

Design of Phase-Shifted Full Bridge Inverter for an High-Frequency Induction Heating System

Fu-Sheng Pai*, Yi-Lin Zhan

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

*E-mail : fspai@mail.nutn.edu.tw

Abstract

This paper aims to develop an inverter circuit for induction heating. The proposed phase-shifted full bridge inverter utilizes series resonance to provide zero-voltage switching (ZVS) for the switching devices. By studying the voltage and current of resonance circuit along with relationships between load impedance and frequency, the working frequency and resonant current phase in the circuit can be well controlled for ZVS. Moreover, the paper has developed the temperature control loop, where software simulations and experimental measurement are both made to evaluate. Results from simulations and hardware testing is compared with each other, thereby verifying the concepts introduced in this paper.

Keywords: Phase-shifted Full Bridge Inverter, Series Resonance, Temperature Control.

Corresponding authour:

fspai@mail.nutn.edu.tw

DOI:10.53106/222344892024101402007

高頻感應加熱系統之全橋相移換流電路設計

白富升^{*}，詹逸寧

國立臺南大學電機工程學系

^{*}E-mail : fspai@mail.nutn.edu.tw

摘要

本文旨在發展應用於感應加熱系統之相移全橋換流電路，本文所提電路使用串聯諧振配合負載線圈電壓、電流相位控制迴路，能在負載溫度控制過程，克服感應熱負載阻抗特性變化，達到換流電路零電壓切換，同時使得負載之工作溫度得穩定在設定值。本文除理論分析外，所提方法已於實驗室完成雛形電路進行驗證，由實驗證實雛形電路 500W 轉換效率 93.4%、160°C 溫度控制誤差 4.3°C，相關實驗結果顯示所提方法在感應加熱系統之應用確具可行性與實用參考價值。

關鍵詞：相移全橋換流器、串聯諧振、溫控

1. 緒論

無論是民生應用或是工業製程都有許多情境需使用加熱系統，若比較不同的加熱方法，感應加熱具多項優點，感應加熱可以根據被加熱物需求，考量不同加熱深度、加熱均勻度、加熱範圍，在工業上具有熱處理、熔接、冶煉、預熱等功能[1-2]。相較於電阻加熱法，由於屏除了介質的傳遞損失，它的效率往往遠高於電阻加熱法，且加熱速度得到大幅提升，此時如能搭配控制電路便能達到有效的功率控制效果，亦可精確控制加熱溫度[3,4]。工業用感應加熱如電爐應用範圍包括電縫管熔接、高熔點合金爐、薄板加熱、鋼瓶淬火等，換流電路需求功率從數千瓦到數百千瓦[5]。

在典型的感應熱供電系統中，諧振換流器是內部直交流電壓轉換的核心電路，諧振換流器可利用調整切換頻率使得加熱線圈負載與電路等效阻抗達最佳匹配，促使加熱能量最大，同時兼顧換流器柔性切換條件要求。但因加熱線圈十分易受熱效應影響改變其電磁等效特性，造成諧振頻率飄移，致使最佳操作頻率無法固定，故文獻研究已提出許多以電壓與電流相位控制為基礎之追頻方法，以確保感應熱電路在高溫操作的過程中能克服負載特性變化，達到溫控功能[6-9]。另一方面因應新材料的趨勢，也有研究使用碳化矽電晶體進行電路設計，並能實現工作十萬赫茲的感應加熱頻率，雖然該研究頻率可調變範圍不大，但這意味著碳化矽電晶體的穩定性已經足以應付感應熱系統要求[10]。最後在線圈結構及負載電磁感應特性研究部分，J. T. Huang 等人研究將加熱線圈置入模具表面，可提高耦合效率；H. Fujita 及 H. J. Tang 等人設計多組線圈，再使用電磁場鄰近效應降低線圈阻抗、提高功率之方法[11-12]；Wojda 等人探討以多股絞線(Litz-Wire)作為高頻變壓器或加熱線圈導線時之損耗特性[13,14]；J. Serrano 等人則證明利用中繼線圈及線圈分區加熱等方式，可增加控制負載各部溫度之均勻性[15-18]。

本文旨在研製一高效能之感應加熱電路，本文所提電路是以全橋相移電路為基礎，配合負載串聯諧振與鎖相設計，使得在負載溫度升高之過程中，電路能克服負載特性變化，準確追蹤其諧振值，並完成零電壓切換之功能。又本文利用熱電偶迴授溫度訊號，再於微處理機中計算全橋相移之功率晶體切換相移角度訊號，故負載之工作溫度得穩定在設定值。本文撰寫在第一節之背景說明後，第二節進行感應加熱負載之特徵分析，第三節描述主電路，第四節說明溫度控制方法，第五節於實驗室發展離形電路以進行實驗量測，驗證所提方法之可行性，最後則為結論。

