

自起動鼠籠式內嵌 W 型永磁馬達磁鐵長度分析

*陳盛基、黃冠豪、張晴閔、侯印修、陳旻賢、林子文

南臺科技大學電機工程系

* amtfcsg123@stust.edu.tw

摘要

自起動鼠籠式內嵌永磁馬達 (LSPMSM) 為具有自起動能力，兼有感應電動機和永磁同步電動機的特點，LSPMSM 體積小、結構簡單，功率密度高，隨著永久磁鐵性能不斷提高，與世界各國追求高效率電機的趨勢下，馬達製造成本也隨著提高，因此本文主要進行 LSPMSM 磁鐵長度的分析。首先本文針對 LSPMSM 的電路進行分析，非同步和同步期間 d 軸、 q 軸相量圖，推導出電磁轉矩的變化。其次依照設計流程，並進行磁鐵參數化的設計，再利用 ANSYS Maxwell 進行磁場的模擬分析，針對不同永久磁鐵長度，探討效率、功率因數、磁通密度、氣隙功率等電機性能，最後模擬結果驗證轉子具有 W 型之永久磁鐵，效率可高達 95% 以上、功率因數 0.8 以上，得到兼具最佳的同步能力和高效率之電機分析。
關鍵詞：自起動、內嵌永磁馬達、ANSYS Maxwell

W-Shaped Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors Simulation Analysis

Seng-Chi Chen, Guan-Hao Huang, Ching-Hong Chang, Yin-Xiu Hou, Min-Yin Chen,
Zi-Wen Lin

Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

The Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) has self-starting capability, and also combines the characteristics of induction motors with permanent magnet synchronous motors, including small size, simple structure, and high energy density. With significant improvement of the performance of the permanent magnet, and the world in pursuit of more high-efficiency motors, motor manufacturing costs will increase. We therefore focused on optimizing the design and analysis of LSPMSM. Firstly, we analyzed the circuit for LSPMSM, and discuss the changes in electromagnetic torque and the asynchronous and synchronous phase diagram. Secondly, in accordance with the design process, we optimized the magnet design. Finally, we simulated the magnetic field using ANSYS Maxwell. For different lengths of permanent magnets, we discuss efficiency, power factor, magnetic flux density, gap power and other electrical performance characteristics. Finally, simulation results showed that using a W-type permanent magnet rotor yields an efficiency of up to 95%, and a power factor reaching a level of 0.8, indicating that the LSPMSM has ideal performance in terms of capacity and efficiency.

Keywords: Line Start, Permanent Magnet Synchronous Motors, ANSYS Maxwell

壹、前言

全球暖化的現象及再生能源研發的議題廣受關注，使現有的能量轉換設備更具效率是必要的[1-2]。隨著電力節能的日益重視，已經有大部分的馬達製造商改進了現在的馬達和驅動器的設計，以提升馬達的整體效率。而馬達在全國工業上的應用，其產生電能的消耗大約 50%。經過調查，國內外馬達應用設備的使用狀況，其耗用電力約佔總電量的一半以上，因此馬達的應用技術對於是否有效節能就扮演著很重要的角色。而高效率的馬達可以顯著地降低能量的損耗及減少對環境的衝擊，所以本文以可產生高效率的 LSPMSM 進行研究且探討其性能[3-4]。

LSPMSM 主要是依靠定子旋轉磁場與鼠籠轉子相互作用產生非同步轉矩起動，正常運作時，轉子在永磁體同步運作，鼠籠轉子不再有動作，其工作原理與激磁式同步電動機相同，不同之處在於 LSPMSM 由永久磁鐵提供機電能量轉換所需的磁場，取消了激磁式同步電動機的集電環、電刷及激磁電源。LSPMSM 結構部分主要分為定子和轉子兩個部份，定子以建立旋轉磁場，轉子經由電磁感應形成轉矩驅動負載運轉，與其他旋轉電機相同。馬達定子結構是由機殼、定子鐵心、定子繞組、端蓋、軸承等元件組成。為了減少鐵心損失，定子鐵心通常由薄形的矽鋼片，沿轉軸方向疊積而成。槽形通常採用半閉口型的梨形槽，增加槽面積的利用率。定子繞組使用銅線繞製而成。利用旋轉磁場在轉子導條感應電流產生起動轉矩，無需起動繞組。

LSPMSM 可以直接用主電源供電，其功率密度、功率因數、效率、尺寸方面及負載範圍都較感應馬達優良，所以不管在工業還是一般家庭的應用方面上，LSPMSM 可以替代一般的感應馬達。其應用如冷氣、風扇、抽水機[5-6]。但相較於感應馬達，LSPMSM 有個起動性能方面的缺陷[7]。其缺陷是馬達起動時，會因其磁鐵所產生的制動轉矩降低馬達的起動轉矩，特別是在低轉速時[8-9]，所以當在設計 LSPMSM 時，如何維持高效率也是很重要的關鍵因素。而磁鐵的優劣在永磁馬達的電機性能上影響甚大，如定子齒槽和永磁體相互作用下所產生的顫動轉矩，也會影響馬達的流暢性且產生振動和噪音；在高負載、慣性大、低電壓或是起動時間過長的狀況下，永久磁鐵也容易發生消磁作用[10]，甚至影響馬達的效率及電機性能。在 LSPMSM 之設計上轉子磁路結構選擇多樣化，有幾點原則必須注意。放置足夠的永久磁鐵，不但能保持電機性能，永久磁鐵寬度越寬，聚磁效果越明顯，氣隙磁密也越高。因此，交、直軸同步電抗比例要適當。

