

以 FPGA 實現應用於光伏系統之高升壓多輸出轉換器

Design and Implementation of a High Step-Up Converter with Multiple-Output for PV System Based on FPGA

林彥志
Yen-Chih Lin

陳建富
Jiann-Fuh Chen
國立成功大學電機工程學系

陳律安
Lu-An Chen

Department of Electrical Engineering
National Cheng Kung University
Tainan, Taiwan, R. O. C.
Tel : +886-6-2762707
E-mail : n2697449@mail.ncku.edu.tw

摘要

本文主旨係設計與實現一個應用於光伏系統之新型高升壓多輸出轉換器。系統輸入為太陽能電池模組，具有一個高電壓輸出，與另一個輸出控制電致變色玻璃，以調節穿透之光線。首先提出一新型高升壓轉換器，利用疊接技術、電壓提升技術、耦合電感技術等，提高電壓增益比。另外開關具有電壓箝位技術，可降低開關應力與切換損失，並且回收漏感能量，達到效率之提升。再於耦合電感中加入一繞組，感應能量提供正負電壓以控制電致變色元件。藉由可規劃邏輯閘陣列發展器，以硬體描述語言撰寫與設計控制程式，以進行最大功率追蹤及電致變色層之變色控制。最後，實現一 75 瓦之新型高升壓多輸出之光伏系統，以驗證多輸出轉換器與控制程式之可行性。

關鍵字：高升壓、多輸出轉換器、光伏系統。

Abstract

In this thesis, a high step-up converter with multiple-output for PV system is designed and implemented. This system converts the energy of the solar cell to provide a high voltage output for a load and a low voltage output for an Electrochromic Device. At first, by using coupled-inductor, cascade and voltage-lift techniques, the high step-up converter is proposed for achieving high voltage gains. Since the switch is clamped by a low voltage, the voltage stress and switch losses on the switch can be reduced. Besides, the energy of the leakage inductor is recycled for improving the conversion efficiency. Moreover, a winding is added into the coupled-inductor of the high step-up converter to transfer the energy to provide the Electrochromic Device with positive or negative voltage for decoloring or coloring. By using the FPGA controller, the system can achieve the both functions of maximum power point tracing and the smart color control. Finally, a 75W PV system is implemented to verify the performances of the converter and control program.

Keywords : high step-up, multiple-output, PV system.

I. 簡介

因太陽光電能極具發展潛力，各國皆積極且大量發展太陽能發電系統，我國也已投入太陽光電研究多年，且相關產業發展完整。另外藉由再生能源發展條例的訂定，未來設置太陽光電系統將可進行電力回售，其帶來的商機及效益將吸引更多企業投入。而因設置空間取得不易，未來的大型建築將朝向太陽光伏能與建築結合 (Building Integrated Photovoltaic, BIPV) 之方向發展，故本文中內容將朝向 BIPV 系統之應用進行研究。

因光伏系統之儲能設備容易損壞與劣化且成本較高，故以不經過儲能設備直接與電網併聯之方式將成為主要趨勢。傳統電網併聯型之太陽光電系統，其建構時常先將多片太陽能電池模組進行串並聯組合成為陣列，以達到較高之容量與電壓再進行電網併聯動作。但於陣列中若部分模組發生遮蔽效應、故障或劣化，將造成整體發電量特性曲線嚴重下降，並可能發生多峰現象，造成最大功率追蹤困難，使整體發電量降低。為改善此問題，開始有微型轉換器、微型換流器之概念形成。此概念之系統設置方式是以單一太陽能電池模組搭配一組高升壓轉換器與換流器，結合三者成為一獨立的系統單元。使得各模組可以分別進行最大功率追蹤及電網併聯控制。如此各模組之間不會相互影響，每片模組皆能產出其最大發電量，以增加整體發電效益。本研究即以此概念進行設計[1][2]。

智慧型玻璃帷幕是近年來興起的技術，它是一種可以與生活結合之節能科技。其材料可以分為電致變色 (Electrochromics) 材料、光致變色 (Photochromic) 材料、氣致變色 (Gaschromics) 材料等。其中利用電致變色玻璃技術可有效控制進入室內之日射量，當電致變色玻璃著色時可遮蔽光線透入室內，達到室內溫度降低、節省空調耗電量之效果，故此技術被積極的研究與開發[3]。

