

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫五：開關式磁阻馬達之徑向力控制(2/2)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2213-E-032-004-

執行期間：92年08月01日至93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

計畫參與人員：林逢傑，劉威廷

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 9 月 21 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 (2/2)

Radial Force Control of Switched Reluctance Motors

計畫編號：NSC 92-2213-E-032-004

執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

主持人：楊勝明 教授 淡江大學機電系

一、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,並設計一套換相法則來降低換相所產生的震動。最後並建立實驗平台以震動的方式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 project, 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 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控制徑向力的特性,本計畫於第一年度設計並製作一磁阻馬達,完成弦波電流激磁控制法則,並以實驗驗證其控制法則能產生所需的徑向力。第二年度主要提出一套換相策略,使其降低換相時所產生的轉矩及徑向力漣波,並設計一實驗平台,以第一年度所提出的弦波激磁為控制法則,進行各項相關的實驗並量測震動結果,最後驗證弦波激磁理論的可行性。

三、研究方法與成果

3.1) 12/8 SRM 轉矩與徑向力分析

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 中假設 A 相四極的激磁電流分別為 i_{A1} 、 i_{A2} 、 i_{A3} 與 i_{A4} ，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]

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

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

$$F_{A1} = \frac{1}{2} i_{A1}^2 \frac{dL_A}{dg} = \frac{\mu_0 N^2 i_{A1}^2 LR \theta_o}{2g^2} = K_F i_{A1}^2 \quad (2)$$

上式之 $K_F = \frac{\mu_0 N^2 LR \theta_o}{2g^2}$ 。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。

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。

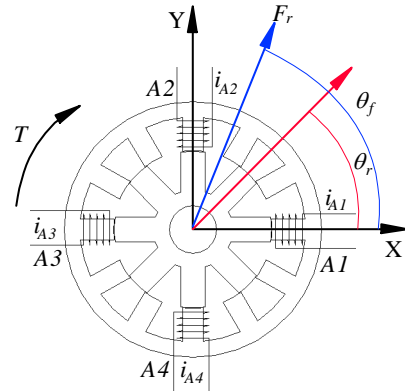


圖 1、12/8 SRM 結構圖

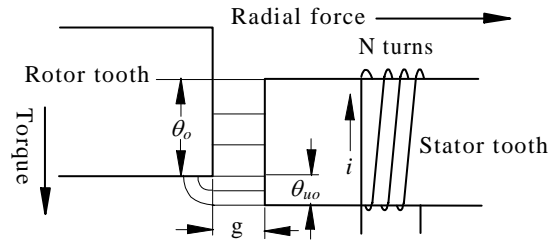


圖 2、12/8 磁阻馬達的 A1 單極結構

3.2) 弦波激磁控制法則設計

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

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

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_r 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。

考慮轉子角度 θ_r 由對正之 0 度轉動到 15 度，則 FEM 模擬結果如圖 5 所示，徑向力逐範圍漸縮小。主要為式(1)電感隨轉子角度變化所造成，因此針對電感之變化加以補償可以得到徑向力方程式

