

以印刷電路板實現軸向式馬達定子繞組於電動自行車之應用 Implementation of PCB Stator Winding for Axial-Flux Motor in Electrical-Bike Application

鄒應嶼 楊甫尊
Ching-Tsai Pan Ting-Yu Chang

電力電子晶片設計與 DSP 控制實驗室
國立交通大學 電機與控制工程學系
Power Electronics IC Design and DSP Control Lab.,
Department of Electrical and Control Engineering, National Chiao Tung University

摘要

本論文針對應用於電動自行車且採用無鐵心(coreless)設計之軸向式馬達(axial-flux motor)進行分析與探討，因其定子繞組並非固定於矽鋼片上，而是以特殊樹脂材料加以固定線圈，因此，此類馬達定子繞組在製作上須賴以手工繞製而使其無法進行大量生產及產生品質不一等缺點，為改善上述之缺點，本論文利用印刷電路板(printed circuit board, PCB)取代既有以銅線纏繞之軸向式馬達定子繞組，針對在相同轉子磁通量分布下提出印刷電路板之定子繞組設計方法，包括印刷電路板佈線設計、測試平台的建立以及樣品之實測結果分析。在馬達測試方面，本論文針對此馬達分兩部份進行單片印刷電路板定子繞組測試，其一為馬達操作於發電機模式時，量測其所感應之反抗電動勢，藉由三相反抗電動勢波形估測其反抗電動勢常數、總諧波失真(total harmonic distortion, THD)、磁通量分布及參數鑑別等，可推論所設計之馬達其反抗電動勢近似正弦波，總諧波失真約為 7%。其次則為馬達操作於電動機模式時，針對其單片定子繞組進行驅動控制測試，其利用線性型霍爾感測器訊號做為轉子位置之參考，以正弦脈波寬度調變(sinusoidal PWM, SPWM)進行驅動控制之模擬與實驗分析，並進行溫度及集膚效應等相關測試。測試結果得以驗證軸向式馬達使用印刷電路板定子繞組的可行性與效能。

關鍵字：PCB 定子繞組、軸向式馬達、電動自行車。

Abstract

This thesis presents an analysis and discussion of the axial-flux motor used on electrical-bike and adopted a coreless design. Therefore, the stator winding fix by a special resin instead of traditional silicon steel. It causes the stator winding can't be mass produced and have quality variations. In order to improve this problem, this thesis presents a design of the axial-flux motor used on electrical-bike with printed circuit board (PCB) stator winding to instead of copper wire including PCB design method, experiment setup and analysis of PCB stator winding prototype test results. In motor test, the generation mode, measure the tri-phase back-emf to calculate and estimate the back-emf constant, total harmonic distortion (THD), flux distribution and parameters. The results infer that the back-emf is similar to a sine wave and THD is about 7%. Then setup a control system with linear hall-effect sensors and Sinusoidal PWM control strategy to drive this motor with a single PCB stator winding. By simulation and experiment to analyze the current response, motor performance, skin-effect and temperature, etc. The test and experiment results verified the feasibility and performance of the axial-flux motor with PCB stator winding.

Keywords : PCB stator winding, axial-flux motor, electrical-bike.

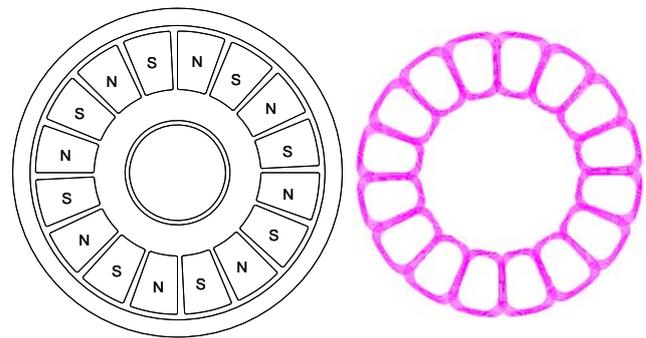


圖1 軸向式馬達轉子與定子繞組結構圖

I. 簡介

軸向式馬達(axial-flux motor)有別於一般徑向式馬達(radial-flux motor)，其磁力線流動方向與定子轉軸相互平行，而定子線圈則沿著徑向纏繞，且因馬達外表多為圓盤形狀，故亦稱為碟型馬達(disk motor)或薄型馬達(pancake motor)[1]。此外，軸向式馬達屬永磁同步馬達的一種，具備了永磁同步馬達基本的特性與優點，在軸向式馬達的應用中，其馬達結構由一組定子繞組搭配單一轉子，例如：磁碟機主軸馬達等，但此結構造成馬達作用力不平衡等缺點，因此，藉由改變馬達結構為雙轉子搭配一組定子繞組(外轉式)或雙定子繞組搭配單一轉子(內轉式)結構，便可使馬達作用力平衡且提升整體效能，也因其特殊結構之設計，故多應用於發電系統或電動載具等[2][3]。

