

Design and Realization of a Magnetizer for Ferrite Magnet

Fu-Sheng Pai, Zong-Han Yang, Jai-Lin Tsai

Department of Electrical Engineering, National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

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 inverter circuit is proposed. In the method, the inverter is first included to generate a basic square voltage. A voltage intensifier is then utilized to further boost this square voltage. This process is followed by using the designed switching capacitors and natural inductive characteristics of magnetizing coil so that the proposed method can provide large magnetizing current to loads. To validate the effectiveness of the method, a prototype is set up in the laboratory. The hardware tests with the non-magnetic ferrite magnet is made. Test results indicate that the proposed method can generate the required magnetizing current indeed.

Keywords: Magnetic material, ferrite, magnetizer.

非稀土永久磁石材料之充磁器設計

白富升 楊宗翰 蔡佳霖

國立臺南大學電機工程學系

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，經磁路感應出磁場，再對該材料成品進行磁化工作。因此本文是在研製新式充磁器，所提方法是使用換流器輔以倍壓電路強化，以提高充磁器之輸出電壓，再透過切換式小電容設計與充磁線圈之自然的電感特性，使得所提充磁器可以高頻放電，並以電流累積方式提高其充磁能量。本文所提出方法已於實驗室建立一雛形裝置，並利用該裝置對待充磁之鐵氧磁石進行試驗，由實驗結果顯示本文所提方法確可順利對待充磁之磁石進行充磁。

關鍵詞：磁性材料、鐵氧、充磁電路。

1. 緒論

物質磁性為發現至今歷史最久的自然現象之一。為了產生磁性物質，最早是利用天然磁石使其他物質磁化(magnetization)，到了近代則設計了充磁器，可藉由人工外加磁場之方式磁化物質[1-3]。如圖 1 所示，對於未磁化的磁性物質而言，各個磁矩指向是雜亂任意排列，且因本身作用力互相牽制使得物質本身不呈現磁性，此時如將其放在漸增的磁場中，則物質開始磁化，最後到達飽和，此過程一般稱之為應生磁化(technical magnetization)。又因內部總磁矩不為零而產生磁力，故在移去外部磁場後物質仍能保有外加磁場方向之磁力。至於不同的磁性物質所需的充磁強度亦不同，通常要完全磁化，其磁場強度與物質本身之磁化曲線特性相關，約為本質矯頑磁力 (Intrinsic Coercive Force) H_c 之三到五倍，故充磁器必須能提供足夠大的脈衝電流給充磁線圈，經電磁轉換原理在特定之磁路上得到足夠的磁場強度方可達成充磁目的。另在充磁方向部分，如圖 2 所示，在不同應用場合有不同軸向之磁化需求，然而使用線圈的充磁方法只能在單一方向產生磁極，故充磁時可配合夾具將線圈繞在高導磁係數材料上，再透過磁路設計得到多磁極(multi-pole)之磁化特性。

今由文獻檢索得知，目前充磁器主要使用之磁化方法有永久磁鐵磁化法、直流源磁化法(DC magnetizer)、半週波磁化法(Half cycle magnetizer)與電容放電充磁法(Capacitor discharge magnetizer)等4種[4-9]，其中使用永久磁鐵僅能對矯頑力較低之材料磁化；而利用直流源磁化則會面臨能產生足夠電流之直流電壓，其充磁效率頗低且有設計不易之問題；半週波磁化法是使用工業電源直接經過開關釋放能量，故其結構相當簡單，但有大量電磁雜訊易干擾同一用電迴路設備；電容放電充磁法則將交流電源透過變壓器升壓到數百甚至數千伏特，以使得足夠之能量可存進高壓電容中，此時再藉由觸發開流體開關將電容放電即可磁化物質。

在上述方法中，電容放電充磁法是業界最普遍使用的充磁方法，目前已有文獻分析報導此類充磁法之特性[10]。如圖3所示，茲以 R 、 L 表示充磁線圈之電阻與電感特性， C 為充磁器內之高壓電容，則該充磁迴路方程式可表示為：

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0 \quad (1)$$

故如依充磁迴路等效之 R 、 L 、 C 值分析，其充磁過程有過衰減、臨界衰減、振盪衰減三種電路特性，其中又以臨界衰減放電因有最大之放電電流，故最適合用於充磁場合。臨界衰減是控制使得：

$$R = 2\sqrt{L/C} \quad (2)$$

此時之充磁電流 $i(t)$ 為

$$i(t) = \frac{V_0}{L} t e^{-(2L/R)t} \quad (3)$$

根據上式，充磁電流之最大值為

$$i_{\max} = \frac{2V_0}{R} e^{-1} \quad (4)$$

利用上述，圖3(b)為使用電腦模擬出之臨界衰減放電電壓、電流波形圖。然而在實際之充磁迴路中，受到線圈的集膚效應、鄰近效應等各種電磁現象之影響，理想的臨界衰減放電充磁狀況並不易產生，同時此類充磁器其使用之電容電壓越高、電容量越大，充磁電流越大，而目前常用的高壓大容量電容，在實務上卻有頗大之串聯等效內電阻性，故當充磁器連續輸出大電流時，電容容易高溫損壞；最後電容放電充磁法需使用低頻變壓