2. 感應加熱負載之特徵分析

感應加熱是基於電磁感應對導磁導電材料進行非接觸加熱，由法拉第定律可知，在時變磁場中放置一根導線，導線兩端將產生與磁場變化相反的感應電動勢，此時若將導線短路，就能產生感應電流。如圖 1 所示，若將導線更換為一塊較大的導體時，一個簡單的感應加熱裝置便完成了，由於導體與磁場平行的面積增加，感應電流更容易在導體上自成迴路，此時的電流稱為渦電流，渦電流會與導體自身的電阻性產生功率，其中渦電流的大小決定加熱的速度，並與磁場大小、導體電阻率、導體形狀相關。

感應負載特性可視為電阻與線圈串聯阻抗，流過感應線圈的電流區分為兩個部分，一部分為激磁電流，另一部分則為磁滯電流與渦電流，激磁電流負責建立磁電場，無論有無熱負載時均會消耗電流；磁滯電流與渦電流則均可對被加熱物提供熱能，但以渦電流影響較大。感應加熱負載可視為二次側僅一匝之變壓器，圖 2 為感應負載等效電路，其中 R_L 為加熱線圈電阻、 n 為加熱線圈匝數。經簡化後，感應加熱負載可視為一電感

器，而電感值與線圈的幾何形狀相關，以 n 匝繞圓半徑為 r 、長度 l 之線圈為例，線圈電感值如(1)所示：

$$L = n^2 \frac{\mu_r \mu_0 \pi r^2}{l} \quad (1)$$

但實際在應用時會因加熱線圈形狀不同產生漏磁通，故可加入修正係數 K ：

$$L = K \frac{\mu_r \mu_0 n^2 \pi^2 r^2}{l} \quad (2)$$

在空心狀態下的螺旋狀電感可被寫成：

$$L = \frac{0.934 r^2 n^2}{9r + 10l} \quad (3)$$

由(3)式可知加熱線圈之感值與線圈長度、圈數、材質、導磁係數、截面積有關。整個電路的等效阻抗可用下式表示：

$$Z_{eq} = R_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (4)$$

$$R_{eq} = R_e + n^2 R_L \quad (5)$$

$$L_{eq} \approx L_C + n^2 L_l + L_m \quad (6)$$

其中 R_e 為感應線圈等效電阻、 L_m 為磁化電感、 L_C 為加熱線圈漏電感、 L_l 為被加熱物等效電感。

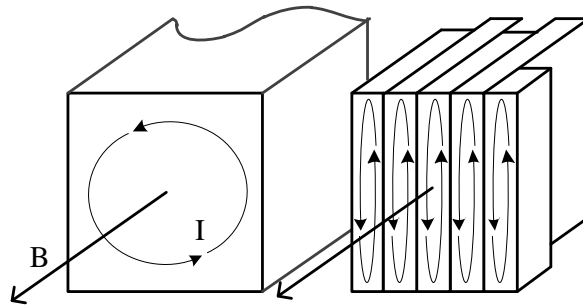


圖 1 渦電流示意圖

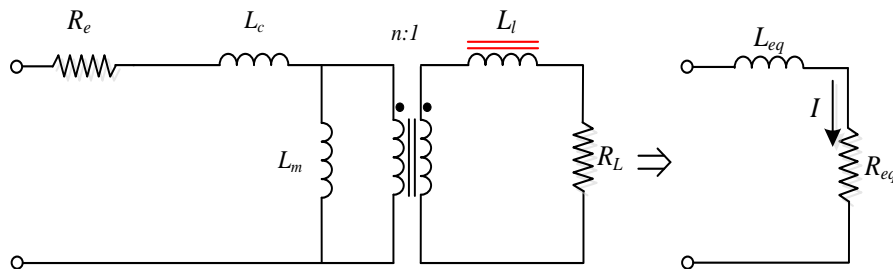


圖 2 感應線圈等效電路圖

3. 感應加熱換流器之設計

本文電路架構如圖 3 所示，由市電 220V 作為電源，經整流濾波得到一穩定直流，接著經過全橋換流器以及變壓器輸出至負載端並與諧振電容形成共振，其中全橋換流器必須滿足可變頻與零電壓切換之條件。全橋相移式脈波寬度調變是近年來主流的電路架構，常被用來製作隔離式直流對直流電壓轉換電路，其架構簡單，增益主要由變壓器決

定，控制訊號如圖 4，可大致分為兩組互補訊號，其中領先臂與落後臂之相位差即為輸出脈波寬度大小。圖中將空乏時間設定為最大，使能夠清楚的分析轉態的過程。為滿足零電壓切換的需求，本文所提電路選取切換頻率使整個電路操作於諧振點偏電感性特區，此時電壓訊號將稍微超前電流訊號，確保開關在導通時具零電壓切換，減少切換損失。至於詳細的電路工作分析說明如下：

工作模式一($t_0 \sim t_1$):

此模式等效電路如圖 5(a)，功率晶體 Q_1 與 Q_4 導通、 Q_2 與 Q_3 截止，並持續一段很長的時間，此時變壓器二次側建立正準位電壓，促使電流開始爬升，並轉換大量能量至變壓器二次側供負載使用。