目前市面上之電動自行車多以無刷直流或永磁交流輪殼馬達為主，而其內部包含減速機構，例如：行星齒輪(planet-gear)等，且多置於前輪或後輪進行驅動控制，此外，其所使用之電池電壓為 24 至 36 伏特，而使得能達成的性能有限。本論文所使用之軸向式馬達為「中置同軸」設計，以前齒盤經由鏈條帶動後齒盤轉動，此外，此軸向式馬達採用無鐵心(coreless)之設計，即其定子繞組並非固定於矽鋼片上，而是以特殊樹脂材料加以固定線圈，因此，此類馬達定子繞組在製作上須賴以手工繞製而使其無法進行大量生產或發生品質不一等缺點。為解決上述之缺點，本論文利用印刷電路板(printed circuit board, PCB)取代既有以銅線纏繞之軸向式馬達定子繞組，針對在相同轉子磁通量分布下提出印刷電路板之定子繞組設計方法。PCB 定子繞組設計目

表 1 軸向式馬達 PCB 定子繞組設計考量規格

考量參數	限制
轉子外徑[mm]	≤ 165
轉子內徑[mm]	≤ 50
轉子厚度[mm]	$\leq 15 \times 2$
永久磁鐵厚度[mm]	5
PCB銅箔厚度[oz]	2
PCB銅箔層數[layer]	4

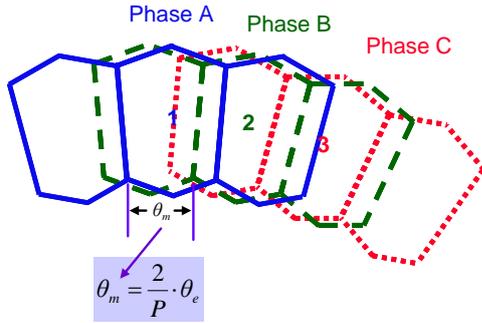


圖 2 軸向式馬達定子繞組連接示意圖

前多為低功率馬達、變壓器與電感等之應用[4]-[7]，其目的主要為消除不必要的線圈繞組以減少體積；而在高功率的應用，則有以 PCB 定子繞組線圈所設計應用於水力發電之軸向式永磁發電機[8]。在電動自行車的應用中，此類型之 PCB 定子繞組並無相關的研究提出，因此，本論文提出應用於電動自行車的軸向式馬達且以直流鏈電壓為 48 伏特之 PCB 定子繞組設計流程與方法並建立馬達測試平台針對單片 PCB 定子繞組進行實測與分析。

II. 印刷電路板定子繞組設計方法

A. 設計目標與流程說明

既有的軸向式馬達其定子繞組是依據轉子永久磁鐵的形狀、位置與磁通量分布等資訊進行設計，而因繞線範圍及體積的限制，導致與線圈與磁場切割之有效路徑無法達到較佳的设计，因此，本論文主要目標乃針對在相同轉子磁通量分布下利用印刷電路板佈線方式取代既有以銅線纏繞之定子繞組，藉以改善其缺點並獲得較佳的设计方法。在设计規格方面，須考量其轉子體積之限制與永久磁鐵之厚度以及 PCB 製程之限制等，如表 1 所示。

針對 PCB 定子繞組之设计方法，本論文依下列步驟進行分析與设计。首先，先針對既有軸向式馬達定子繞組進行分析，了解其繞線方式、線圈匝數以及基本參數鑑別；其次，則進行 PCB 定子繞組设计，以轉子永久磁鐵其形狀、位置等為依據，做較佳的線圈设计，再針對所设计之繞組計算其反抗電動勢與轉矩常數以及功率密度等；最後，進行馬達整體之效能測試，以正弦脈波寬度調變 (sinusoidal PWM, SPWM) 及線性霍爾感測器 (linear hall-effect sensors) 做開迴路電壓模式與開迴路電流模式控制，並評估測試結果而進行改善或重新设计。在上述的设计過程中，反抗電動勢與定子繞組等效電

