

實現以數位控制為基礎之感應加熱系統

摘 要

本文提出一種以數位控制為基礎之感應加熱系統，系統架構採用全橋串聯諧振電路，搭配降壓變壓器，以驅動加熱線圈，並藉由數位控制器調變操作頻率使加熱功率達到要求，以完成1.5 kW感應加熱系統之研製。本文利用諧振電感、諧振電容、加熱線圈等形成諧振電路，能使功率開關達到零電壓切換的效果，且充分運用感應加熱的原理將高頻交流提供至加熱線圈以加熱工件。此外，本系統使用一降壓變壓器，除了提供隔離作用，並將諧振元件至於變壓器一次側，此舉能減少功率開關及諧振元件的電流應力，並降低系統製作成本。最後本文進行實測，系統能將長度150 mm、直徑25 mm的低碳鐵棒在50秒內由室溫加熱至發紅(約700~800度)，驗證本系統之可行性。

關 鍵 字

感應加熱、全橋串聯諧振轉換器、零電壓切換、數位化控制。

一、前言

在現今社會中，加熱技術是一門很重要的學問，隨著不同的加熱溫度，可應用在醫療、居家生活、工業鍛造等眾多場合，傳統的加熱技術如燃燒可燃物產生熱量加熱，其造成環境汙染，加熱效率低落等問題，因而發展出電能加熱，包含電阻式加熱、紅外線加熱、微波加熱、電弧加熱、感應加熱等，各式電能加熱的用途及特色整理如表1，其中又以感應加熱具有較多優點^[1-2]。

表1 各式電能加熱比較表

加熱方式	用途	特色
電阻式	較低溫的加熱，如家用電熱水壺、電熱鍋。	接觸性加熱將造成金屬氧化，效率較低。
紅外線	可對多種材質同時進行表面加熱。	分為遠、近紅外線，對不同材質有不同加熱效果。
微波加熱	對含水量較多的橡膠或食品加熱。	加熱迅速，但有電波洩漏的疑慮，須隔離加熱場所。
電弧加熱	對金屬做高溫熔解。	低電壓、大電流。交流電源。
感應加熱	適用於較高溶解溫度之金屬，作表面加熱、溶解。	非接觸加熱，利用頻率選取加熱深度，加熱迅速且效率高。

感應加熱是一種非接觸式的加熱技術，應用範圍十分廣泛，搭配不同加熱線圈設計、模具及加熱溫度，可延伸出腫瘤熱療、電磁爐食品加熱、工業金屬鍛造、金屬熔煉、玻璃曲面加工、塑膠射出成型等應用。本文研製之 1.5 kW 感應加熱系統電路，架構為全橋 LC 串聯諧振，輸入電壓為直流 400 V，負載端採用螺旋多匝型加熱線圈，可因加工物件的長度調整匝數，或根據不同加工物件體積調整內徑大小。系統將加工物件加熱至約 700~800 度，後續可做金屬鍛造等加工應用。

二、感應加熱系統設計與分析

1. 感應加熱原理

感應加熱是利用電磁感應，對金屬進行加熱的技術。根據法拉第的電磁感應定律 (Faraday's law of electromagnetic induction)，當電流通過線圈，會在其四周產生磁場，若將具導磁性的工件放置在由線圈建立的交變磁場內，工件會因為磁力線的切割而感應電壓，在工件表面產生渦電流，並產生焦耳加熱的效果，使加工物件溫度升高^[3]，圖 1 為感應加熱原理圖。

