

燃油幫浦系統高效率銅轉子感應電機使用 有限元素分析與實作驗證

陳盛基 吳仲琪 粘鏡耀

大葉大學電機工程學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本文探討航太工業燃油系統中所採用之高效率三相鼠籠式感應電機的設計與分析，為達到高效率的目標，電機設計採用銅轉子結構以符合系統規格。為驗證設計及模擬的正確性，除使用磁路與有限元素分析軟體進行電機暫態與穩態特性的模擬外，並依設計分析資料製作電機實體，並進行轉矩、電流、效率等參數對速度的性能量測，經由實測數據證實本設計與分析方法的適切性。

關鍵詞：高效率三相鼠籠式感應電機，有限元素分析，銅轉子

Analysis of a High-Efficiency Three-Phase Squirrel-Cage Induction Machine for Fuel Pump Systems by the Finite Element Method

SENG-CHI CHEN, CHUNG-CHI WU and YI-YAO NIAN

Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University

No.168 University Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 51591, R.O.C.

ABSTRACT

In this research, the increase in system efficiency of squirrel-cage-type three phase-induction machines for fuel pumps in aerospace applications is investigated. Both steady- and transient-state characteristics identified by the finite element method (FEM) and equivalent circuit analysis are adopted. Both testing and analysis are applied to meet the specifications of torque, current, and efficiency. The most important purpose of this study is to achieve accordance between the simulation analysis and the implementation of the testing.

Key Words: efficiency of squirrel-cage-type three phase-induction machines, finite element method (FEM), equivalent circuit analysis

一、前言

隨著國際原油價格不斷的高漲，環保節能等議題受到極度的關切，先進國家對於工業用電動機的效率標準亦進行規範，藉以達到節省能源的目標。典型的規範有兩種，一者為美國的 NEMA (National Electrical Manufacturers Association) Premium® 電機能源效率標準，另者為歐盟的 CEMEP (European Committee of Manufactures of Electrical Machines and Power Electronics) 電機能源效率標準。

如圖 1 所示，為 10 kW 以下感應電機，NEMA 及 CEMEP 之效率比較圖，其中歐盟的 CEMEP 制訂了高標的 EFF1 (efficiency1) 及低標的 EFF3 (efficiency3)，而美國 NEMA 之效率要求更高過 CEMEP EFF1 及 EFF3 的標準 [7]。

燃油系統中最主要的動力元件為感應電動機及燃油幫浦，感應電動機的輸出軸提供轉矩及速度作為幫浦之輸入源，幫浦將燃油從油箱輸送至引擎的燃燒室中，以推進載具於空中飛行。依據載具飛行的高度及速度不同，燃油的流量及壓力亦隨之改變。因此，感應電動機必須隨著不同條件改變速度及扭距。本研究中所設計的電動機，其規格相當嚴苛，除體積限制外，在不同轉速條件下，亦需達到特定的轉矩及較低的電流規範，如圖 2 所示，為本文所設計的三相感應電動機在不同轉速下所需達到的轉矩，其中轉速在 5200 rpm、5600 rpm、6800 rpm、8390 rpm 下，輸出轉矩分別為 1.31 Nm、1.24 Nm、0.88 Nm、0.84 Nm，且輸出轉矩誤差不得超過 6%。

有關國內外感應電動機的研究上，主要分為三類：第一類以提高感應電動機的效率為目標，Kirtley 等研究人員 [6]