器升壓，其也衍生體積大、重量高之缺點，因此此類充磁裝置目前在實務應用上仍亟待改良與精進。

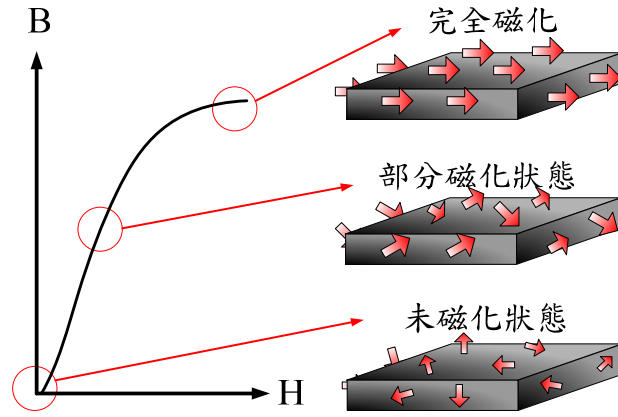


圖 1 磁性物質之應生磁化示意圖

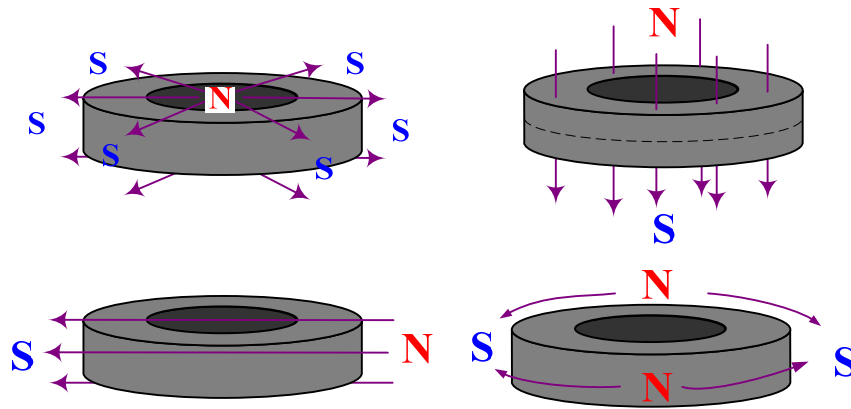


圖 2(a) 不同軸向充磁示意圖

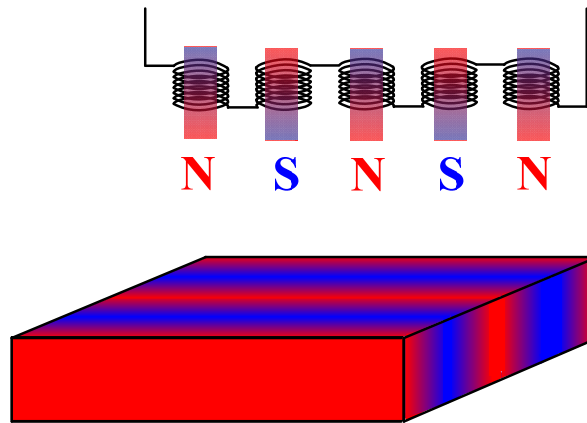
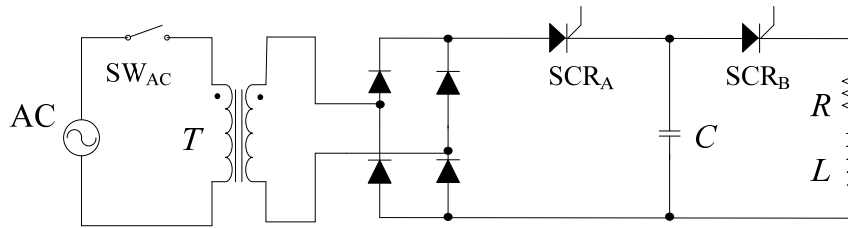
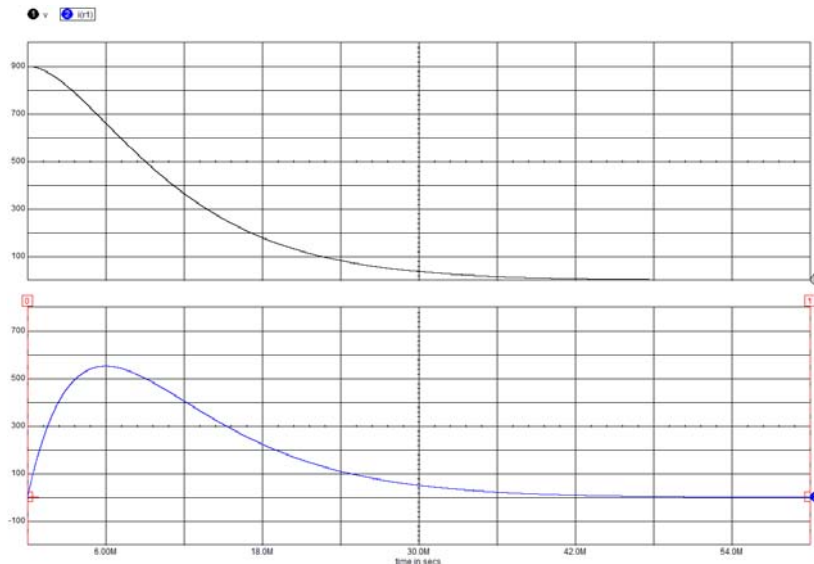


