

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫五：開關式磁阻馬達之徑向力控制(1/2)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2213-E-032-033-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

計畫主持人：楊勝明

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國92年5月20日

總計畫：開關式磁阻馬達設計、驅動、控制及應用

子計畫五：開關式磁阻馬達之徑向力控制 (1/2)

Radial Force Control of Switched Reluctance Motor Drives

計畫編號：NSC 91-2213-E-032-033

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：楊勝明 副教授 淡江大學機械系

參與人員：林逢傑 淡江大學機械系博士班

一、中文摘要

由於 12/8 磁阻馬達的凸極結構，使得馬達具有可以做徑向力控制的特性，但為了能同時產生轉矩與所需的徑向力，各極線圈必須可以獨立激磁。一般的 SRM 會因為 1) 外加的偏心負載或 2) 轉子偏心，而使馬達產生不平衡的徑向力，導致震動的現象。為消除此一問題，本計畫以設計並製作一 12/8 磁阻馬達，同時利用 FEM 軟體分析徑向力變化的特性，根據馬達徑向力與力矩分析之結果，設計一弦波激磁的控制法則，經由此一法則激磁各極線圈可以產生所需的徑向力與輸出轉矩。最後並建立一可以量測徑向力的實驗平台驗證以上理論分析的結果。

關鍵詞：12/8 磁阻馬達、徑向力控制、有限元素分析、弦波激磁

Abstract-Due to its special structure the shaft radial force and torque of the three-phase 12/8 switched reluctance motors can be controlled independently by properly distribution of current at each pole of the excited phase. The radial force produced can be used to counterbalance: 1) external force acting on the motor shaft, or 2) the imbalanced force due to rotor eccentricity, so as to reduce vibrations of the motor. In this subproject, the radial force and torque produced by the SRM under sinusoidal excitations are analyzed, and a model for radial force is proposed. It was found that when excited with sinusoidal currents, the SRM can generate the desired shaft radial force in any direction in the rotational plane without interfering with the rotational torque. The results were verified with a finite-element software. An experimental system was also built for verification of the proposed scheme.

Keyword: 12/8 switched reluctance motor, radial force control, finite element analysis, sinusoidal excitations.

二、緣由與目的

開關式磁阻馬達 (SRM) 在轉子偏心，相對磁極激磁不平衡，或外加的負載偏心時，皆會產生對轉軸的徑向力，這些不平衡的徑向力是使 SRM 產生震動的主要原因。但相較於其他種類的馬達，磁阻馬達的雙凸極結構使其可以做徑向力的控制，因此具有可消除震動問題的能力。以 12/8 磁阻馬達為例，運轉時同時激磁相差 90 度的 4 個極，所以產生的徑向力除了隨氣隙大小變化，亦為各極激磁電流的函數。因此若能找出正確的激磁電流組合，則可以使馬達除了產生旋轉的力矩，亦可以產生任意方向與大小的徑向力。此控制可以應用於消除 SRM 本

身由於電磁或氣隙不均所產生的徑向力。更進一步，亦可應用於偏心負載的狀況，利用適當的電流組合以產生正好可以抵消偏心負載之徑向力，因此對馬達轉軸而言，所受之合力為零，馬達的震動即可消除。

目前對於磁阻馬達徑向力之研究大多針對震動的原因以 FEM 分析[1-2]，這些文獻分析了氣隙變化對徑向力之影響，轉子偏心時轉子角度改變徑向力之變化，與電流變化對徑向力之影響，但並未探討徑向力控制的問題。不過在磁浮的研究領域則有磁阻馬達徑向力控制應用的論文提出[3-5]，這些文獻皆使用 12/8 極 SRM 做為平台，其線圈分成主副兩線圈，主線圈用以控制力矩，副線圈用以控制徑向力，[3]說明以向量控制法則與解耦控制法則使同時控制力矩與徑向力，[4]說明了氣隙變化對於徑向力及其控制之影響，[5]分析漏磁通與飽和對徑向力之影響。

