

Design of a Magnetizing Circuit with Voltage Multiplier for Magnetic Materials

Fu-Sheng Pai^{1,}, An-De Su¹, Yu-Liang Chen¹, Min-Fu Hsieh²*

Department of Electrical Engineering, National University of Tainan, Taiwan¹

Department of Electrical Engineering, National Cheng-Kung University, Taiwan²

Email: fspai@mail.nutn.edu.tw

Abstract

To meet the application requirements, parts of the permanent magnets are not magnetized directly after production. They have to be magnetized afterwards by application of a high external field which can come from a magnetizer. Therefore, in this paper, a method based on the switching power circuit is proposed. In the method, the inverter is first included to generate a basic square voltage. A double-voltage circuit is then utilized to further boost this square voltage. This process is followed by using the modularization design of switching capacitors so that the proposed circuit can provide large magnetizing current to loads with the interleaving mode. To validate the effectiveness of the method, a prototype is set up in the laboratory. The hardware tests with the non-magnetic ferrite magnet and post-assembly Interior Permanent Magnet motors are made. Test results indicate that the proposed circuit can generate the required magnetizing current indeed.

Keywords: Magnetic material, capacitor discharge magnetization, double-voltage circuit.

* Corresponding author: fspai@mail.nutn.edu.tw
DOI : 10.3966/222344892021041101002

應用電容倍壓方法之磁性材料磁化電路設計

白富升^{1,*} 蘇晏德¹ 陳昱良¹ 謝旻甫²

國立臺南大學 電機工程學系¹

國立成功大學 電機工程學系²

摘要

基於生產要求，部分磁性材料生產時常未具磁性，而是使用外部電路產生大電流，並感應出磁場，再對該材料成品進行磁化工作。因此本文即在研製充磁電路。本文是使用換流器電路輔以倍壓電路強化，以提高充磁電路之輸出電壓，再透過多模組之小電容切換方式，使得所提電路可以交錯放電，進而提高所提充磁電路之充磁電流。本文所提出方法已於實驗室建立一雛形電路，並利用該電路分別對待充磁之鐵氧磁石與後充磁型永磁馬達進行試驗，由實驗結果顯示本文所提方法確可順利對負載進行充磁。

關鍵詞：磁性材料，電容放電充磁，倍壓電路。

1. 前言

一般所稱的磁性材料可分為軟磁、硬磁。所謂的軟、硬磁是依材料磁化後所殘留的保磁力硬度區分。一般而言硬磁是指不易磁化亦不易退磁，軟磁則反之。在工業界常見的硬磁種類包括合金磁鐵、陶瓷磁鐵，稀土類磁鐵。軟磁則為矽鋼片、軟質鐵氧磁體（例如錳鋅鐵氧磁體、鎳鋅鐵氧磁體），另外稀土類磁鐵以釹鐵硼為目前性能最高之永磁材料。稀土磁鐵矯頑磁力強且不易被退磁，雖然其溫度穩定性較差，但隨著材料技術的進步，目前溫度已可達 240°C 以上[1-3]。

在磁性材料應用方面，其常使用在馬達之轉子上，以提供馬達旋轉所需之轉子磁場。然而馬達轉子之磁化問題一直是其生產過程中重要之一環，由文獻得知依據馬達磁鐵充磁方式可分為前充磁法與後充磁法[4,5]。所謂前充磁法是指先將馬達轉子內部磁鐵先進行磁化後再進行馬達組裝；前充磁法在小型馬達應用組裝上，由於內部磁鐵磁性較小，在馬達組裝上較不會有組裝上之問題，若是應用於大型電動機馬達上，由於馬達體積增大，所需磁鐵磁性亦將隨著功率增加而增加，如此一來，馬達轉子在組裝上將變得非常困難。另外後充磁法分為充磁軛法以及裝配充磁法，所謂充磁軛法為利用充磁軛，將已裝有磁性材料之轉子插入其中後進行充磁，充磁軛則是由電感線圈繞製而成，再將充磁完成之轉子置入馬達組裝，此做法簡單且容易生產，但仍需組裝至定子內部，無法完全有效改善大型馬達在組裝上之問題；另一種方式為裝配充磁法，不同於前者，此方法將馬達轉子與定子組裝完成後，利用定子線圈作為充磁軛對轉子上的磁性材料進行充磁，此方法能夠適用的馬達功率範圍又較充磁軛法高出許多，但裝配充磁法又比充磁軛法困難，需考量因素增多，例如轉子位置、繞線規格、佔槽率、充磁電壓與電流等馬達設計問題，都成為設計上的關鍵。

