

# 電動車銅轉子三相感應馬達設計分析與向量控制研究

朱智盟、陳盛基

E-mail: 344739@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

本文提出電動車感應馬達之設計與分析流程及馬達向量控制之研究。電動車應具備高功率密度及高效率的要求，為了達到這些要求，除了增加定子繞線的佔槽率外，我們採用高等級的薄型矽鋼片，降低馬達的鐵損。此外，定子繞組亦採用短節距雙層疊繞設計，降低一次側銅損及高頻諧波；轉子繞組也採用銅轉子增加導電率，降低二次側銅損。本文設計一具3相4極，連續功率35 kW，最大功率105kW，效率高於94 % 之電動車用感應馬達。文中說明馬達的電機設計、電磁場及等效電路分析要點。最後，進行馬達特性的模擬與實測。在馬達向量控制研究上，首先瞭解三相感應馬達向量控制之座標轉換原理，其中包含PARK、CLACK轉換及PI控制等，接著對純量、直接磁場導向及間接磁場導向控制進行探討，最後使用MATLAB/SIMULINK進行馬達開迴路、閉迴路及磁場導向速度控制系統的模擬與分析，並針對不同加載下的動態響應進行討論。

關鍵詞：電動車、感應馬達、有限元素分析、銅轉子、向量控制

## 目錄

封面內頁 簽名頁 中文摘要 . . . . .	iii	英文摘要 . . . . .	iv
. . . . .	iv	誌謝 . . . . .	v
. . . . .	vi	圖目錄 . . . . .	x
. . . . .	xv	符號說明 . . . . .	xvi
第一章 緒論 . . . . .	1	1.1 研究動機與目的 . . . . .	1
. 1.1.2 文獻回顧 . . . . .	4	1.3 內容大綱 . . . . .	7
第二章 感應馬達設計 . . . . .	8	2.1 感應馬達構造 . . . . .	8
2.1.1 三相感應馬達旋轉磁場 . . . . .	8	2.1.2 三相感應馬達的特性 . . . . .	11
2.1.3 三相感應馬達等效電路 . . . . .	13	2.2 感應馬達等效電路 . . . . .	13
. . . . .	13	2.2.1 戴維寧等效電路分析 . . . . .	14
. . . . .	17	2.3 感應馬達設計程序 . . . . .	17
. . . . .	17	2.3.1 感應馬達定子設計 . . . . .	18
. . . . .	23	2.3.2 感應馬達轉子設計 . . . . .	23
. . . . .	26	2.3.3 感應馬達繞線設計 . . . . .	26
2.4 感應馬達特性曲線 . . . . .	29	2.4.1 感應馬達轉矩特性分析 . . . . .	29
2.4.2 感應馬達電流特性分析 . . . . .	30	2.4.3 感應馬達輸出功率特性分析 . . . . .	31
2.4.4 感應馬達功率因數特性分析 . . . . .	32	2.4.5 感應馬達效率特性分析 . . . . .	33
2.5 感應馬達機械設計 . . . . .	35	第三章 感應馬達有限元素分析 . . . . .	38
. . . . .	38	3.1 有限元素分析法之基本概念 . . . . .	38
3.2 馬達材料特性及設定 . . . . .	41	3.3 有限元素分析結果 . . . . .	43
4.1 線圈電阻、電感量測 . . . . .	46	4.2 無載測試 . . . . .	47
4.2 無載測試原理 . . . . .	47	4.2.2 無載測試實驗結果 . . . . .	47
4.3 馬達加載測試 . . . . .	50	4.3.1 加載測試設備 . . . . .	50
4.3.2 加載測試實驗結果 . . . . .	51	4.4 實測模擬比對 . . . . .	58
4.4.1 頻率126(Hz)比較 . . . . .	58	4.4.2 頻率173.5(Hz)比較 . . . . .	62
第五章 三相感應馬達參數與特性量測 . . . . .	66	5.1 感應馬達參數量測 . . . . .	66
5.1.1 直流試驗 . . . . .	67	5.1.2 無載試驗 . . . . .	68
5.1.3 堵轉試驗 . . . . .	70	5.1.4 參數估算 . . . . .	73
5.2 感應馬達動力計測量 . . . . .	78	5.3 感應馬達特性曲線驗證 . . . . .	81
5.3.1 轉矩特性驗證 . . . . .	81	5.3.2 電流特性驗證 . . . . .	81
5.3.3 輸出功率特性驗證 . . . . .	82	5.3.4 效率特性驗證 . . . . .	83
第六章 三相感應馬達向量控制原理 . . . . .	85	6.1 簡介 . . . . .	85
6.2 向量控制原理 . . . . .	86	6.3 座標轉換 . . . . .	88
6.3.1 CLARKE轉換 . . . . .	89	6.3.2 PARK轉換 . . . . .	89
6.3.3 PARK反轉換 . . . . .	91	6.3.4 CLARKE反轉換 . . . . .	91
6.3.5 磁通估測器 . . . . .	92	6.3.6 PI控制 . . . . .	94
6.3.7 空間向量調變 . . . . .	95	第七章 三相感應馬達向量控制模擬 . . . . .	99
7.1 操作策略 . . . . .	99	7.1.1 純量控制 . . . . .	99

101	7.2 磁場導向控制	102	7.2.1 直接磁場導向電流控制
105	7.2.2 直接磁場導向電壓控制	108	7.3 間接磁場導向控制
111	7.4 模擬	113	7.4.1 模擬1：利用純量控制進行閉迴路速度控制
		113	7.4.2 模擬2：感應馬達六步波驅動變頻器
124	7.4.3 模擬3：磁場導向控制	129	第八章 結論
136	參考文獻	138	