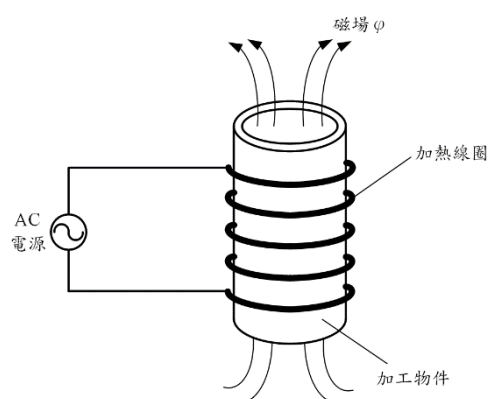


圖 1 感應加熱原理圖

2. 感應加熱系統之架構介紹

本文以全橋串聯諧振轉換器作為感應加熱系統之主電路，其系統架構圖如圖 2 所示，整體系統包括：全橋電路、LC 串聯諧振電路、變壓器、加熱線圈、回授電路與數位控制器。圖 3 為全橋串聯諧振轉換器之電路架構，將輸入直流電源轉換為高頻交流電源，提供至加熱線圈以加熱工件。其中，本文使用降壓變壓器目的是為了提供隔離並加大流經加熱線圈的電流，同時，將諧振元件放置在變壓器一次側，以減少功率開關及諧振元件的電流應力及體積^[4-5]，另外，感應加熱系統之負載，即加熱線圈及加工物件 (work-piece) 在電路上可等效為一電感 L_{eq} 及一電阻 R_{eq} ^[5-6]。

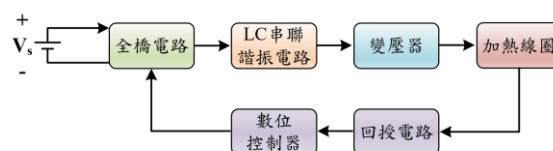


圖 2 全橋 LC 串聯諧振轉換器驅動加熱線圈示意圖

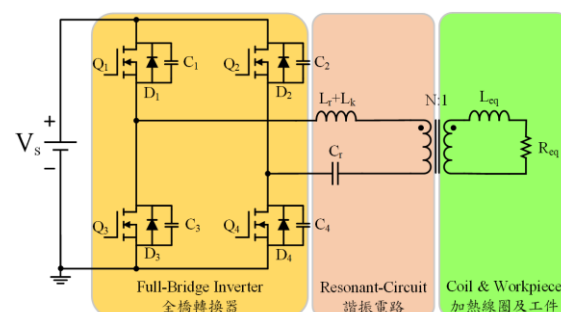


圖 3 全橋 LC 串聯諧振轉換器電路架構圖

3. 全橋串聯諧振轉換器工作模式分析

本文所採用之全橋串聯諧振轉換器在穩態的情況下，在一個完整的切換週期內可分成 6 個工作模式，在各個工作模式中，功

率開關的控制訊號 $V_{gs1}(V_{gs4})$ 、 $V_{gs2}(V_{gs3})$ ，功率開關上的跨壓 $V_{ds1}(V_{ds4})$ 、 $V_{ds2}(V_{ds3})$ 、諧振電感電流 i_{Lr} 、加熱線圈上的跨壓 V_{out} 、功率開關導通電流 i_{ds1} 之時序關係，如圖 4 所示。

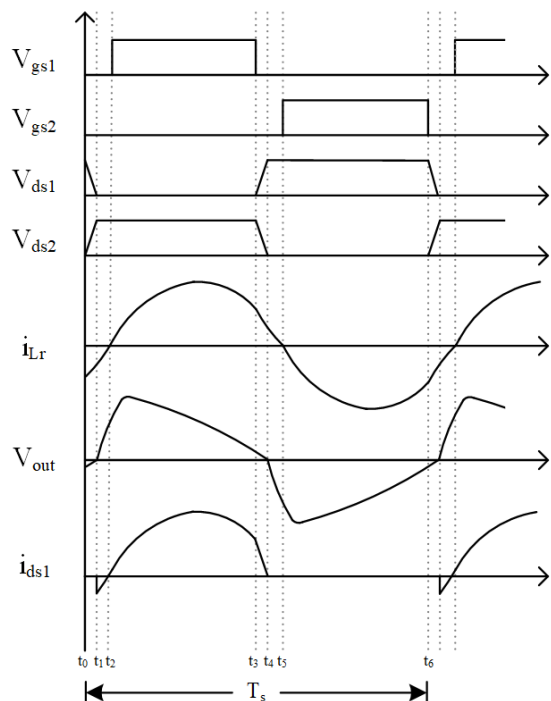


圖 4 全橋串聯諧振轉換器動作時序圖

(1) Mode 1 [t₀-t₁]