在傳統充磁電路中，透過低頻變壓器升壓，經由整流器對電容充電，再將儲存能量放電至負載，此架構簡單控制容易操作，但由於透過低頻變壓器升壓，使用大薄膜電容多個串、並聯儲能後再放電，其易有重量及體積以及成本龐大之問題[6,7]。因此如圖 1 所示，本文使用電力轉換器技術，重新設計並使充磁電路操作於高頻切換狀態，最後再透過倍壓電路達到升壓效果，同時採用多模組構成一個系統操作來提高輸出電流，利用釋能特性透過高頻切換方式，使負載電流以能量累積形式增加，故不同於傳統式充磁電路，本文所提電路不論是在體積、重量

與成本上較低。

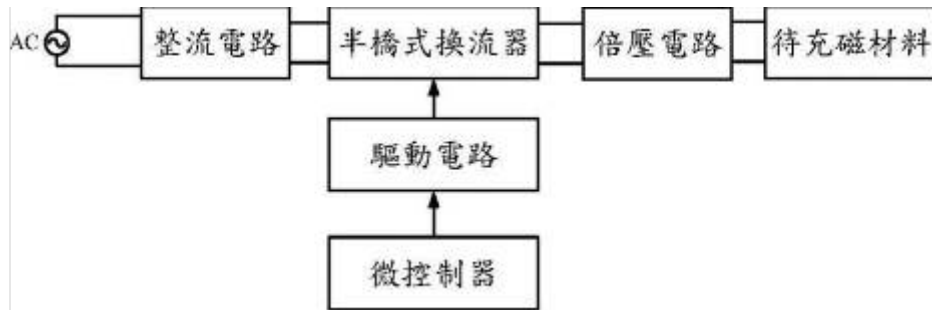


圖 1 充磁設備系統示意圖

2. 充磁電路之特性分析

2.1 切換式電力轉換器

圖 2 為基本型半橋式換流器電路架構圖，其中由一組串接直流電容 C_1 與 C_2 ，以及兩個功率電晶體開關 S_1 及 S_2 ，因兩直流電容串接於直流電源 (V_{dcbus}) 上，同時其大小一樣，故在 C_1 與 C_2 兩電容均可分得一半的直流電壓。再者經由 S_1 與 S_2 兩功率電晶體開關交互切換後，即輸出高頻方波電壓 V_{hf} ，如圖 2 所示。半橋式換流器在元件選擇上功率電晶體僅需承受一倍直流電壓，但是耐流需要承受兩倍之輸入電流；然而僅需兩顆功率電晶體與兩組隔離驅動電路，設計上也較為簡單，元件成本也相較於全橋式換流器較低，故本文使用基本型半橋式換流器架構進行電路設計。

在本文中使用的四倍壓電路如圖 3 所示，因此須使用四個二極體以及四個直流電容組成，其中在二極體耐壓選擇上需選用可承受兩倍逆向峰值電壓 (Peak Inverse Voltage, PIV) 之元件，在電容器的選擇上如以本文所使用之四倍壓電路為例，在電容器 C_3 、 C_4 需選用耐壓可承受輸入電壓 V_m 之電容元件，而在最後主要儲能與釋能電容器 C_5 、 C_6 則需選用可承受 2 倍輸入電壓 V_m 之電容元件。

