



# 無感測器永磁同步馬達 速度控制器之設計與模擬

Design and Simulation of a Sensorless Speed Controller

for PMSM Drives

## 龔應時

南臺科技大學  
電機工程系  
教授

## 楊迪

南臺科技大學  
電機工程系  
碩士班研究生

## 林易德

南臺科技大學  
電機工程系  
碩士班研究生

## 關鍵詞(Keywords)

- 無感測器永磁同步馬達驅動器  
Sensorless PMSM Drives
- 擴展式卡爾曼濾波器  
Extended Kalman Filter
- 硬體描述語言  
Hardware Description Language

## 摘要(Abstract)

本文主要設計無感測器永磁同步馬達速度控制器之數位硬體智財(IP)，並以模擬驗證之。首先，在無感測技術方面，乃利用擴展式卡爾曼濾波器(extended Kalman filter)直接估測馬達之磁極

角度與轉子速度以回授給電流迴路之向量控制與速度迴路之速度控制使用。為了提高速度控制之性能，在速度迴路方面，採用模糊控制器。接著，上述所提無位置感測器永磁同步馬達之磁極角度與速度估測器，模糊控制器等，將以 VHDL (very high speed IC hardware description language) 語言來描述其電路行為，並以有現狀態機器來設計以減少數位硬體資源。最後，將結合 ModelSim 及 SimuLink 之環境來共同模擬本文所提之數位硬體 IP，以證實其正確性與有效性。

This work presents a design and simulation of a digital hardware intellectual property (IP) of a sensorless speed controller for permanent magnet synchronous motor (PMSM) drives. Firstly, the extended Kalman filter (EKF) is adopted to estimate the rotor flux angle (FA) and rotor speed. The



estimated rotor FA is sent back to the current loop for vector control and the estimated rotor speed is fed back to the speed loop for close-loop speed control. Secondly, to increase the system performance, a fuzzy controller (FC) is utilized in speed control loop. Thirdly, VHDL (very high speed IC hardware description language) is applied to describe the circuit behaviors of FC and EKF; then the finite state machine (FSM) method is adopted to reduce the usage of hardware resource. Finally, to evaluate the effectiveness and correctness of the proposed digital hardware IP for the sensorless PMSM drive, a co-simulation work performed by Simulink and Modelsim is conducted, and some simulated cases are demonstrated.

## 1. 前言

永磁同步馬達由於具有結構簡單、高效率、優異的電力密度、高性能的速度響應與精度、控制簡易及方便等優點，已成為很多自動化控制系統之致動器。永磁同步馬達在控制方面可以分為有位置感測器控制與無位置感測控制。具有光編碼感測器控制為現今工業上常用之控制，在馬達轉子上加裝光編碼感測器以偵測馬達磁極角度位置，以利於電流迴路及速度迴路控制。但光編碼器隨著精密度越高，價格也越高，且也有增加體積、減少可靠性及提高訊號干擾之缺點。另外，具光編碼感測器之馬達不適合在震動大或濕氣高的環境使用，如冷氣機、電動機車...等，因此無

感測器速度控制技術成為近年來永磁同步馬達研究之主題。在文獻中，有多種無位置感測控制方法被提出[1-6]，如：數值計算速度估測法、擴展式卡爾曼濾波器(extended Kalman filter)速度估測法、滑動模式觀察器(sliding mode observer)估測反電動勢之電流觀測器、以類神經網路為基礎之速度估測法及以參考模型調適系統為基礎之速度估測法。滑動模式估測法[1-2]乃利用一個電流觀測器先估測出馬達的反電動勢，再間接估測磁極角度與轉子速度。此方法具有計算簡單，便於硬體實現，但卻因易受外界訊號干擾，使得磁極角估測之準確度較差而無法精準控速，尤其當馬達運轉於低速時，由於反電動勢訊號較薄弱更易受影響。擴展式卡爾曼濾波器[3-6]具有線上即時估測可適用於非線性系統，具有較佳的抗雜性能力以應用在低速控制及具有快速的收斂率特性可提昇速度控制之暫態響應性能、因此適合非線性系統之永磁同步馬達。擴展式卡爾曼濾波器有降階式與全階式兩種。降階擴展式卡爾曼濾波器[3-4]僅需要  $3 \times 3$  矩陣運算，但是僅可直接估測磁極角度而無法直接估測轉子速度；而全階擴展式卡爾曼濾波器[5-6]雖需要  $4 \times 4$  矩陣運算，但是可直接估測磁極角度及轉子速度。全階式擴展式卡爾曼濾波雖然需要較複雜之運算，但是在馬達低速控制及正反向轉速控制具有較佳之性能。

近年來，藉由電子設計自動化(electronic design automation, EDA)模擬連結器之共同模擬(co-simulation)系統漸漸被使用來驗證馬達驅動系統[7-9]。Verilog 及 VHDL 程式之正確性與有效性。EDA 模擬連結器提供 Simulink [10]及硬體描述語言(hardware description language,

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】386期・104年5月號

每期220元・一年12期2200元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9342

傳真訂購：03-582-2011

機械工業雜誌官方網站：[www.automan.tw](http://www.automan.tw)