$$F_N = \frac{\theta_o}{15} + K_{fg} g \theta_{uo} \quad (12)$$

其中 $K_{fg} = \frac{K_f}{\mu_0 LR} (\frac{12}{\pi})$ 。其補償結果如圖 6 所示，其詳細的推導可參考[8]。

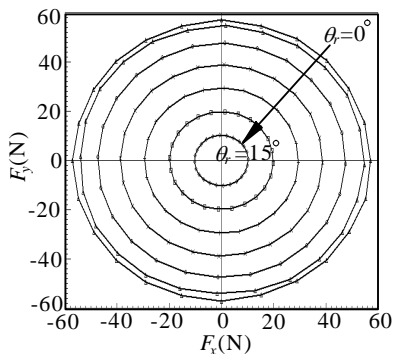


圖 5、當 θ_r 由 0° 轉至 15° ， θ_f 由 0° 轉至 90° 時激磁電流與徑向力之變化

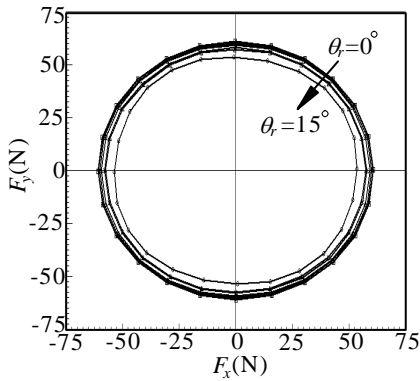


圖 6、使用轉子角度補償之徑向力變化

3.3) 換相策略

磁阻馬達必須經由換相過程來得到連續的力矩，但在換相過程中因為磁阻力的不連續以及徑向力大小瞬間變化的情形下，產生轉矩連波以及震動等問題，若此時馬達所產生的徑向力不平衡會導致有一偏心力量，在換相時會產生更大的影響，所以有很多文獻針對消除磁阻馬達的轉矩連波[7]，但這些方法大多採用一般的磁阻馬達一相多極線圈串聯或並聯使用，並沒有針對消除換相

時的徑向力連波，所以在此針對此弦波控制法則提出一套消除連波的換相方式。

由於瞬間的換相會使徑向力及力矩在換相前後有明顯的不連續產生，所以設定一個換相的範圍，舉例來說，圖 7 為 A 相換 C 相的各極電流波形所示，設定角度 θ_{TS} 到 θ_{FS} 為換相過程，原本僅有 A 相四極激磁並同時產生徑向力及力矩，此時 $i_T=2A$ 、 $i_F=2A$ ，而進入換相過程後，C 相 4 極全部激磁 i_T 以產生轉矩，而 A 相經由徑向力方向的判斷而使用其中兩極作徑向力的產生，直到換相過程結束，C 相四極再以弦波激磁產生徑向力及力矩，經由此一換相過程，可讓徑向力與轉矩在換相間不至於有太大的變化，圖 8 為 FEM 的模擬結果，分別為普通換相過程與使用此換相策略之比較，而角度 θ_{TS} 與 θ_{FS} 以 FEM 分析得之分別為對正前 2° 與對正後 5° 最佳，可看出在普通換相過程中因為電流的瞬間切換，導致徑向力與力矩明顯的改變，而使馬達產生震動，而使用換相策略後，其改變量明顯的減小，證實此換相策略可行。

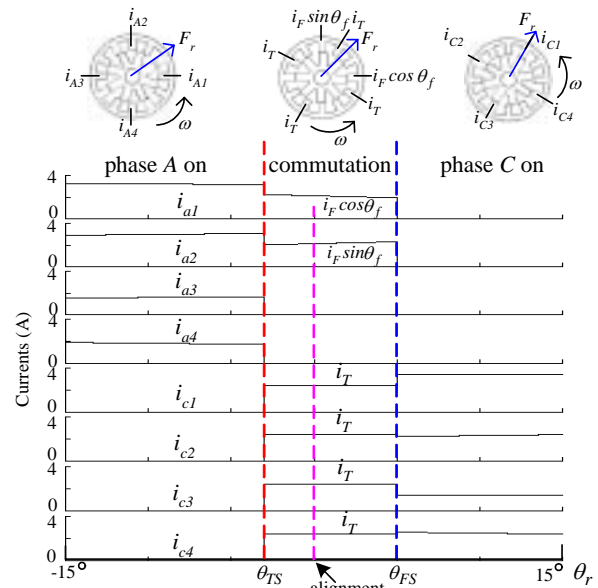


圖 7、使用換相策略，A 相換至 C 相的電流波形

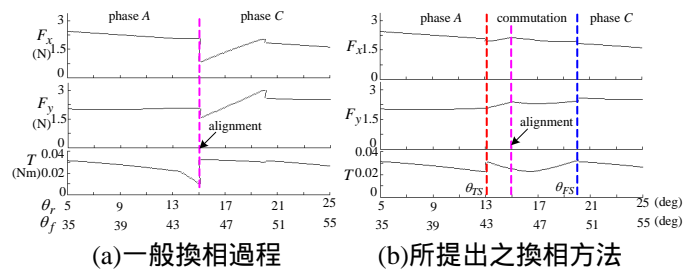


圖 8、在不同的換相方法下比較徑向力與轉矩波形

3.4) 實驗結果與討論

圖 9 顯示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。

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。

驅動器

12/8 SRM 原本只需 3 相驅動電路，因為弦波控制法則必須使每一極線圈分開做電流控制，所以 SRM 驅動器必須要有 12 組電流控制迴路，其驅動器的照片如圖 10 所示，由於每組驅動器均並聯到 Bus 電源，則電源所承受的電流為原來的四倍，為了使電源無過電流的問題而採用較高負載電流限制(30A)的電源供應器作為 Bus 電源。