在此區間內，功率開關 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均為截止狀態，此時諧振電流 i_{Lr} 因為電感的特性而保持續流，對 C_2 、 C_3 充電，對 C_1 、 C_4 放電，達成 Q_1 、 Q_4 零電壓切換的條件，當 C_1 、 C_4 上電壓放電完成，此階段結束，其時域等效電路圖如圖 5。

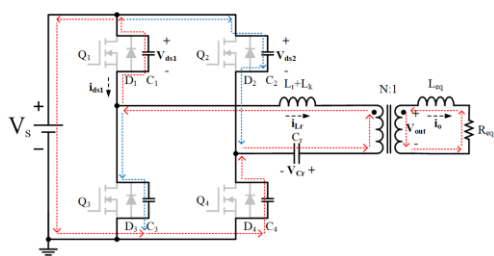


圖 5 全橋諧振轉換器於 Mode 1 之時域等效電路

(2) Mode 2 [t₁-t₂]

在此區間內，功率開關 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均為截止狀態，此時 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 的充放電已結束，諧振電流 i_{Lr} 因為電感的特性而保持續流，所以 D_1 、 D_4 導通，並將 V_{ds1} 、 V_{ds4} 箝位在零電位，持續至下個階段 Q_1 、 Q_4 才會導通，其時域等效電路圖如圖 6。

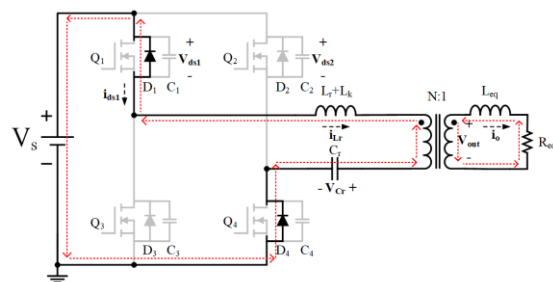


圖 6 全橋諧振轉換器於 Mode 2 之時域等效電路

(3) Mode 3 [t₂-t₃]

在此區間內，功率開關 Q_1 、 Q_4 為導通狀態， Q_2 、 Q_3 為截止狀態，為能量傳遞區間。此時能量由 V_s 經 Q_1 、 Q_4 所提供之路徑對諧振電感 L_r 激磁及對諧振電容 C_r 充電，因此諧振電流 i_{Lr} 持續上升，變壓器將一次側能量耦合至變壓器二次側供給加熱線圈。此狀態在 Q_1 、 Q_4 截止時結束，其時域等效電路圖如圖 7。

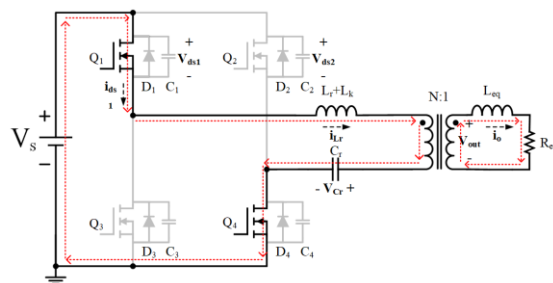


圖 7 全橋諧振轉換器於 Mode 3 之時域等效電路

(4) Mode 4 [t₃-t₄]

在此區間內，功率開關 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均為截止狀態，此時諧振電流 i_{Lr} 因為電感的特性而保持續流，對 C_1 、 C_4 充電，對 C_2 、 C_3 放電，達成 Q_2 、 Q_3 零電壓切換的條件，當 C_2 、 C_3 上電壓放電完成，此階段結束，其時域等效電路圖如圖8。