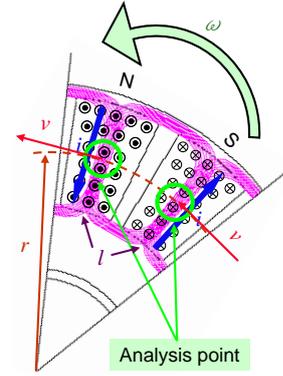


圖 3 軸向式馬達反抗電動勢感應原理

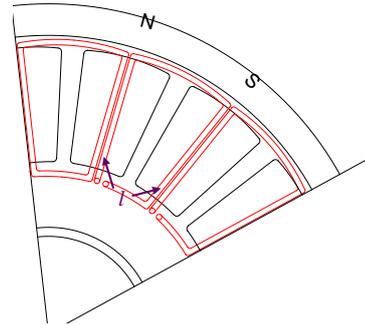


圖 4 軸向式馬達 PCB 定子線圈初步設計圖

阻為主要之设计考量，因此，本論文以直流鏈電壓 48V 為依據決定反抗電動勢峰值大小並將等效電阻降至最低。

B. 軸向式馬達定子繞組设计方法與 PCB 佈線規劃

反抗電動勢常數為馬達设计重要的指標，圖 3 為軸向式馬達其反抗電動勢感應原理說明，當馬達運轉時，其於圖中分析點所感應電壓其方程式可表示為(1)， E_{pk} 為所感應之反抗電動勢峰值， B 為磁通密度， l 為導體長度， v 為切線速度而 θ 為導體與磁場切割的角度。其中， $v = \omega \times r$ ，故可將(1)表示為(2)。

$$E_{pk} = B \cdot l \cdot v \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

$$E_{pk} = B \cdot l \cdot \omega \cdot r \cdot \sin(\theta) \quad (2)$$

在軸向式馬達線圈设计中，假設轉子永久磁鐵不變且磁通量為均勻分布，即 B 與某一點為固定不變，導體的有效長度與導體與磁場所切割的夾角為主要的設計指標，因此，在 PCB 佈線设计中，將既有線圈其無效的導體路徑減少，並增加導體之有效路徑與切割角度，可得其初步设计如圖 4，而三相之 PCB 定子繞組设计如圖 5 所示。在理想的情況下，所感應之電壓與線圈匝數成正比，隨著有效導體數量的增加，反抗電動勢的大小亦會隨之增加。在定子繞組设计完成後，反抗電動勢與馬達轉速呈一比例關係，如(3)所示， K_e 為馬達反抗電動勢常數。

$$E_{pk} = K_e \cdot \omega \quad (3)$$

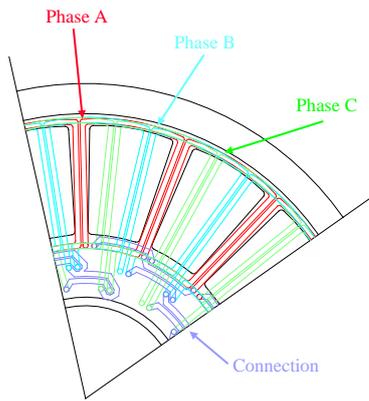


圖5 三相軸向式馬達PCB定子繞組設計圖

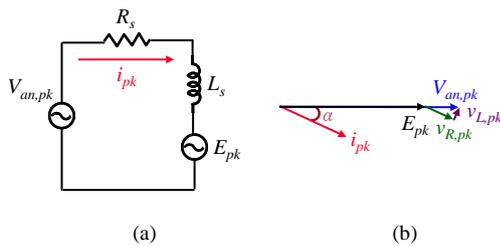


圖6 單相定子繞組等效電路與向量分析圖(a)等效電路(b)向量分析

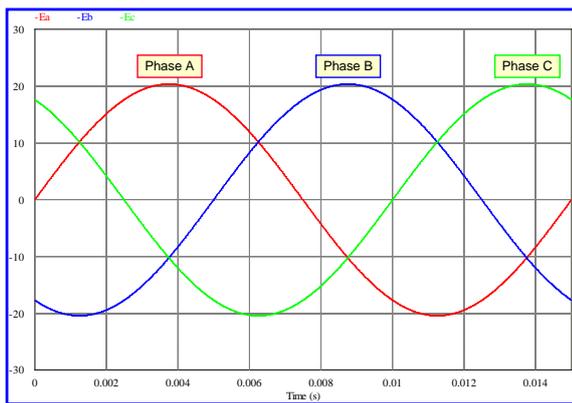


圖7 PCB軸向式馬達三相反電動勢預測波形

在本設計主要針對直流鏈電壓48伏特的應用，因此，所考量的主要重點並非馬達反抗電動勢的形狀，而是其峰值大小，換言之，即為 K_e 的大小。依電動自行車法規規定其最大速限為25 km/hr，而經自行車齒輪比轉換，可得馬達轉速最高約工作於500 rpm，而當馬達運轉時，其等效電路與向量分析如圖6所示，若馬達以48V且以弦波進行驅動控制，可知當馬達於最高速500 rpm時， $V_{an,pk}$ 為24伏特，若工作於額定電流峰值為10安培的情況下，且經電流控制使得其功率因數(Power factor, PF)接近於1，可估算其於電阻與電感所產生之壓降，並藉以決定反抗電動勢峰值的大小。一般而言，馬達反抗電動勢的峰值約為相電壓峰值的10%~15%，故可建立馬達反抗電動勢之預測波形，如圖7所示。