工作模式二($t_1 \sim t_2$):

此模式等效電路如圖 5(b)所示， Q_4 截止，能量傳送被迫中斷，但此時變壓器激磁電感已經建立正電流，必須將儲存之電流釋放完畢，又變壓器一次側仍保有正電壓，開始對 Q_3 的寄生電容放電，並在放電完畢後由 Q_3 的背接二極體形成迴路，供激磁電流續流。

工作模式三($t_2 \sim t_3$):

此模式等效電路如圖 5(c)所示，由於 Q_3 的背接二極體導通，因此 Q_3 的跨壓下降至背接二極體的順向導通電壓， Q_3 在此時柔性切換，激磁電流不再從背接二極體流過，而是經由阻抗更低的功率晶體形成迴路。

工作模式四($t_3 \sim t_4$):

此模式等效電路如圖 5(d)所示， Q_1 被截止，激磁電流經由 Q_2 找到新的路徑， Q_2 的寄生電容被放電，放電完成後激磁電流經由 Q_2 內部背接二極體形成迴路。

工作模式五($t_4 \sim t_5$):

此模式等效電路如圖 5(e)，由於 Q_2 的內部二極體導通，因此 Q_2 的跨壓下降至內部二極體的順向導通電壓， Q_2 在此時零電壓導通，此時電變壓器建立負電壓，將能量傳送至二次側，並持續很長一段時間。

工作模式六($t_5 \sim t_6$):

此模式等效電路如圖 5(f)，此時 Q_3 截止，能量傳送被迫中斷，但此時變壓器激磁電感已經建立負電流，必須將儲存之電流釋放完畢，又變壓器一次側仍保有負電壓，開始對 Q_4 的寄生電容放電，並在放電完畢後由 Q_4 的背接二極體形成迴路，供激磁電流續流。

工作模式七($t_6 \sim t_7$):

此模式等效電路如圖 5(g)，由於 Q_4 的背接二極體導通，因此 Q_4 的跨壓下降至背接二極體的順向導通電壓， Q_4 在此時柔性切換，激磁電流不再從背接二極體流過，而是經由阻抗更低的本體形成迴路。

工作模式八($t_7 \sim t_0$):

此模式等效電路如圖 5(h)， Q_2 被截止，激磁電流經由 Q_1 找到新的路徑， Q_1 的寄生電容被放電，放電完成後激磁電流經由 Q_1 的背接二極體形成迴路，藉由背接二極體導通時啟動 Q_1 達成柔性切換，並重複工作模式一。