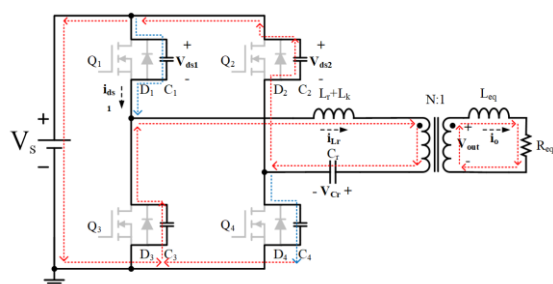


圖8 全橋諧振轉換器於Mode 4之時域等效電路

(5) Mode 5 [t4-t5]

在此區間內，功率開關 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均為截止狀態，此時 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 的充放電已結束，諧振電流 i_{Lr} 因為電感的特性而保持續流，所以 D_2 、 D_3 導通，並將 V_{ds2} 、 V_{ds3} 箝位在零電位，持續至下個階段 Q_2 、 Q_3 才會導通，其時域等效電路圖如圖9。

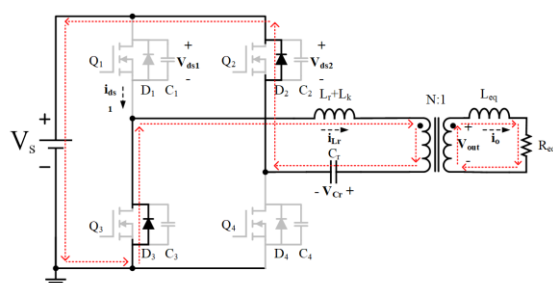


圖9 全橋諧振轉換器於Mode 5之時域等效電路

(6) Mode 6 [t5-t6]

在此區間內，功率開關 Q_2 、 Q_3 為導通狀態， Q_1 、 Q_4 為截止狀態，為能量傳遞區間。此時能量由 V_s 經 Q_2 、 Q_3 所提供之路徑對諧振

電感 L_r 激磁及對諧振電容 C_r 充電，因此諧振電流 i_{Lr} 持續上升，變壓器將一次側能量耦合至變壓器二次側供給加熱線圈。此狀態在 Q_2 、 Q_3 截止時結束，其時域等效電路圖如圖10。

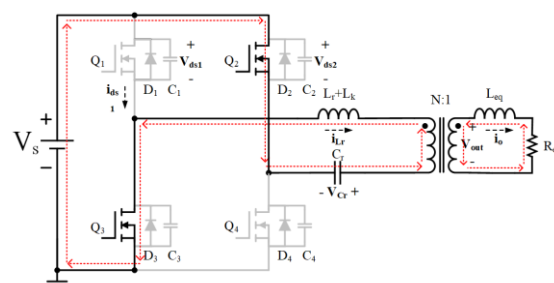


圖10 全橋諧振轉換器於Mode 6之時域等效電路

4. 感應加熱負載特性分析

在2.2節提及，感應加熱系統中的加熱線圈及加工物件可等效成一電阻及一電感，為電感性負載，如圖11所示，在加熱過程中，金屬工件上的物理變化如溫度等，會同時反應在其等效電阻值、電感值上，進而影響感應加熱系統之電路參數如諧振頻率等。

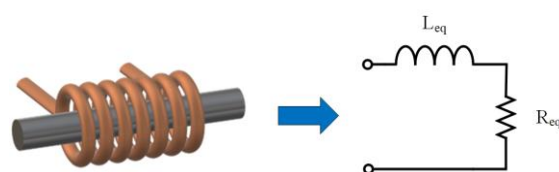


圖11 加熱線圈及加工物件等效電路示意圖

由文獻^[7-9]中可得知，當加工物件被加熱時，其等效電感值會隨著溫度升高而逐漸增加，當工件被加熱至超越居里溫度(Curie temperature)時，金屬的鐵磁性消失，轉換為順磁性，其相對導磁係數(μ_r)驟降為1，導致等效電感值突然下降；而對於等效電阻而言，其隨著溫度改化而變化的趨勢與等效電感相同，在溫度上升至居里溫度前，電阻值與溫度成正比，到達居里溫度後，電阻值則急速