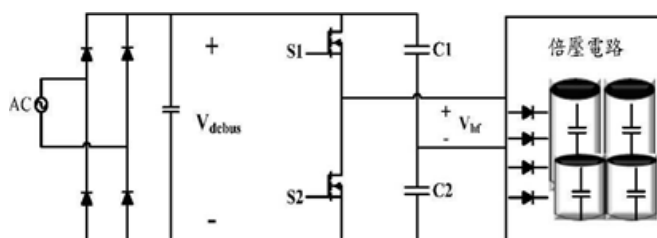


圖 2 半橋式換流器電路架構

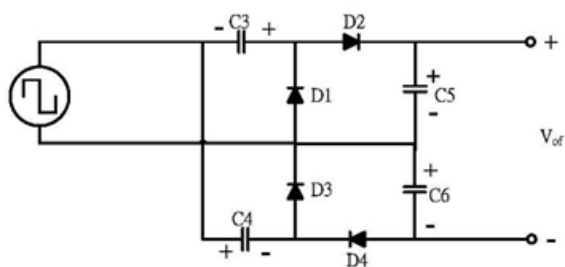


圖 3 四倍壓電路示意圖

2.2 充磁馬達特性

本文係使用一內藏式永磁式馬達(Interior Permanent Magnet motor, IPM)進行後充磁測試，其馬達之設計繞線完全依照 4 極 18 槽馬達之規格，其中圖 4 為馬達定子 Phase A 之繞線剖析圖，每一槽之繞線方式，其繞線匝數為 30 匝組成，利用 LCR Meter 量測其定子規格單相電阻值為 2Ω ，低頻電感值為 2.9m H ，矽鋼片積厚 l_{stack} 為 30mm ，矽鋼片相對導磁係數 μ_r 為 4000，後充磁為利用馬達定子作為充磁軛對轉子內部磁鐵進行充磁。

本文充磁模組系統以倍壓電路作為主要儲能與放電充磁核心，因此在不同外部接線方式，馬達電阻與電感值不同，故其會對充磁電流大小產生影響，對於產生的磁場方向也會有所不同。本文利用茂迪股份有限公司所出產型號為 MT 4090 的 LCR Meter 作為量測儀器，由量測結果得知，馬達在使用三相並聯接線方式時所得到電阻值與電感值為最小，因此在進行充磁時能產生的電流與磁場將較為容易達到充磁效果，故本文使用三相並聯外部接線方式作為馬達負載充磁接線方式[1]。

本文所提之充磁電路後級可等效為一 RLC 之串聯電路，如圖 6 所示；其中 C5、C6 為倍壓電路主要放電之電容，S3 為脈衝開關，本文使用此開關做多次開、關切換使電容 C5、C6 做充、放電動作，可分為電容放電時態以及電容充電時態，在充電、放電之動作瞬間使電流以累積方式逐漸增加。圖 7 為本文充磁電路後級之 RL 等效電路圖，當充磁完後，電感性負載中冷次定律特性，會使電感極性反

向釋能產生反電動勢，因此需並聯一飛輪二極體 D 形成迴路；此時電感在放電期間 S3 開關為關閉狀態，所以又等於前端電容 C5, C6 在這個時間點為其充電時間。

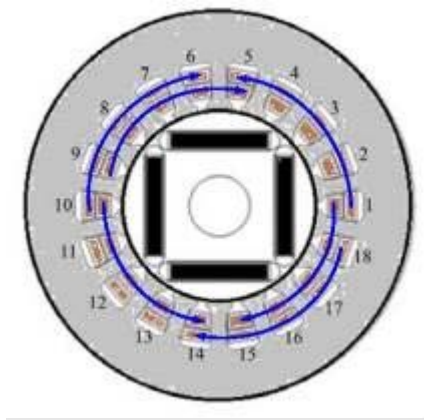


圖 4 4極 18槽 Phase A繞線剖析圖

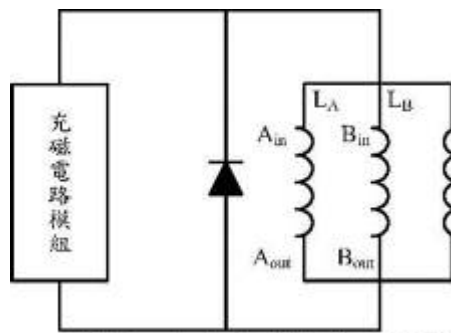


圖 5 充磁外部接線示意圖

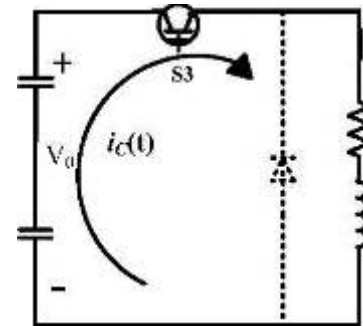


圖 6 充磁電路後級等效放電迴路圖

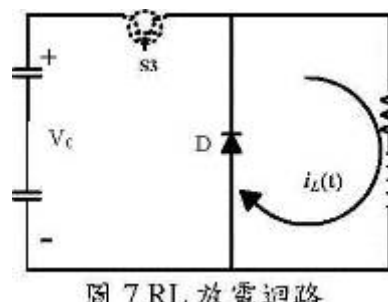


圖 7 RL 放電迴路

3. 系統硬體電路設計及規劃

3.1 電路架構分析

如圖 8所示，本文使用兩模組並聯分別對負載做交錯式放電，首先交流市電經過全波整流為直流電壓，經過功率電晶體切換為高頻方波，再送進倍壓電路充電儲能，當模組 A與 B充電至設定之電壓值，透過後級脈衝開關 S3-A與 S3-B以交錯方式進行開、關切換動作放電，為了避免兩模組相互感應形成迴路本文分別加入一二極體(D6-A、D6-B)於兩模組。如圖 9所示，其中可分為以下兩個工作模式：