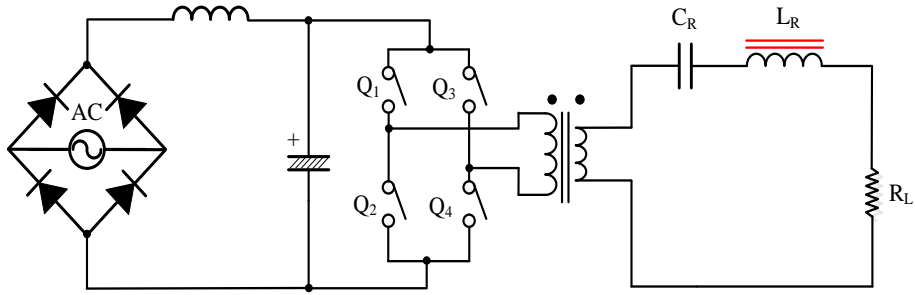


圖 3 感應加熱電路架構

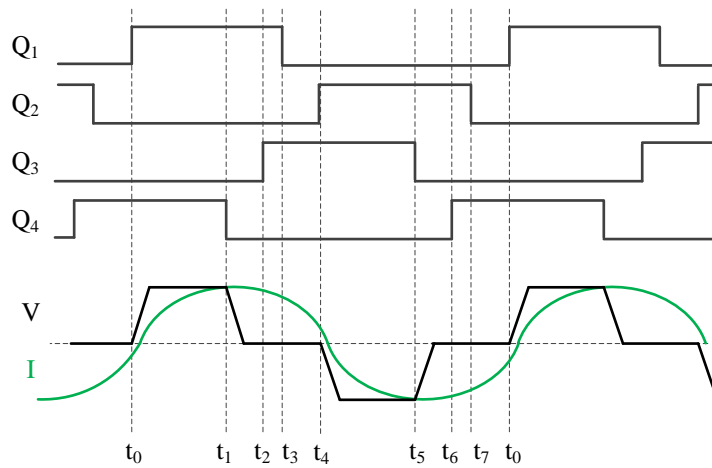


圖 4 全橋相移換流器狀態時序圖

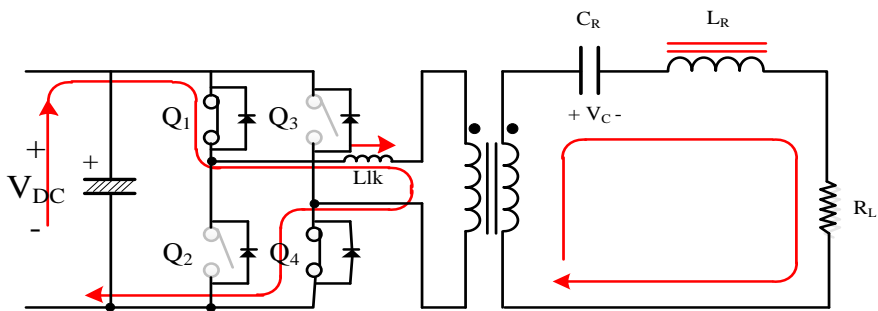


圖 5(a) 工作模式一等效電路圖

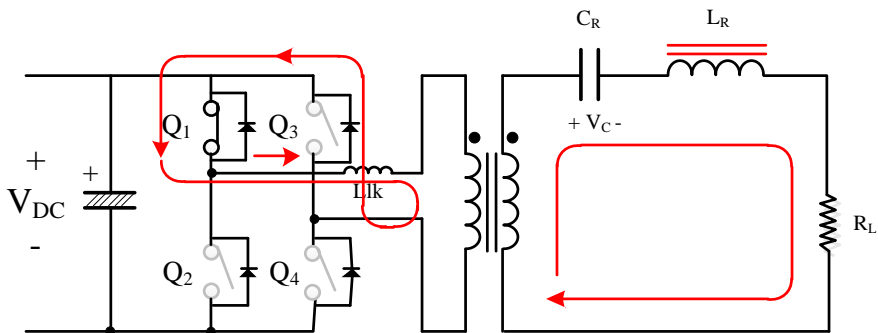


圖 5(b) 工作模式二等效電路圖

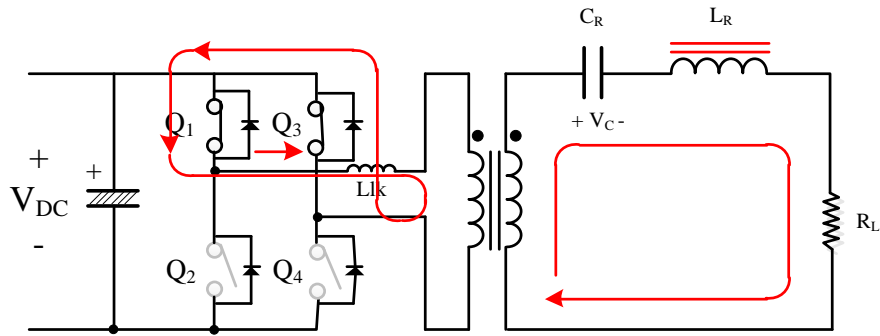


圖 5(c) 工作模式三等效電路圖

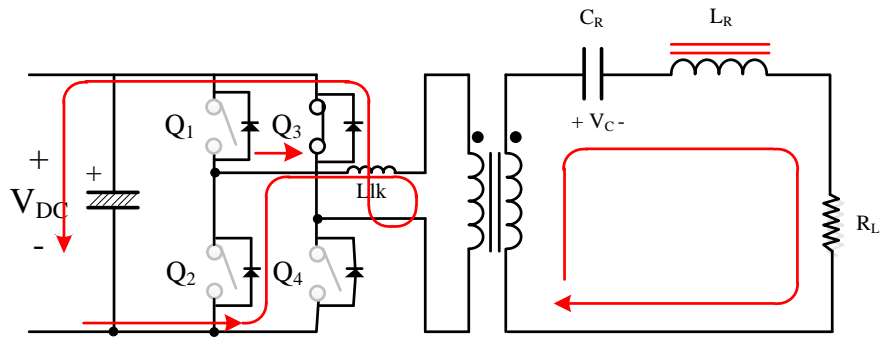


圖 5(d) 工作模式四等效電路圖

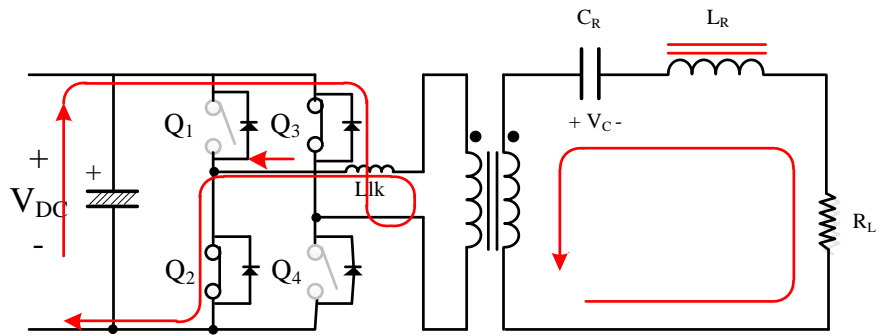


圖 5(e) 工作模式五等效電路圖

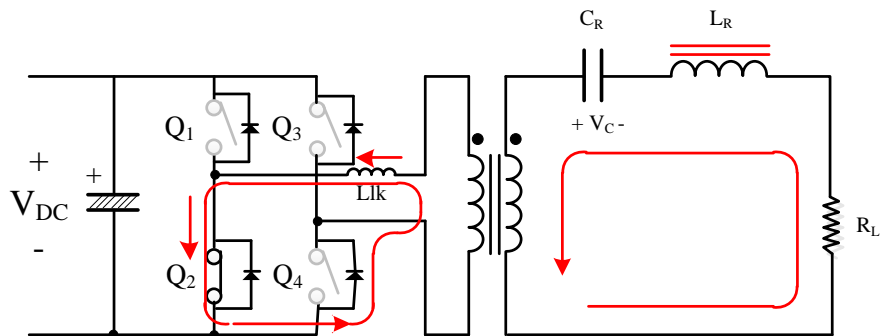


圖 5(f) 工作模式六等效電路圖

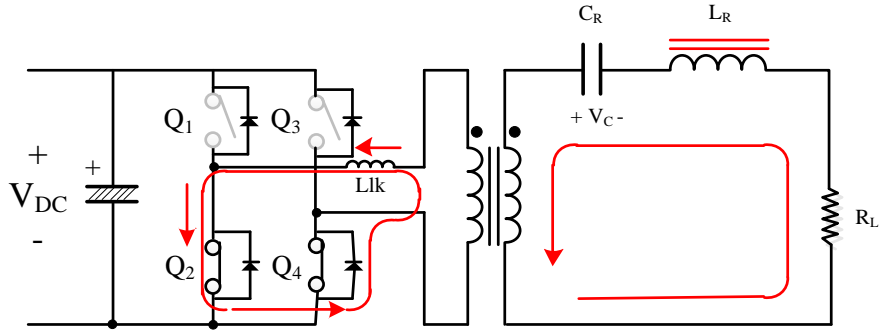


圖 5(g) 工作模式七效電路圖

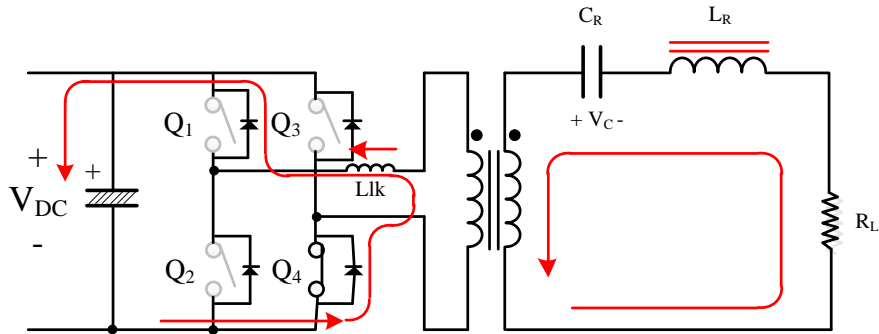


圖 5(h) 工作模式八效電路圖

4. 溫度控制策略