根據以上的說明可知磁阻馬達具有可徑向力控制的特性。本計畫第一年度以 FEM 軟體設計一 12/8 極磁阻馬達，其結構為一極一個線圈，使每一個極的激磁可以獨立控制。接著利用 FEM 分析此馬達的徑向力與力矩之特性。透過 FEM 雖可瞭解馬達之特性，但尚不足以建立徑向力控制法則，因此本計畫亦從基本的單一磁極之電磁力的分析開始，推導出馬達的徑向力與電流、氣隙、磁通面積與力矩等之關係方程式，並以 FEM 驗證所推導出之結果與特性。最後，並建立一可以量測徑向力的實驗平台以驗證 SRM 的徑向力及控制法則。

三、研究方法與成果

1. 研究方法

本章主要分析 12/8 極 SRM 的徑向力與轉矩，以建立馬達之徑向力控制模式。

1.1) 單極之徑向力分析

圖 1 為一個定子 12 極、轉子 8 極的典型的三相開關式磁阻馬達的結構圖，其主要的電氣規格如附錄一所示。圖中 θ_f 為磁極產生之徑向力的角度， θ_r 則為轉子的角度； $\theta_r = 0^\circ$ 為完全對正狀態 (Aligned)， $\theta_r = 22.5^\circ$ 則為完全不對正狀態 (Unaligned)。在線圈結構上，每一相的四個線圈必須可以獨立激磁，以達到徑向力控制的目的。

圖 1 中只畫出 A 相四極的線圈，且假設 A 相四極的激磁電流分別為 i_{A1} 、 i_{A2} 、 i_{A3} 與 i_{A4} ，以方便對力矩與徑向力的分析，首先分析單極所產生的轉矩與徑向力。圖 2 為磁阻馬達 A1 極的結構圖，圖中畫出定轉子之間所產生的磁通，其中除了定轉子面積重疊部分的主要磁通外，尚有 Fringing 磁通部分，因此單極的大約電感 L_A 可由下式求得[6]

$$L_A = \frac{\mu_0 N^2 S}{g} = \frac{\mu_0 N^2 L R \theta_o}{g} + N^2 K_f \theta_{uo} \quad (1)$$

上式之 μ_0 為真空的導磁係數 (約等於空氣的導磁係數)， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ， g 為轉子平衡時的氣隙， N 為線圈匝數， i 激磁電流， S 磁通面積， K_f 為 Fringing 電感常數，為一未知數， θ_o 為定轉子重疊面積之角度， θ_{uo} 為定轉子未重疊面積之角度， L 為馬達疊積厚度， R 為馬達轉子半徑。由於定子與轉子並不在對正的位置，所以除了徑向力之外亦會轉矩產生。假設電磁鐵無漏磁束、無磁飽和，且鐵心的導磁係數無限大時，忽略 L_A 中 Fringing 磁通，由於馬達的氣隙固定不變，因此在固定的轉子角度下 $dL_A = L_A$ 與 $dx = g$ ，所以徑向力 F_{A1} 的變化可以簡化成

$$F_{A1} = \frac{1}{2} i_{A1}^2 \frac{L_A}{g} = \frac{\mu_0 N^2 i_{A1}^2 L R \theta_o}{2g^2} = K_F i_{A1}^2 \quad (2)$$

上式之 $K_F = \frac{\mu_0 N^2 L R \theta_o}{2g^2}$ 。由式(2)知徑向力與電流平方成正比，與氣隙平方成反比，所以當氣隙固定時，電流越大徑向力越大。當馬達定子凸極與轉子凸極不對正的情況下，徑向力大小也會隨之改變。