圖 2(b) 多磁極磁鐵示意圖



(a) 電路組態圖



(上：100V/div 下：100A/div t：6ms/div)

(b) 臨界衰減放電電壓電流波形

(電阻 $R=1.2\Omega$ ，電感 $L=3.6\text{mH}$ ，電容 $C=10000\mu\text{F}$ ，電容電壓 $V_0=900\text{V}$)

圖 3 傳統之電容式充磁器及其充磁特性圖

有鑑於此，本文即在研究一新式充磁器，所提方法係以鐵氧等非稀土磁性材料為充磁目標，使所提充磁器輸出之電流能產生足夠之磁場對該材料充磁。本文所設計之方法是以電力轉換器之高頻轉換為核心，透過功率晶體對相對小電容進行開關操作與狀態切換，使得充磁器之輸出電壓提升，進而帶動充磁電流之上升，最後再利用充磁線圈本身之電感及電阻特性，得到電流相對較為緩和之電流衰減，如此反覆操作，即可使充磁電流以高頻、疊加之方式增加。本文所提充磁器預期可捨棄高壓電容及升壓變壓器，並以數位化控制設計，精準控制磁化電流準位，故可達成高品質與高穩定性充磁電源設計之目標。

本文架構共分三節，本節為緒論，說明研究動機與研究方向；第二節將介紹本論文的系統架構與所提出的研究方法；第三節為實務開發上的介紹，包括介紹電腦模擬跟實作的結果；最後第四節為結論與未來展望。

2. 充磁電路設計

2.1. 充磁器組態

本文提出之新式充磁器電路組態如圖 4 所示，其中電路首先將市電經過全波整流為直流電壓，經過換流器切換後轉換為高頻方波，再送進升壓電路充電儲能後，經脈衝開

關觸發放電充磁。如圖 5 所示其為本電路之動作分析圖，其中迴路工作模式分為兩個階段，圖 5(a)、(c)為第一階段當輸入為正半週電壓的工作模式；圖 5(b)、(d)則為第二階段當輸入為負半週之電壓工作模式：

模式一：

由圖 5(a)可看出，當電壓為正半週輸入時，二極體 D_3 處在順向偏壓導通，二極體 D_4 則為逆向偏壓截止，故電容 C_4 充電且其充入電壓為 V_m 。

模式二：

當電壓為負半週時，如圖 5(b)所示，二極體 D_1 為順向偏壓導通，二極體 D_2 為逆向偏壓截止，故電路對電容 C_3 充電且充入電壓為 V_m 。

模式三：

由圖 5(c)可知，當電壓為正半週流入時，此時二極體 D_2 處在順向偏壓導通之狀態，二極體 D_1 逆向偏壓截止，故電容 C_3 電壓 V_m 與輸入電壓對電容 C_5 充電且其充入電壓為 $2V_m$ 。

模式四：

當電壓為負半週流入時，如圖 5(d)所示，二極體 D_4 順向偏壓，二極體 D_3 逆向偏壓截止，故輸入電壓 V_m 與電容 C_4 電壓 V_m 同時對電容 C_6 充電， C_6 充入電壓為 $2V_m$ 。又電容 C_5 、 C_6 串聯，因此電路之輸出電壓 V_o 為 $4V_m$ 。