工作模式一：

當模組 A之脈衝開關 S3-A導通，模組 B之脈衝開關 S3-B為關閉狀態，此時負載開始充磁，當第一階段充磁完畢則將 S3-A關閉，模組 A之電容(C5-A、C6-A)開始充電；此時 S3-B尚未導通，由於負載為電感性元件具有冷次定律反電動勢特性，於負載並接一飛輪二極體 (D5-A、D5-B)形成迴路，因此負載電流會呈下降趨勢。

工作模式二：

模組 B之脈衝開關 S3-B導通，由模組 B之電容(C5-B、C6-B)放電充磁，此時模組 A之脈衝開關 S3-A為關閉狀態，進行第二階段電流累積並充磁。本文以此方式使得模組 A與模組 B兩模組以交錯互補式的方式做多次循環，故電流得以累積方式逐漸上升至最大值。

3.2 電路架構

經由模組化設計考量後，本文使用兩模組架構組成充磁系統。控制部分使用微控制器作為主要控制核心，使其產生高頻切換訊號，再將此控制訊號輸入至驅動電路，進而驅動功率電晶體開關。如圖 10所示，本文使用全波整流電路，進而將輸入市電供給充磁模組系統工作，市電電壓轉換為直流電源後，再經由功率電晶體開關切換，將直流電壓進一步轉換成高頻方波，再對倍壓電路進行充電以及提升電壓動作，最後透過電晶體開關觸發，使電容進行放電之動作。