所以在各種因素的影響下，設計 LSPMSM 的難度更勝於設計感應馬達。透過磁鐵的形狀、磁鐵間的夾角、排列方式、鼠籠式轉子的結構及合適的尺寸，可以優化及改善 LSPMSM 的性能[11-13]。大型馬達的磁鐵受限於生產設備、充磁技術或成本等原因，生產不易，一般會以多片磁鐵組成一大型磁極來做為替代。另外在設計方面，可以利用感應馬達的規格來設計 LSPMSM，如此可以使設計過程變得較簡單也可以降低製造成本，而選擇適當的尺寸和磁鐵的排列方式，可以使永磁馬達的性能得到提升，使其性能優於改造前的感應馬達。LSPMSM 串聯磁路結構中其永久磁鐵的排列方式有：U 型、V 型、W 型、徑向、切向、混合式，根據文章[14]可以發現，W 型結構具有高效率，且研究 W 型結構的文章較少，所以本文進行 W 型永久磁鐵的參數化模擬。

貳、自起動鼠籠式內嵌 W 型永磁馬達的結構示意圖

LSPMSM 的結構主要為定子和轉子兩大部分組成。圖 1 所示為 LSPMSM 二維結構示意圖，定子槽槽型採用半閉口的梨形槽，增加槽面積的利用率。轉子結構則為鼠籠轉子和永久磁鐵組合而成，轉子槽俗稱鼠籠轉子，槽型方面和定子槽類似都是由梨形槽組成。轉子鐵心是由整塊鋼材加工而成，軸的外圍圍繞著許多永久磁鐵，永久磁鐵排列方式可以有很多種方法，而本文電機採用 W 型之設計。圖 2 為所對應的三維結構示意圖，定子槽繞組由銅線繞製，定子鐵心由薄形矽鋼片組，沿轉軸方向疊製而成。而增加轉子端環可以增加轉子槽面積，降低銅損。轉子磁路結構能放置足夠永久磁鐵，不但能保持電機性能，永久磁鐵越寬，聚磁效果越明顯。

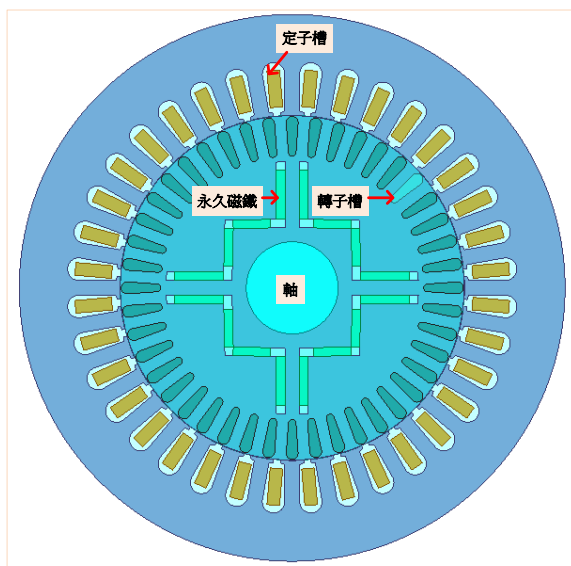


圖 1 LSPMSM 二維結構示意圖

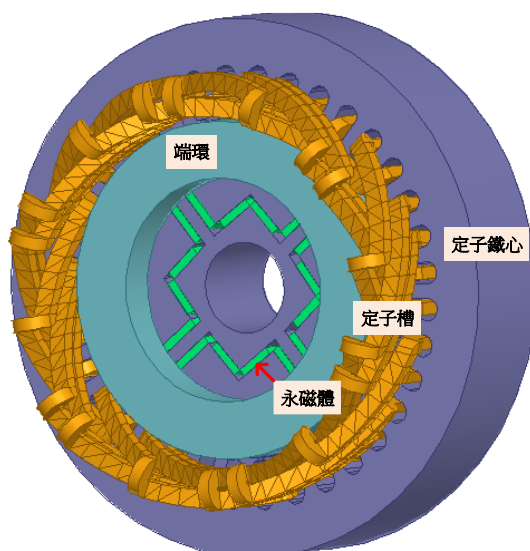


圖 2 LSPMSM 三維結構示意圖

參、轉矩推導

一、非同步期間操作

如圖 3 所示，為 LSPMSM d 軸等效電路圖，其中 U_d 為電源電壓， $\omega\lambda_q$ 為 q 軸磁鏈在 d 軸線圈上所感應的電壓，其中 ω 為電源角速度，馬達定子的電阻、電流、電感分別為 R_s 、 I_d 、 L_d ；轉子電阻、電流、電感分別為 R_D 、 I_D 、 L_D ，而 L_{md} 、 L_{mq} 為定子與轉子間的互感。而 q 軸等效電路，則如圖 4 所示。