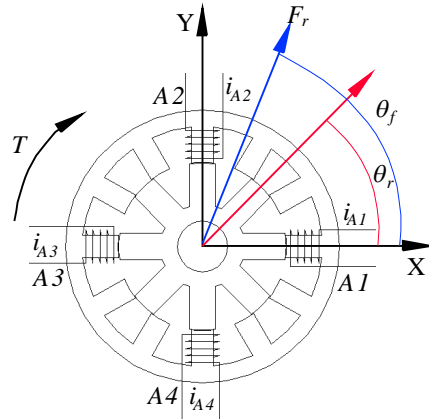


圖 1、12/8 SRM 結構圖

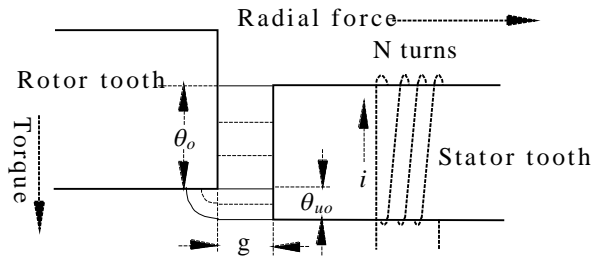


圖 2、12/8 磁阻馬達的 A1 單極結構

1.2) 單相之徑向力與轉矩分析

正常運轉時 12/8 極 SRM 需同時激磁一相的四個極，產生的徑向力大小與方向等於分別激磁四個凸極所產生的電磁力合力的大小與方向。轉子在 X 軸上受到兩極的拉力 F_{A1} 與 F_{A3} 時，所造成的徑向力合力 F_x ，將四極電流帶入式(2)可擴充為

$$F_x = F_{A1} - F_{A3} = K_F (i_{A1}^2 - i_{A3}^2) \quad (3)$$

$$F_y = F_{A4} - F_{A2} = K_F (i_{A4}^2 - i_{A2}^2) \quad (4)$$

由上式可知在四極激磁的狀況下各軸的徑向力分力大小則會與該軸上兩相對方向的凸極的激磁電流平方差成正比。而四極同時激磁時所產生的轉矩則可表示如下

$$T = \frac{1}{2} (i_{A1}^2 + i_{A2}^2 + i_{A3}^2 + i_{A4}^2) \frac{dL_A}{d\theta_o} \quad (5)$$

上式之電流亦可利用一等效的轉矩電流 i_T 表示如下: $4(i_T)^2 = i_{A1}^2 + i_{A2}^2 + i_{A3}^2 + i_{A4}^2$ 。

觀察以上推導的磁阻馬達的徑向力與轉矩方程式(3)-(5)可知，若四個激磁電流可以任意調整，則可以經由這些方程式計算符合馬達控制器需求的轉矩與徑向力之電流組合。

1.3) 弦波激磁時之徑向力與轉矩分析

延續前一節的分析結果，若各極激磁電流為大小相同但相位相差 90 度的弦波，令

$$i_{A1} = C + K \cos \theta_f \quad (6)$$

$$i_{A2} = C + K \sin \theta_f \quad (7)$$

$$i_{A3} = C - K \cos \theta_f \quad (8)$$

$$i_{A4} = C - K \sin \theta_f \quad (9)$$

式中的 θ_f 為徑向力角度， K 為電流弦波的振幅， C 為電流的基準值。若期望的徑向力大小為 F_r ，因為徑向力與電流平方成正比，故可假設一等效的徑向力電流 i_F ，並令 $F_r = K_F i_F^2$ ，則將式(6)-(9)帶入(3)-(4)後可得

$$K_F i_F^2 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 4K_F KC \quad (10)$$

由上式知不論方向為何，徑向力的大小與 CK 的乘積成正比，當 CK 的乘積固定時，徑向力大小就維持固定。

又若期望的轉矩為 T ，等效的轉矩電流為 i_T ，將式(6)-(9)帶入式(5)後可得

$$4i_T^2 = (C + K \cos \theta_f)^2 + (C + K \sin \theta_f)^2 + (C - K \cos \theta_f)^2 + (C - K \sin \theta_f)^2 \quad (11)$$

因為 i_F 與 i_T 為已知，故利用式(10)、(11)計算可以求得 C 與 K 之值，將 C 與 K 帶回(6)-(9)即可以得到四極的激磁電流，若以這些電流激磁時馬達可以產生我們期望的徑向力與轉矩。