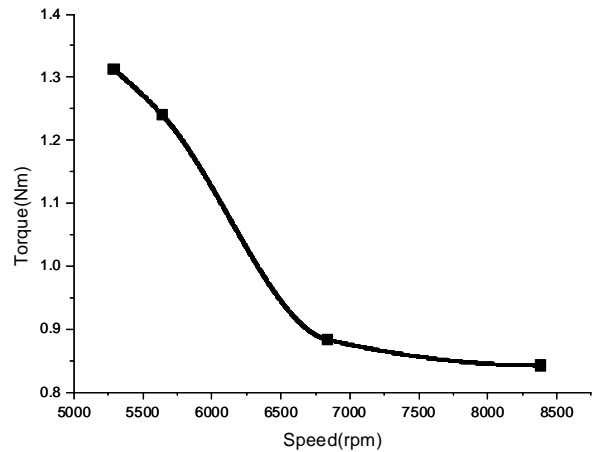


圖 2. 感應馬達速度-轉矩工作點

採用壓鑄的方法，並將銅取代鋁作為轉子材料，因為銅之電阻約為鋁的三分之二，故可有效降低歐姆損耗。經由系統整體設計亦可將鐵損大幅降低，因此總損耗減少 15-20%，電機重量亦減輕 5-10%。Williamson 與 McClay [8] 等人則使用等效電路及有限元素法探討改變電機幾何外形對效率的影響，改變參數包含矽鋼片材料、定子槽與轉子槽的搭配、轉子槽型、氣隙、繞線等。Haataja 與 Pyrhonen [5] 等工程人員則探討製程對提升感應電動機效率的重要性。第二類則以有限元素法進行分析，如 Bentounsi 與 Nicolas [2] 使用有限元素法分析感應電動機之磁場及運轉特性。第三類的研究主要探討感應電動機的暫態及穩態特性。如 Dorrell 與 Miller [3] 則提出鼠籠式銅轉子內部的轉子銅條電流對電機特性的影響。綜合以上文獻的回顧，感應電動機採用銅轉子結構，並經由適當的電機參數分析及利用有限元素分析軟體，可進行高效率感應電動機的分析。本文設計一高效率燃油系統用三相感應電動機，外形結構如圖 3 所示。首先，描述此感應電動機的等效模型，進而推導其特性方程式，詳列系統設計規格、深槽式銅轉子及定子尺寸、繞線方式。文中呈現有限元素分析的結果，其中包含暫態及穩態的特性如轉矩、電流、效率。最後，製作實品進行測試，並比較模擬分析與實測之結果。

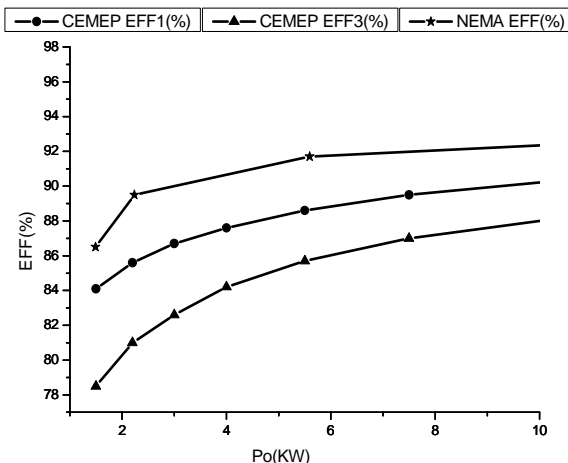


圖 1. NEMA 及 CEMEP 感應電機輸出功率 (Po) 與效率之比較圖

二、感應電機等效模型

三相鼠籠式感應電動機之單相等效電路如圖 4 所示 [4]。其中 jx_l 為定子漏電抗， r_l 為定子繞線電阻， U_l 為輸入相電壓， I_l 為相電流， I_m 為通過氣隙之感應電流， r_m 為氣隙