II. 光伏系統架構介紹

結合前述因素，本文內容將研製一小型太陽電能轉換應用系統。系統主架構為一單輸入雙輸出電路[4]，搭配可規劃邏輯閘陣列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 進行控制，使系統具有太陽能電池最大功率追蹤功能，以增加系統之效益。系統輸入源為一 75 W 之太陽能電池模組，其中一組輸出將以新型高升壓電路進行升壓動作，將太陽能電池之低電壓提升至足以與市電併聯之電壓等級，以便未來進行電網併聯控制；另一組輸出將進行降壓動作，提供能量於電致變色層，並藉由天候判斷控制輸出正負電壓，以達到著色與去色變化之智慧控制。系統電路架構圖如圖 1 所示此系統可分為四個部分，分別為多輸出轉換器、類比轉數位迴授電路、閘極驅動電路、FPGA 控制器。其中多輸出轉換器由新型高升壓轉換器與一正負電壓變換電路所構成。

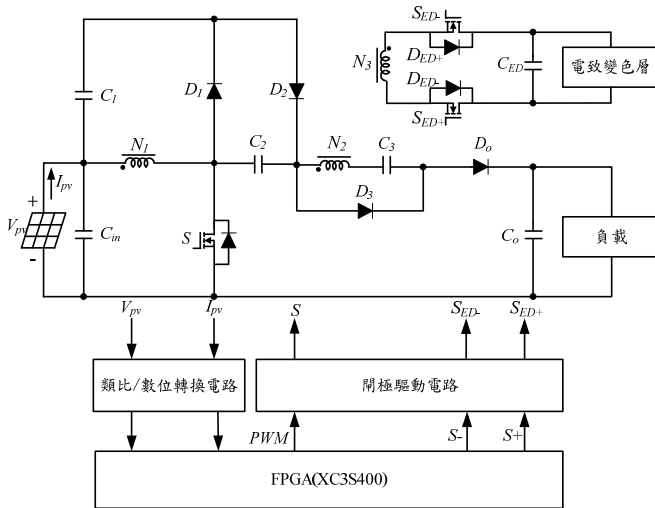


圖 1 光伏系統電路架構圖

III. 新型高升壓轉換器之電路動作分析

圖 2 為本文所提出之新型高升壓轉換器之架構圖。其基礎架構為一個輸出端與輸入端疊接之升壓式轉換器，此部分不只有基本升壓式轉換器之升壓功能，還具有對開關元件之電壓箝位功能，使電路可選用導通電阻較低之開關元件降低導通損失。第二部分加上電壓提升技術之結構。第三部分為耦合電感升壓技術，並於輸出路徑上串接一順向式升壓結構增加增益。由上述三個部分結合，以達成高升壓之目的，且儲存於漏感之能量可被回收，進而提升轉換效率[5-7]。

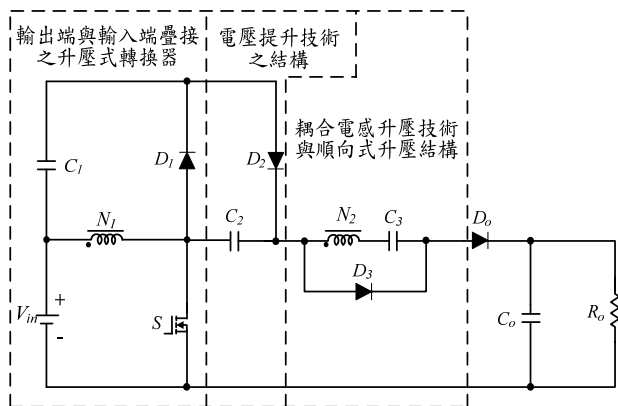


圖 2 新型高升壓轉換器之架構圖

以下將進行新型高升壓轉換器工作於連續導通模式下，於一個開關工作週期內之動作模式分析。圖 3 為本文所提出之新型高升壓轉換器電路圖，轉換器中各元件之電壓與電流之定義方向如圖所示。其中耦合電感之等效電路以激磁電感 L_m 、漏感 L_{k1} 與 L_{k2} 以及理想變壓器線圈 N_1 與 N_2 表示。對應之動作波形圖如圖 4 所示。