1.4) FEM 分析結果

接著，將以上的結果用 Ansoft 之 EM2D 有限元素分析軟體分析。馬達轉子角 θ_r 設為 7.5 度，並假設需求的 i_T 與 i_F 皆為 10A，徑向力角 θ_f 則由 0 度增加至 360 度。依式(6)-(9)、(10)-(11)計算不同 θ_f 時之激磁電流可得到如圖 3 所示之四個相位相差 90 度的弦波。圖 4a)則顯示 θ_f 變化時所產生各角度徑向力的分布狀況，由此圖可發現任何角度的徑向力的大小都相同，亦即為期望的徑向力。圖 4b)則顯示當徑向力角度改變時馬達所輸出的轉矩。由圖中可知，無論徑向力的方向為何，輸出的轉矩幾乎都維持在一定值。此一現象驗證了式(10)之結果，只要激磁電流的平方和為 i_T 平方的 4 倍輸出轉矩皆為一定值。

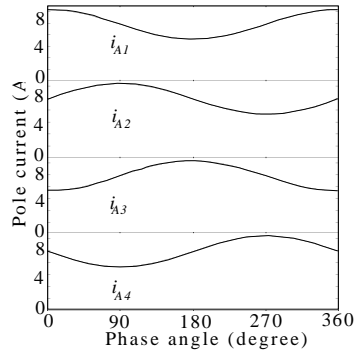
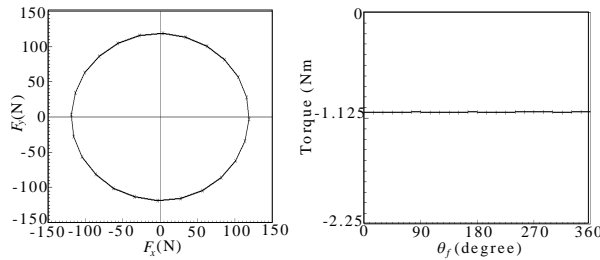


圖 3、 θ_f 從 0 度~360 度時 A 相之四個極的激磁電流



a) 徑向力

b) 力矩

圖 4、 θ_f 從 0 度~360 度時，徑向力與力矩之變化

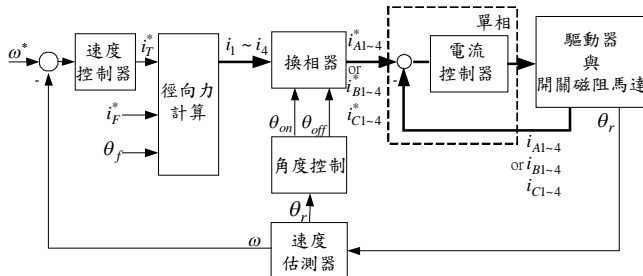


圖 5、磁阻馬達控制系統架構

1.5) 控制系統

圖 5 整個磁阻馬達的控制系統架構，轉速控制、電流控制與換相器與傳統控制方式相同，修正徑向力之電流大小與角度命令則以前饋的方式加入，之後與轉矩控制之電流命令一起計算單相四極之電流命令。換相器需有馬達之位置信號，而電流控制器則需馬達各相各極總共 12 個電流回授訊號。

因為轉矩與徑向力皆須經由線圈電流產生，若二者皆為閉迴路控制，則整個系統會相當複雜，不容易分析與控制。因為我們只考慮與轉子位置有固定關係的徑向力，所以徑向力並不需要閉迴路控制，而只需以前饋的方式調節電流即可，徑向力命令可以事先以計算或量測方式決定。

因為每一極線圈皆須電流控制，馬達驅動器共有 12 個電流控制迴路，若加上徑向力命令與速度控制等，所需的計算並非單一的 DSP 可以負荷。計畫目前

設計的驅動電路使用四顆數位訊號處理器，其中三顆 TMS320F240 DSP，每一顆負責磁阻馬達的一相的電流控制，即四個極的電流控制回路。另一顆為 C32 浮點運算的 DSP，其主要任務為速度控制、換相與徑向力之計算，以產生各相四極的電流控制命令。C32 與三顆 240 DSP 之間則以一 CPLD 做訊號傳輸的介面。又為了簡化電路，每一極線圈的驅動使用最簡單的單一開關電路控制。