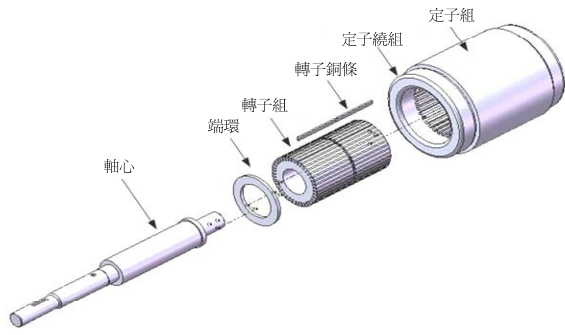


圖 3. 設計之感應電機定轉子立體圖

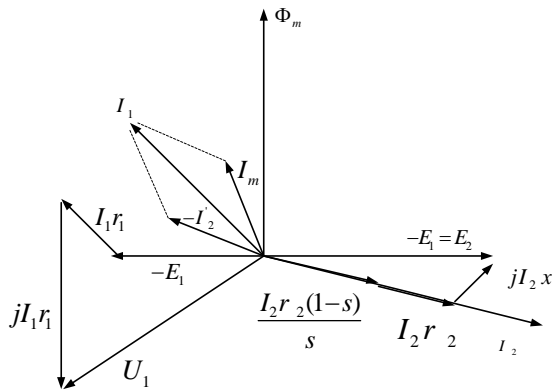
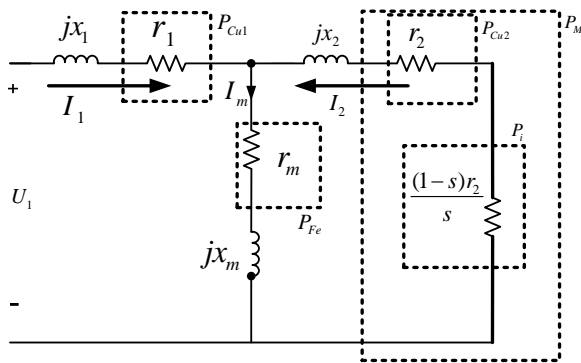


圖 4. 感應電機之等效電路與等效向量圖

磁阻， jx_m 為氣隙電磁電抗， I_2 為轉子電流， jx_2 為轉子漏電抗， r_2 為轉子電阻， s 為轉差率。感應電機之同步轉速為

$$S_{syn} = \frac{120}{P} f \quad (1)$$

其中 S_{syn} 為同步轉速 (rpm)； P 為極數； f 為工作頻率 (Hz)。而轉子的

$$S_{Rotor} = (1-s)(S_{syn}) \quad (2)$$

此處 S_{Rotor} 為轉子轉速 (rpm)； s 為轉差率

定子三相輸入至氣隙之總功率為：

$$P_{gap} = mI_2^2 \frac{r_2}{s} \quad (3)$$

其中 m 為相數，此處 $m=3$ ， I_2 為轉子相電流 (A)；

感應電機輸出的機械功率 P_m 為：

$$P_m = (1-s)P_{gap} \quad (4)$$

氣隙總功率 $P_{gap} = \omega_s T_e$ ；電磁轉矩如下式所示

$$T_e = \frac{1}{\omega_s} mI_2^2 \frac{r_2}{s} = \frac{mU_{th}^2 (r_2/s)}{\omega_s (R_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (X_1 + x_2)^2} \quad (5)$$

其中 ω_s 為轉子同步角速度 (rad/s)； T_e 為電磁轉矩 (N·m)；

U_{th} 、 R_1 、 X_1 分別為圖 4 之戴維寧等效電壓、電阻及電抗

$$U_{th} = U_1 \frac{|jx_m|}{|r_1 + jx_1 + jx_m|} \quad (6)$$

$$(r_1 + jx_1) + jx_m = R_1 + X_1 \quad (7)$$

感應電動機的損失共分五類：第一類是由定轉子鐵芯材質造成的損失，稱為鐵損 P_{Fe} 。第二類是由定子線圈產生的損失，稱為一次銅損 P_{Cu1} 。第三類由電機轉子線圈或使用鋁製或銅製鼠籠式轉子，其電流所造成的損失，稱為二次銅損 P_{Cu2} 。第四類由電流經過定子線圈所產生的磁場切割鐵芯，造成材料渦流效應的損失，稱為渦流損 P_{ad} 。第五類是電機在運轉下機械磨擦及冷卻風扇的風阻所產生的損失，稱為雜散損 P_{mec} 。感應電機之總損失為

$$P_{loss} = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{ad} \quad (8)$$

感應電動機的效率為

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{P_o}{P_o + P_{loss}} \times 100\% \quad (9)$$

其中 P_{in} 、 P_o 分別為電動機之輸入及輸出功率，隨著負載變化，定轉子的電流也隨之變化；影響效率之主要損失為一次（定子）及二次（轉子）銅損，因此，採用銅轉子結構，可有效減少銅損提高電動機之效率。

三、有限元素法

Maxwell 於 19 世紀中，提出能適用任何電磁現象的宏觀數學模型。Maxwell 方程式可分為微分與積分兩種形式，使用微分形式的方程組可推導出使用有限元素解決電磁問題的方程式 [1]。