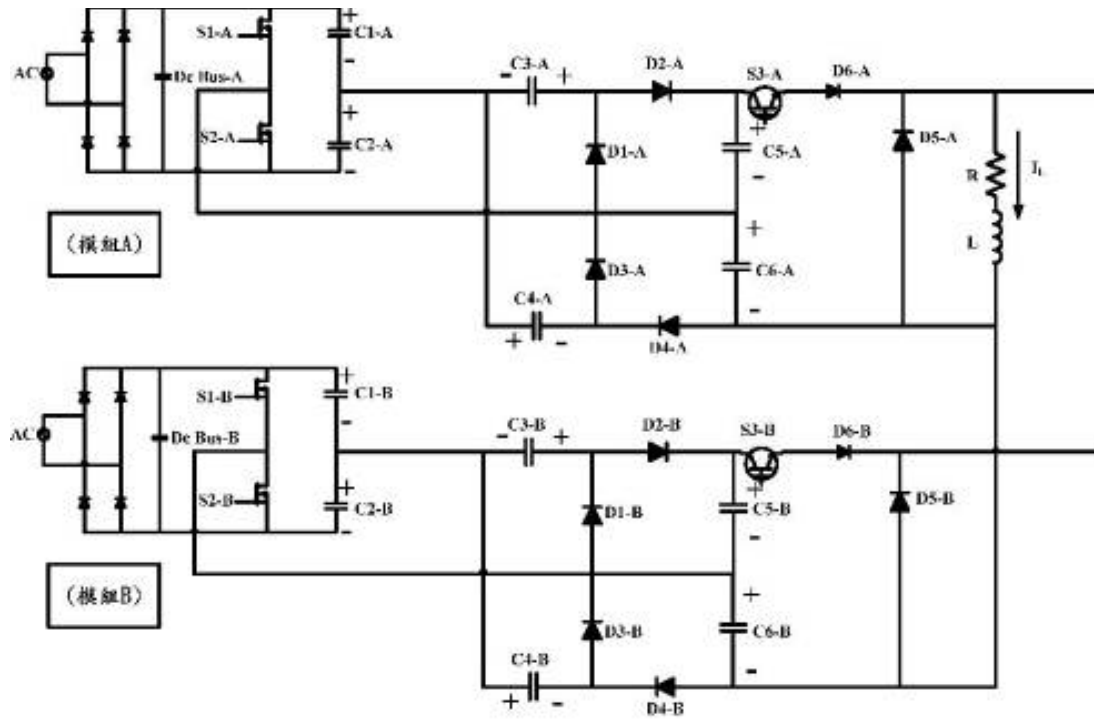


圖 8 充磁模組系統硬體架構圖

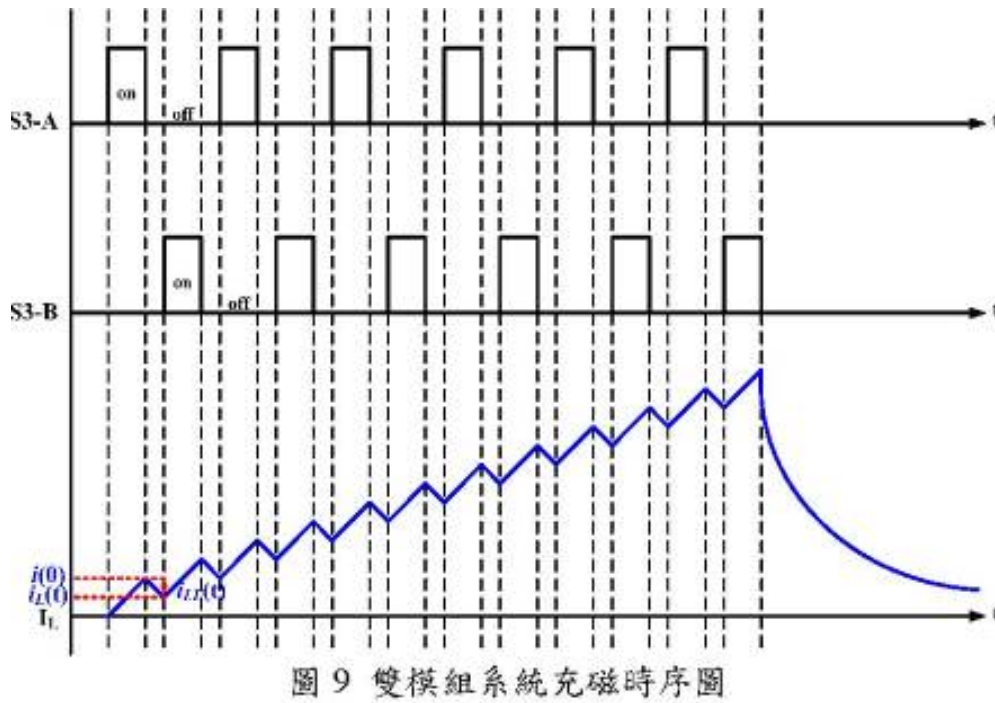


圖 9 雙模組系統充磁時序圖

在本文中所使用之功率電晶體開關(S1-A、S2-A、S1-B、S2-B)，由於考慮高耐壓、耐流之需求，因此選用生產型號為 IXFB100N50P，此功率電晶體支援高速切換，且具有快速回復特性，可達本文系統操作之需求。脈衝開關(S3-A、S3-B)選用為 TOSHIBA公司所生產的 MG300Q2YS40元件，此元件具有超高耐壓與耐流也支援快速切換特性，又額定最大耐壓為 1200V與額定最大耐流為 600A，