在此裝置中設定開關 S_2 開啟與關閉時間相同，此時電路之電容 C_5 、 C_6 開始放電，開關 S_2 關閉時電容 C_5 、 C_6 則開始充電，充磁電流則經飛輪二極體 D_w 續流。值得注意的是由於 C_5 、 C_6 之充放電頻率與換流器切換頻率相同，故本文所提電路得以小電容之高速重複充放電充磁，而其與傳統一次性電容放電之充磁法相比，自然地因電容的重複使用可大幅增加其電容之利用率，因此本文所提電路得以大幅減少其對輸出電容大小之要求。

2.2 充磁軛設計

充磁軛一般以線圈纏繞鐵心形式構成，充磁軛作用為將充磁器輸出的電流轉換成磁場，再以磁路設計配合充磁夾具將磁場形塑成所需之形狀。整體而言充磁軛可廣泛用於各種馬達、高頻電源之磁性鐵心或音響中之鈹鎳鈷、鐵磁體(ferrite)、鈹鐵硼等永磁材料之充磁設備。圖 6 為本文研製之充磁軛，其使用銅導線繞於 C 字型之高導磁性矽鋼片。本文設計將待充磁之磁性材料放置於矽鋼片氣隙之間，此時由安培定律可以得到：

$$H_c L_c + H_a L_a = nI \quad (5)$$

其中 L_c 為矽鋼片中磁平均路徑、 L_a 為氣隙寬、 n 為線圈匝數、 I 為充磁電流。由於矽鋼片磁壓降 $H_c L_c$ 甚小可忽略不計，故(5)式可簡化為

$$H_a L_a = nI \quad (6)$$

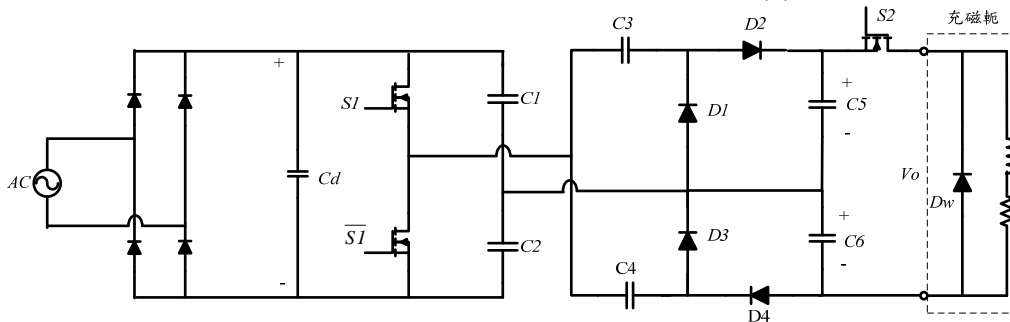
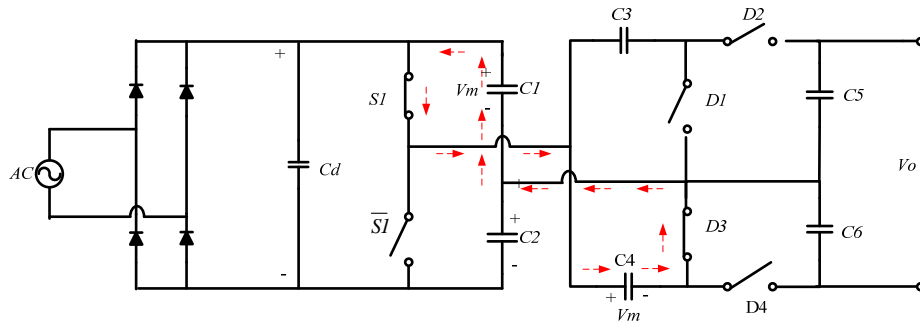
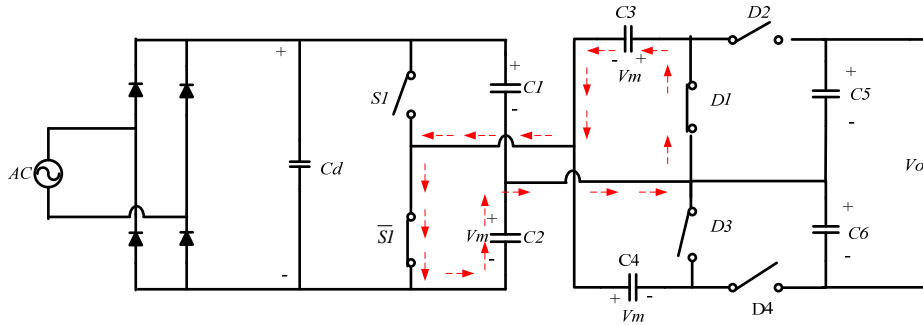