由 Maxwell 方程組可知道電流密度向量 $J(A/m^2)$ 和磁性電位向量 A ，如 (10) 式所示

$$J = (0, 0, J_z), A = (0, 0, A_z) \quad (10)$$

磁場強度向量 $H(A/m)$ 和磁通密度向量 $B(T)$ 有分量在 (x, y) 平面如 (11) 式所示

$$H = (H_x, H_y, 0), B = (B_x, B_y, 0) \quad (11)$$

在二維靜磁場求解器所必需滿足的非齊次泊松方程式可由 (10)、(11) 獲得以下微分方程：

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A_z = J_z \quad (12)$$

其中 J_z 為定子電流密度 (A/m^2)； μ 為材料導磁率；有限元素分析是以能量之觀點來計算轉矩，轉矩表示如下

$$T_e = \left. \frac{dW(\theta, i)}{d\theta} \right|_{i=const} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\int_V (\int_0^H B \cdot dH) dv \right] \quad (13)$$

靜磁場所計算的磁通為 (14) 式所示

$$\Phi = \int B \cdot dA \quad (14)$$

定子相繞組所產生之磁通鏈如 (15) 式所示

$$\lambda_a = \Phi \frac{pN_{ph}L}{a} \quad (15)$$

其中 λ_a 為相磁通鏈； N_{ph} 為每相匝數； L 為鐵心長度； a 為繞組並聯分支數； p 為極數。

反電動勢 e_b 為磁通鏈微分如 (16) 式所示

$$e_b = -\frac{d\lambda_a}{dt} \quad (16)$$

而暫態之轉動方程則為 (17) 式

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - D\omega_r \quad (17)$$

其中 J 為轉動慣量、 D 為摩擦係數、 T_L 為負載轉矩、 ω_r 為轉子角速度。

轉動慣量在有限元的暫態分析中對系統響應時間影響極大。

四、電機設計與模擬分析

表 1 詳列所設計電機之規格及特定參數。表 2 及圖 5 為定轉子外形尺寸；定子的繞線，採用 #AWG26 號線 3 股並繞 10 匝，並依表 3 的順序進行繞線。依等效電路分析獲得穩態的結果，在不同頻率下，將轉矩及效率對速度之曲線繪於圖 6 及圖 7。由圖 6 可知當頻率越高工作點越往右邊移動、最大轉矩降低、工作點在 595 Hz 轉速為 8389 Rpm 時，轉矩為 0.843 Nm，而圖 7 為各頻率下效率對速度之曲線圖，觀查曲線圖，當頻率越高時其工作點效率略增，當工作點在 595 Hz 轉速為 8389 Rpm 時效率高達 86.78%。圖 8 為使用分析軟體 Maxwell Ansoft 2D [1] 所建立有限元素模型；包含軸心、轉子、定子以及三相繞組 A_{in} 、 A_{out} 、 B_{in} 、 B_{out} 、 C_{in} 、 C_{out} ，三相之相位差為 120° 電機角使繞線平衡。其中進行三相感應電機有限元素靜磁分析與暫態分析，有限元素以劃分網格解析，經過場解析器求解後，由後處理器擷取磁力線分佈圖、磁通密度分佈圖如圖 9 所示及氣隙磁通分佈圖如圖 10 所示。磁力線分佈越密代表磁通量越大，最高約 3.29×10^{-3} wb，磁通密度約 1.3 Tesla 未達到磁飽和狀態，氣隙磁通密度約為 0.7 Tesla 模型經過暫態求解後，根據所解出之數據，繪出電機三相線圈之磁通鏈波形如圖 11 所示及三相對應之反電動勢波形如圖 12 所示；暫態模擬主要觀察電機由暫態到穩態過程中的變化，圖 13 為 595 Hz 時轉矩與轉速對時間的變化，到達穩態時間約 0.2 秒，模擬結果顯示起動轉矩約 1.5 Nm，而到達額定轉速 8382 rpm 穩態轉矩約 0.85 Nm，轉動慣量為 $1.12 \times 10^{-4} Kg/m^2$ ；起動電流至穩態時之無載電流的大小也是非常重要之參數，在頻率 595 Hz 時起動電流約 11A rms，如圖 14 所示。到達額定轉速 8382 rpm 其電流約為 3.81A rms，如圖 15 所示。