另一個主要考量為定子繞組之等效電阻，(4)式為電阻之計算方法，其中， l 為導線長度，而 A 為導線截面積， ρ 為電阻係數，銅為 $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。

$$R_s = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (4)$$

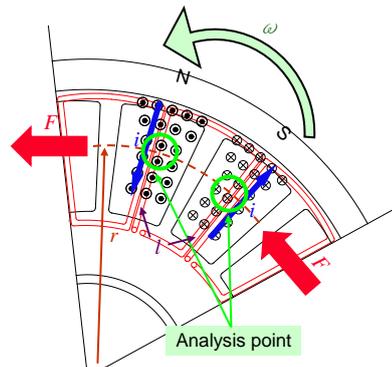


圖8 軸向式馬達作用力與轉矩產生示意圖

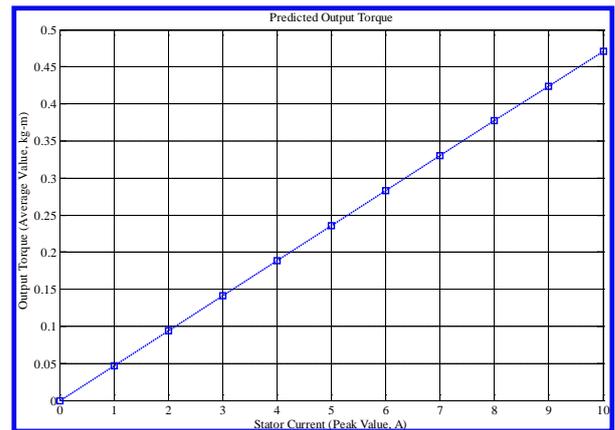


圖9 於不同定子繞組電流下所產生之電磁轉矩大小($\alpha=0$)

以既有馬達銅線繞組為例，直徑為 $\Phi 0.5$ mm之銅線單位長度之電阻值約為 0.276Ω 。而在PCB導線等效電阻的計算中，以銅箔重量為2 oz及銅箔寬度為0.5 mm做為計算條件，因此，換算其厚度約為 $68.65 \times 10^{-6} m$ ，而單位長度之電阻值則為 0.502Ω 。PCB的導線電阻其主要影響量為導線之截面積，在一般PCB製程中，銅箔多以1至2 oz為主，而在寬度部份，需以永久磁鐵間的槽寬做為最大限制來考量。

C. 轉矩與反抗電動勢常數及功率密度分析

軸向式馬達轉矩的產生如圖8所示，根據佛萊明左手定則，置於均勻磁場中的導體若通以一電流，則可產生與磁場方向相互垂直的作用力，(5)式為馬達作用力之計算方式。而其轉矩的換算為 $T = F \cdot r$ ，且在有效導體與磁場為正交時，可將馬達轉矩計算表示為(6)式。因此，在軸向式馬達設計中，於圖中分析點所產生之轉矩正比於導體電流大小，如(7)所示， K_t 為轉矩常數。

$$F = B \cdot l \cdot i \cdot \sin(\theta) \quad (5)$$

$$T = B \cdot l \cdot i \cdot r \quad (6)$$

$$T = K_t \cdot i \quad (7)$$

在三相軸向式馬達中，其輸出功率可表示為 $P_m = T_e \cdot \omega$ ，假設馬達電磁轉換效率為100%時，其輸出轉矩可表示為(8)式，其中， e_a, e_b, e_c 為馬達反抗電動勢， i_a, i_b, i_c 為定子繞組電流，若反抗電動勢為正弦波時，則定子繞組電流也須為相同頻率之正弦波便能產生穩定的轉矩，故馬達之轉矩計算如(9)所示。

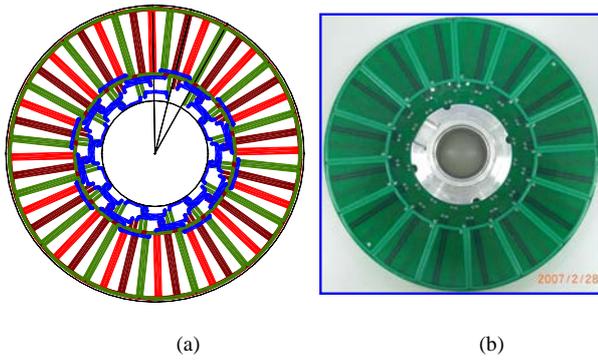


圖 10 三相軸向式馬達 PCB 定子繞組 (a) 佈線圖 (b) 實際樣品

表 2 三相軸向式馬達與 PCB 定子繞組基本參數

主要參數	設計及量測數值
連接方式	3相 Y接
馬達極數(P)	16
PCB銅箔寬度[mm]	1.5
定子線圈圖數	1
單片定子電阻(R_s) [Ω]	0.348
單片定子電感(L_s) [μH]	5.348
單片反抗電動勢常數(K_e) (線對中性點峰值) [V·s/rad]	3.54×10^{-3}
黏滯摩擦係數(B_m)	1×10^{-3}
轉動慣量(J_m) [kg·m ²]	10.004×10^{-3}