模式 I ($t_0 < t < t_1$)：此區間內，開關 S 導通，二極體 D_2 與 D_o 導通，而 D_1 與 D_3 截止。延續上一個工作狀態，在開關 S 導通之後，由於二次側漏感 L_{k2} 上的電感電流續流而漏感能量釋放至輸出端，電流 i_{k2} 逐漸變小。此時輸入電壓 V_{in} 對激磁電感 L_m 和漏感 L_{k1} 儲能，電流 i_{Lk1} 與 i_{Lm} 呈線性上升。同時 V_{in} 與 V_{C1} 一起經開關 S 對 C_2 儲能。直到二次側漏感能量釋放結束而電流 $i_{Lk2}=0$ 時，

此區間結束。在此工作區間內電流 $i_{Lk2}=i_{D_o}$ ，由於漏感電流 i_{Lk2} 呈現逐漸下降至零的情況，可解決二極體 D_o 上的電流反向回復時間之問題。

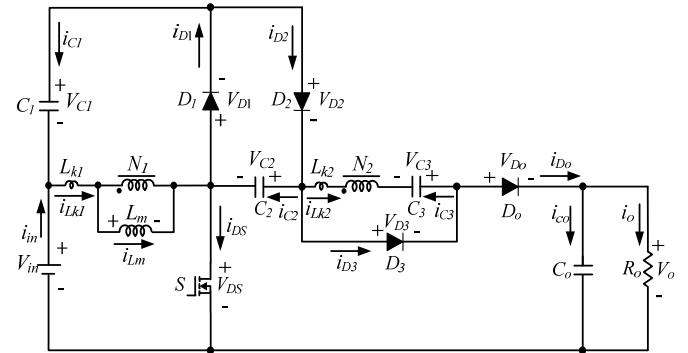


圖 3 新型高升壓轉換器電路圖

模式 II ($t_1 < t < t_2$)：此區間內，開關 S 持續導通，二極體 D_2 與 D_3 導通，而 D_1 與 D_o 截止。 V_{in} 持續對激磁電感 L_m 和 L_{k1} 儲能，電流 i_{Lk1} 與 i_{Lm} 且呈線性上升。而輸入電壓 V_{in} 與 V_{C1} 一起經開關 S 對 C_2 儲能。同時輸入電壓 V_{in} 透過耦合電感於二次側感應出電壓 nV_{in} ，經 D_3 對電容 C_3 充電，在此時耦合電感可視為一組變壓器使用，如同順向能量傳送(Forward)機制對 C_3 儲能。負載所需之能量由 C_o 提供。當 C_2 儲能至 $V_{C2}=V_{in}+V_{C1}$ 而 $i_{D2}=0$ 時，此區間結束。

模式 III ($t_2 < t < t_3$)：此區間內，開關 S 持續導通，二極體 D_3 導通，而 D_1 、 D_2 與 D_o 截止。 V_{in} 持續對激磁電感 L_m 和 L_{k1} 儲能，電流 i_{Lk1} 與 i_{Lm} 呈線性上升。同時輸入電壓 V_{in} 透過耦合電感感應電壓至二次側經 D_3 對電容 C_3 充電。負載所需之能量由 C_o 提供。在開關 S 截止時，此區間結束。

模式 IV ($t_3 < t < t_4$)：在此區間內，開關 S 截止，二極體 D_1 與 D_3 導通，而 D_2 與 D_o 截止。延續上一個狀態，當開關截止之後，由於一次側漏感 L_{k1} 的電流 i_{Lk1} 和二次側漏感 L_{k2} 上的電流 i_{Lk2} 必須續流，而分別將能量回收至 C_1 與 C_2 ，而 i_{Lk1} 與 i_{Lk2} 之電流值逐漸變小。負載所需之能量由 C_o 提供。當漏感 L_{k2} 能量釋放結束而 $i_{Lk2}=0$ 時，此區間結束。

模式 V ($t_4 < t < t_5$)：在此區間內，開關 S 持續截止，二極體 D_1 與 D_o 導通，而 D_2 與 D_3 截止。激磁電感 L_m 與一次側漏感 L_{k1} 一方面將能量釋放至 C_1 ，使漏感能量得以回收。另一方面與 C_2 和 C_3 一起經由 D_o 將能量傳送至輸出。而 i_{D1} 與 i_{Lk1} 逐漸下降，而 i_{D_o} 逐漸上升，直到 $i_{Lk1}=i_{D_o}$ 亦即 $i_{D1}=0$ 時，此區間結束。而在此模式、模式 IV 與模式 VI 之開關截止後的三個區間內，開關 S 之跨壓皆被箝制在 $V_{DS}=V_{in}+V_{C1}$ ，因此具有降低開關耐壓之特性。

