

降低永磁線性同步馬達頓動力之分析與驗證

莊杰霖、陳盛基

E-mail: 9607741@mail.dyu.edu.tw

摘要

工廠自動化與線性運動控制系統促使永磁線性同步馬達的蓬勃發展。永磁線性同步馬達的優點在於高速、高動態響應及直接驅動。但是，永磁線性同步馬達因端部效應及永久磁鐵與齒槽間的相互作用產生頓動力，頓動力通常會引起我們不想要的振動及噪音。尤其在低速時將對系統造成不利的影響。本研究分析頓動力並提出四種降低永磁線性同步馬達頓動力的技術。包括：在動子鐵心增加齒靴，並縮小槽口寬度、調整永久磁鐵寬度、選擇適當的動子鐵心長度、修改永久磁鐵表面形狀等。並使用有限元素分析軟體(Ansoft Maxwell-2D)進行模擬，再就所得之模擬結果分析討論，並依此結果設計一組較小頓動力之線性馬達。最後，我們建立一套頓動力量測機構，實際量測永磁線性同步馬達的頓動力。由實測數據顯示與模擬結果吻合，驗證分析流程的正確性。

關鍵詞：永磁線性同步馬達；頓動力；有限元素分析；端部效應；永久磁鐵

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	xiii
.	1	1.1 研究動機及目的	1
.	1	1.2 文獻回顧	1
.	2	2.1 研究步驟與論文架構	3
.	6	2.2 線性馬達	6
.	6	2.1 線性馬達簡介	6
.	6	2.2 線性馬達分類	10
.	8	2.3 端部效應	10
.	12	3.1 永磁線性同步馬達原型介紹	12
.	12	3.2 永磁線性同步馬達規格與性能分析	15
.	15	3.2.1 磁鐵材料與磁導係數	17
.	17	3.2.2 線圈繞組分佈與電阻值	20
.	20	3.2.3 馬達電感值	24
.	24	3.2.4 氣隙磁通密度	24
.	28	3.2.5 馬達推力與推力常數	28
.	28	3.2.6 馬達反電勢波形與反電動常數	33
.	35	3.2.7 馬達常數	35
.	35	3.3 永磁線性同步馬達頓動力波形分析	36
.	40	4.1 有限元素分析法之基本概念	40
.	40	4.2 材料特性	44
.	44	4.3 網格密度的影響	46
.	46	4.4 馬達原型有限元素模擬分析結果	48
.	55	5.1 改變動子槽型	55
.	55	5.2 改變磁鐵尺寸	57
.	64	5.3 改變動子長度	66
.	66	5.4 改變磁鐵表面形狀	70
.	70	5.5 最佳參數組合	73
.	76	6.1 永磁線性同步馬達原型頓動力量測系統	76
.	76	6.2 永磁線性同步馬達原型頓動力之量測與比較	80
.	80	第七章 結論	85
.	87	參考文獻	87
.	93	符號說明	93

參考文獻

[1] R. P. Deodhar, D. A. Staton, T. M. Jahns and T. J. E. Miller, " Prediction of Cogging Torque Using the Flux-MMF Diagram Technique ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.32, no.3, pp. 569-576, 1996.

[2] K. C. Lim, J. P. Hong and G. T. Kim, " The Novel Technique Considering Slot Effect by Equivalent Magnetizing Current ", IEEE Trans. on Magnetism, vol.35, no.5, pp. 3691-3693, 1999.

[3] T. Yoshimura, H. J. Kim, M. Watada, S. Torii, D. Ebihara, " Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor ", IEEE Trans. on Magnetism, vol.31, no.6, November, pp.3728-3730, 1995.