下降，這是由於相對導磁係數降低，減少集膚效應(skin effect)，工件上流通的渦電流分散各處，阻抗面積增大的緣故，因此在設計系統的過程中，須留意溫度對各參數的影響。

此外感應加熱負載等效至一次側的參數會因變壓器匝數比誤差、加工物件材質的不同、元件雜散電感等因素而影響，建議將加熱線圈及加工物件實際接上系統，用LCR meter實際測量等效至電路上的參數較為準確。

5. 感應加熱系統之數位控制器

圖12為感應加熱器之主電路、控制器及週邊電路，包括電流回授電路、電壓回授電路、數位訊號處理器TMS320F28035等之連接示意圖。本文利用數位訊號處理器整合週邊電路，並產生可調變操作頻率之功率開關驅動訊號，其中電壓回授及電流回授信號經由A/D轉換後送至數位控核心進行判斷，以作為過電壓、過電流保護之用途，所研製的系統可驅動1.5kW之感應加熱器。

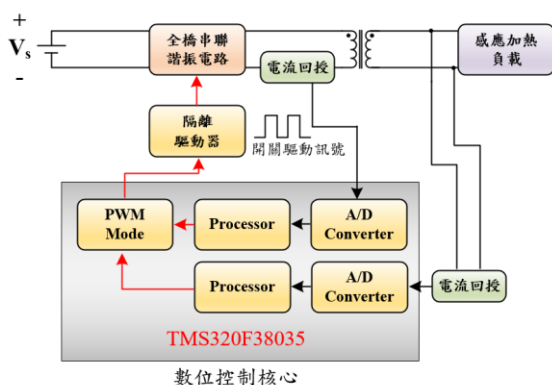


圖12 全橋串聯諧振轉換器之系統方塊圖

三、實驗結果

1. 本文系統規格

本文所實現之全橋串聯諧振感應加熱系統如圖13所示，主要由全橋串聯諧振轉換

器、TMS320F28035數位控制器及加熱線圈(以管徑4.7 mm空心銅管繞製13匝，內徑25 mm)所組成，系統所加熱之對象為長度150 mm、直徑25 mm的低碳鐵棒。藉由調整控制訊號的頻率可以調變加熱功率，其操作頻率範圍介於47 kHz 至66 kHz，此系統之最大輸入功率為1500 W，其主要元件參數如表2所示。

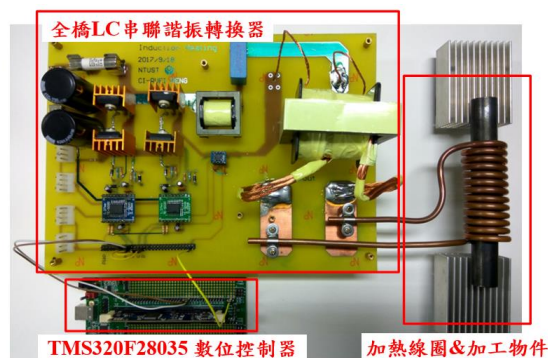


圖13 所實現之全橋串聯諧振感應加熱系統

表2 全橋串聯諧振感應加熱系統主要元件參數

全橋功率開關	SPW47N60C3
諧振電感	120 μ H
諧振電容	330 nF
變壓器匝數比	N : 1
加熱線圈	空心銅管繞製 13 匝

2. 模擬與實測波形

本文使用電路模擬軟體Simplis，對所實現之全橋串聯諧振感應加熱系統進行模擬，藉此驗證系統之實測與模擬結果是否相符。因為感應加熱的負載是變動的，因此本文將加熱線圈及工件在常溫時，以LCR meter所測得的參數代入模擬軟體，並假定其為加工物件於常溫($t=0$)的測試條件，觀察控制訊號、諧振電流、輸出電流、輸出電壓，圖14為電路模擬圖。

