

# 以有限元素法對電機磁場分析之研究

盧孝銘、胡永柟

E-mail: 9419801@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本論文主要探討發電機如何得到較高的輸出電壓，此發電機為單相永磁式同步發電機，定子繞組為四組串聯的集中繞組線圈，轉子為八極，採用永久磁石激磁。首先，從轉子的結構及激磁的磁石材料著手，再應用Ansoft公司所提供的套裝軟體Maxwell 2D，以二維非線性靜磁場有限單元分析法來進行發電機的電磁場、磁力與轉矩性能分析，以計算開路輸出電壓。在各種不同的磁石與結構組合所產生的輸出電壓，選擇最理想的發電機。本文是以三種不同磁石材質AlNiCo5、SmCo28、NdFe35並以徑向充磁及非導磁性材料兩種結構共六種模式使用套裝軟體特性分析，以特性而言，NdFe35最好，SmCo28次之，AlNiCo5最差，以結構而言，徑向充磁結構優於非導磁性結構。對於電機設計者來說其成本、溫度等因素也必須加以考慮的。

關鍵詞：有限元素法、電磁場分析、永磁式同步發電機、非線性靜磁場。

## 目錄

封面內頁 簽名頁 授權書 . . . . .	iii	中文摘要 . . . . .	
. . . . .	iv	英文摘要 . . . . .	v
. . . . .	vi	目錄 . . . . .	vii
. . . . .	ix	表目錄 . . . . .	x
. . . . .		xi	第一章 緒論 1.1
研究動機與目的 . . . . .	1	1.2 系統架構與研究步驟 . . . . .	2
. . . . .	2	2.1.1 系統架構 . . . . .	2
. . . . .	2	2.1.2 研究步驟 . . . . .	4
. . . . .	4	4.1.3 論文內容大綱概述 . . . . .	4
. . . . .	4	第二章 有限元素法數值分析 2.1簡介 . . . . .	5
. . . . .	5	2.2 Maxwell模組的原理 . . . . .	13
. . . . .	5	2.3線路方程式 . . . . .	24
. . . . .	16	2.4力矩的計算 . . . . .	13
. . . . .	16	第三章 磁效應理論 3.1磁極化與磁導係數 . . . . .	17
. . . . .	19	3.2磁雙極與磁雙極矩 . . . . .	17
. . . . .	19	3.3反磁性與順磁性 . . . . .	22
. . . . .	27	3.4反強磁性與磁鐵性 . . . . .	22
. . . . .	27	3.5磁伸縮現象 . . . . .	29
. . . . .	33	第四章 永久磁石的材料 4.1 概述 . . . . .	33
. . . . .	36	4.2 磁性材料用於電路元件的特色 . . . . .	34
. . . . .	36	4.3 磁性材料的分類 . . . . .	41
. . . . .	36	4.4 磁石的特性曲線 . . . . .	41
. . . . .	53	第五章 模擬過程及結果 5.1模型規格的建構 . . . . .	53
. . . . .	59	5.2徑向充磁的轉子結構模擬分析 . . . . .	56
. . . . .	59	5.3嵌入非導磁性的轉子結構模擬分析 . . . . .	56
. . . . .	65	5.4徑向充磁的轉子結構比較分析 . . . . .	63
. . . . .	65	5.5嵌入非導磁性的轉子結構比較分析 . . . . .	63
. . . . .	65	5.6性能討論 . . . . .	67
. . . . .	68	第六章 結論 . . . . .	67
. . . . .	68	參攷文獻 . . . . .	69
. . . . .	3	圖目錄 圖1.1軟體模擬製作流程圖 . . . . .	
. . . . .	3	圖2.1線性材料及非線性材料之能量關係圖 . . . . .	8