表 1. 感應電機設計規格

額定規格			
輸出功率 (W)	740	轉子斜槽	1 槽
線電壓 (V)	220	繞線	#AWG 26
定子鋼片	M19		3 股 10 匝
定子極數	8	氣隙 (mm)	0.155
定子槽數	36	轉子槽數	41
堆疊因數	0.95	轉子型態	銅轉子
定子積厚 (mm)	74	軸心材料	Steel 1010
電機特性需求			
額定工作頻率 (Hz)	額定轉速 (rpm)	無載轉速 (rpm)	額定轉矩 (N-m)
375	5,200	5,625	1.31
400	5,600	6,000	1.24
480	6,806	7,200	0.88
595	8,390	8,925	0.84

表 2. 定子轉子尺寸 (mm) 及符號表

定子內徑	37.85	d2	9	轉子內徑	12.7
定子外徑	66.95	Wsb	3	Rr1	0.8
Wsi	1.54	d1	0.95	Rr2	0.8
Ws	1	Rs	1	Rd1	3.85

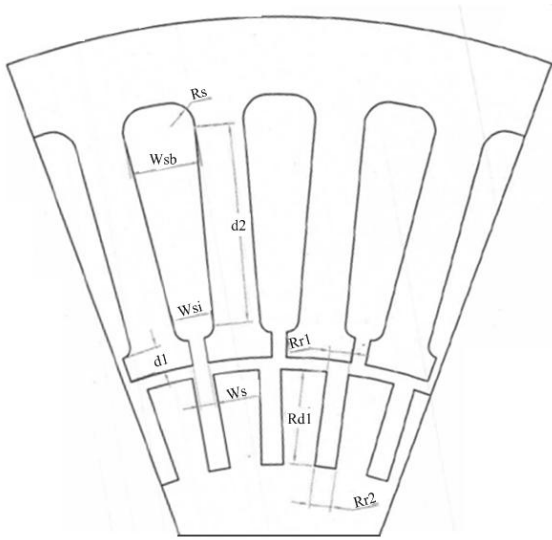


圖 5. 定子轉子尺寸圖

表 3. 定子繞線表

Phase A							
In	1	2	10	10	11	19	19
out	5	6	6	14	15	15	23
In	20	28	28	29	1		
out	24	24	32	33	33		

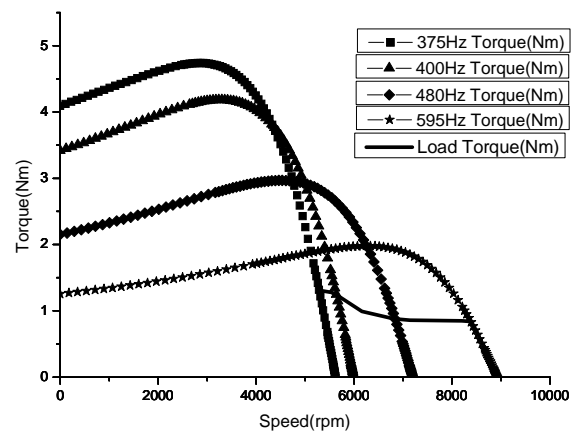


圖 6. 各頻率穩態轉矩對轉速曲線 (T-N)

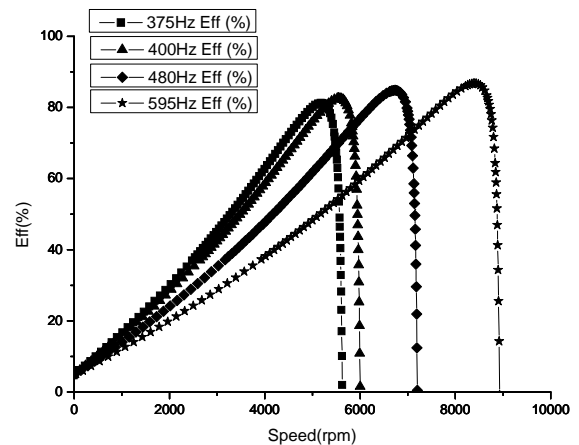


圖 7. 各頻率效率對轉速曲線 (Eff-N)

