波命令)	88	圖6.21 線性馬達速度迴授 (方波命令)	88	圖6.22 線性馬達電流 (方波命令)	89	圖6.23 線性馬達之誤差值	
--------	-----	-----	-----	------	---	------	----	----	-----	----	------	-----	---	-----	-----	--------	---	----------	---	----------	---	----------	---	----------	---	-------------------	---	----------	---	-------------------	----	-------------------	----	------------	----	---------------------	----	-----------------------	----	----------------	----	------------	----	--------------	----	--------------	----	--------------------------	----	-----------	----	-------------	----	--------------	----	------------------	----	------------------	----	------------------	----	-------------	----	----------	----	--------------	----	----------------	----	-------------	----	----------	----	------------------	----	----------------	----	-------------	----	------	----	-----	--	-----------------------	---	-----------	----	-----------------	---	-----------------	---	----------------	----	------------------	----	--------------------	----	----------------------	----	--------------------	----	-----------------	----	----------------------	----	----------------------	----	----------------------	----	--------------------------	----	-------------------------	----	-----------------	----	------------------	----	--------------------------	----	--------------	----	----------------	----	---------------------	----	--------------------------	----	------------------	----	--------------------	----	-----------------	----	-----------------	----	--------------	----	-------------------	----	--------------------	----	--------------------------	----	--------------	----	---------------	----	---------------	----	---------------	----	------------------	----	------------------	----	-----------------------	----	------------------	----	----------------	----	--------------------	----	----------------	----	---------------------	----	----------------	----	-----------------	----	----------------------	----	--------------------	----	--------------------	----	-------------------	----	--------------------	----	--------------------	----	----------------	----	------------------	----	--------------	----	-----------------	----	--------------------------	----	-----------------	----	------------------	----	------------------	----	---------------	----	----------------	----	-------------------	----	-------------------	----	----------------	----	-------------------	----	--------------	----	----------------	----	-------------	----	-------------	----	-------------	----	---------------	----	---------------	----	---------------	----	--------------	----	---------------------	----	-----------------------	----	----------------------	----	---------------------	----	-------------	----	---------------------	----	------------------	----	-------------------	----	---------------	----	-----------------------	----	-----------------------	----	---------------------	----	----------------	--

(方波命令) 89 圖6.24 線性馬達位置迴授(正弦波命令) 90 圖6.25 線性馬達之誤差值(正弦波命令) 90 圖6.26 線性馬達速度迴授(正弦波命令) 91 圖6.27 線性馬達電流(正弦波命令) 91 表目錄 表3.1 IGBT規格參數 19 表3.2 霍爾電流感測器規格參數 20 表3.3 線性永磁式同步馬達規格參數 20 表5.1 模糊規則庫 71

## 參考文獻

- 參考文獻 [1] J.F. Eastham, " Novel synchronous machines: Linear and disc " IEEE Proceedings, Vol.137, Pt. B, No.1, 1990.
- [2] G.W. McLean, " Review of recent progress in linear motors ", IEEE Proceedings, Vol.135, Pt. B, No.6, 1988.
- [3] 許仁源, " 線性直流無刷馬達驅動系統之研製 ", 國立清華大學電機工程學系, 碩士論文, 1999.
- [4] K.S. Low, Y. Z. Deng, M.T. Keck, and C.W. Koh, " A high performance linear motor drive for integrated circuit ' s leads inspection system ", IEEE Transactions on Vol.52, No.3, pp.785-789, 1988.
- [5] L. Kumin, G. Stumberger, D. Dolinar, and K. Jezernik, " Modeling and Control design of a linear induction motor ", IEEE International Symposium on Vol.2, pp.963-967, 1999.
- [6] H. Wakiwaka, H. Yajima, and H. Yamada, " Design and evaluation of linear DC motor for pen recorder ", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31, No.6, pp.3755-3757, 1955.
- [7] H. Yajima, H. Wakiwaka, and S. Senoh, " Consideration on high-response of a linear DC motor ", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.33, No.5, pp.3880-3882, 1997.
- [8] P. Famouri, " Control of linear permanent magnet brushless DC motor via exact linearization methods ", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.7, No.3, pp.544-551, 1992.
- [9] K.K. Shyu and H.J. Shieh, " A new Switching surface sliding-mode speed control for induction motor drive systems ", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.11, No.4, pp.660-667, 1996.
- [10] F.J. Lin, " Incremental motion control of linear synchronous motor ", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems Vol.38, No.3, pp.1011-1022, 2002.
- [11] D.S. Reay, M.Mirkazemi-Moud, and B.W. Williams, " On the appropriate uses of fuzzy systems: Fuzzy sliding mode position control of a switched reluctance motor ", IEEE International Symposium on 27-29 Aug, pp.371-376, 1995.
- [12] F.-J. Lin, " Robust controller design with recurrent neural network for linear synchronous motor drive ", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.50, No.3, pp.456-470, 2003.
- [13] C.H. Lin, W.D. Chou, and F.J. Lin, " Adaptive hybrid control using a recurrent neural network for a linear synchronous motor servo-drive system ", IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol.148, No.2, pp.156-168, 2001.
- [14] F.J. Lin, " Hybrid supervisory control using recurrent fuzzy neural network for tracking periodic inputs ", IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.12, No.1, pp.68-90, 2001.
- [15] F.J. Lin, " On-line gain-tuning IP controller using RFNN ", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.37, No.2, pp.655-670, 2001.
- [16] 張育暢, " 具小腦模型之永磁式線性同步馬達控制器之設計與實現 ", 大同大學電機工程系, 碩士論文, 2003。
- [17] 楊柏森, " 線性馬達系統推導與控制模擬 ", 逢甲大學自動控制工程學系, 碩士論文, 2000。
- [18] 王國龍, " 線性永磁同步馬達驅動系統之設計及研製 ", 國立臺灣科技大學電機工程系, 碩士論文, 2001。
- [19] 劉志豪, " 應用模糊控制於線性永磁式同步伺服馬達速度及定位控制器參數之調適 ", 國立臺灣科技大學電機工程系, 碩士論文, 2001。
- [20] 楊昌憲, " 具智慧型保護機制之高功率馬達驅動器設計 ", 國立交通大學電機與控制工程學系, 碩士論文, 2002。
- [21] 劉昌煥, 2003, 交流電機控制向量控制與直接轉矩控制原理, 東華書局。
- [22] L.X. Wang, " adaptive fuzzy systems and control: Design and analysis ", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [23] C.C. Fuh, and P.C. Tung, " Robust stability analysis of fuzzy control systems ", Fuzzy Sets and Systems, No.88, pp.289-298, 1997.
- [24] H.K. Khalil, Nonlinear Systems, New York: Macmillan, 1992.