. . . . .	22	圖3.1永久磁雙極的排列情形 . . . . .	8
. . . . .	22	圖3.2 /N - X 函數曲線 . . . . .	25
. . . . .	35	圖4.1磁性體的能轉換 . . . . .	25
. . . . .	35	圖4.2永久磁石的B - H曲線圖 . . . . .	40
. . . . .	42	圖4.3磁滯迴線 . . . . .	40
. . . . .	42	圖4.4減磁曲線及能量曲線 . . . . .	43
. . . . .	43	圖4.5回歸線 . . . . .	43
. . . . .	43	圖4.6永久磁石的減磁曲線 . . . . .	45
. . . . .	47	圖4.7簡易磁路模型 . . . . .	45
. . . . .	47	圖4.8簡易磁路模型的操作點的變化 . . . . .	47
. . . . .	51	圖4.9磁路模型 . . . . .	47
. . . . .	51	圖4.10 NeFe35磁石之操作點變化情形 . . . . .	52
. . . . .	54	圖5.1發電機結構剖面圖 . . . . .	52
. . . . .	54	圖5.2定子鐵心B - H 特性曲線圖 . . . . .	55
. . . . .	56	圖5.3徑向充磁的轉子結構模型圖 . . . . .	55
. . . . .	56	圖5.4徑向充磁 - 鋁鎳鈷磁石的靜態磁場模擬圖 . . . . .	56
. . . . .	57	圖5.5徑向充磁 - 鋁鎳鈷磁石兩磁極的B曲線模擬圖 . . . . .	56
. . . . .	57	圖5.6徑向充磁 - 鈰鈷磁石的靜態磁場模擬圖 . . . . .	57
. . . . .	58	圖5.7徑向充磁 - 鈰鈷磁石兩磁極的B曲線模擬圖 . . . . .	57
. . . . .	58	圖5.8徑向充磁 - 鈰鐵磁石的靜態磁場模擬圖 . . . . .	58
. . . . .	59	圖5.9徑向充磁 - 鈰鐵磁石兩磁極的B曲線模擬圖 . . . . .	58
. . . . .	59	圖5.10 嵌入非導磁材料的轉子結構模擬圖 . . . . .	59
. . . . .	59	圖5.11 嵌入非導磁 - 鋁鎳鈷磁石的靜態磁場模擬圖 . . . . .	59
. . . . .	60	圖5.12嵌入非導磁 - 鋁鎳鈷磁石兩磁極的 B曲線模擬圖 . . . . .	60
. . . . .	60	圖5.13嵌入非導磁 - 鈰鈷磁石的靜態磁場模擬圖 . . . . .	60
. . . . .	61	圖5.14嵌入非導磁 - 鈰鈷磁石兩磁極的 B曲線模擬圖 . . . . .	61
. . . . .	61	圖5.15嵌入非導磁 - 鈰鐵磁石的靜態磁場模擬圖 . . . . .	61
. . . . .	62	圖5.16嵌入非導磁 - 鈰鐵磁石兩磁極的 B曲線模擬圖 . . . . .	62
. . . . .	62	圖5.17徑向充磁 - 三種磁石的 Energy比較圖 . . . . .	62
. . . . .	63	圖5.18徑向充磁 - 三種磁石的Flux比較圖 . . . . .	63

63 圖5.19徑向充磁 - 三種磁石的Torque比較圖	64 圖5.20徑向充磁 - 三種磁石的Force比較圖
64 圖5.21嵌入非導磁 - 三種磁石的Energy比較圖	65 圖5.22嵌入非導磁 - 三種磁石的Flux比較圖
65 圖5.23嵌入非導磁 - 三種磁石的Torque比較圖	66 圖5.24嵌入非導磁 - 三種磁石的Force比較圖
66 表目錄 表3.1 反強磁性物質之溫度	28 表3.2 各種磁性材料與之值
31 表4.1 各種永久磁石的特性	33 表4.2 磁性材料的分類及材料
37 表4.3 純鐵磁特性	37 表4.4 MK系磁石鋼特性
38 表4.5 非磁性合金成分	39 表5.1 發電機的規格表
51 表5.2 三種永久磁石的特性	52