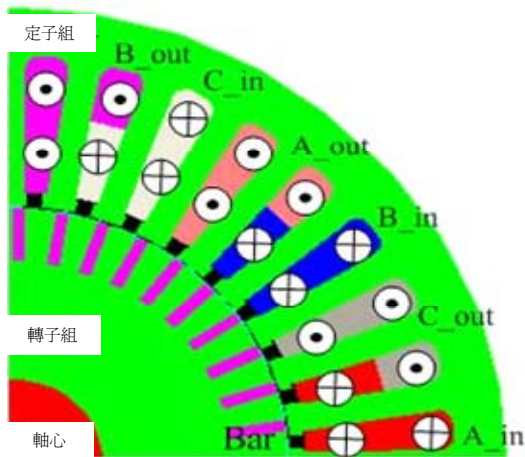


圖 8. 有限元素分析 2D 模型

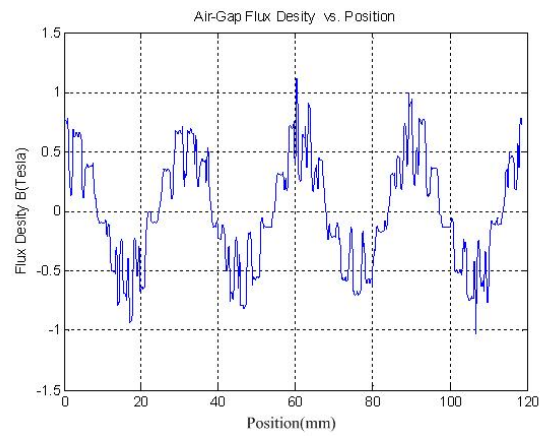


圖 10. 氣隙磁通密度分佈圖

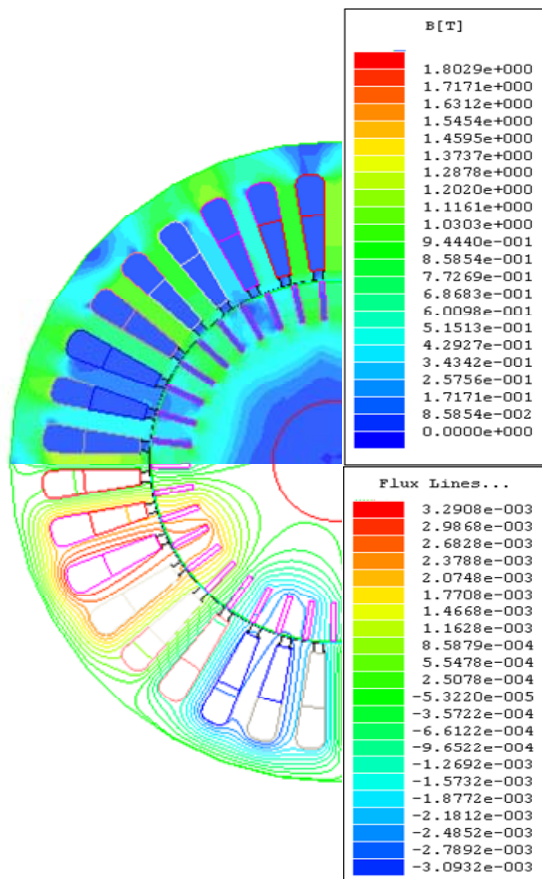


圖 9. 磁通密度分佈圖(上)與磁力線分佈圖(下)