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3 E_{pk} \cdot I_{pk}}{2 \omega} \cos \alpha \quad (9)$$

$$T_e = \frac{3}{2} K_e \cdot I_{pk} \cdot \cos \alpha \quad (10)$$

將(3)代入(8)，可得馬達之平均轉矩為(10)所示，其中， α 為反抗電動勢與定子繞組電流的相位差，一般而言，若需產生最大之電磁轉矩， α 必須為零。此外，在M.K.S.制中，馬達之轉矩與反抗電動勢常數相等，故所設計之PCB軸向式馬達其於不同定子繞組電流下所產生之電磁轉矩如圖9所示。反抗電動勢常數依直流鏈電壓與馬達之應用得以決定後，便可計算其輸出轉矩等馬達主要參數，並進一步驗證所設計之馬達是否合乎需求。

在功率密度方面，其定義為單位體積內馬達輸出功率之大小，如(11)所示，式中 P_m 為馬達輸出功率， V_m 則為馬達總體積。由上述之推導且在同樣的條件之下，可將馬達功率密度計算改寫如(12)。

$$D_m = \frac{P_m}{V_m} \quad (11)$$

$$D_m = \frac{3 E_{pk} \cdot I_{pk}}{2 V_m} \quad (12)$$

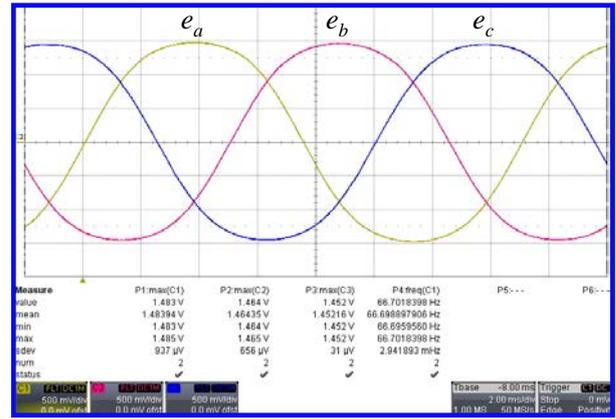


圖 11 三相軸向式馬達使用 PCB 定子繞組之反抗電動勢波形

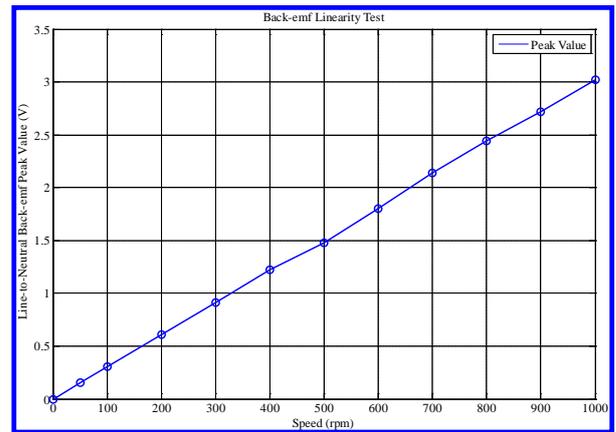


圖 12 於不同轉速下之反抗電動勢峰值(最大速度為1000 rpm)

而馬達體積則以轉子規格為考量計算可得其總體積約為 223 cm³，在體積不變且於定轉速 500 rpm 的情況下，而依據所設計之反抗電動勢常數，並假設定子繞組電流峰值為 10 A 時，可求出馬達之功率密度約為 1.372 W/cm³。在 PCB 定子繞組設計中，其單位有效銅箔體積所能產生之功率大小亦可估算得知，若有效銅箔長度為 35 mm，而寬度為 1.5 mm 且以 2 oz 進行設計時，其佔馬達總體積約為 0.31%，故可計算其功率密度則為 4.25 × 10⁻³ W/cm³。就 PCB 定子繞組設計之應用而言，功率密度的數值越大表示其單位體積內所產生之輸出功率也越大，即表示以較小的體積便能獲得其較佳之設計。