本文設計之溫度控制如圖 6 所示，將熱端點固定於被加熱物上，冷端點置於 TC77 旁，藉由放大電路將微小冷熱端電壓訊號放大 600 倍後輸入至單晶片 AD 模組，同時 TC77 每隔 1 秒回傳當時室溫進行冷端點溫度補償，由單晶片(dsPIC33EV)計算熱端點實際溫度，顯示於 LCD 畫面上。使用者透過 LCD 畫面設定所需溫度，系統將自動開始進行頻率掃描，並進入溫度控制模式，單晶片將調變功率晶體工作義務週期範圍在 20%~100%間，使物件溫度與設定命令溫度相同。將圖 6 溫度控制方塊展開如圖 7，單晶片從熱電偶接收到的電訊號經由 AD 轉換器輸入第一階數位濾波器後，與冷端溫度相加算得物件實際溫度，再經由第二階數位濾波器輸出至 LCD 監看窗，抑制加熱時產生的電磁干擾。另一方面將物件溫度與命令溫度輸入 PI 控制器中，藉由計算得到修正值來控制 PWM 模組產生之功率晶體義務週期訊號，如此一來便能控制功率大小，並完成控制物件溫度，最後經物件上的熱電偶形成閉迴路控制機制。

5. 系統驗證

為驗證所提電路之可行性，本文已於實驗室建立一雛形電路進行實驗，表 1 為系統電路參數，諧振頻率介於 240kHz~360kHz 間，系統應能隨負載溫度變動對換流器功率晶體切換義務週期進行調變。由於當切換義務週期小於 20%時負載將充滿 5 次以上的諧波，可能對迴授系統造成嚴重干擾，故溫度控制時對功率晶體控制範圍為 20%~100%。本文使用 SiC 電晶體作為全橋式功率開關，與傳統矽功率晶體最大差異在於優異的導通阻抗，可以有效減少導通損失。