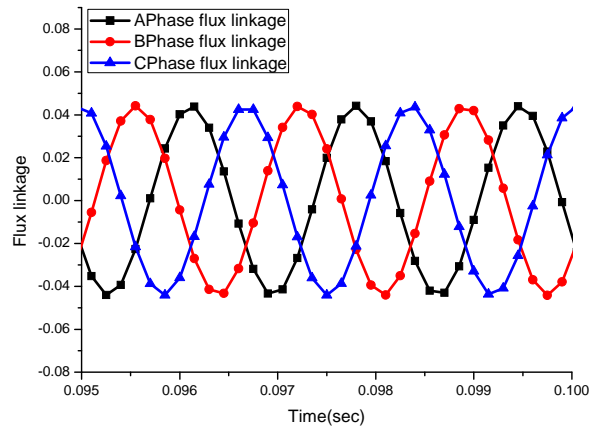


圖 11. 三相磁通鏈波形曲線圖

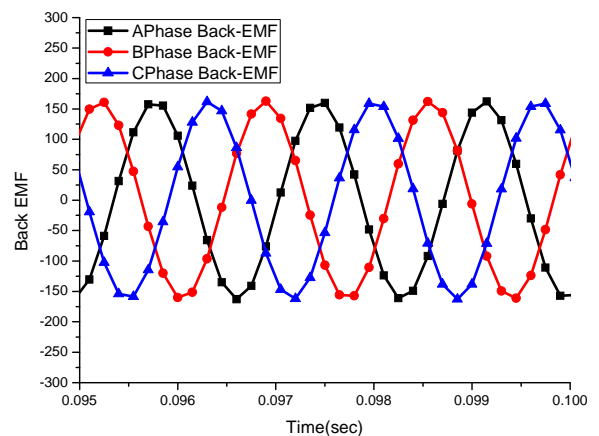


圖 12. 反電動勢波形圖

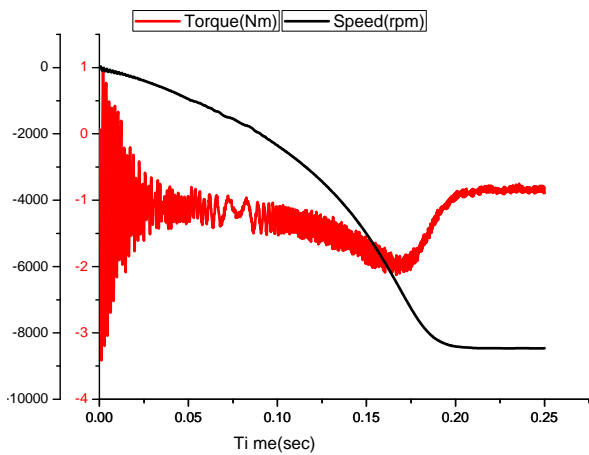


圖 13. 暫態轉矩與轉速曲線圖

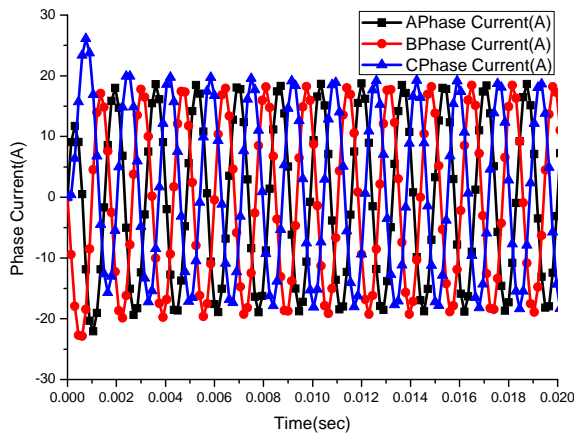


圖 14. 暫態起動三相電流曲線圖

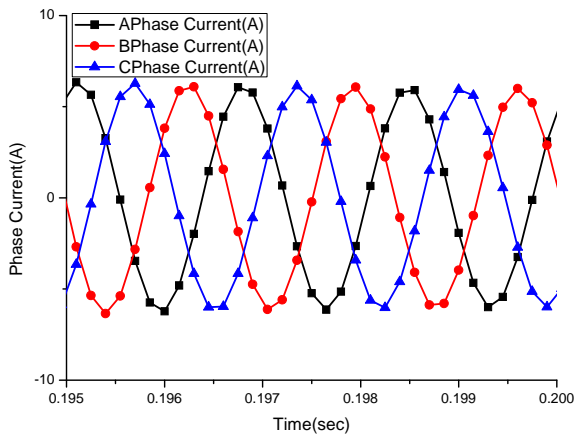


圖 15. 額定三相電流曲線圖

五、實測驗證與結論

圖 16 為測試系統建構圖。將實測數據與分析結果整理於圖 17 及圖 18；由此圖可知分析資料（375 Hz、480 Hz）的效率略高於實測數據，而誤差約為 5% 左右，分析與實測之結果尚在合理範圍內，唯一差距較多的分析為 375 Hz 時的電流與實測差距 0.5A。經過設計分析，此電機的轉矩與效率皆符合設計的需求。在恆速飛行中的工作點為 595 Hz、8,390 rpm、0.88 Nm，根據 NEMA 效率管理規範此工作點效率需高於 85.5%，而設計分析之效率為 86.5% 與實作成品測試驗證的效率 87% 皆高於 85.5%，滿足 NEMA 所規範之標準，達到設計分析與實作驗證的一致性。