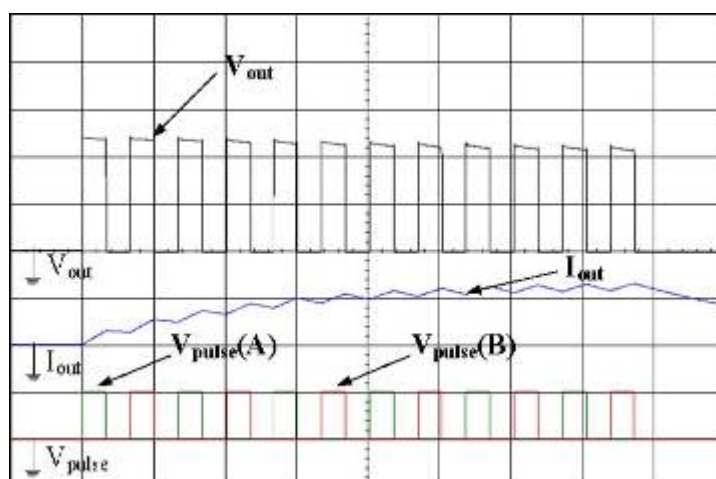
可達本文之操作需求。

4. 實測與模擬結果

本文採用美國 Intusoft 公司所開發之電路模擬軟體 IsSpice 輔助進行系統模擬，最後建立一離型充磁電路系統進行實測與模擬結果做比較，以佐證本文所提之系統發法確實具有可行性與實用價值。本實驗係操作在交流市電之下，經由全波整流後可得直流電壓，該直流電壓由倍壓電路升壓，再經脈衝開關切換對充磁材料放電，本文分別針對單模組兩種模式與雙模組系統電路之放電結果做比較，在高壓部分本文則以電腦模擬來呈現電路充磁結果。

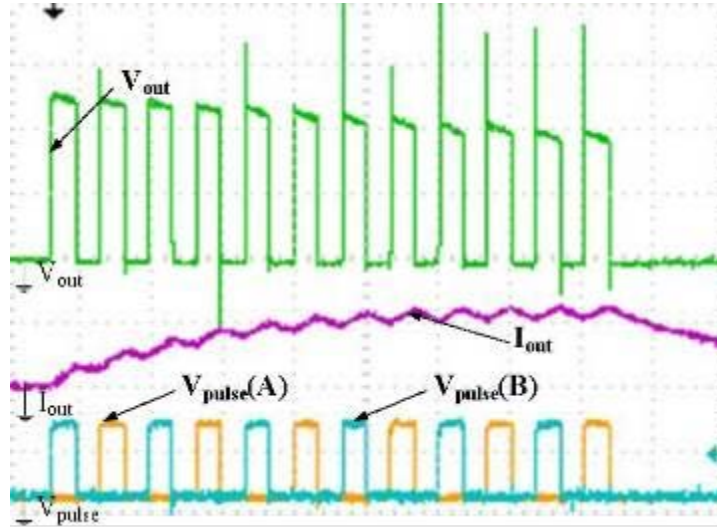
4.1 雙模組系統充磁 PM 馬達模擬與實測

圖 10 所示為直流電壓由 50 伏特之輸出充磁電壓與充磁電流之模擬與實際量測波形圖，其中雙模組系統之脈衝訊號為 $V_{pulse}(A)$ 、 $V_{pulse}(B)$ ，以相同切換頻率做互補式交錯切換放電，可以看到當 $V_{pulse}(A)$ 關閉時， $V_{pulse}(B)$ 則開啟；由於一組電容充電時另一組則電容放電，使得充磁電流 I_{out} 下降幅度較單模組小。圖 11 所示為直流電壓由 50 伏特逐步升壓到 300 伏特時之模擬與實際測試數據比較圖，由模擬與實際量測之充磁電流分析可看出，誤差值均在 10% 以內以呈現模擬之準確度。