## 參考文獻

- [1] 宋平生、洪瑞吉等“用電器具能源效率標準評估”，能源研究發展基金研究報告，台灣大電力研究試驗中心，民國82年6月。 [2] 姚久龍、吳祥俊等“感應電動機之省電研究計畫”，能源研究發展基金研究報告，工業技術研究院能源與礦業研究所，民國74年6月。 [3] 盧昭正、吳祥俊等“電動機組省電研究計畫”，能源研究發展基金研究報告，工業技術研究院能源與礦業研究所，民國76年7月。 [4] 陳夢萍、吳祥俊等“電動機組省電研究計畫”，能源研究發展基金研究報告，工業技術研究院能源與礦業研究所，民國77年8月。 [5] 黃昌圳、王坤卿、陳信元、張景誌、卓源鴻，Nov. 1999, “電動機車馬達之設計與分析,” Proceedings of the 20 Symposium on Electrical Power Engineering, Vol. 1, pp.594-598, Taipei, Taiwan. [6] G. A. Amratunga, P. P. Acarnley and P. G. McLaren, “Optimum Magnetic Circuit Configuration for Permanent Magnet Aerospace Generators,” IEE Trans. On Electronic Systems, Vol. Aes-21. No.2 pp.230-255, March 1985. [7] T. Sebastian and V. Gangla, “Analysis of induced EMF and torque waveforms in a brushless permanent magnet machine,” Rec.IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. pp.240-246,1994. [8] B. Nogarede and M. Lajoie-Mazenc, “Torque ripple minimization methods,” in Proc. IEE Conf. Elec. Machines & Drives, pp.41-45, Sept 1991. [9] T. Jahns, “Toque production in permanent-magnet synchronous motor drives with rectangular current excitation,” IEEE Trans. Ind.Applicat. Vol.20, No.4,pp.803-813,July/Aug 1984. [10] E. Favre, L. Cardoletti, ant M. Jufer, “Permanent-magnet synchronous Motors: a comprehensive approach to cogging torque suppression,” IEEE Trans. Ind. Applicat, Vol.29. No. 6, pp.1141-1149, Nov./Dec.1993. [11] A. Kaddouri and H. Le-Huy, “Analysis and design of a slotless NdFeB Permanent-magnet synchronous motor for direct drive,” in Rec. IEEE Ind. Applicat. Soc Annu.Meet,pp.271-278,1992. [12] F. Colamartino. C. Marchand, and A. Razek, “Considerations of nonsinusoidal field distribution in a permanent magnet synchronous motor control,” in Proc.IEE Conf. Power Electron, Var.-Spd.Drives, pp.508-513,Oct 1994. [13] L. Soderlund and J. T. Eriksson, “A Permanent-Magnet Generator for Wind Power Applications,” IEEE Trans. On Magnetics, Vol.32, No.4, pp.2389-2393, July 1996. [14] E. Muljadi, C. P. Butterfield and Y. H. Wan, “Axial-Flux Modular Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind-Turbine Applications,” IEEE Trans. Ind. Applicat, Vol.35, No.4, pp.831-836, July/Aug 1999. [15] 蔡文彬, “永磁交流馬達,” 中華民國磁性技術協會會訊第十八期,pp25-29, Oct 1998. [16] Ansoft Corporation, “Maxwell 2D Field Simulator User Reference,” August 1999. [17] 蔣世邦, “光碟機主軸馬達的模擬與分析,” 逢甲大學電機工程研究所碩士學位論文,May,1997. [18] 王家騏,俞國平編著, “電工材料,” 曉園出版社,pp.309-329,Feb 1983. [19] T. Kenjo and S. Nagamori, Permanent-Magnet and Brushless DC Motor,Oxford,1985. [20] 黃世民,羅應照, “永久磁石在永磁電動機之設計與應用技術,” 機械工業雜誌,pp.183-204, March 1996.