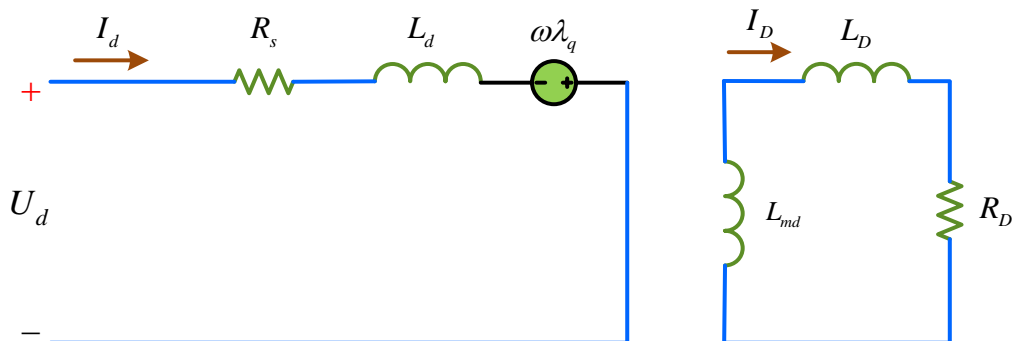


圖 3 d 軸等效電路

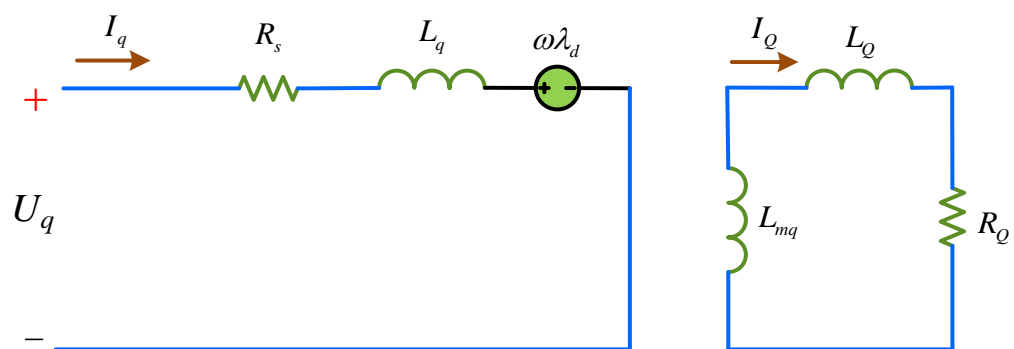


圖 4 q 軸等效電路

由克希荷夫電壓定律

$$U_d = R_s I_d + p \lambda_d + \omega \lambda_q \quad (1)$$

$$U_q = R_s I_q + p \lambda_q + \omega \lambda_d \quad (2)$$

$R_s I_d$ 和 $R_s I_q$ 代表電阻在 d 軸和 q 軸之電壓降， $p \lambda_d$ 和 $p \lambda_q$ 代表線圈在 d 軸和 q 軸方向所感應的電壓，其中 p 為微分運算子， d 軸和 q 軸方向的磁通鏈 λ_d 、 λ_q 分別表示如下：

$$\lambda_d = L_d I_d + L_{md} I_D + \lambda_{pm} \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q I_q + L_{mq} I_Q \quad (4)$$

其中 λ_{pm} 為永久磁鐵所產生的磁通鏈。由於圖 3、4 等效電路中轉子為短路環，由克希荷夫電壓定律表示如下：

$$0 = R_D I_D + p \lambda_D \quad (5)$$

$$0 = R_Q I_Q + p \lambda_Q \quad (6)$$

定子磁通鏈 λ 與定子電流 I 間的相量，如圖5所示。電磁轉矩可表示如下

$$T_e = I_q \cdot \lambda_d - I_d \cdot \lambda_q \quad (7)$$

將(3)(4)代入(7)式，可得

$$\begin{aligned} T_e &= I_q \lambda_{pm} + I_q (L_d I_d + L_{md} I_D) - I_d (L_q I_q + L_{mq} I_Q) \\ &= T_b + T_c \end{aligned} \quad (8)$$

此處 T_b 稱為制動轉矩， T_c 則稱為鼠籠轉矩，亦即

$$T_b = \lambda_{pm} \cdot I_q \quad (9)$$

$$T_c = I_q \cdot \lambda_{cd} - I_d \cdot \lambda_{cq} \quad (10)$$

其中， λ_{cd} 、 λ_{cq} 表示如下

$$\lambda_{cd} = L_d I_d + L_{md} I_D \quad (11)$$

$$\lambda_{cq} = L_q I_q + L_{mq} I_Q \quad (12)$$

若鼠籠轉矩小於制動轉矩，LSPMSM將無法起動運轉[14]。

二、同步期間操作

圖 6 所示為 LSPMSM 在同步模式下之相量圖，其中 U 為電源電壓， E_0 為反電勢， R_s 、 I 分別為定子電阻、電流， I_d 、 I_q 、 X_d 、 X_q 分別為 d 軸、 q 軸電流與電抗。其中 ψ 為 E_0 與 I 的夾角， φ 、 θ 分別代表功因角及轉矩角。 ψ 表示如下