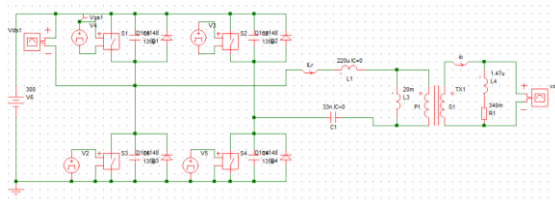


圖 14 模擬全橋串聯諧振感應加熱系統之電路圖

圖 15 為全橋串聯諧振感應加熱系統之模擬波形，其測試條件為輸入電壓 400 V，負載為加熱初時的常溫狀態 ($t=0$)，其中 CH1 為輸出電壓 V_o ，CH2 為開關控制訊號 V_{gs1} 、CH3 為諧振電流 i_{Lr} 、CH4 為輸出電流 i_o 。

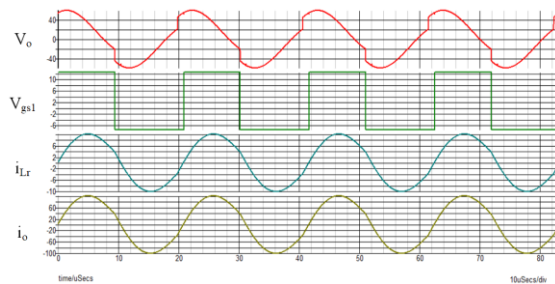


圖 15 加工物件於常溫 ($t=0$) 時之模擬波形

圖 16 及圖 17 為全橋串聯諧振感應加熱系統於實際運轉時所測得之實測波形，圖 16 中波形 CH1 為功率開關跨壓 V_{ds1} ，CH2 為功率開關控制訊號 V_{gs1} ，CH3 為輸出電壓 V_o 其有效值為 46.8 V，CH4 為輸出電流 i_o 其有效值為 47.6 A。而圖 17 中波形 CH1 為功率開關跨壓 V_{ds1} ，CH2 為功率開關控制訊號 V_{gs1} ，可觀察到功率開關已達零電壓切換。

本文所實現之全橋串聯諧振感應加熱系統於滿載運轉時，可將長度 150 mm、直徑 25 mm 的低碳鐵棒在 50 秒內由室溫加熱至發紅 (約 700~800 度)，圖 18 為本系統之加工物件被加熱至發紅的實體照片，可觀察到工件中心已經通紅。