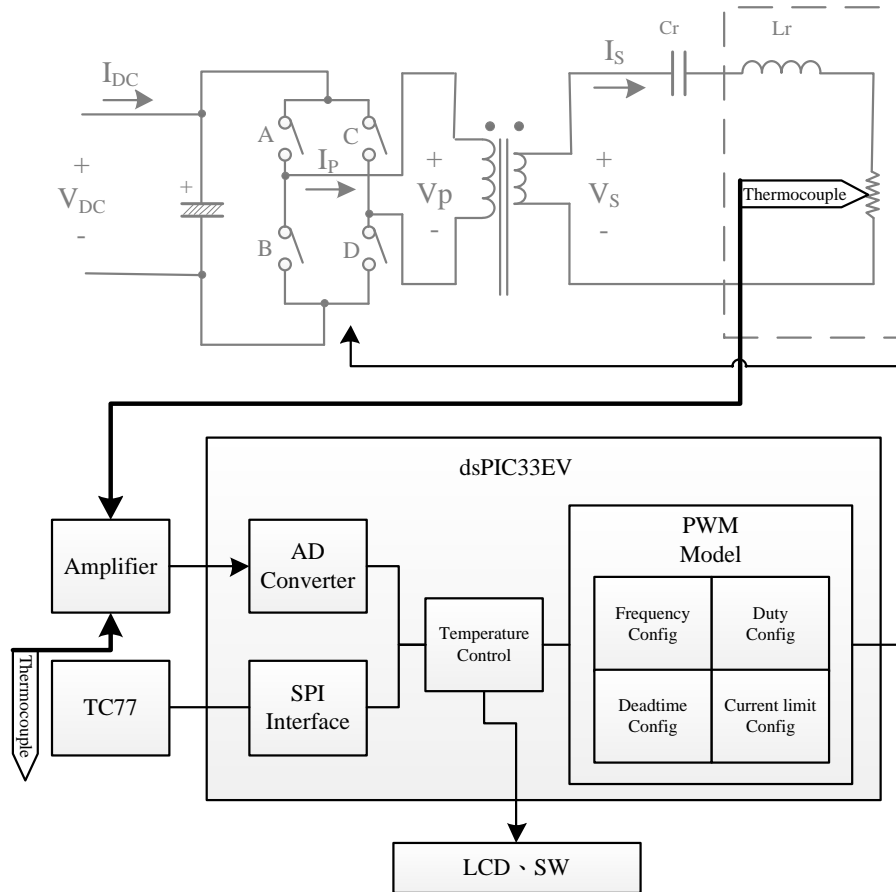


圖 6 溫度控制電路方塊圖

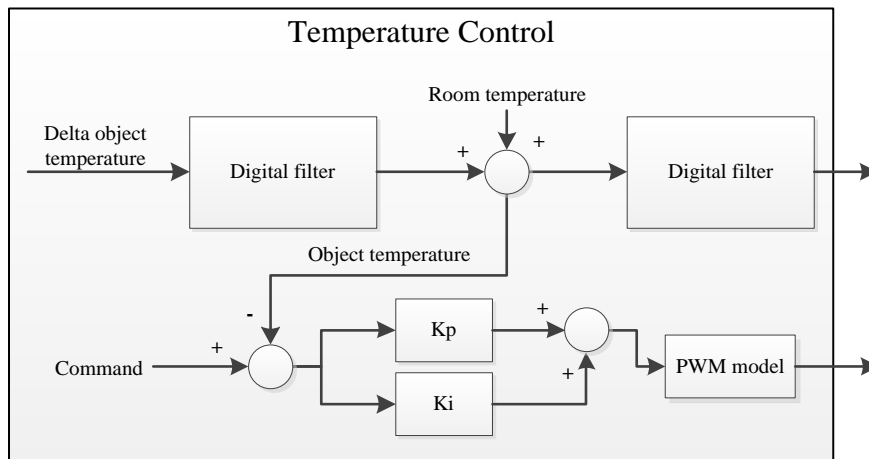


圖 7 溫度控制程式方塊圖

表 1 系統電路參數表

項目	數值
輸入電壓	220Vac/60Hz
輸入電流	5.2Arms
切換頻率	240kHz~360kHz
輸出功率	500W

本文之柔性切換係利用零電壓切換方式達成，圖 8 所示分別為功率電晶體 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 之零電壓切換波形，其跨壓皆在在驅動電壓達高準位前先降至低電壓，故可確認四個功率電晶體皆處在零電壓切換之狀態。由於使用柔性切換，本文所提之換流器於輸入功率 500W 時，效率為 93.4%。再者本文亦已對於所提溫度控制功能進行測試紀錄。圖 9 為溫度控制時控制訊號與變壓器一次側電壓波形，由此圖可知由微處理器輸出之控制訊號可改變換流器之輸出相位，而其輸出合成波形亦為如預期之方波波形。最後為進一步驗證溫度控制功能，本文使用溫度記錄器搭配 k-type 溫度線量測負載溫度，測量結果繪如圖 10 所示，由圖可以看到溫度控制時，溫度震盪範圍不超過 5°C ，且均能逐步收斂到設定值。本文最高測試溫度為 160°C ， 160°C 時，穩態控制誤差 4.3°C 。

