

# 降低永磁電機頓動轉矩方法分析與研究

林英智、陳盛基

E-mail: 387153@mail.dyu.edu.tw

## 摘要

現今能源漸漸短缺的社會中，各國紛紛提倡綠色能源的開發與研究，在機械設備的運作上，電動機的使用是不可欠缺的，相對電動機的效能也提倡高功率密度的開發與研究。現今台灣提倡智能馬達，即為「永磁無刷馬達」，其具有優良的控制、體積小和高效率等特性，但其也有負面性影響，即為磁石所帶來的頓動轉矩。它會影響電機的旋轉，故削減頓動轉矩的課題是永磁無刷馬達之困難點及研究重點之一。本研究選用合適的磁鐵外形特徵作為參數化設計指標，此參數同時包含磁極的極弧距及磁鐵外表面圓弧的偏心距。本文以一具3相4極6槽的馬達作為研究架構，首先用等效磁路分析進行馬達特性的評估，然後利用傅立葉級數與有限元素分析法獲得馬達的頓動轉矩、磁場分佈與反電勢等波形；並以數值分析的方法，研究磁鐵外形於參數變化下所對應的頓動轉矩。最後，依據所分析的結果製作馬達雛形，進行馬達特性的測量，透過實驗結果與分析的比較，驗證本研究所提出的方法之有效性且為準確度極高之方法。

關鍵詞：永磁無刷馬達、頓動轉矩、極弧距、偏心距、等效磁路分析、有限元素分析、反電動勢

## 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 . . . . .	viii
. . . . .	x	表目錄 . . . . .	xi
. . . . .	1	符號說明 . . . . .	xi
. . . . .	1	第一章 緒論 . . . . .	1
. . . . .	1	1.1 前言 . . . . .	1
. . . . .	1	1.2 研究方法 . . . . .	1
. . . . .	2	1.3 內容大綱 . . . . .	3
. . . . .	3	第二章 永磁直流無刷電動	3
機的結構與頓動轉矩的響應 . . . . .	4	2.1 永磁無刷電動機基本構造配置與應用 . . . . .	4
. . . . .	7	2.2 永磁直流無刷馬達的基本	7
旋轉條件 . . . . .	7	2.3 頓動轉矩的生成與影響 . . . . .	10
. . . . .	14	第三章 探討減小頓動轉矩的方式 . . . . .	14
. . . . .	22	3.1 消除頓動轉矩的方式 . . . . .	14
. . . . .	26	3.2 改變頓動轉矩大小的實用性 . . . . .	22
. . . . .	26	第四章 永磁直流無刷馬達機構與幾何設計 . . . . .	26
介 . . . . .	26	-vii- 4.1 永磁無刷馬達主要材料簡	26
. . . . .	34	介 . . . . .	26
. . . . .	34	4.2 定轉子槽極數及相數之選擇 . . . . .	32
. . . . .	47	4.3 定子和轉子幾何結構與參數 . . . . .	34
. . . . .	47	4.4 永磁直流無刷馬達電氣參數的計算 . . . . .	38
. . . . .	47	第五章 低成本且有效降低頓動的方法 . . . . .	47
. . . . .	47	5.1 減少頓動轉矩所選用的方法 . . . . .	47
. . . . .	47	5.2 永磁電機分析和減少頓動轉矩 . . . . .	47
. . . . .	57	5.3 有限元素分析法 . . . . .	57
. . . . .	60	第六章 研究成果的比較與分析 . . . . .	60
. . . . .	68	6.1 探討最佳化極弧距和偏心距參數的響應 . . . . .	60
. . . . .	68	6.2 降低頓動的驗證 . . . . .	68
. . . . .	71	第七章 結論及未來研究方向 . . . . .	71
. . . . .	4	-viii- 圖目錄 圖2.1 PMBLDCM 之基本控制架構 . . . . .	4
. . . . .	6	圖2.2 傳統直流有刷馬達構造 . . . . .	6
. . . . .	6	圖2.3 無刷直流馬達剖面圖 . . . . .	6
. . . . .	6	圖2.4 無刷直流馬達結構圖 . . . . .	6
. . . . .	7	圖2.5 三相永磁直流無刷馬達	7
之驅動電路示意圖 . . . . .	8	圖2.6 霍爾元件回授信號與馬達三相輸出電壓之時序圖 . . . . .	9
. . . . .	8	圖2.7 永磁直流無刷馬達	8
六步換向順序 . . . . .	10	圖2.8 永磁馬達旋轉時頓動轉矩位置 . . . . .	13
. . . . .	10	圖2.9 永磁馬達旋	10
轉時頓動轉矩示意圖 . . . . .	13	圖3.1 輔助齒槽示意圖 . . . . .	16
. . . . .	13	圖3.2 磁極	13
擺放差異示意圖 . . . . .	20	圖3.3 磁鐵極弧距 . . . . .	21
. . . . .	20	圖3.4 磁鐵表面圓心偏差 . . . . .	21
. . . . .	21	圖3.5 分數槽 . . . . .	22
. . . . .	21	圖3.6 齒靴深度 . . . . .	22
. . . . .	22	圖3.7 縮小槽口設計 . . . . .	22
. . . . .	23	圖3.8 定子斜槽設計 . . . . .	23
. . . . .	23	圖3.9 表面黏貼式永久磁鐵 . . . . .	23
. . . . .	24	圖3.10 無齒槽繞阻 . . . . .	24
. . . . .	24	圖3.11 定子齒部凹槽 . . . . .	24
. . . . .	25	圖4.1 中鋼公司CSC50CS600 矽鋼片的磁滯曲線 . . . . .	29
. . . . .	29	圖4.2 中鋼公司CSC50CS600 矽鋼片	29
的B-H 特性曲線圖 . . . . .	29	圖4.3 中鋼公司CSC50CS600 矽鋼片的鐵損特性圖 . . . . .	30
. . . . .	29	圖4.4 中鋼公司CSC50CS600	29
矽鋼片在不同頻率下的鐵損特性30 圖4.5 本研究之永磁無刷馬達定轉子示意圖 . . . . .	34	圖4.6 本研究之永磁無	30
. . . . .	34	刷馬達定轉子細部示意圖 . . . . .	35
. . . . .	35	圖4.7 定子槽部及端部線圈分佈圖 . . . . .	42
. . . . .	35	圖5.1 3相4極6	35
槽的無刷馬達模型 . . . . .	49	圖5.2 3相4極6槽無刷直流馬達及封閉之磁迴路 . . . . .	49
. . . . .	49	圖5.3 在	49
圖5.2 中的等效電路磁路模型 . . . . .	50	圖5.4 頓動轉矩的形成 . . . . .	53
. . . . .	50		53