模式 VI ($t_5 < t < t_6$)：此工作區間內，開關 S 持續截止，二極體 D_o 導通，而 D_1 、 D_2 與 D_3 截止。激磁電感 L_m 、一次側漏感 L_{k1} 、 C_2 和 C_3 一起經由 D_o 將能量傳送至輸出， i_{D_o} 逐漸下降且電流值約等於 i_{Lk1} 。直到開關導通時，此區間結束。

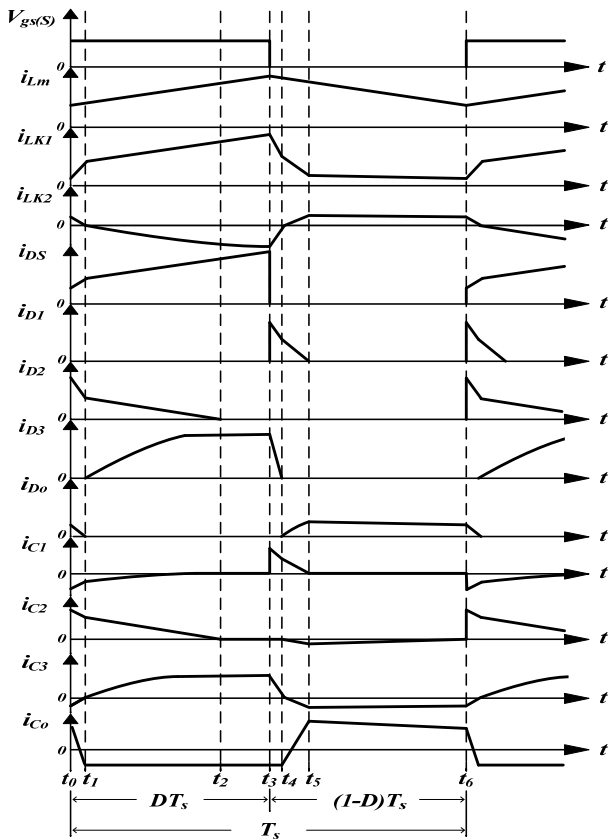


圖 4 新型高升壓轉換器之動作波形圖

接著將分析轉換器操作於連續導通模式下的穩態特性。此時先忽略漏感 L_{kl} 與 L_{k2} ，而耦合電壓等效電路只考慮激磁電感 L_m 與理想變壓器之線圈 N_1 與 N_2 。分析上忽略電路之暫態動作，僅考慮開關導通與截止兩種工作狀態，進行轉換器之電壓增益之推導。

在開關導通時($0 < t < DT_s$):

$$V_{Lm} = V_{in}$$

$$V_{N2} = nV_{Lm} = nV_{in}$$

在開關截止時($DT_s < t < T_s$):

$$V_{Lm} = -V_{C1}$$

$$V_{N2} = nV_{Lm} = -nV_{C1} = V_{in} + V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} - V_o$$

$$= 2(V_{in} + V_{C1}) + nV_{in} - V_o$$

其中

$$V_{C2} = V_{in} + V_{C1}$$

$$V_{C3} = nV_{in}$$

利用伏秒平衡定理可列出以下二組方程式:

$$\int_0^{DT} (V_{in}) dt + \int_{DT}^{T} (-V_{C1}) dt = 0 \quad (7)$$

$$\int_0^{DT} (nV_{in}) dt + \int_{DT}^{T} [2(V_{in} + V_{C1}) + nV_{in} - V_o] dt = 0 \quad (8)$$

由式(7)與式(8)可推導得 V_{C1} 與 V_o 之電壓值如下列所式:

$$V_{C1} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (9)$$

$$V_o = \frac{2+n}{1-D} V_{in} \quad (10)$$

IV. 正負電壓變換電路動作模式分析

以下將說明電壓變換電路之動作原理，其可分為正電壓輸出與負電壓輸出兩種形式，配合圖 1 中之右上部分之電路圖與圖 5 之兩種形式下電路動作波形圖進行分析。欲得正電壓輸出，則開關極訊號 $V_{gs(s+)}$ 需維持高電壓準位而 $V_{gs(s-)}$ 需維持低準位。反之欲得負電壓輸出，則開關極訊號 $V_{gs(s-)}$ 需維持高電壓準位而 $V_{gs(s+)}$ 需維持低準位。定義耦合電感之線圈匝數比為 $n_{31} = N_3 / N_1$ 。