## 參考文獻

- [1]W. R. Finley and M. M. Hodowanec, " Selection of Copper versus Aluminum Rotors for Induction Motors, " IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, pp. 1563-1573, 2001.
- [2]K. Hafiz, G. Nanda, and C. Kar, " Performance Analysis of Aluminum- and Copper-Rotor Induction Generators Considering Skin and Thermal Effects, " IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 57, No. 1, pp. 181-192, 2010.
- [3]Motors and Generators, NEMA Standards Publication MG 1-1993, 1996.
- [4]M, Zeraouia, M. E. H. Benbouzid, and D. " Diallo,Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study, " IEEE Trans. on Vehicle Power and Propulsion, Vol. 55, No. 6, pp. 1756-1764, 2006.
- [5]S. Z. Jiang, K. T. Chau, and C. C. Chan, " Spectral Analysis of a New Six-Phase Pole-Changing Induction Motor Drive for Electric Vehicles, " IEEE Trans. on Industry Electronics, Vol. 50, No. 1, pp. 123-131, 2003.
- [6]M. K. Yoon, C. S. Jeon, and S. K. Kauh, " Efficiency Increase of an Induction Motor by Improving Cooling Performance, " IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, pp. 1-6, 2002.
- [7]J. L. Kirtley, J. G. Cowie, E. F. Brush, D. T. Peters, and R. Kimmich, " Improving Induction Motor Efficiency with Die-cast Copper Rotor Cages, " IEEE Trans. on Power Engineering Society General Meeting, Vol. 17, No. 1, pp. 1-6, 2007.
- [8]D. H. Cho, H. K. Jung, and C. G. Lee, " Induction Motor Design for Electric Vehicle Using a Niching Genetic Algorithm, " IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 37, No. 4, pp. 994-999, 2001.
- [9]J. Wu, D. Gao, and Q. Lu, " An Efficiency Optimization Strategy of Induction Motors for Electric Vehicles, " IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, on Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1-5,2008.
- [10]T. Wang, P. Zheng, Q. Zhang, and S. Cheng, " Design Characteristics of the Induction Motor Used for Hybrid Electric Vehicle, " IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 505-508, 2005.
- [11]Y. Wu, and H. Gao, " Induction-Motor Stator and Rotor Winding Temperature Estimation Using Signal Injection Method, " IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 42, No. 4, pp. 1038-1044, 2006.
- [12]C. C. Chan, " An Overview of Electric Vehicle Technology, " Proceedings of The IEEE, Vol. 81, No. 9, pp. 1202-1213, 1993.
- [13]C. C. Chan, " An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles, " IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 1, pp. 3-13, 1997.
- [14]M. Centner, and U. Schafer, " Optimized Design of High-Speed Induction Motors in Respect of the Electrical Steel Grade, " IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 1, pp. 288-295, 2010.
- [15]A. H. Bonnett, and G. C. Soukup, " Rotor Failures in Squirrel Cage Induction Motors, " IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 22, No. 6, pp. 1165-1173, 1986.
- [16]Bentounsi, and A. Nicolas, " On Line Diagnosis of Defaults on Squirrel Cage Motors Using FEM, " IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 3511-3514, 1998.
- [17]J. L. Oldenkamp, and S. C. Peak, " Selection and Design of an Inverter-Driven Induction Motor for a Traction Drive System, " IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 1, pp. 259-265, 1985.
- [18]A. Kawamura, N. Hoshi, T. W. Kim, T. Yokoyama, and T. Kume, " Analysis of Anti-directional-twin-rotary Motor Drive Characteristics for Electric Vehicles, " IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 1, pp. 64-70, 1997.
- [19]W. R. Finley, and M. M. Hodowanec, " Selection of Copper Versus Aluminum Rotors for Induction Motors, " IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, pp. 1563-1573, 2001.
- [20]H. Shim, S. Wang, and K. Lee, " 3-D Optimal Design of Induction Motor Used in High-Pressure Scroll Compressor, " IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 45, No. 5, pp. 2076-2084, 2009.
- [21]J. H. H. Kuhlmann, Design of Electrical Apparatus, 3d ed., John Wiley & Sons, New York, 1950.
- [22]陳秋麟、王順忠編譯, 「電機機械基本原理」, 麥格羅希爾出版, 2000年7月。
- [23]J. J. Cathey, Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB. McGraw-Hill, Inc., 2001.
- [24]D. C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design. 2nd ed., The Writers' Collective, 2003.
- [25]詹宜彬, " 線性同步馬達的設計與製作 ", 清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 1996年。
- [26]S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 4 ed, McGraw-Hill Inc., 2003.
- [27]黃昌圳編譯, 「電機機械」, 麥格羅希爾出版, 2006年9月。

- [28]Application Note AN908, “ Using the dsPIC30F for Vector Control of an ACIM, ” Microchip Technology Inc., 2007.
- [29]M. Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB/SIMULINK, Prentice-Hill, Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [30]陳盛基、朱智盟、羅民芳、張金鋒, “ 高效率銅轉子電動車感應馬達設計與分析 ”, 第9屆電力電子研討會暨展覽會, pp. 99-104, 2010年9月。
- [31]張金鋒、黃茂川、陳盛基、朱智盟, “ 新世代電動車感應馬達設計與分析 ”, 機械月刊432期, pp.76-90, 2011年7月。