控制器

由於需要一次控制 12 極的電流命令，又加上徑向力命令與速度控制等，所需的計算並非一般 DSP 可以負荷。本實驗使用 TMS320F2812 DSP 作為控制核心，此 DSP 的最高處理速度為 150MHz，可在 18kHz 的中斷頻率內同時讀入 12 極的電流回授信號，並依照速度控制所產生的電流命令做磁滯型的電流控制，還可依不同的徑向力需要產生所需的電流命令，使馬達線圈激磁。

實驗系統

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 10 為馬達的實驗機台，此實驗設備有上下兩個平台，這兩個平台由四個阻尼器所連接，而馬達則放在兩平台的中間，馬達上方以連軸器連接另一馬達作為負載，其負載力矩為 0.5Nm，實驗中主要以一加速規來量測馬達的震動，其訊號經由頻譜分析儀(FFT)觀察之。

實驗結果

首先以一相四極電流相等激磁，其電流波形與震動頻譜如圖 11 所示，速度為 1000rpm (17Hz)，可看出馬達本身因轉子稍微偏心的關係，使馬達產生與速度頻率相同的震動情形，而圖 12 為打入 25Hz 的徑向力弦波電流與震動波形，可看出頻譜圖增加了 25Hz 以及其倍頻的震動訊號，證明弦波激磁確實能使馬達產生所需的徑向力方向；圖

13 則是分別打入 17 與 34Hz 的徑向力弦波來消除本身偏心造成的震動，與圖 11 比較得知加入徑向力控制後可明顯的消除偏心造成的影響，而圖 14(a)則是在轉軸上加入一機械式偏心負載，使 17Hz 的震盪變大，再利用產生徑向力抵消偏心負載的方式使震動減小，如圖 14(b)所示，圖 15 則針對一般換相所造成的震動頻譜圖，可看出震動均發生在 17x24Hz 的附近，這是由於 12/8 SRM 轉一圈需換相 24 次，在換相時會有力矩漣波震動產生，而圖 16 則使用了針對消除力矩漣波而提出的換相策略，與圖 15 比較可發現其震動大小均降低，驗證此換相策略可行。由以上的實驗結果發現弦波激磁可產生徑向力，而運用此徑向力可使馬達消除偏心所產生的震動現象。

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。第二年度完成的工作項目如下：

1. 提出一套換相策略以消除轉矩漣波。
2. 製作一磁阻馬達 12 極的驅動器並整合所有實驗設備。
3. 以弦波激磁為核心，測試多項實驗並驗證了弦波激磁控制法則的確可以同時控制馬達的徑向力與轉矩。

在執行此計畫時我們亦發現以下缺點：

1. 馬達的規格訂的太高，如額定電流為 11.5A，以致徑向力相當大，在量測與控制上相當困難。
2. 所設計之馬達電感太小，所以控制時電流的漣波相當大，容易導致驅動器過電流。

將來的研究計畫必須重新設計一符合實驗室設備的磁阻馬達，減少馬達之直徑但增加其疊積之厚度，使其維持足夠之徑向力並增加電感值，同時將馬達功率降低。

五、在本計畫之支持下完成的論文

本計畫發表之相關論文有[8-12]，[8-10]為已發表的國內研討會論文，[11]發表於 IEEE-PEDS 國際研討會，[12]將於 2004 年 10 月在西雅圖舉行之 IEEE-IAS 年會發表。