$$\psi = \tan^{-1} \frac{I_d}{I_q} \quad (13)$$

$$\varphi = \theta + \psi \quad (14)$$

由圖 6 之向量圖觀察 U 相量與 q 軸間的幾何關係，可得

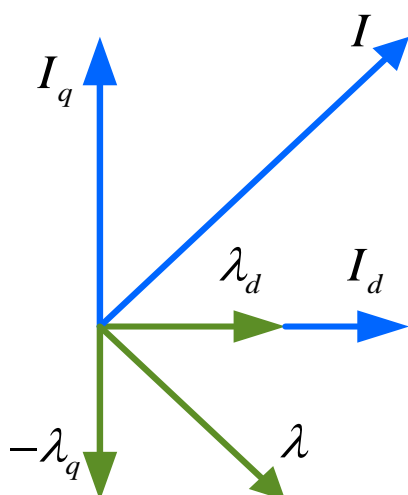


圖 5 磁通鏈 λ 與電流 I 之相量圖

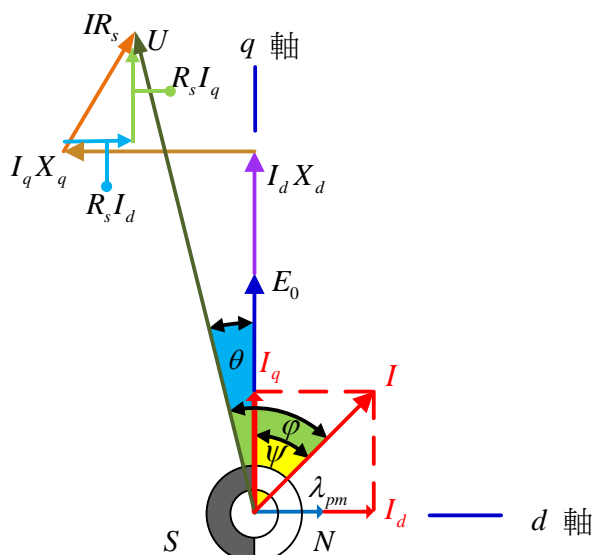


圖 6 LSPMSM 相量圖

$$U \cos \theta = E_0 + I_d X_d + I_q R_s \tag{15}$$

$$U \sin \theta = I_q X_q - I_d R_s \tag{16}$$

(15)(16)式經過整理可得

$$I_d = \frac{X_q (U \cos \theta - E_0) - R_s U \sin \theta}{R_s^2 + X_d X_q} \tag{17}$$

$$I_q = \frac{R_s (U \cos \theta - E_0) + X_d U \sin \theta}{R_s^2 + X_d X_q} \tag{18}$$

同步時，鼠籠轉子感應電流為零，式 (8) 之每相電磁轉矩為

$$T_e = \lambda_{pm} \cdot I_q - (L_q - L_d) I_d I_q \tag{19}$$

由於馬達輸入功率為

$$P_{in} = m \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \tag{20}$$

其中 m 為相數，若 $R_s \ll X_d, X_q$ ，且忽略定子鐵心損失，則馬達總電磁轉矩可推導如下：

$$T_e = \frac{m}{\omega} \left[\frac{E_0 \cdot U}{X_d} \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \right] = T_{pma} + T_{rel} \tag{21}$$

式中 T_{pma} 稱為對正轉矩，而 T_{rel} 稱為磁阻轉矩，分別表示如下[15]:

$$T_{pma} = \frac{m}{\omega} \frac{E_0 \cdot U}{X_d} \sin \theta \tag{22}$$

$$T_{rel} = \frac{m \cdot U^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \tag{23}$$

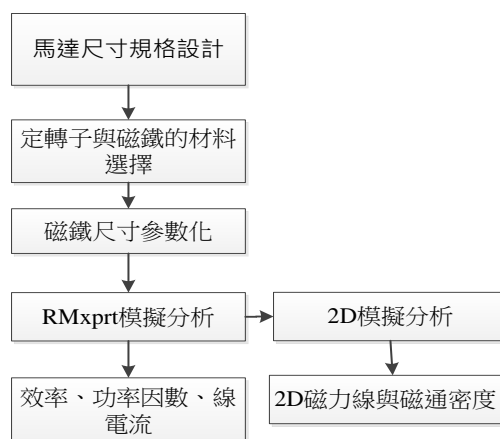


圖 7 設計流程圖

肆、設計與規格

一、馬達設計

如圖 7 所示為 LSPMSM 的設計流程，首先建立所馬達規格，如馬達尺寸、轉速、馬力與結構等。本文內嵌式磁鐵主要為 W 型結構，其次，選擇馬達定轉子與磁鐵材料，並決定槽極數、槽型、繞線匝數、線徑與氣隙等細部的設計。最後將磁鐵尺寸參數化進行模擬分析，觀察結果比較，因為本文只探討 W 型的磁鐵長度，所以在設計的過程中僅變更磁鐵的長度。

二、馬達規格

馬達規格如表 1 所示，在馬達定轉子的尺寸固定下，磁鐵以 W 型擺放，選擇不同的磁鐵長度進行模擬分析，並探討不同磁鐵的長度對於馬達整體性能的影響，本文磁鐵長分別選擇 30、40、50 與 60mm 四種模型進行模擬，探討每種模型的電機性能。

表 1 馬達規格表

定子外徑	190mm
定子內徑	120mm
轉子外徑	119.65mm
轉子內徑	32mm
積厚	80mm
額定電壓	380V
額定轉速	1750rpm
額定功率	3.75kw
磁鐵材料	N35
矽鋼片材料	50CS290
磁鐵長度	30mm~60mm
極數	4 極
匝數	28 匝
頻率	60 赫茲