2. 實驗結果與討論

實驗驗證用的 12/8 極 SRM 是以 Ansoft 之 RMexp 與 EM2D 軟體設計，然後委託廠商製作。額定電壓為 110 VAC，額定電流為 10 Amp，額定轉速為 3000 rpm，圖 6、7 顯示馬達的外觀與內部實體圖。馬達之驅動器為自行設計與製作，如圖 6 右邊所示的電路。控制器為一 TMS320F240 DSP，電流控制頻率為 10000 次/秒、轉速控制頻率則為 2000 次/秒。馬達的性能利用一磁粉煞車動力計驗證，典型的測試結果如圖 8 所示，轉速為 1000 rpm、1 Nm 負載下三相電流與速度的波形。

為了驗證徑向力控制法則，我們亦製作一可以量測馬達徑向力的實驗系統，詳細的結構圖可參考[7]。初步的實驗結果如圖 9 所示，在馬達轉子固定不動時，量測得到的徑向力與利用 EM2D 計算的徑向力之比較。由於力量測系統必須相當穩固，而我們製作的結構還有一些不穩定之處尚需改進。此外，最大的問題是此系統需要兩軸的力量感測器與放大器，由於經費的限制我們僅能使用相當簡略的應變規（見圖 7），此感測器有許多限制，目前正設法克服這些困難。

四、結論

本計畫為兩年期的計畫，主要目的是研究一利用控制開關式磁阻馬達所產生的徑向力以消除馬達之震動的技術，採用的馬達結構為三相、12/8 極的馬達。第一年度進行中和已完成的工作項目如下：

1. 利用 FEM 軟體設計一 12/8 磁阻馬達，並完成其製作。
2. 分析 12/8 SRM 徑向力與力矩的特性，推導其徑向力與轉矩模式。
3. 設計一弦波激磁法則，藉由改變各極的激磁電流以得到不同徑向力的大小與方向，同時亦得到所期望的輸出力矩。
4. 設計、製作一磁阻馬達驅動器以測試馬達速度與力矩之特性。
5. 設計、製作一單相四極激磁之驅動器以驗證 FEM 之徑向力分析、設計結果，以及弦波激磁控制法則。