圖5.5 磁鐵幾何外形以極弧距及外圓弧偏心距的方式定義 . . . 54	圖5.6 表面黏貼式永磁馬達 . . . . . 55
圖6.1 極弧距及極弧偏心距對頓動轉矩振幅之影響 . . . . . 61	圖6.2 Type A 的模型 . . . . . 62
圖6.3 Type B 的模型 . . . . . 63	圖6.4 Type A的 $p = 0.67$ , $R1 = 3mm$ . . . . . 63
圖6.5 Type B 的 $0.75 p a =$ , $1 R = 7.5mm$ . . . . . 64	圖6.6 Type A 與Type B 三角網格元素 . . . . . 64
圖6.7 Type A 在氣隙中的磁通密度 . . . . . 65	圖6.8 Type B 在氣隙中的磁通密度 . . . . . 66
圖6.9 相繞組的反電動勢波形 . . . . . 67	圖6.10 具不同磁鐵外形之無刷雛形品 . . . . . 67
圖6.11 量測頓動轉矩之測試平台 . . . . . 68	圖6.12 相繞組的反電動勢量測波形 . . . . . 69
圖6.13 頓動轉矩的量測波形, 及有限元素和分析波形之比較 . 69	-x- 表目錄 表2.1 永磁直流無刷馬達控制真實表 . . . . . 9
表3.1 降低頓動轉矩方法之比較 . . . . . 22	表4.1 常用矽鋼片特性 . . . . . 28
表4.2 永久磁石種類比較表 . . . . . 31	表4.3 永磁直流無刷馬達的相數比較表 . . . . . 32
表4.4 三相永磁直流無刷馬達槽/極組合表 . . . . . 33	表5.1 馬達設計參數 . . . . . 50
表5.2 電機尺寸 . . . . . 51	表5.3 磁路分析的結果 . . . . . 51 a

## 參考文獻

[1] N. Parspour and R. Hanitsch, " Fuzzy Controlled Brushless DC Motor for Medical Applications, " Control and Instrumentation 20th International Conference on Industrial Electronics, Vol. 2, pp. 1310-1314, 1994.

[2] H. Tian, D. Wu, Z. Du, J. Ma and L. Sun, " Development of a Robot System Assisting Artificial Cervical Disc Replacement Surgery, " Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1382-1387, 2010.