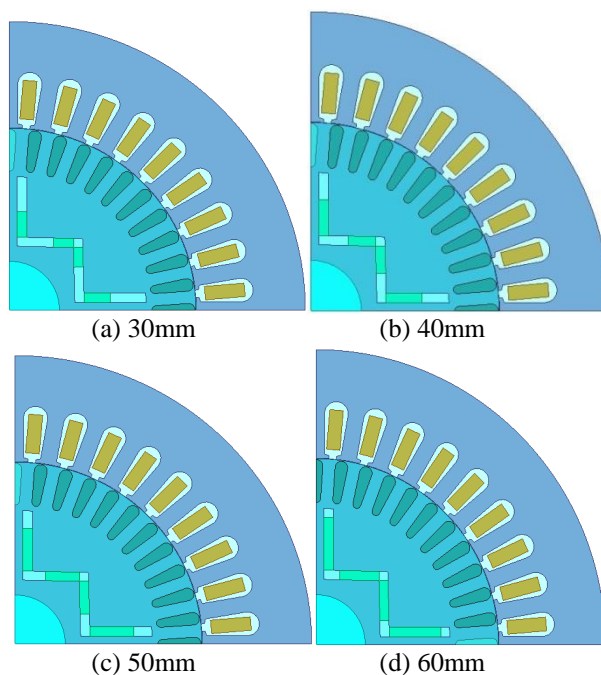


圖 8 磁鐵長度之馬達幾何模型

伍、模擬與分析

本文應用 Ansys Maxwell 對 LSPMSM 進行模擬分析，針對不同的磁鐵長度，比較效率、轉矩、功率因數與電流值，再從數據中挑選出最佳的模型，進行二維磁場分析，觀察磁力線是否形成正確的磁路與磁通密度是否產生過飽和的情況。使用 ANSYS 模擬對於馬達設計可以減少許多的時間與成本，也可針對所設計的馬達進行缺點的改良。本文以 W 型的磁鐵模型進行分析，如圖 8 所示，比較 30、40、50 與 60mm 的磁鐵長度之馬達幾何模型。

一、非同步期間

圖 9~11 所示，為 LSPMSM 在非同步到同步期間所產生的起動轉矩，其中 s 為轉速對同步轉速的正規值。如圖 9 所示，鼠籠轉子的結構沒有做變化，所以產生出來的轉矩都一樣。圖 10 所示，為永久磁鐵所產生的制動轉矩，是與鼠籠轉矩呈反向，會降低 LSPMSM 的起動轉矩，由圖 10 得知，磁鐵長度愈長所產生的制動轉矩愈大。圖 11 顯示，為圖 9、10 相加而成的起動轉矩，在相同的鼠籠轉矩下，因不同的制動轉矩會形成不同的起動轉矩，從圖 10 得知的磁鐵愈長反向制動轉矩愈大，故起動轉矩相對的就下降，所以依據起動轉矩來看，磁鐵愈短會是較佳的選擇。

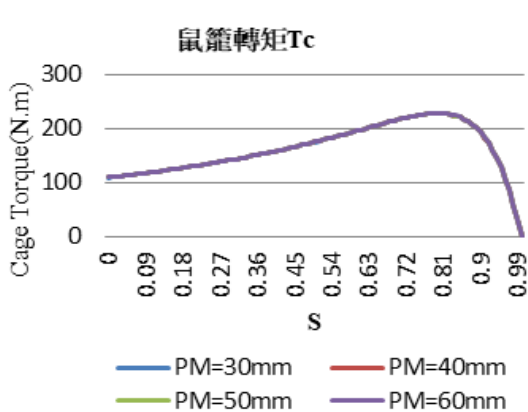


圖 9 鼠籠轉矩比較

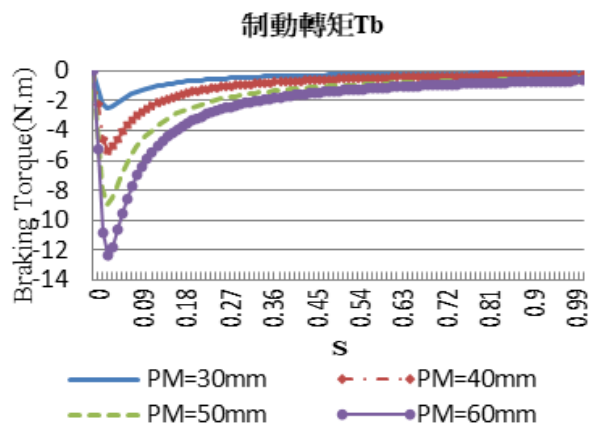


圖 10 制動轉矩比較

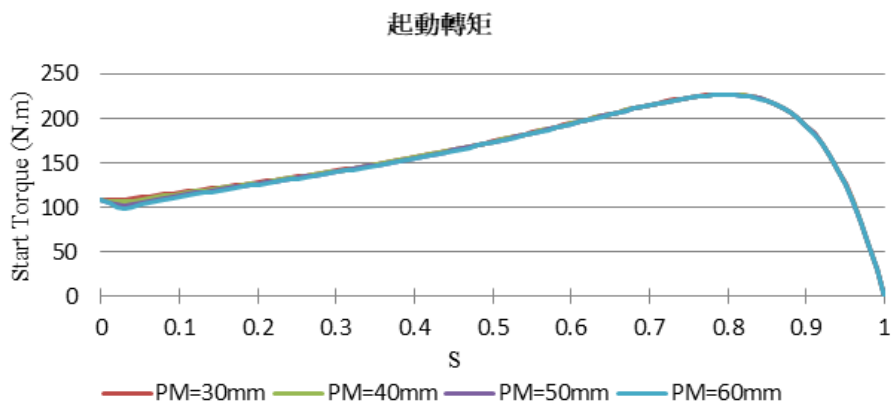


圖 11 起動轉矩

二、同步期間

圖 12 所示，可以得知磁鐵長度愈長，所對應到的功率因數則愈高。圖 13 所示，磁鐵長度愈長，線電流愈小。圖 14 所示，當磁鐵長度愈長，效率反而是些微的下降。圖 15 所示，當磁鐵長度增加，氣隙磁通密度也隨之提高。當磁鐵長度愈長，所示用到的磁鐵材料也會較多，相對的也會提高成本，所以如圖 16 所示，標示出每個模型所使用到的磁鐵重量乘上磁鐵價格。