V_{out} : 40V/div ; I_{out} : 50A/div ; V_{pulse} : 20V/div ; M : 500 μ s/div

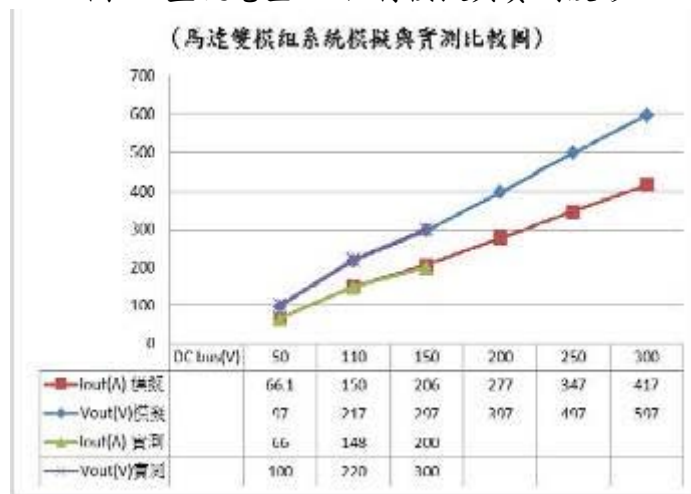
(a) 模擬波形圖



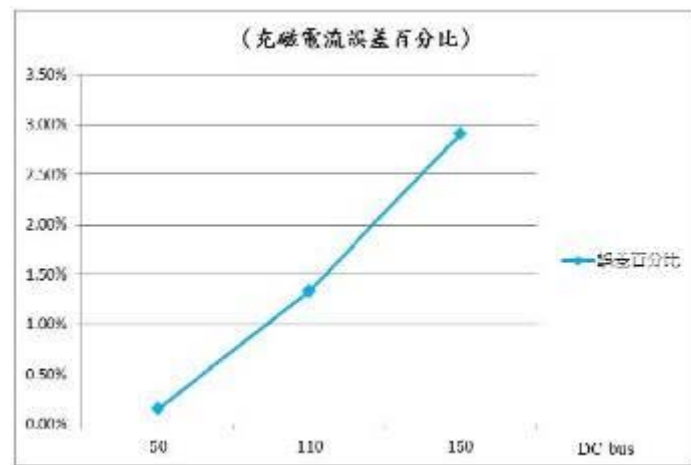
Vout : 40V/div ; Iout : 50A/div ; Vpulse : 20V/div ; M : 500μs/div

(b)實測波形圖

圖 10 直流電壓 50 伏特模擬與實測波形



(a) 雙模組系統模擬與實測比較圖



(b) 模擬與實測充磁電流誤差百分比

圖 11 直流電壓逐步升壓之模擬與實際測試數據比較圖

4.2 充磁馬達充磁結果分析

本文先將 IPM馬達轉子置入鐵氧磁鐵(Ferrite)，如圖 12所示；再與已繞線完成之 IPM馬達定子進行組裝，接著進行充磁，亦即裝配充磁法。測試本文所提之充磁電路系統之可行性，使用前章節之實驗結果，直流電壓 150伏特，並使用三相並聯接線方式對此馬達進行充磁。充磁完畢之馬達轉動時，內部磁場的變化透過線圈感應會產生反電動勢，藉由量測馬達反電動勢電壓大小可了解充磁狀態，如圖 13為馬達充磁後，三相 U、V、W實測與模擬之反電動勢波形比較，可以看出結果接近，圖 14根據 Ansys Maxwell軟體[5]進行模擬可看出馬達單相電流充磁之磁場強度為 7KA/m；由以上結果得知充磁後內部磁鐵已被磁化。

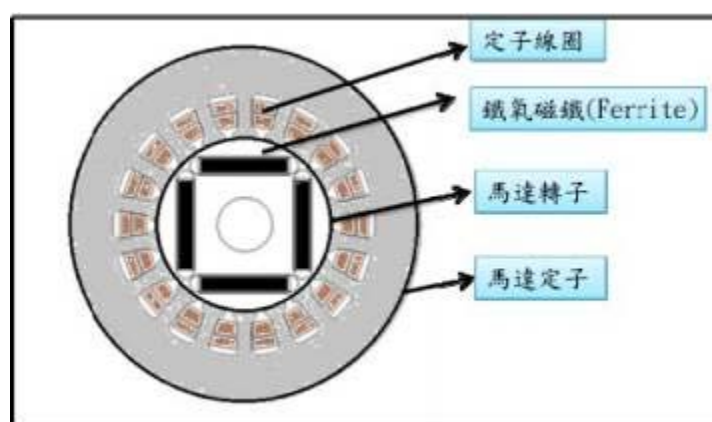
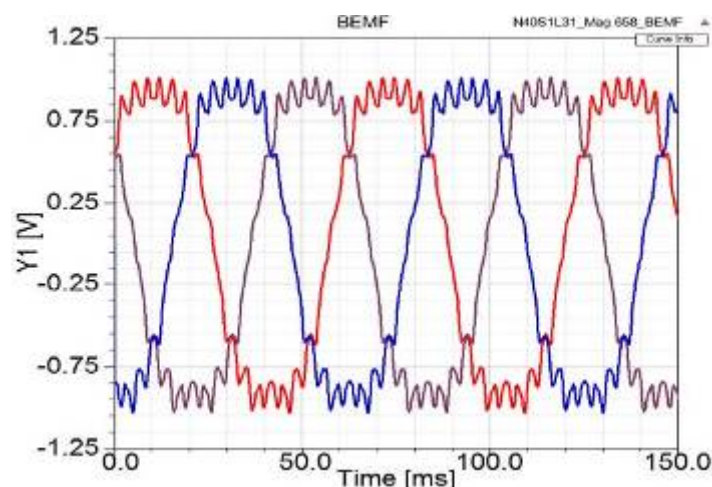
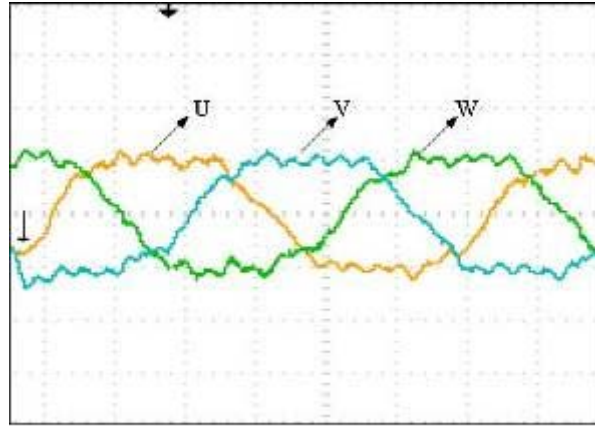