D. 設計結果與樣品

本論文以 4 層 PCB 實現三相軸向式馬達定子繞組，其佈線設計如圖 10(a) 所示，頂層為 A 相繞組，第 2 層為 B 相繞組，第 3 層為 C 相繞組，而底層則為各相線圈連接導線；而在繞組位置佈線上，各相間需相差電氣角度 120°，故以馬達極數轉換至機械角度，其各相線圈需相差 15°，此外，此馬達為 Y 接設計，故中性點亦於底層進行連接。圖 10(b) 為實際完成之三相軸向式馬達 PCB 定子繞組單片設計樣品。針對組裝完成之軸向式馬達進行基本的參數鑑別，可得表 2 為本論文所使用之三相軸向式馬達與 PCB 定子繞組之基本參數表。

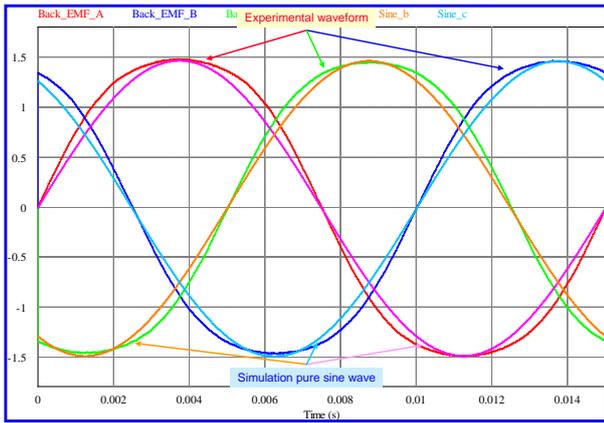


圖 13 所量測之反抗電動勢與理想正弦波比較圖

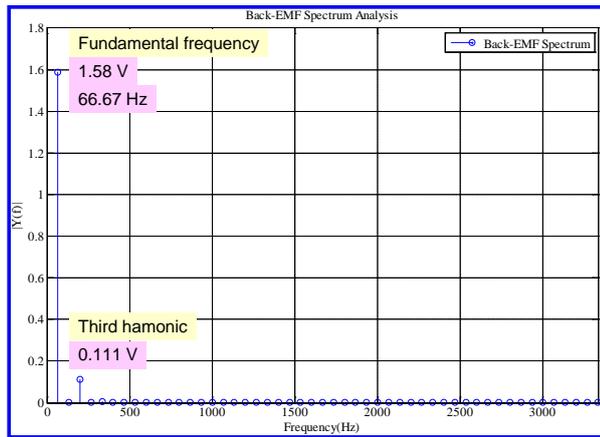


圖 14 反抗電動勢之頻譜計算與分析

III. 單片印刷電路板定子繞組測試方法

A. 反抗電動勢量測方法

PCB 定子繞組在進行測試時，因仍須考慮相互疊合時的連接問題，故以單片 PCB 定子繞組進行測試，並建立一套相對測試標準用以評估此設計是否合乎需求。在反抗電動勢測試中，第一部分為驗證其反抗電動勢常數並探討其線性度。測試方法是使用直流馬達經鏈條帶動待測馬達，並由馬達三相及中性點輸出端量測其波形，圖 11 為所量測之三相反抗電動勢波形，可計算出其反抗電動勢常數值為 $3.54 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。而在不同轉速下之反抗電動勢如圖 12 所示，其反抗電動勢峰值大小於不同轉速時，仍維持一線性關係，故可推論反抗電動勢常數為固定而不會有所波動。

第二部份則針對反抗電動勢形狀之總諧波失真 (total harmonic distortion, THD) 與合成磁場向量進行分析。圖 13 為所量測之反抗電動勢與理想之正弦波比較，可知其仍有誤差計算所量測之反抗電動勢頻譜如圖 14 所示，藉此計算其三相反抗電動勢之 THD 各為 7.01%、6.71% 與 6.62%，故可推論三相之反抗電動勢近似於正弦波。另一方面，在合成磁場的探討中，圖 15(a) 說明三軸與二軸座標間的轉換關係，故求得所量測之反抗電動勢的合成磁場，而理想之正弦波其合成向量為圓形，由圖 15(b) 可知，反抗電動勢的合成磁場亦近似圓形。由上述之測試與分析可知，反抗電動勢之波形須以弦波之電流進行驅動控制才能產生平穩的轉矩。