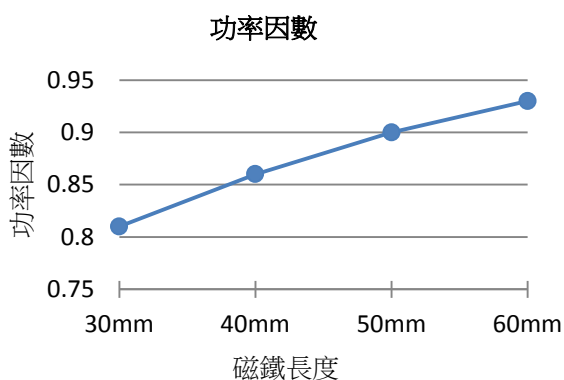


圖 12 功率因數與磁鐵長度

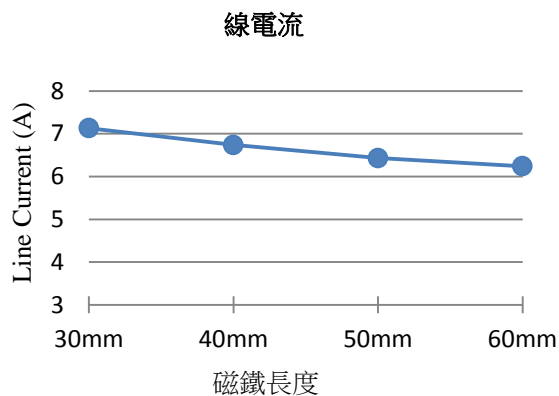


圖 13 線電流與磁鐵長度

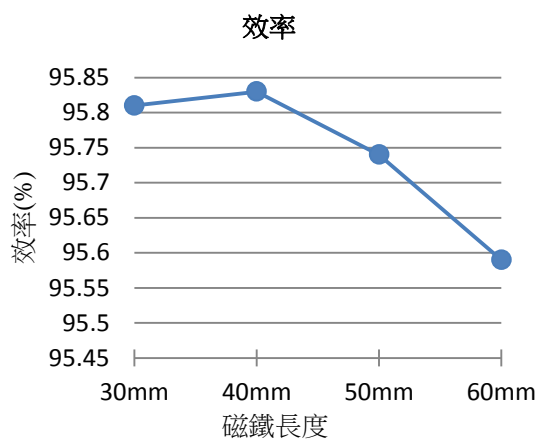


圖 14 效率與磁鐵長度

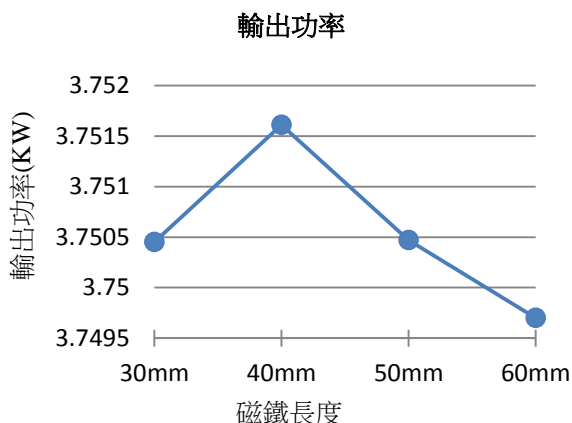


圖 15 輸出功率與磁鐵長度

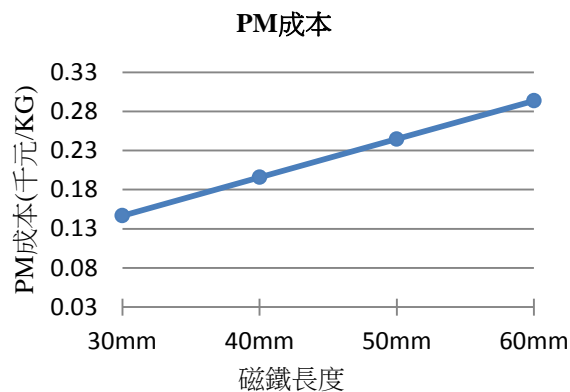


圖 16 PM 成本與磁鐵長度

經由四種電機模型的分析，不同磁鐵長度所模擬的數據，整理如表 2 所示，依據模擬數據分析，將四個模型的特性加入權重進行分析，功率因數、效率以及輸出功率三項特性，數據愈高性能愈好，所以在權重部分取正值。線電流愈大以及永久磁鐵重量愈重，相對的損失會提高，成本也會提高，所以我們將這兩項的權重取負值。將 cost 函數進行判斷，cost 值愈大表示愈好。圖 17 顯示，磁鐵長度為 60mm 在額定轉速 1750rpm 下所感應之三相電壓，圖 18 為所對應之馬達磁通密度與磁力線分佈圖，由於馬達具有對稱性，故磁力線呈現四個磁極，磁通密度也沒有發生飽和的現象。