(a) 正電壓輸出模式

在($0 < t < DT_s$)區間內開關 S 導通， V_{Lm} 之跨壓為 V_{in} ，耦合電感於三次繞組感生電壓 $n_{31}V_{in}$ ，因感生之電壓方向使開關 S_+ 導通而 S_+ 截止。能量以順向式機制，經由開關 S_+ 與開關 S_+ 之反向並聯二極體 D_+ 傳送至輸出電容 C_{ED} 與電致變色層，於輸出端建立一正電壓 $V_{ED} = n_{31}V_{in}$ 。在($DT_s < t < T_s$)區間內開關 S 截止， V_{Lm} 之跨壓為 $-V_{C1}$ ，耦合電感於三次繞組感生電壓 $-n_{31}V_{C1}$ ，但因電壓方向無法構成能量傳送路徑，開關 S_+ 與 S_+ 皆截止，電致變色層所需能量與正極性電壓由電容 C_{ED} 提供。

(b) 負電壓輸出模式

在($DT_s < t < T_s$)區間內開關 S 截止， V_{Lm} 之跨壓為 $-V_{C1}$ ，耦合電感於三次繞組感生電壓 $-n_{31}V_{C1}$ ，因感生電壓之方向使開關 S_+ 導通而 S_+ 截止。能量以返馳式機制，經由開關 S_+ 與開關 S_+ 之反向並聯二極體 D_+ 傳送至輸出電容 C_{ED} 與電致變色層，將於輸出電容上建立負電壓 $V_{ED} = -n_{31}V_{C1}$ 。在($0 < t < DT_s$)區間內開關 S 導通， V_{Lm} 之跨壓為 V_{in} ，耦合電感於三次繞組感生電壓 $n_{31}V_{in}$ ，但因電壓方向無法構成能量傳送路徑，開關 S_+ 與 S_+ 皆截止，電致變色層所需能量與負極性電壓由電容 C_{ED} 提供。

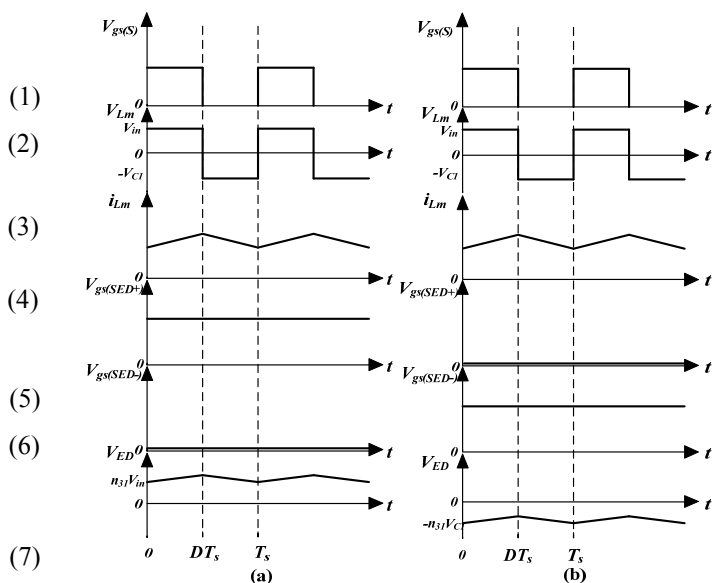


圖 5 正負電壓變換電路波形圖(a)正輸出(b)負輸出

V. 數位控制電路規劃

本文研製之光伏系統是藉由現場可程式化邏輯陣列進行數位控制，達成太陽能模組之最大功率追蹤功能與電致變色層之變色控制功能，以完成此光伏系統之能量轉換。首先由外部類比轉數位晶片將太陽能模組的

電壓與電流之類比數值轉換為八位元之數位訊號，輸入控制晶片裡進行最大功率追蹤運算與正負電壓運算。最後將輸出 1 個脈波寬度調變訊號(PWM)與 2 個正負電壓控制訊號(S+, S-)，以控制轉換器的開關元件切換，進行系統控制。控制晶片動作示意圖如圖 6 所示[8]。