- [4] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim, D. S. Hyun, " Analysis of Forces in a Short Primary Type and a Short Secondary Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor ", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol.14, no.4, December, pp.1265-1269, 1999.
- [5] M. Inoue, K. Sato, " An Approach to a Suitable Stator Length for Minimizing the Detent Force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motors ", IEEE Trans. on Magnetics, vol.36, no.4, July, pp.1890-1893, 2000.
- [6] K. C. Lim, J. K. Woo, G. H. Kang, J. P. Hong and G. T. Kim, " Detent Force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motors ", IEEE Trans. on Magnetics, vol.38, no.2, March, pp.1157-1160, 2002.
- [7] N. Bianchi, S. Bolognani and A.D.F. Cappello, " Reduction of Cogging Force in PM Linear Motors by Pole-Shifting ", IEE Proceedings Electronic Power Applications, vol.152, no.3, May, pp.703-709, 2005.
- [8] R. Akmese, J. F. Eastham, " Design of Permanent Magnet Flat Linear Motors for Standstill Applications ", IEEE Trans. on Magnetics, vol.28, no.5, September, pp.3042-3044, 1992.
- [9] 沈德洋, " 單側式永磁同步馬達之動態分析及頓動力與力量漣波補償 ", 中正大學機械工程研究所碩士論文, 2000年。
- [10] 陳盛基, " 影響永磁無刷直流線性馬達頓動力之電機參數分析 " 國家科學委員會個人型研究計劃報告, NSC94-2213-E-212- 027, 2006年。
- [11] 粘鏡耀, " 無鐵心式永磁線性無刷直流馬達之設計與分析 ", 大葉大學電機工程研究所碩士論文, 2007年。
- [12] 戴信能, " 永磁式線性伺服馬達控制與磁路之整合最佳化設計 ", 中正大學機械工程研究所碩士論文, 2000年。
- [13] K. K. Tan, S. N. Huang and T. H. Lee, " Robust Adaptive Numerical Compensation for Friction and Force Ripple in Permanent Magnet Linear Motor ", IEEE Trans. on Magnetics, vol.38, no.1, pp.221-228, 2002.
- [14] K. K. Tan, H. Dou, Y. Chen and T. H. Lee, " High Precision Linear Motor Control Via Relay-Tuning and Iterative Learning Based on Zero-Phase Filtering ", IEEE Trans. on Magnetics, vol.9, no.2, pp.244-253, 2001.
- [15] A. P. Hu, A. Register, N. Sadegh, " Using a Learning Controller to Achieve Accurate Linear Motor Motion Control ", International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta, USA, September, pp.611-616, 1999.
- [16] G. Otten, T. J. A. de Varies, J. V. Amerongen, A. M. Rankers and E. W. Gaal, " Linear Motor Motion Control Using a Learning Feed-Forward Controller ", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 2, no.3, pp. 179-187, 1997.
- [17] D. C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, second edition, The Writers ' Collective, 2003.
- [18] C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian, S. K. Murthy, " Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines ", IEEE IAS Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, USA, October, pp.42-49, 1997.
- [19] 黃國華、陳鴻誠, " 永磁電機頓轉轉矩之分析 ", 馬達電子報, 第七十二期, 2004年。
- [20] Z. Q. Zhu, D. Howe, " Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines ", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol.15, no.4, December, pp.407-412, 2000.
- [21] M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian, " Issues in Reducing the Cogging Torque of Mass-Produced Permanent-Magnet Brushless DC Motor ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.40, no.3, May/ June, pp.813-820, 2004.
- [22] T. Mizuno, H. Yamada, " Magnetic Circuit Analysis of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets ", IEEE Trans. on Magnetics, vol.28, no.5, pp.3027-3029, 1992.
- [23] 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。
- [24] I. Boldea, S. S. Nasar, " Linear Electric Actuators and Generators ", Cambridge University Press, 1997.
- [25] 廖聰明, " 線性馬達高功率驅動器研製 ", 中山科學研究院委託學界研究報告, 1998年。
- [26] 涂銘河, " 線性馬達強健控制器設計 ", 大葉大學電機工程研究所碩士論文, 2005年。
- [27] Catalog:Linear motion products, Baldor Electric Company, Fort Smith, AR, USA, 2000.
- [28] Boldea, and S. A. Nasar, Linear motion electromagnetic systems, John Wiley & Sons Inc., 1985.
- [29] G. W. Mclean, " Review of recent progress in linear motors ", IEE Proceedings, vol. 135, Pt. B, no.6, pp.380-416, November, 1988.
- [30] Catalog:Platinum DDL, Kollmorgen, Radford, VA, USA, 2001.
- [31] D. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, second edition, Addison Wesley, 1992.
- [32] P. Famouri, " Control of a linear permanent magnet brushless DC motor via exact linearization Methods ", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol.7, no.3, September, pp.544-551, 1992.
- [33] 張富均, " 線性馬達驅動系統之研製 ", 逢甲大學自動控制工程研究所碩士論文, 2001年。
- [34] " 精密馬達機電科技研發人材培訓課程講義 ", The University of Sheffield, 2006年。
- [35] 陳盛基、粘鏡耀, " 永磁直流無刷馬達改變磁極弧長降低頓轉轉矩之分析 ", 馬達電子報, 第209期, 2006年。
- [36] N. Bianchi and S. Bolognani, " Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.38, no.5, pp.1259-1265, 2002.
- [37] J. F. Gieras, " Analytical Approach to Cogging Torque Calculation of PM Brushless Motor ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.40, no.5, pp.1310-1316, 2004.
- [38] Z. Q. Zhu, X. P. Xia, D. Howe and P. H. Mellor, " Reduction of cogging force on slotless linear permanent magnet force ", IEE Proceedings Electronic Power Applications, vol.144, no.4, pp. 277-282, July 1997.

- [39] 黃昌圳, “有限元素法在電機工程的應用”, 全華科技圖書股份有限公司, 初版一刷, 2005年。
- [40] 陳雙穩, “永磁無刷馬達之繞線結構對性能影響之研究”, 成功大學機械工程研究所碩士論文, 2001年。
- [41] D. Howe, Z. Q. Zhu, “The Influence of Finite Element Discretisation on the Prediction of Cogging torque in Permanent Magnet Excited Motors”, IEEE Trans. on Magnetics, vol.28, no.2, March, pp.1080-1083, 1992.
- [42] 陳文川, “精密直流無刷馬達之頓轉扭矩量測設備的建置及應用研究”, 長庚大學化工與材料工程研究所碩士論文, 2005年。
- [43] J. F. Gieras and Z. J. Piech, LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS Transportation and Automation Systems, CRC Press, 2000.