表 2 參數值

磁鐵長度	30mm	40mm	50mm	60mm
電機特性				
功率因數*0.3	0.81	0.86	0.90	0.93
效率(%)*0.3	95.81	95.83	95.74	95.59
輸出功率(KW)*0.2	3.75045	3.75161	3.75047	3.7497
線電流(A)*-0.1	7.13	6.74	6.43	6.24
PM 成本*-0.1	0.1468	0.1958	0.2447	0.2937
cost	0.5528	0.6022	0.6398	0.6623

註：目標函數:cost function=功率因數*w1+效率*w1+輸出功率*w2+線電流*w3+PM 重量*0.689*w3, W1=0.3;w2=0.2;w3=0.1

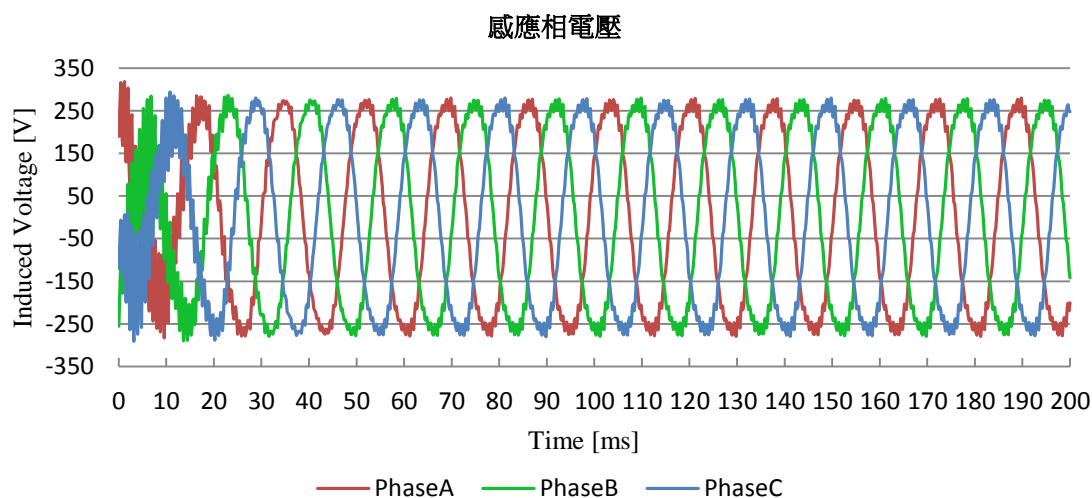


圖 17 感應相電壓

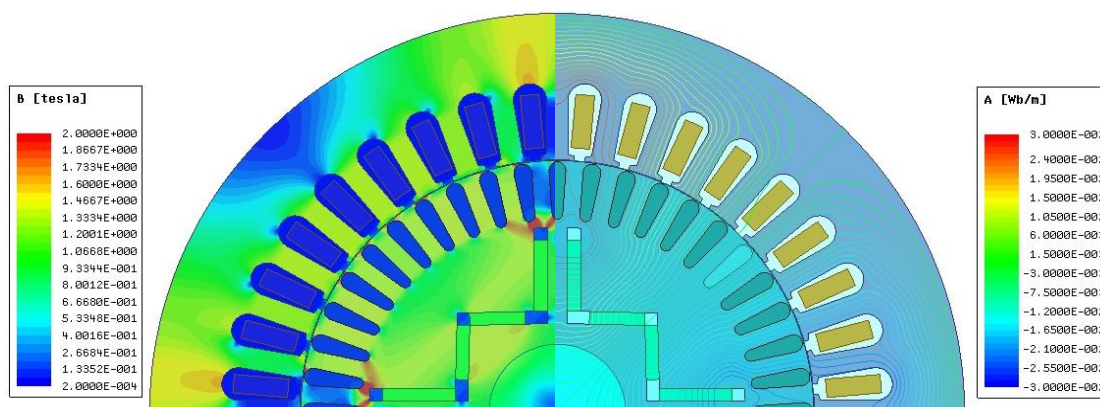


圖 18 W 型磁通密度與磁力線

陸、W 型與一字型比較

圖 19 所示，為 LSPMSM 一字型模型，與上圖 18 W 型相比起來，一字型的磁通密度沒有 W 型來的高，因為磁鐵擺放方式的緣故，一字型的短距離磁路路徑較多可以通過，所以從磁力線圖中可以看出，在定子上的磁力線比 W 型的磁力線來的少，因為一個 W 為一個磁極，再加上磁鐵擺放位置使的轉子路徑減少，所以大多數磁力線會經過定子形成迴路。W 型 60mm 與一字型參數值如表 3 所示，當一字型的設計規格達到近似值的輸出功率時，可以經由模擬結果得知，雖然效率結果近似，但是考慮到永久磁鐵的使用量來看，一字型的成本大約會多出 1.5 倍左右。