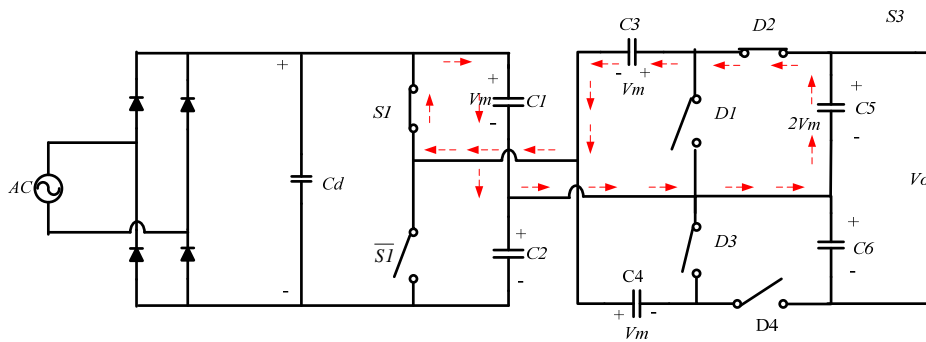
圖 4 本文所提充磁器電路組態圖



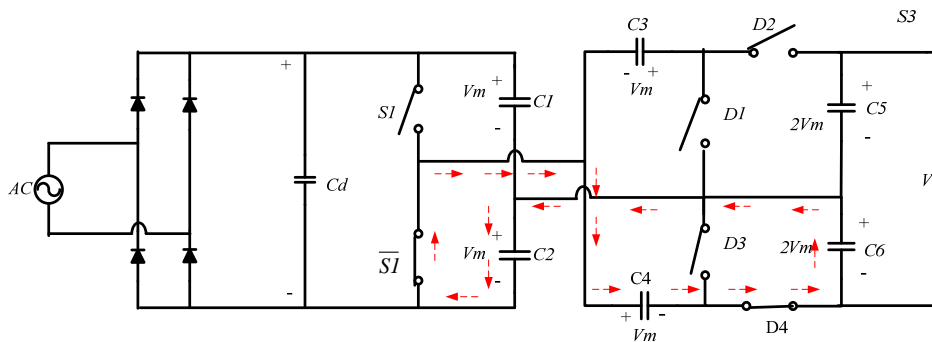
(a) 工作模式一



(b) 工作模式二



(c) 工作模式三



(d) 工作模式四

圖 5 本文所提方法之工作模式分析

今如可事先掌握待充磁之物質特性，則使用(6)式即可計算出所需之線圈匝數與充磁電流乘積。以本文設計之線圈30匝為例，對於一般待充磁之鐵磁體體鐵心(ferrite core)，其要求之充磁場強度約為790-960 kA/m之間，故充磁器如產生約160安培之充磁電流即符

使用；另對於應用在馬達等級之鈹鐵硼鐵心特性而言，其約需2800到4000 kA/m間之磁場強度方能達成充磁需求，此時如使用本文所提之充磁軛，則充磁器約需要輸出瞬間600安培峰值之充磁電流。

2.3 充磁控制訊號

如前所述，本文所提方法之兩組主要控制訊號分別是換流器 PWM 開關訊號 S_1 以及放電控制訊號 S_2 。本文設計此兩組訊號利用微處理器產生，以方便可以使用程式方式調整設計值。圖 7 為本文研究提出之程式流程圖，如圖所示，微處理器初始化後先設定 PWM 相關參數，產生方波，透過光耦合電路後輸出為功率電晶體之開關訊號 S_1 ，以將輸入直流切換轉為高頻脈波，同時再等待外部按鈕的觸發訊號。一旦使用者按下放電觸發後，微處理器可產生預先設定寬度之放電開關訊號，再透過光耦合電路後輸出至 S_2 ，如此一來即可以精確的控制所需要的放電時間與充磁電流。如圖 8 所示，本文所提方法之充磁電壓 V_o 為連續脈衝輸出，脈衝的頻率為功率電晶體之切換頻率，脈波數量依照 S_2 寬度決定。又由於充磁軛為一電阻與電感性負載，故當充磁電路提供脈衝電壓時，充磁電流之波形即可採步階疊加方式增加。本文之充磁電路以藉由增加 S_2 寬度，產生多個電壓脈衝，以期可增加充磁電流，但其仍不能無限制的增加，因為充放電迴路與電感電流初始值有關，故能爬升的電流值亦會有其限制。再者過長的放電時間會對充磁材料產生多餘熱，不利於充磁。基於此一設計考量，本文所提系統會依照不同之充磁材料特性，利用程式選擇適當之充磁時間，以得到最大之充磁電流輸出，並使其不至有充磁過久使得充磁材料產生過多餘熱之不良狀況發生。