圖 12 後充磁 IPM馬達內部剖析圖



(a) 反電動勢模擬波形



U : 1V/div ; V : 1V/div ; W : 1V/div ; M : 10ms/div

(b) 反電動勢實測波形

圖 13 後充磁 IPM馬達反電動勢波形圖

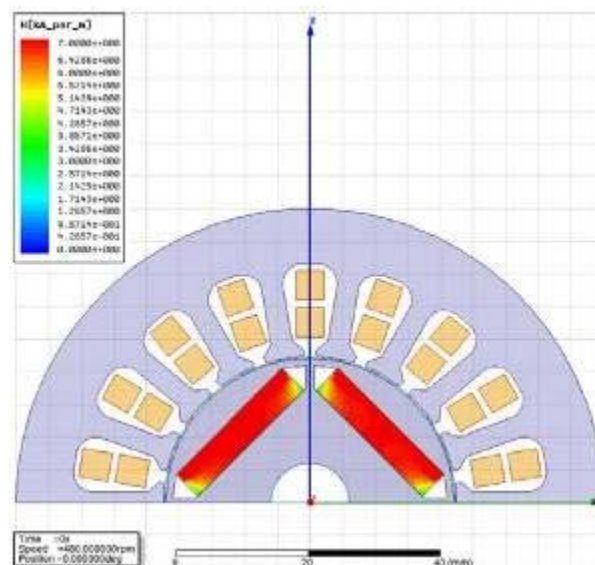


圖 14 磁場強度模擬圖

5. 結論

本文研究提出一個應用於充磁場合之充磁電路，此電路目的在於產生大電流，並感應得一強力磁場，以對磁性材料進行磁化。而此充磁電路是以基本型半橋式換流器做為基本電路切換架構，再加入倍壓電路作為儲能放電之核心，最後利用充磁負載之電感特性使電流以累積方式逐漸增高，到達充磁效果。本文研製之充磁電路，最後對馬達進行充磁，由最後結果得知已順利達至對於磁性材料之充磁效果。

誌謝

本論文承蒙科技部計畫 MOST 109-2622-8-006-005 經費補助，對研究資源挹注助益頗多，特此致謝。

參考文獻

- [1] W. Jewell, D. Howe, and T. S. Birch, "Simulation of Capacitor Discharge Magnetization", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, 1990, pp. 1638-1640.
- [2] P. S. Kim and Y. Kim, "Field and Thermal Modeling of Magnetizing Fixture by Impulse," 28th IEEE IECON, 2002, pp.1342-1347.
- [3] M. F. Hsieh, D. G. Dorrell, C. K. Lin, P. T. Cheng, and Y. P. Wang, "Modeling and Effects of In Situ Magnetization of Isotropic Ferrite Magnet Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, 2014, pp. 367-374.
- [4] D. G. Dorrell, M. F. Hsieh, and Y. C. Hsu, "Post Assembly Magnetization Patterns in Rare Earth Permanent Magnet Motors", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, 2007, pp. 2489-2491.
- [5] Y. Zhilichev, P. Campbell, and D Miller, "In Situ Magnetization of Isotropic Permanent Magnets", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, 2002, pp. 2988-2990.
- [6] J. M. Wang, S. T. Wu and H. J. Chiu, "A Novel Energy-retaining Inverter for AC Arc Welding Machines", International Journal of Circuit Theory and Applications, 2012, vol. 40, pp. 107-126.
- [7] Y. Xu, R. Yang, Y. M. Xiang, H. F. Ding, T. H. Ding, and L. Li, "Design of a Novel Pulsed Power System for Repetitive Pulsed High Magnetic Fields," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, vol. 27, pp. 1929-1932.