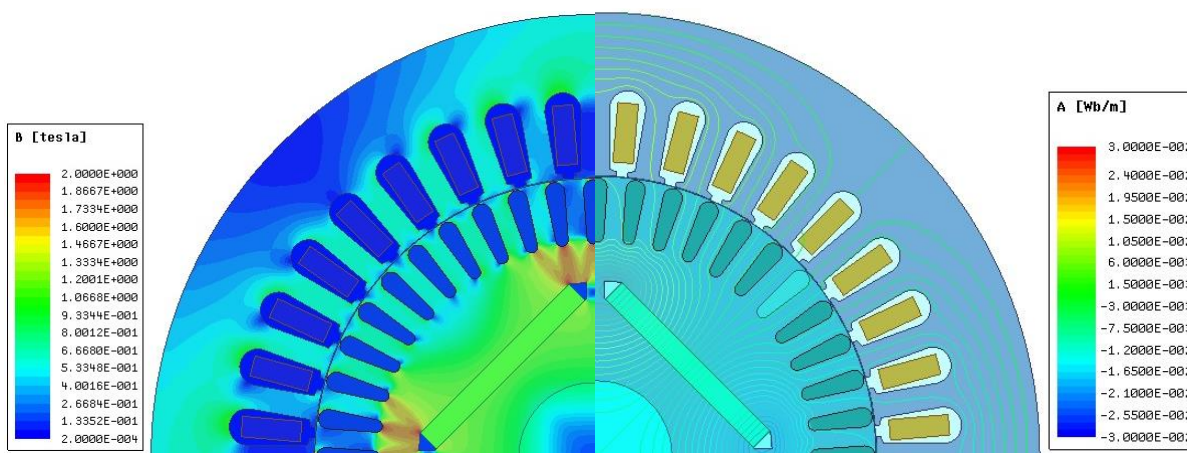


圖 19 一字型磁通密度與磁力線

表 3 W 型與一字型參數值

電機模型	W 型 60mm	一字型
電機特性		
功率因數	0.93	0.6927
效率(%)	95.59	94.97
輸出功率(W)	3749.7	3751.1
線電流(A)	6.24	8.66
PM 成本	0.2937	0.4405

柒、結論

使用再生能源是世界潮流，高效率馬達是現代各國發展的趨勢，本文研究轉子具 W 型永久磁鐵之自起動鼠籠式內嵌永磁馬達，探討在異步與同步週期下的電磁轉矩，遵循設計流程與規格擬定，利用 ANSYS Maxwell 進行電磁場模擬與馬達特性分析。模擬結果驗證在永久磁鐵長度 60mm 的模型中，效率最高可以達到 95%，功率因數 0.93 為四種模型中最佳的磁鐵長度，符合能源效率比，具備高效率 and 同步運轉特性，未來我們將進行馬達的製作，以驗證模擬結果。

參考文獻

- [1] M. A. M. Cheema, and J. E. Fletcher.(2013). *Analysis of the limitations of conventional direct thrust control scheme for linear permanent magnet synchronous motors*, 271-277, ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 IEEE , Melbourne, Australia .
- [2] C. D. Nguyen, and W. Hofman. (2015) *Model-based loss minimization control of interior permanent magnet synchronous motors*, 2104-2111, 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain.
- [3] A. H. Isfahani, and S. Vaez- Zadeh. (2009). Line- start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities, *Energy*, 34(11), 1755–1763.
- [4] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, J. A. C. Fong. (2011). Standards for efficiency of electric motors, *IEEE Industry Applications Magazine*, 17(1), 12-19.
- [5] H. Behbahanifard, and A. Sadoughi (2015). Line start permanent magnet synchronous moter performance and design; a review, *Journal of World's Electrical Engineering and Technology*, 4(2), 58-66.
- [6] A. M. Knight, and C. I. McClay. (2000). The design of high-efficiency line start motors, *IEEE Transaction on Industry Application*, 36(6), 1555-1562 .
- [7] F. Libert, J. Soulard, and J. Engstrom. (2002). *Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor*, 25-28, ICEM 2002, Brugge, Belgium.
- [8] T. J. E. Miller. (1984). Synchronization of line-start permanent magnet ac motors, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* ,PAS-103(7), 1822–1828.
- [9] M. A. Rahman, A. M. Osheiba, and T. S. Radwan. (1997). Synchronization process of line-start permanent magnet synchronous motors , *Electric Machines & Power Systems*, 25(6), 577–592.
- [10] W. Lu, M. Liu, Y. Luo, and Y. Liu. (2011). *Influencing factors on the demagnetization of line-start permanent magnet synchronous motor during its starting process*, 1-4, International Conference on Electrical Machines and System (ICEMS 2011), Beijing, China .
- [11] S. W. Baek , B. T. Kim, and B. I. Kwon (2011). Practical optimum design based on magnetic balance and copper loss minimization for a single-phase line start PM motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 3008-3011.
- [12] A. H. Isfahani and S. Vaez-Zadeh. (2011). Effects of magnetizing inductance on start-up and synchronization of line start permanent- magnet synchronous motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(4), 823–829.
- [13] B. H. Lee, J. P. Hong, and J. H. Lee. (2012). Optimum design criteria for maximum torque and efficiency of a line start permanent-magnet motor using response surface methodology and finite element method,

IEEE Transactions on Magnetics, 48(2), 863–866.

- [14] A. Takahashi, S. Kikuchi, K. Miyata, A. Binder. (2015). Asynchronous Torque of Line Starting Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 30(2), 498-506.
- [15] J. F. Gieras and M. Wing. (2002). *Permanent magnet motor technology*(2nd Ed.), New York, Marcel Dekker Inc.
- [16] P. W. Huang and M. C. Tsai. (2013). Investigation of V-shaped line start permanent magnet motors base on reactance effect, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5), 2311-2314.