3. 電腦模擬與雛形電路驗證

本文所提之充磁方法已使用 IsSpice 進行電腦模擬驗證，在實驗中直流電壓為 300 伏特，並以 50 伏特為增量模擬不同之放電情境。圖 9 為測試波形圖，於此測試中脈衝開關驅動訊號 V_{pulse} 以 3kHz 做切換，其中充磁電流 I 隨著輸入電壓增加而增大；另在輸出電壓部分，由於所提電路之電容持續做階段性放電，故由圖可發現充磁電流確以階梯狀疊加爬升至最大值。茲由圖 9 之相關測試結果可看出，本文所提電路其在直流電壓 300 伏的條件下，充磁電流峰值已達 400 安培，該電流應已符磁化非稀土之磁性材料之使用。

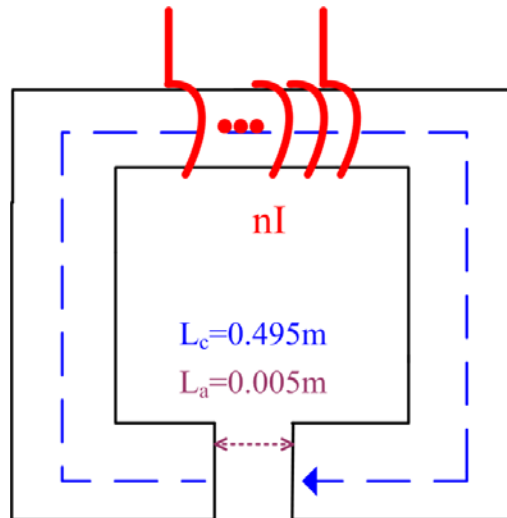


圖 6 C-Core 矽鋼片充磁軛

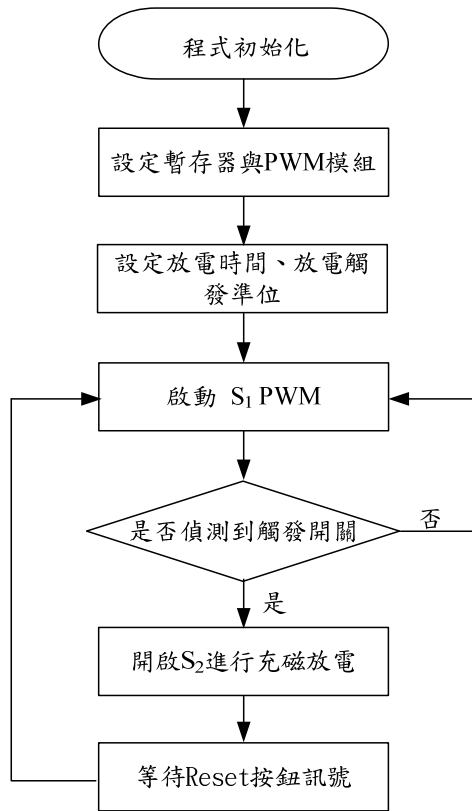


圖 7 程式流程圖

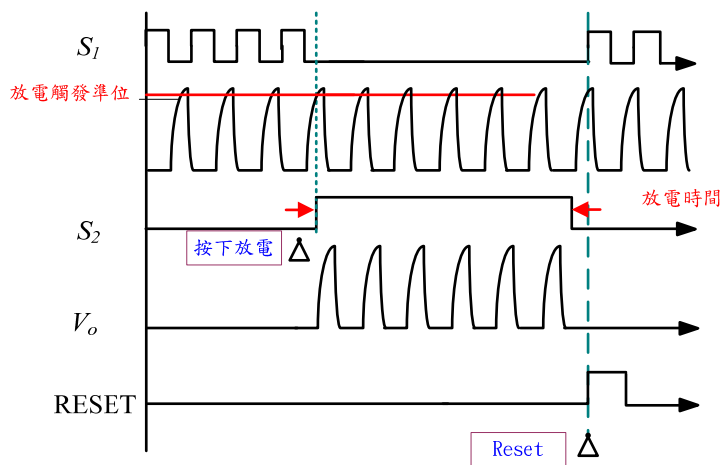


圖 8(a) 控制訊號與輸出波形

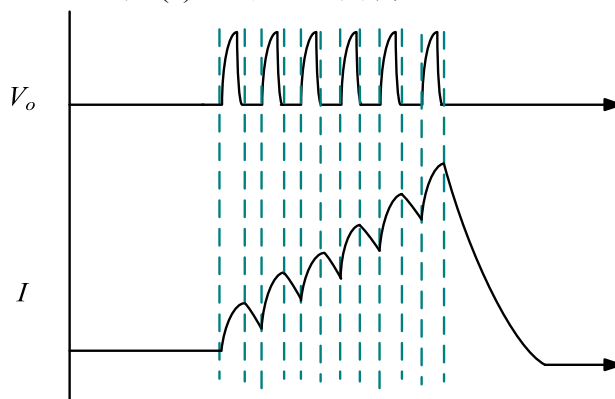
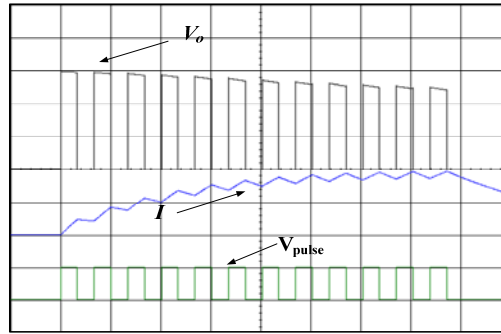
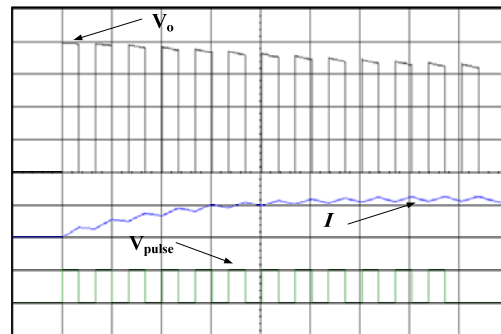