[3] J. D. Ede, K. Atallah, G. W. Jewell, J. B. Wang, and D. Howe, " Effect of Axial Segmentation of Permanent Magnets on Rotor Loss in Modular Permanent-Magnet Brushless Machines, " IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 5, pp. 1207-1213, 2007.

[4] C. Liu, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, " A Permanent-Magnet Hybrid Brushless Integrated Starter-Generator for Hybrid Electric Vehicles, " IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 12, pp. 4055-4064, 2010.

[5] C. S. Soh and C. Bi, " Sensorless Optimal Sinusoidal Brushless Direct Current for Hard Disk Drives, " Journal of Applied Physics, Vol. 105, No. 7, pp. 07F118-07F118-3, 2009.

[6] S. G. Lee, D.K. Kim, D. S Shin, B. T. Kim, B. I. Kwon and Y. C. Lim, " A Study on Low-Cost Sensorless Drive of Brushless DC Motor for Compressor Using Random PWM, " Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 920-925, 2007.

[7] K. W. Lee, J. Hong, S. B. Lee, and S. Lee, " Quality Assurance Testing for Magnetization Quality Assessment of BLDC Motors Used in Compressors, " IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 6, pp. 2452-2458, 2010.

[8] A. Zaki and S. Ibrahim, " Modeling and Analysis of PM Brushed DC Motor Using FEM, " 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-6, 2005.

[9] 賴耿陽, 永久磁鐵技術實務, 復漢出版社, 1993.

[10] Z. Q. Zhu and D. Howe, " Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines, ? IEEE Transactions on IEEE Energy Conversion, Vol. 43, No. 4. pp. 407-411, 2000.

[11] T. M. Jahns and W. L. Soong, " Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives-A Review,? IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, pp. 321-330, 1996.

[12] M. Goto and K. Kobayashi, " An Analysis of Tile Cogging torque of a DC Motor and a New Technique of Reducing the Cogging Torque,?Electrical Engineering in Japan, Vol. 103, No. 5, pp. 113-120, 1983.

[13] K. Kobayashi and M. Goto, " A Brushless DC Motor of a New Structure with Reduced Torque Fluctuations, ? Electrical Engineering in Japan, Vol. 105, No. 3, pp. 104-112, 1985.

[14] 王秀和, 永磁電機(第2版), 中國電力出版社, 2010.

[15] C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian and S. K. Murthy, " Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines, " IEEE Industry Applications Conference, Vol. 1, pp. 42-49, 1997.

[16] 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 Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, pp. 569-576, 1996.

[17] S. Ruangsinchaiwanich, Z. Q. Zhu, D. Howe, " Influence of Magnet Shape on Cogging Torque and Back-Emf Waveform in Permanent Magnet Machines, Electrical Machines and Systems, " Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol. 1, pp. 284-289, 2005.

[18] J. R. Hendershot and T. J. E Miller, " Design of Brushless Permanent Magnet Motors " , Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994.

[19] D. C. Hanselman, " Brushless Permanent-Magnet Motor Design " , McGraw-Hill, New York, 1994.

[20] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, and A. Tenconi, " A Comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM

Synchronous Motors ” , IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No 6, pp. 1517-1524, 2002.

[21]M. R. Dobois, H. Polinder, and J. A. Ferreira, “ Magnet shaping for Minimal Magnet Volume in Machines, ” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 5, pp. 2985 – 2987, 2002.

[22]D. C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2nd ed., Cranston, Rhode Island: The Writers ’ Collective, 2003.

[23]N. Bianchi and S. Bolognani, “ Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors, ” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 5, pp. 1259-1265, 2002.

[24]R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.

[25]X. Wang, Y. Yang, and D. Fu, “ Study of Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Motors with Energy Method, ” Journal of Magnetism and Magnetic Material, Vol. 267, No. 1, pp. 80-85, 2003.

[26]X. Wang, Permanent Magnet Machines, 2nd ed., Chinese Version, Beijing, China Electric Power Press, 2010.

[27]Y. Yang, X. Wang, R. Zhang, and R. Tang, “ The Optimization of Pole Arc Coefficient to Reduce Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Motors, ” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 4, pp. 1135-1138, 2006.

[28]D. K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, 2nd ed., Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1983.

[29]李志勇、陳盛基，表面型永磁直流無刷馬達磁鐵形狀對頓動轉矩及效率之影響，大葉大學碩士論文，1997。

[30]D. Ishak, Z. Q. Zhu and D. Howe, “ Permanent-Magnet Brushless Machines with Unequal Tooth Widths and Similar Slot and Pole Numbers, ” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 2, pp. 584-590, 2005.