本文設計三相感應電動機具銅轉子結構，擁有低起動電流、高效率、並滿足特定轉速下轉矩特性，可供作航太燃油系統內的主動力源。

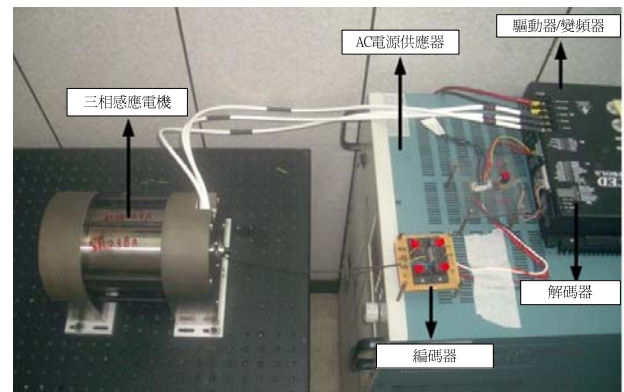


圖 16. 實測設備

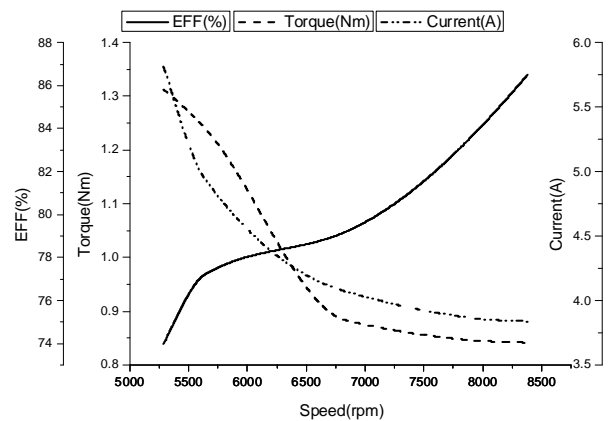


圖 17. 模擬曲線圖

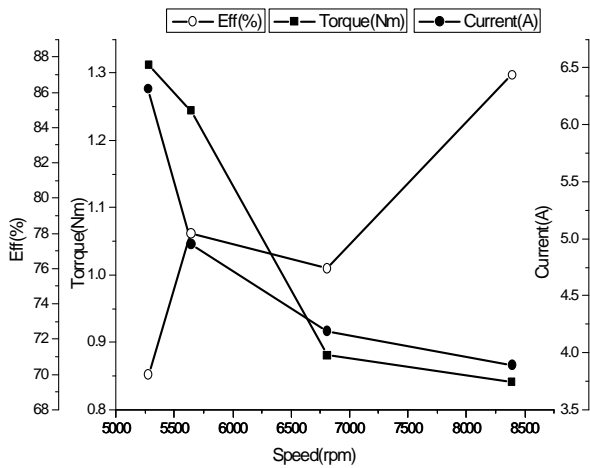


圖 18. 實測曲線圖

參考文獻

1. 劉國強、趙凌志、蔣繼姪 (民 94) , ansoft 工程電磁場有限元分析, 頁 46-79, 電子工業出版社, 北京。
2. Bentounsi, A. and A. Nicolas (1998) On line diagnosis of defaults on squirrel cage motors using FEM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(5), 62-66.
3. Dorrell, D. G. and T. J. E Miller (2001) Inter-bar currents

in induction machines. Industry Applications Conference on 2001 36th IAS Annual Meeting, Chicago, IL.

4. Fitzger, A. E., K. Charles and S. D. Umans (1994) *Electric Machinery*, McGraw-Hill, New York, NY.
5. Haataja, J. and J. Pyrhonen (1997) *Improving 3-phase Induction Motors Efficiency in Europe, the Challenge for Manufacture*, EMD 97 IEE Conference Publication, Cambridge, UK.
6. Kirtley, Jr. J. L., J. G. Cowie and E. F. Brush Jr. (2007) Improving induction motor efficiency with die-cast copper rotor cages. Power Engineering Society General Meeting, IEEE Conference, Tampa, FL.
7. Malinowski, J., J. McCormick and K. Dunn (2004) Advances in construction techniques of AC induction motors: Preparation for super-premium efficiency levels. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(6), 56-60.
8. Williamson, S. and C. I. McClay (1996) Optimization of the geometry of closed rotor slots for cage induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32(3), 560-568.

收件：97.12.17 修正：98.02.13 接受：98.03.11