圖 8(b) 脈衝輸出電壓及疊加式充磁電流



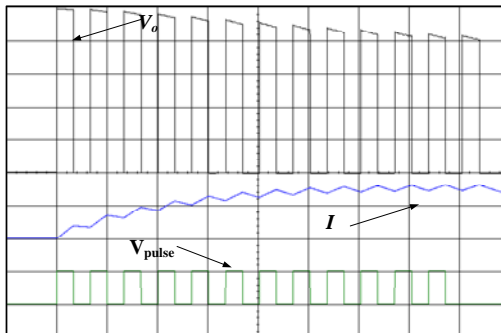
$V_{out} : 100V/div ; I_{out} : 100A/div ; V_{pulse} : 20V/div ; M : 500\mu s/div$

(a) 直流電壓 150 伏特試驗波形圖



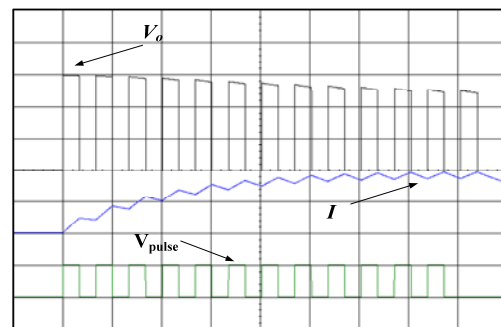
$V_{out} : 100V/div ; I_{out} : 200A/div ; V_{pulse} : 20V/div ; M : 500\mu s/div$

(b) 直流電壓 200 伏特試驗波形圖



$V_{out} : 100V/div ; I_{out} : 200A/div ; V_{pulse} : 20V/div ; M : 500\mu s/div$

(c) 直流電壓 250 伏特試驗波形圖

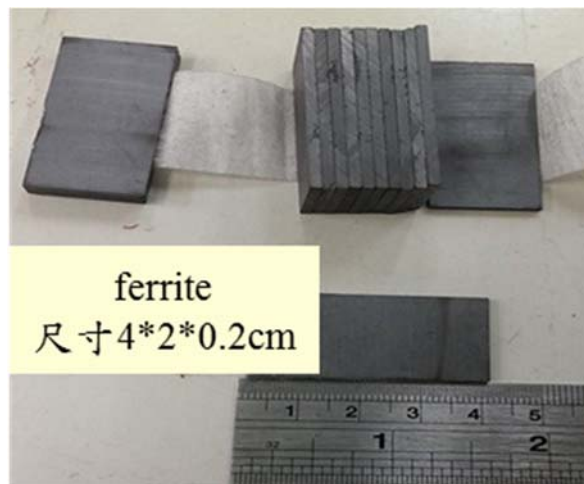


$V_{out} : 200V/div ; I_{out} : 200A/div ; V_{pulse} : 20V/div ; M : 500\mu s/div$