六、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

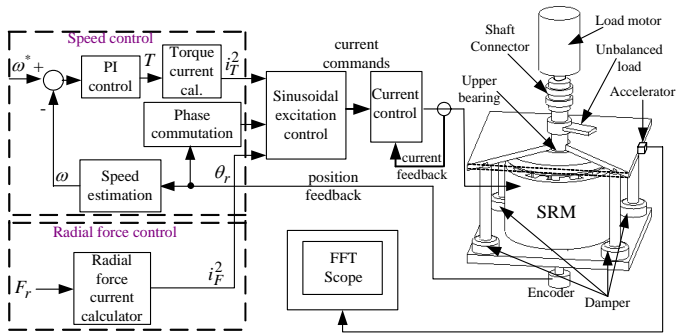


圖 9、實驗系統方塊圖

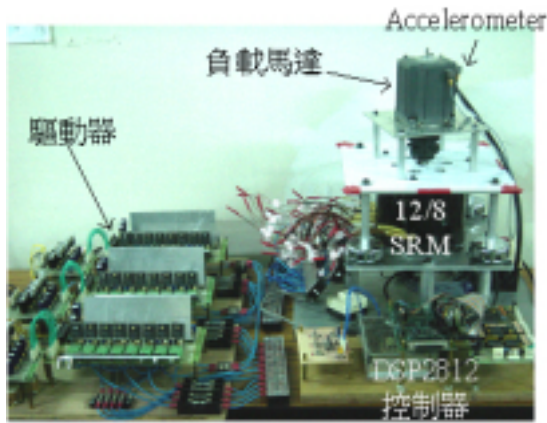


圖 10、實驗系統照片

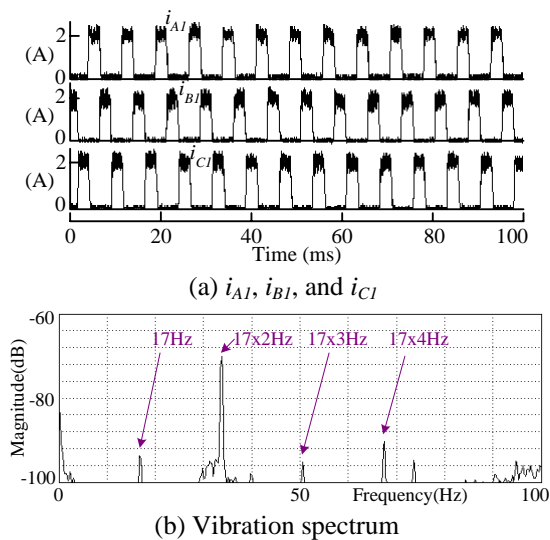
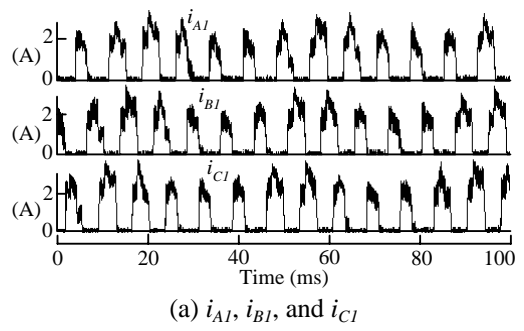
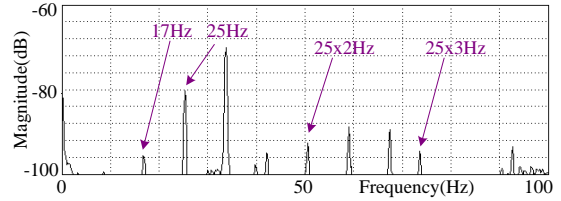


圖 11、在方波電流控制下的電流與震動頻譜
馬達轉速為 1000 rpm(17Hz)