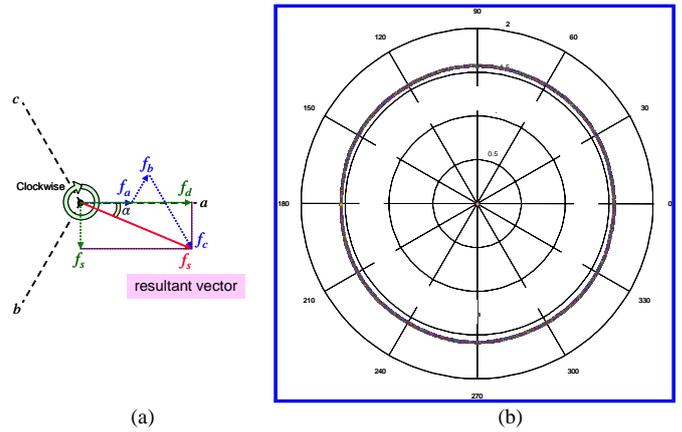


圖 15 反抗電動勢合成磁場向量分析結果圖(a)計算方法(b)計算結果

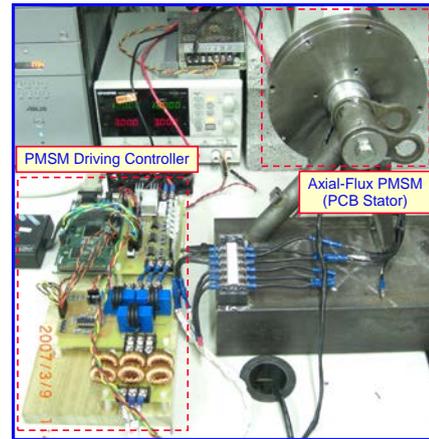


圖 16 測試實驗平台建立

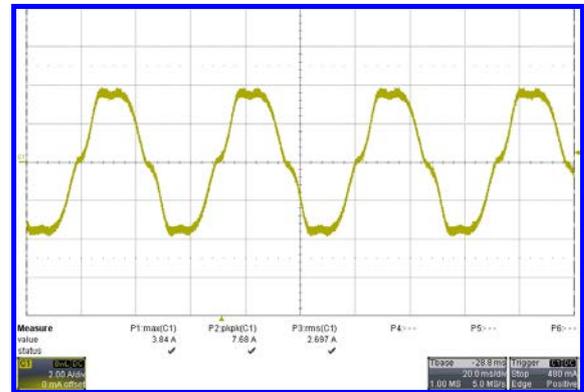


圖 17 A 相定子繞組電流響應

B. 開迴路驅動控制

PCB 軸向式馬達的驅動控制中，是由單片 PCB 定子繞組進行測試，故其電感值極小而造成電流控制不易實現，故於三相線路中串接電感以便於測試，圖 16 為所建立之測試實驗平台。在控制方法方面，利用線性霍爾感測器做為轉子位置與反抗電動勢相位之參考進行 SPWM 驅動控制，並藉此產生所需之電壓命令而使得馬達能夠穩定運轉來藉此測試其所需之相關參數。圖 17 為在電壓模式控制下之定子繞組電流響應。

C. 溫度與集膚效應測試方法

在溫度的測試中，將軸向式馬達於驅動控制下持續運

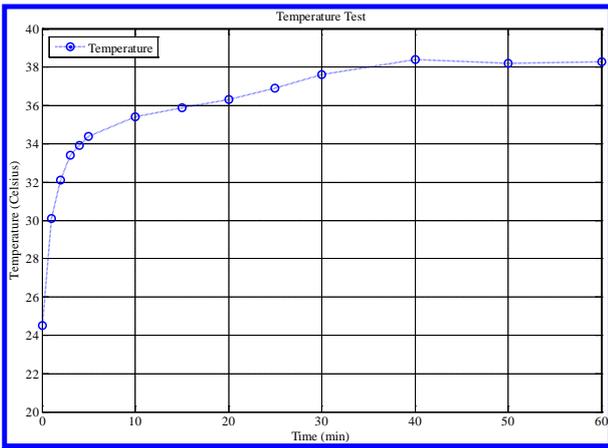


圖18 馬達內部溫度變化曲線圖

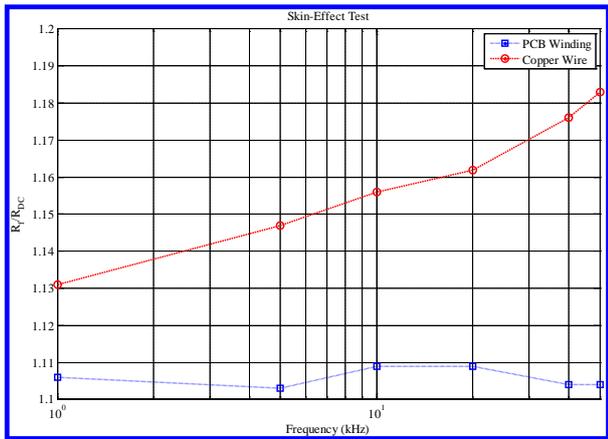


圖19 集膚效應測試結果圖

轉，並將溫度感測器置於馬達內部進行溫度量測約1小時，其測試結果如圖18所示。馬達之熱阻(θ_{th})經計算馬約為 $5.4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，而其由初始溫度上升至穩態溫度之時間約為40分鐘。

