



# 高性能永磁磁通切換馬達 之集中繞組設計

Design of High Performance Switched Flux Permanent  
Magnet Motors with Concentrated Windings

黃昌圳

逢甲大學  
電機工程系  
教授

## 關鍵詞(Keywords)

- 永磁磁通切換馬達  
Switched Flux (or Flux Switching) Permanent  
Magnet Motor
- 單層集中繞組  
Single-Layer Concentrated Winding
- 雙層集中繞組  
Double-Layer Concentrated Winding
- 頓轉轉矩  
Cogging Torque
- 總諧波失真  
Total Harmonic Distortion
- 有限元素法  
Finite Element Method

## 摘要(Abstract)

本文旨在提出高性能永磁磁通切換馬達之繞組設計方法。首先，為了得到低頓轉轉矩之馬達，選擇具有較高的最小公倍數之槽、極數組合。其次，控制每極每相之槽數在  $2/7$  與  $2/5$  之間，目的是確保繞組因數至少大於或等於  $0.866$ 。然後，介紹繞組配置的程序，以 12 槽 11 極為例，對可能的四種繞組配置，利用有限元素法進行分析，探討與比較對馬達性能所造成影響。最後，針對可以實施單層繞的槽、極數組合進行繞組配置與特性分析。

This paper presents a procedure to determine the winding layout for the design of high performance switched flux permanent magnet (SFPM) machines with concentrated windings. Firstly, in order to have



a low level of cogging torque, the least common multiple (LCM) of the magnet pole and slot count combination with higher value is selected. Secondly, in order to keep the winding factor equal or greater than 0.866, the number of slots per pole per phase between  $2/7$  and  $2/5$  is select. Thirdly, a procedure to determine the winding layout is introduced. Four possible winding configurations of a 12-slot/11-pole machine are investigated. Electromagnetic performance comparison among four winding configurations is made using finite element analysis. Finally, the magnet pole and slot count combination that can be wound with single-layer concentrated windings is selected as an example for illustration.

## 1. 前言

近年來，永磁磁通切換 (switched flux permanent magnet, SFPM; or flux switching permanent magnet) 馬達已逐漸受到重視及採用。這種電機在 50 年代就已被製作成一種高頻的發電機與致動器[1, 2]；之後為了降低成本，使用 DC 激磁線圈取代磁鐵[3, 4]；90 年代後期，被稱為 SFPM 馬達先驅的英國 Pollock 教授積極投入研發，獲得許多成果，如[5-9]等，其中大部分應用於單相驅動的低價位商品上，他曾經來台灣參訪與推廣 SFPM 馬達，對相關產學界有些助益；在此同時，法國的學者 Hoang 等實現了三相 SFPM 馬達的研製[10-14]；Sheffield 大學 Zhu 教授更將 SFPM 馬達的研究推向更高的境界，如[15-20]等。

SFPM 馬達它結合了切換磁阻馬達 (switched reluctance motor) 的高轉速與堅固的凸極性轉子結構、及永磁無刷馬達的高轉矩密度等優點，同時將磁鐵與繞組均裝置於定子，故具有較高的磁氣與電氣負荷，且磁鐵的溫升問題能很容易地被掌握，因此最近才異軍突起，儼然成為馬達領域的新秀。

理論上，設計一高性能的 SFPM 馬達，其轉子極數應儘可能接近定子槽數 (即高轉矩密度)，同時與傳統分數槽永磁馬達相似[20]，為了降低頓轉轉矩，應選擇具有較高槽極數之最小公倍數的組合，此外，為了維持線圈獲得較高的磁通交鏈，每極每相之槽數 ( $N_{spp}$ ) 應設計在  $1/4$  與  $1/2$  之間，如此可以確保基本波之繞組因數不小於 0.866。

因 SFPM 馬達之定子槽距通常相當接近轉子極距，故大都採用集中繞為主。當槽數為 12 的整數倍時，可以採用雙層集中繞或單層集中繞；而當槽數為 6 的奇數倍時，只能採用雙層集中繞。當馬達採用單層集中繞時，線圈數目為槽數的一半，因而使繞線較為容易實現，同時它比雙層繞具有較高的自感、較高的磁通交鏈、及故障容忍度，在定功率操作下有較廣域的速度範圍表現[21]。

Zhu [20] 等人已針對 SFPM 馬達提出具有高繞組因數的繞組配置方法，本文延伸他們的方法，針對高性能的需求，參考文獻[21-23] 提出所有可能的繞線配置，並以 12 槽 11 極的結構為案例，進行四種繞組配置的深入研究與探討，利用有限元素法作電磁特性分析[24]，以比較這四種繞組配置對馬達特性的影響，作為對 SFPM 馬達有興趣者之參考。

更完整的內容

請參考【機械工業雜誌】398期・105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)

機械工業雜誌信箱：[jmi@itri.org.tw](mailto:jmi@itri.org.tw)