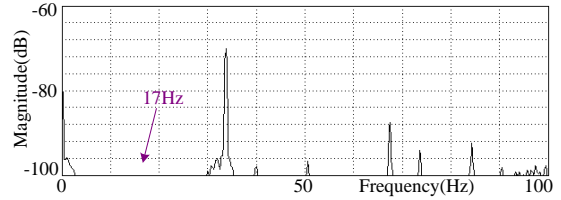


(a) i_{A1} , i_{B1} , and i_{C1}

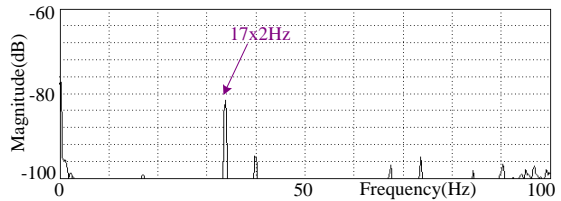


(b) Vibration spectrum

圖 12、在弦波電流控制下的電流與震動頻譜
 $T^* = 2.8N$, 25 Hz, 馬達轉速為 1000 rpm

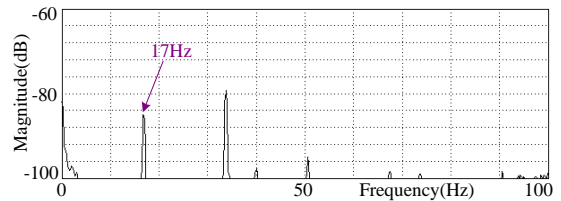


(a) 17 Hz

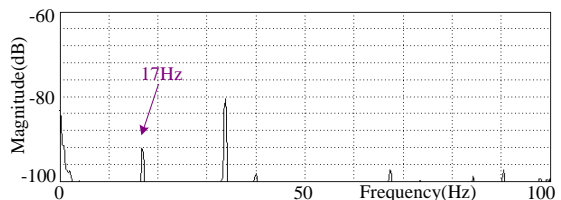


(b) 34 Hz

圖 13、與圖 12 的情形相同，
但 T^* 的頻率改變(a) 17 Hz, and (b) 34 Hz

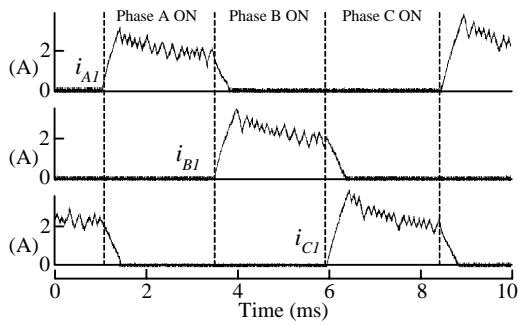


(a) $T^* = 0$

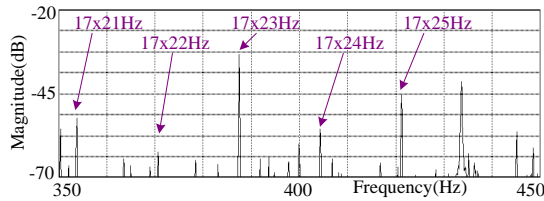


(b) $T^* = 2.3N$, 17 Hz

圖 14、在加入偏心負載的情形下比較馬達震動波形
馬達轉速為 1000 rpm

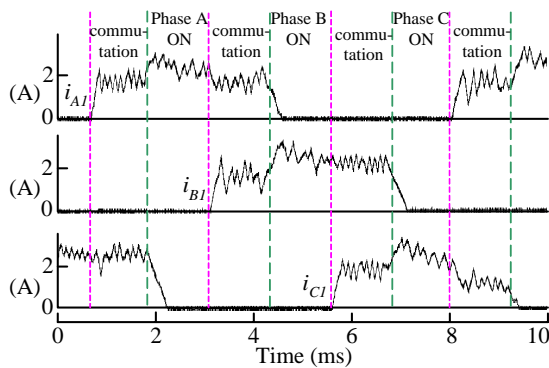


(a) i_{A1} , i_{B1} , and i_{C1}

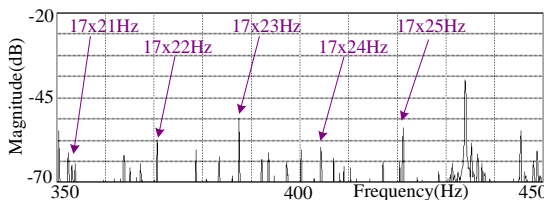


(b) Vibration spectrum

圖 15、一般換相方法的電流與震動頻譜
馬達轉速為 1000 rpm



(a) i_{A1} , i_{B1} , and i_{C1}



(b) Vibration spectrum

圖 16、使用換相策略的電流與震動頻譜
馬達轉速為 1000 rpm

七、參考文獻

- [1] N.R. Garrigan, W. L. Soong, C. M. Stephens, A. Storace, and T.A. Lipo, "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. Nairus, "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] T. J. Miller (ed.), *Electronic Control of Switched Reluctance Motors*, Newnes Power Engineering Series, Newnes, 2001.
- [8] 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.
- [9] 邱建昕、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.
- [10] 練建昕、楊勝明, 2004年3月, "12/8 SRM之12組獨立電流控制系統設計與實作", 2003中華民國自動控制研討會, 大葉大學, pp. 644-649.
- [11] F.C. Lin, S. M. Yang, "Analysis and Modeling of the Radial Force in a Switched Reluctance Motor with Sinusoidal Excitations", IEEE Conf. on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 2, Nov. 2003. pp. 938 - 943
- [12] F.C. Lin, S. M. Yang, "Instantaneous Shaft Radial Force Control with Sinusoidal Excitations for Switched Reluctance Motors", IEEE IAS Annual Meeting, 2004.