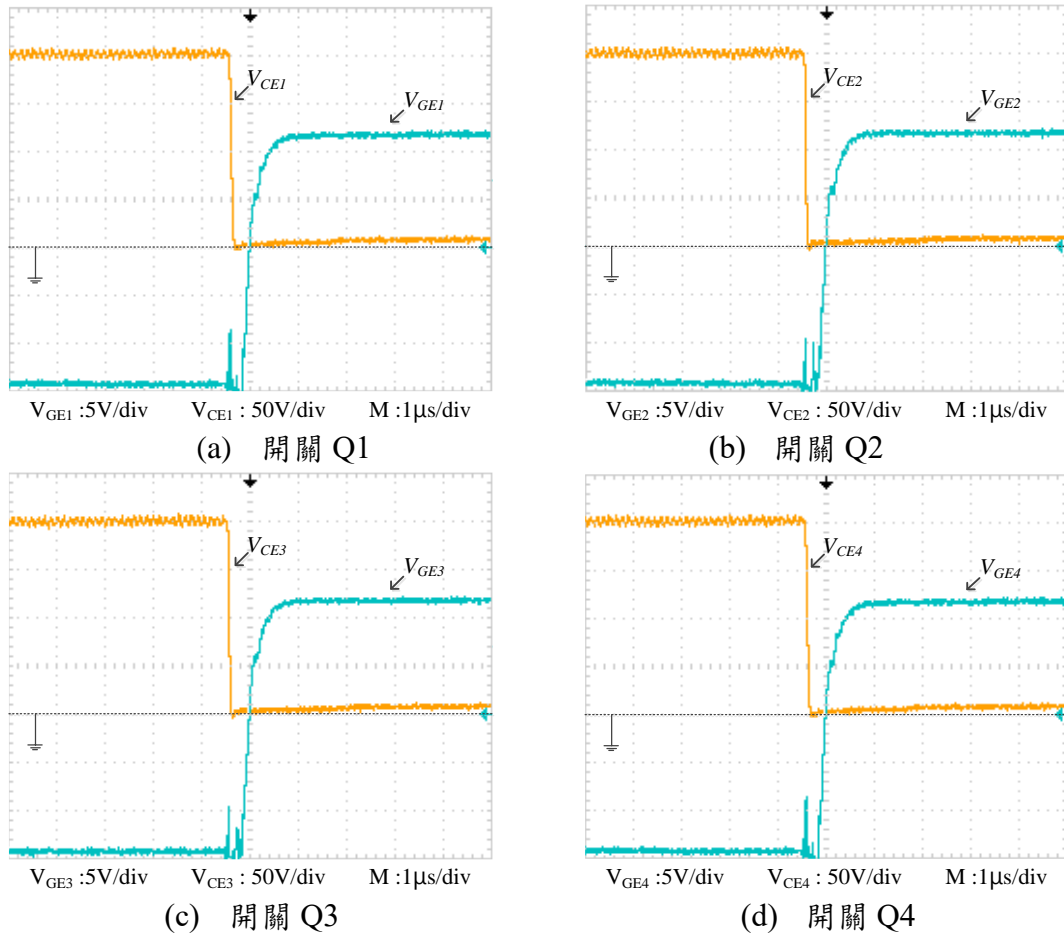


圖 8 功率電晶體零電壓切換波形圖

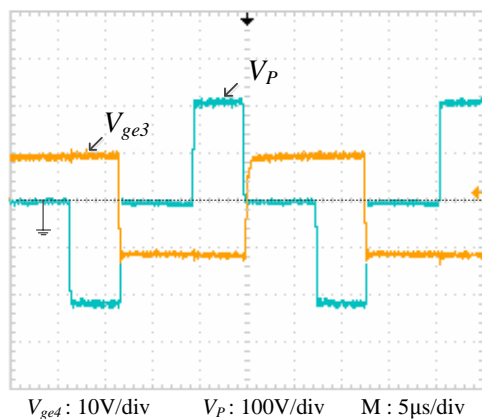


圖 9 PWM 訊號與變壓器一次側電壓波形圖

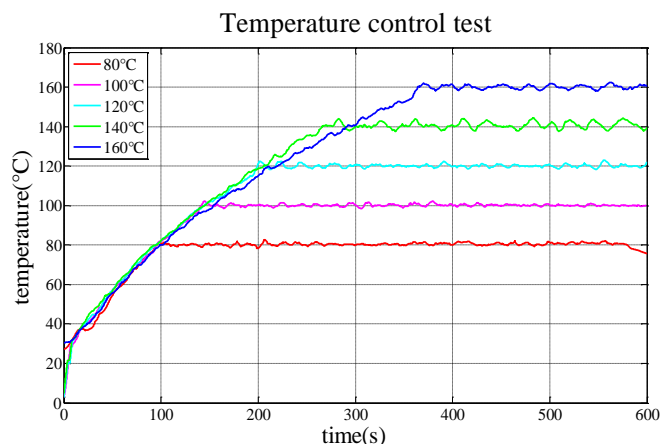


圖 10 溫度控制實驗結果

6. 結論

本文所提系統是由換流器、諧振槽及感應加熱線圈組成，同時再以微控制器為核心，發展掃頻、鎖相以及具溫度迴授控制之相移角度計算功能，故可達成溫度閉迴路控制與電路零電壓驅動之電路效率提升目的。本文所提電路目前為 500W，效率最高 93.4%，溫度控制誤差 3% 以內，未來研究朝功率擴增提升方向努力，更進一步的設計成果與測試心得將於近期整理後發表與討論。