在本計畫之支持下完成的論文如下：[7]於第二十三屆電力工程研討會發表，[8]於 2003 自動控制研討會發表。

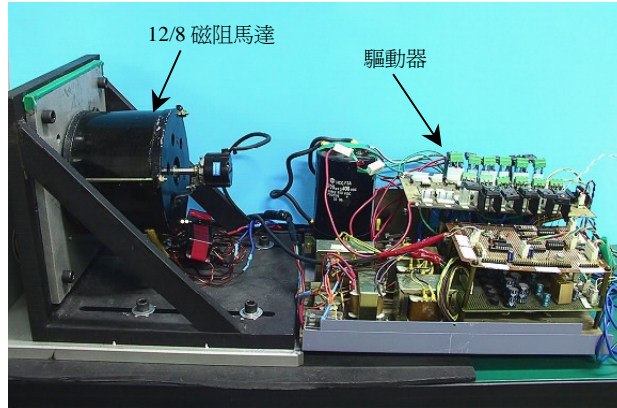


圖 6、磁阻馬達外觀與自驅動器

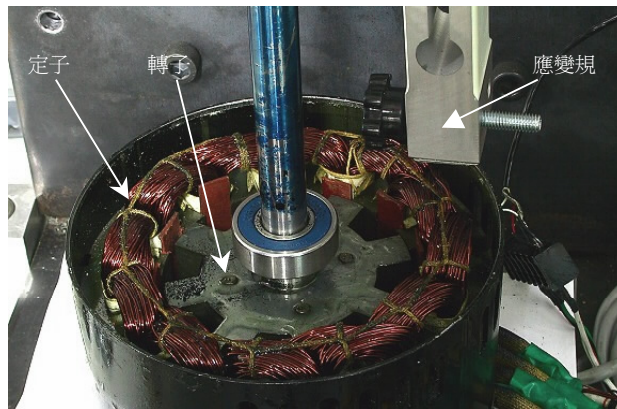


圖 7、馬達內部圖

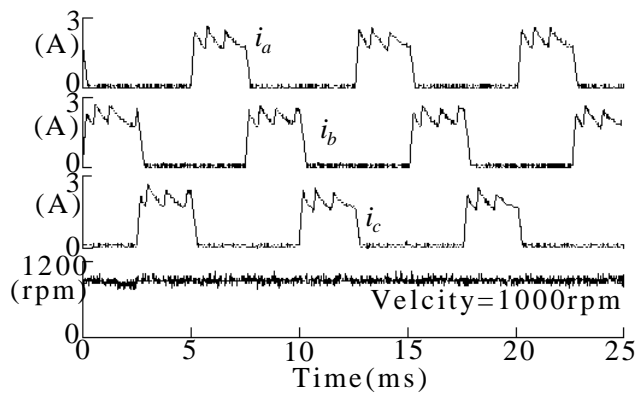


圖 8、1000 rpm，1 Nm，三相電流

與速度波形

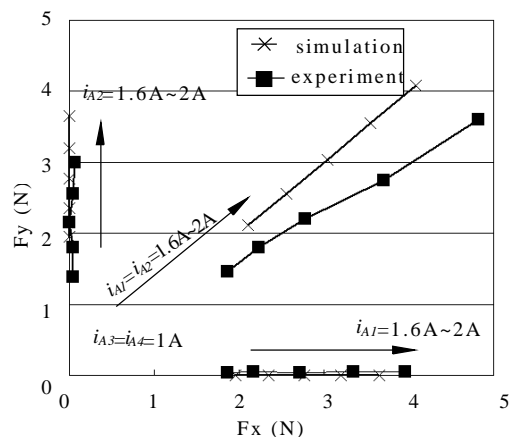


圖 9、Ansoft 計算與實測之徑向力比較

五、附錄一

12/8 極, 1Hp, 100 volts, 11.5 A, 1945 rpm

定子電阻：0.93 ohm

不對正位置之電感：1.2 mH

對正位置之電感：7.6 mH

六、參考文獻

- [1] N.R. Garrigan, W. L. Soong, C. M. Stephens, A. Storage, and T.A. "Radial Force Characteristics of a Switched Reluctance Machine" IEEE IAS Annual Meeting Vol.4, 1999, pp.2250-2258.
- [2] I. Husain, A. Radun, and J. Nairu "Unbalanced Force Calculation in Switched Reluctance Machines", IEEE. Trans. on Magnetics, vol. 36, Jan. 2000, pp. 330-338.
- [3] C. Michioka, T. Sakamoto, O. Ichikawa, A. Chiba, and T. Fukao, "A Decoupling Control Method of Reluctance Type Bearingless Motors Considering Magnetic Saturation" IEEE IAS Annual Meeting, Vol.1, Oct 1995, pp.405-411.
- [4] M. Takemoto, H. Suzuki, A. Chiba, T. Fukao, and M. A. Rahman "Improved Analysis of a Bearingless Switched Reluctance Motor", IEEE. Trans. on Ind. Applicat., Vol.37, Jan./Feb. 2001, pp. 26-34.
- [5] M Takemoto, A Chiba, H. Akagi, and T. Fukao "Radial Force and Torque of a Bearingless Switched Reluctance Motor Operating in a Region of Magnetic Saturation" IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, 2002, pp. 35-42.
- [6] G. R. Slemon, "Electric Machines and Drives", Addison Wesley, 1992.
- [7] 馬玉龍、楊勝明, 2002 年 12 月, "切換式磁阻馬達之徑向力分析", 第二十三屆電力工程研討會, 中原大學, pp. 1147-1151.
- [8] 邱建民、楊勝明, 2003 年 3 月, "無軸承開關式磁阻馬達控制法則設計", 2003 中華民國自動控制研討會, 清雲技術學院, pp. 394-398.