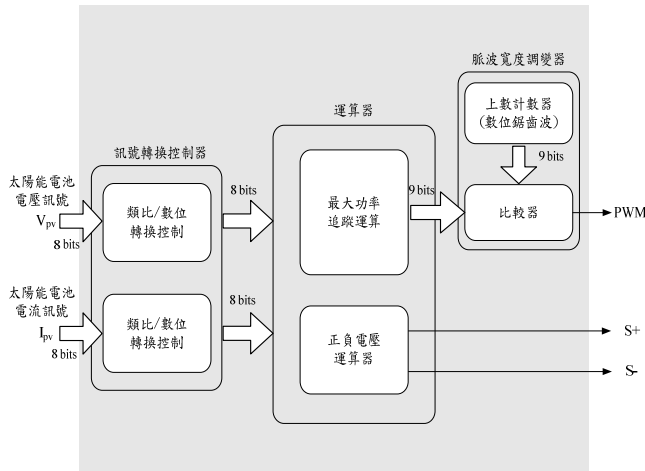


圖 6 數位控制晶片動作示意圖

VI. 系統之電路製作

如圖 7 所示為光伏能系統實作電路實體圖，而其電路規格與參數如表 1 所示。圖 7 中 A 區為多輸出轉換器，由新型高升壓轉換器與正負電壓變換器結合而成，主架構為新型高升壓電路以提供能量給測試電阻負載，再於耦合電感中加入三次繞組，感應能量經電壓變換器提供電致變色層正負電壓；B 區為開關元件之驅動電路，以光耦合放大器 TLP250 將 FPGA 輸出之 PWM、S+與 S-三個開關控制訊號由 3.3 V 提升至 12 V，增加驅動能力以驅動電路上的 MOSFET 開關元件；C 區為電壓與電流訊號取樣迴授之類比/數位轉換電路，透過 FPGA 進行轉換控制，將類比訊號轉換為數位資料，將數位資料讀取至 FPGA 中進行運算；D 區為 FPGA 控制器，內部主要為太陽能最大功率追蹤控制、電致變色層正負電壓判斷控制與類比/數位轉換控制之功能。

表 1 多輸出轉換器之電路規格與參數表

最大輸出功率	75 W
輸入電壓範圍	10 V ~ 21 V
第一組輸出電壓範圍	180 V ~ 240 V
第二組輸出電壓範圍	-5 V ~ 5 V
匝數比 ($N_1:N_2:N_3$)	15 : 75 : 6 (turns)
開關切換頻率	40 kHz
激磁電感	100 μ H
一次測漏感	1.5 μ H
二次測漏感	32.5 μ H
電容 C_1 、 C_2	120 μ F/50 V
電容 C_3	150 μ F/200 V
第一組輸出電容 C_o	470 μ F/250 V
第二組輸出電容 C_{DE}	22 μ F/100 V

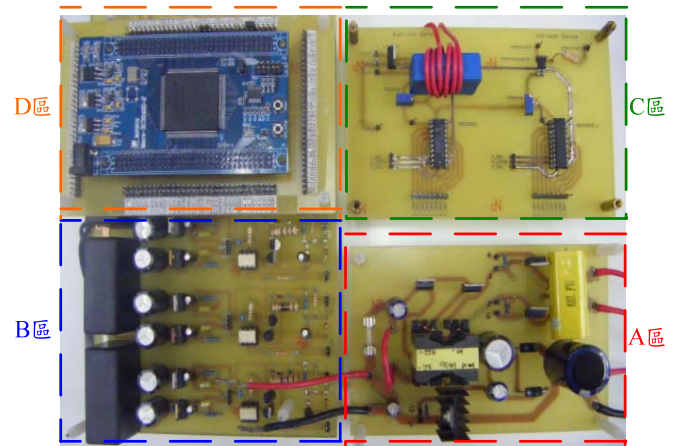


圖 7 光伏能系統實作電路實體圖

VII. 新型高升壓轉換器實測結果

將新型高升壓轉換器實體電路進行量測，以驗證理論分析結果，波形可與圖 4 之理論波形相互比較。量測時輸入電壓為 16 V，輸出電壓 220 V，於滿載下進行測試。由圖 8 可得知漏感電流 i_{LK1} 在開關截止後由續流路徑下降為零，沒有突波產生。而 i_{LK2} 在開關切換瞬間皆由續流路徑快速下降為零之後由另一方向儲能，故漏感能量可被回收。由圖 9 可觀察開關截止時電壓被 V_{in} 與 V_{Cl} 所箝制，達到電壓箝位之效果。由圖 10 則可觀察出，輸出電壓可升壓至 220V，具有高升壓之效果。