7. 誌謝

本文特別感謝國科會專題研究計畫補助（計畫編號 112-2622-E-024 -001 -），相關協助對本文之研究發展助益頗大，特此致謝。

8. 參考文獻

- [1] H. Sarnago, L. Óscar, and J. M. Burdío, "A Comparative Evaluation of SiC Power Devices for High-Performance Domestic Induction Heating," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 4795–4804, 2015.
- [2] O. Jimenez, O. Lucía, I. Urriza, L. A. Barragan, and D. Navarro, "Power Measurement for Resonant Power Converters Applied to Induction Heating Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 12, pp. 6779–6788, 2014.
- [3] M. Wesołowski, "Induction Heating of Thin Aluminum Layers During Depolymerization Process," in *Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, pp. 1–4, 2017.
- [4] K. Thepsatitsilp, W. Boonpeang, P. Saeung, N. Pukseesang, and C. Thongsopa, "Experiment and Design a Suitable Induction Heating for Air Heat Exchanger Application," in *Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2017 Asia-Pacific International Symposium on*, pp. 161–163, 2017..
- [5] T. Kute, A. Mahajan, and R. D. K. Barc, "Generation of Heat on Fuel Rod in Cosine Pattern by Using Induction Heating," *Nascent Technologies Engineering (ICNTE), 2017 International Conferences*, pp. 1–5, 2017.
- [6] H. Sarnago, Luci, x, O. a, A. Mediano, Burdi, et al., "Class-D/DE Dual-Mode-Operation Resonant Converter for Improved-Efficiency Domestic Induction Heating System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, pp. 1274-1285, 2013.
- [7] Y. Zhongming, P. K. Jain, and P. C. Sen, "A Full-Bridge Resonant Inverter With Modified Phase-Shift Modulation for High-Frequency AC Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 2831-2845, 2007.
- [8] C. Chin-Hsing, "Design of Fuzzy Controller for Induction Heating using DSP," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference on*, pp. 2276-2280, 2010.
- [9] H. Sarnago, Ó. Lucía, A. Mediano, and J. M. Burdío, Multi-MOSFET-Based Series Resonant Inverter for

- Improved Efficiency and Power Density Induction Heating Applications, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4301-4312, 2014.
- [10] H. Karaca, "Design and Realization of a 100kHz-100kW Series Resonant Inverter with SiC-MOSFETs Connected in Parallel for a High Frequency Induction Heating Application," *International Exhibition and Conferences Power Electronics Intelligent Motion*, May, pp. 16-18, 2017.
- [11] H. Fujita, N. Uchida, and K. Ozaki, "A New Zone-Control Induction Heating System Using Multiple Inverter Units Applicable Under Mutual Magnetic Coupling Conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 2009-2017, 2011.
- [12] H. J. Tang, L. P. An, L. P. Chin, L. K. Yu, and H. H. Jun, "The Development of High Frequency Induction Heating Embedded Coil," in *Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference, 2009. IMPACT 2009. 4th International*, pp. 701-704, 2009.
- [13] R. P. Wojda and M. K. Kazimierczuk, "Winding Resistance and Power Loss of Inductors With Litz and Solid-Round Wires" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 4 pp. 31-38, 2018.
- [14] R. Y. Zhang, J. K. White, J. G. Kassakian, and C. R. Sullivan, "Realistic Litz Wire Characterization using Fast Numerical Simulations," *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, March, pp. 738-745, 2014.
- [15] W. Han, K. T. Chau, and Z. Zhang, "Flexible Induction Heating Using Magnetic Resonant Coupling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 1982-1992, 2017.
- [16] J. Serrano, J. Acero, I. Lope, C. Carretero, and J. M. Burdío, "A Flexible Cooking Zone Composed of Partially Overlapped Inductors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp.7762-7771, 2018.
- [17] S. H. Im, J. S. Kim, Y. S. Jang, and G. S. Park, "Design of Ferrite Core for the Improvement of Power Efficiency in Induction Range," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 6, pp.1-4, 2019 .
- [18] E. Plumed, I. Lope and J. Acero, "Induction Heating Adaptation of a Different-Sized Load With Matching Secondary Inductor to Achieve Uniform Heating and Enhance Vertical Displacement," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 6, pp. 6929-6942, 2021.