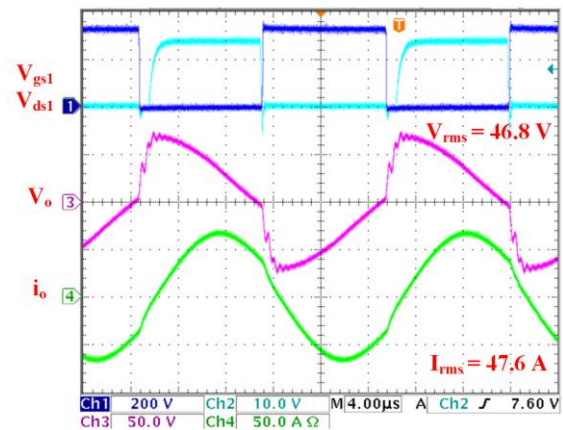


圖 16 所提感應加熱系統於滿載時之實測波形

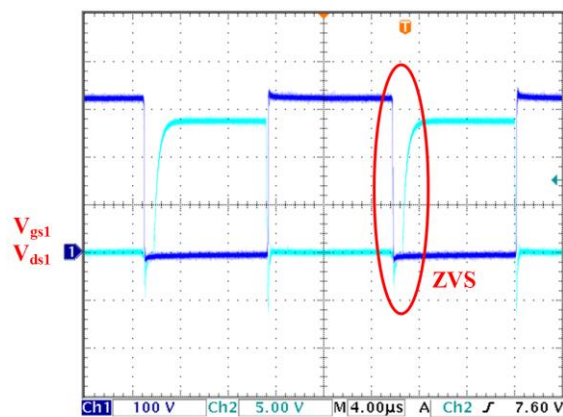


圖 17 功率開關實現零電壓切換之實測波形

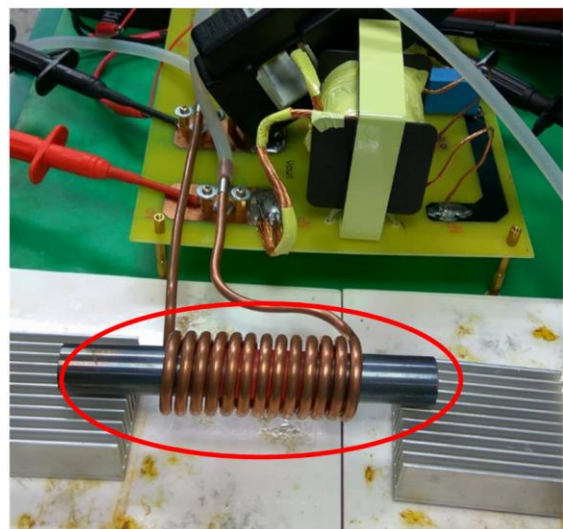


圖 18 加工物件被加熱至發紅照片

四、結論

本文實現了1.5 kW之全橋串聯諧振感應加熱系統，系統之數位控制器可針對轉換器之功率開關操作頻率進行調頻，以控制輸出側的加熱功率，並在滿載的條件下，使加工物件於50秒內加熱至發紅。其次，本文利用變壓器內部的寄生元件及外加諧振元件形成一諧振電路，使系統一次側的功率開關皆可達到零電壓切換，藉此降低切換損失，提高系統效率。此外，本系統在諧振電路後接一降壓變壓器，能減少功率開關及諧振元件的電流應力及體積，並降低系統製作成本。

參考文獻

- [1] 王榮爵，張宏榮，“全橋式零電壓切換技術之感應加熱器”，中國文化大學數位機電科技研究所、建國科技大學機電光系統研究所，華岡工程學報第二十一期，pp.145-154，民國九十六年六月。
- [2] 吳宏遠，“感應加熱系統之研究”，國立高雄應用科技大學電機工程系碩士學位論文，民國一百零二年二月。
- [3] 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, March 2017.
- [4] C. Bi, H. Lu, K. Jia, J. Hu and H. Li, "A Novel Multiple-Frequency Resonant Inverter for Induction Heating Applications," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 12, pp. 8162-8171, Dec. 2016.
- [5] 許國展，“應用於感應加熱的負載串聯共振電壓型反流器設計與研製”，私立中原大學電機工程系碩士學位論文，民國九十一年六月。
- [6] I. Millán, J. M. Burdío, J. Acero, O. Lucía and S. Llorente, "Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating," IET Power Electronics, vol. 4, no. 5, pp. 587-592, May 2011.
- [7] 虞龍，“串並聯諧振逆變器式高頻感應加熱電源的研究”，華南理工大學碩士學位論文，2005年6月。
- [8] S. Chudjuarjeen, A. Sangswang and C. Koompai, "An Improved LLC Resonant Inverter for Induction-Heating Applications With Asymmetrical Control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 7, pp. 2915-2925, July 2011.
- [9] 焦俊生，“高頻感應加熱過程的負載電氣特性分析”，銅陵學院電氣工程系，工業加熱第37卷第2期，pp. 56-58，2008年。