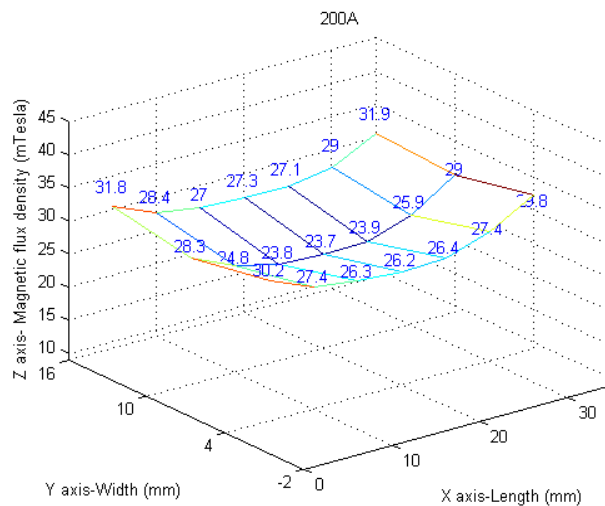
(d) 直流電壓 300 伏特試驗波形圖

圖9 本文所提之充磁方法之電腦模擬驗證圖

再者為驗證所提出充磁方法足以對鐵磁體材料充磁，本文已於實驗室建立一充磁器雛形並委其進行充磁實測試驗，其中本實驗所使用鐵磁體試片外觀如圖10所示，其尺寸為長4公分、寬2公分、厚0.5公分，而磁場量測方式為將高斯計之探棒設置在固定高度，再將試片擺放於線性平台上移動，藉此量測試片上網狀切割之定位點。實驗時則以事先向廠購買已充飽之鐵磁體磁鐵為基準，再採買相同尺寸但未充磁之鐵磁體試片使用本方法對其充磁，所得測試數據則以Matlab軟體整理呈現。利用上述方法充磁結果整理如圖7所示，其中充磁電流峰值調整為200安培時，鐵磁體試片之中央磁場強度為23.7mT，轉角處磁場強度最低為31.9mT，此測試結果是由於磁鐵磁動勢經過空氣路徑後再由儀器蒐集所經過之磁通量計算表面磁場強度大小，故試片正中央所經過的空氣磁阻路徑較長，相對於角落經過的空氣磁阻路徑較短使得測量結果試片中央會得到較小的磁場強度。茲將相關試片與廠商已充飽之標準磁鐵為基準進行比較，由實驗結果可看出所提充磁方法，確可試片之表面磁場度到達95%以上充飽之磁化效應。



(a) 鐵磁體試片尺寸



(b) 以 200A 充磁磁鐵試片表面磁場
圖10 鐵磁體試片充磁測試圖

4. 結論

由於溫度等製程因素，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。其中基於所提電路之電容切換設計，其可較傳統之方法減少電路對於輸出電容值大小之需求。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試片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，而本文所提之多模組充磁電路設計亦有助於使輸出電流進一步提升。

5. 致謝

本文部分研究成果蒙科技部前瞻技術產學合作計畫-新世代車用動力驅動關鍵模組整合設計之智能化平台建置之補助，計畫編號 107-2622-8-006-015，謹此敬致誠摯謝意

6. 參考文獻

1. Y. Zhilichev, P. Campbell, and D. Miller, "In Situ Magnetization of Isotropic Permanent Magnets", IEEE Transactions on Magnetics, 38, 2988-2990, 2002.
2. 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, 50, 367-374, 2014.
3. D. G. Dorrell, M. F. Hsieh, and Y. C. Hsu, "Post Assembly Magnetization Patterns in Rare Earth Permanent Magnet Motors", IEEE Transactions on Magnetics, 43: 2489-2491, 2007.
4. G. W. Jewell, D. Howe, and T. S. Birch, "Simulation of Capacitor Discharge Magnetization", IEEE Transactions on Magnetics, 26, 1638-1640, 1990.
5. P. S. Kim and Y. Kim, "Field and Thermal Modeling of Magnetizing Fixture by Impulse," the 28th IEEE IECON, 2, 1342-1347, 2002.
6. C. J. Lee, C. I. Lee, and G. H. Jang, "Source and Reduction of Uneven Magnetization of the Permanent Magnet of a HDD Spindle Motor", IEEE Transactions on Magnetics, 27, 1929-1932, 2011.
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, 27, 1929-1932, 2012.
8. 謝旻甫、陳柏廷、余守龍。永磁電機槽極比與充磁接線對後充磁製程之影響分析。馬達電子報 497 期，2013。
9. J. M. Rivas, Y. Han, O. Leitermann, A. D. Sagneri, and D. J. Perreault, "A High-Frequency Resonant Inverter Topology with Low-Voltage Stress," IEEE Transactions on Power Electronics, 23, 1759-1771, 2008.
10. 廖文博。電容脈衝式充磁機參數計算。馬達電子報 487 期，2012。