在集膚效應部分，其測試方法是由一降壓型轉換器進行測試，以不同開關頻率量測其電流的改變，並藉此估算PCB定子繞組之電阻變化，圖19為PCB定子繞組與既有繞線方法其集膚效應的測試結果。

IV. 測試結果與分析

從反抗電動勢的測試中可知，由單片PCB定子繞組所測得之反抗電動勢常數為 $6.132 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ，而反抗電動勢的大小與通過磁場中有效導體的匝數成正比，故本論文所設計之單片PCB定子繞組應疊合並串聯至6片便可達到所需之要求。而在反抗電動勢分布形狀方面，所計算之THD約為7%，可推論其近似於正弦波並使用弦波電流控制以達到良好的轉矩輸出。在進行驅動控制下PCB軸向式馬達穩定運轉，可推論其所產生之轉矩與輸出功率等經單片PCB繞組相互疊合後可符合所預期的響應。而在溫度測試的結果中，可知單片PCB定子繞組之熱阻係數與熱時間常數的變化，但溫度與PCB疊合數量成正比，故須特別考量散熱問題以降低馬達內部溫度。集膚效應為既有馬達不易克服的缺點之一，而在PCB定子繞組中，因導體為扁平設計，故集膚效應的影響相較於既有銅線繞組有顯著下降。

表3 PCB軸向式馬達製程設計參考表(以銅箔層厚度為主)

Parameters	Specifications
Thickness of printed circuits [oz]	≥ 15
No. of PCB layers	4
Connection method for each PCB	Series
Connection method for each layer	Series
Stator winding ESR [Ω]	0.3712

表4 PCB軸向式馬達製程設計參考表(以佈線層數為主)

Parameters	Specifications
Thickness of printed circuits [oz]	2
No. of PCB layers	≥ 15
Connection method for each PCB	Series
Connection method for each layer	Parallel
Stator winding ESR [Ω]	0.56

V. 結論

本論文以PCB實現了應用於電動自行車之軸向式馬達的定子繞組，不僅將與磁場切割之有效導體路徑發揮極致，更有效的克服既有銅線纏繞方式所造成的限制與缺點，並經分析與測試得以驗證其可行性與效能。針對PCB的製程中，本論文提出兩種設計方法如表3與表4所示。銅箔厚度與佈線層數為本研究的主要限制，銅箔的厚度主要影響電阻的變化，隨著厚度的增加而使得定子繞組等效電阻有效降低進而減少溫度的產生；另一方面，佈線層數則決定馬達的最大圈數與各層連接方法，若層數得以增加，單片PCB定子繞組各線圈的圈數增加經疊合後而使得馬達反抗電動勢常數增加進而提升輸出轉矩大小，此外，亦能藉由各片PCB以並聯方式連接來減少等效電阻值。因此，本研究未來將以單片PCB定子繞組進行疊合並分析與測試其效能，更針對PCB製程的限制進行改善而設計符合電動自行車需求之軸向式馬達。

參考文獻

- [1] D. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Second Edition, The Writers' Collective, 2003.
- [2] P. Wannakarn, T. Tanmaneeprasert, N. Rugthaicharoencheep, and S. Nedphograw, "Design and construction of axial flux permanent magnet generator for wind turbine generated dc voltage at rated power 1500 w," Forth International Conf. on the Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Tech. (DRPT), pp. 763-766, Aug. 2011.
- [3] D. R. Chikkam, "Performance of disc brushless dc motor applied as gearless driver for wheelchair," Louisiana State University, Agricultural and Mechanical College, 2002.
- [4] M. C. Tsai and L. Y. Hsu, "Design of a miniature axial-flux spindle motor with rhomboidal pcb winding," IEEE Trans. Magnetics, vol. 42, pp. 3488-3490, Sep. 2006.
- [5] G. J. Yan, L. Y. Hsu, J. H. Wang, M. C. Tsai, and X. Y. Wu, "Axial-flux permanent magnet brushless motor for slim vortex pumps," IEEE Trans. Magnetics, vol. 45, pp. 4732-4735, Sep. 2009.
- [6] C. Yan, F. Li, J. Zeng, T. Liu, and J. Ying, "A novel transformer structure for high power, high frequency converter," IEEE Power Electron. Specialists Conf. (PESC), pp. 214-218, Oct. 2007.
- [7] H. Dong, Y. S. Zhu, and B. S. Zhao, "Research on the electromagnetic radiation of a pcb planar inductor," Asia-Pacific Microwave Conf. (APMC), vol. 1, Mar. 2006.
- [8] S. Moury and M. T. Iqbal, "A permanent magnet generator with pcb stator for low speed marine current applications," First International Conf. on the Dept. in Renewable Energy Tech. (ICDRET), pp. 1-4, Apr. 2010.