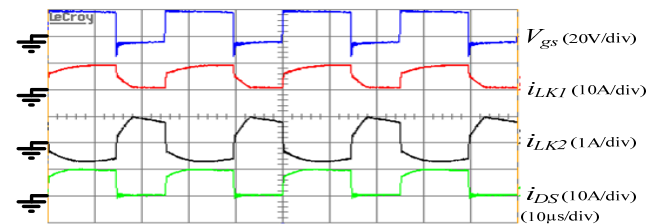


圖 8 V_{gs} , i_{LK1} , i_{LK2} , i_{DS} 之實測波形

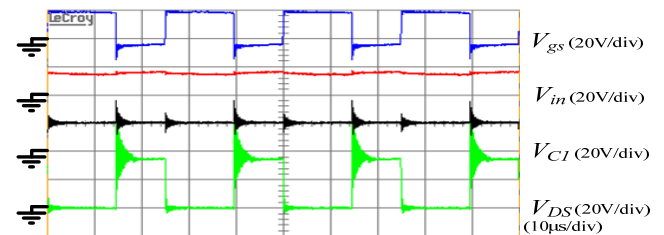


圖 9 V_{gs} , V_{in} , V_{Cl} , V_{DS} 之實測波形

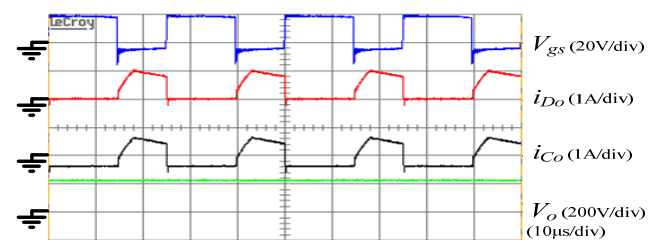


圖 10 V_{gs} , i_{Do} , i_{Co} , V_{Do} 之實測波形

VIII. 最大功率追蹤實測結果

圖 11 為太陽能模組之輸出功率與日射量於紀錄時間內之變動曲線。由圖中可發現模組之輸出功率隨日射

量上升而增加，並隨日射量下降而減少，具有追蹤之功能。在日射量約為 800 W/m^2 時，輸出功率可達 50 W 左右；當日射量下降至 600 W/m^2 時，輸出功率下降至 35 W 左右，符合最大功率點之大小與日射量成正比關係之太陽能電池特性。而圖 12 則為模組之電壓與電流之變動曲線，可發現電壓與電流的於時間內之變化亦與圖 11 中日射量變化成正比關係，符合太陽能電池之特性。

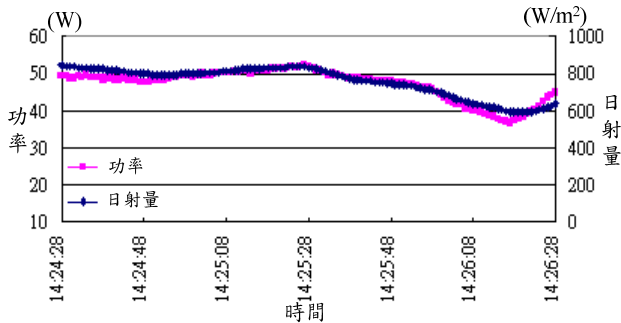


圖 11 太陽能模組之功率與日射量之變動曲線

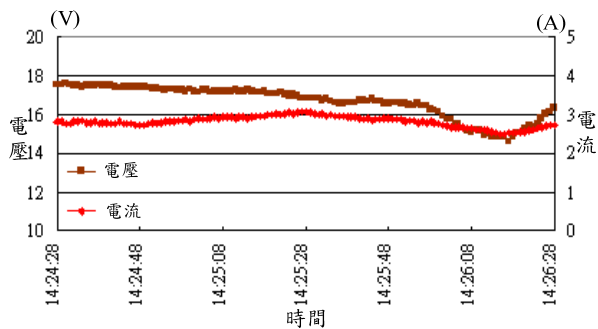


圖 12 太陽能模組之電壓與電流之變動曲線

IV. 正負電壓變換電路實測結果

在新型高升壓轉換器中之耦合電感加入三次側繞組，感應能量以供給正負電壓變換電路。藉由控制加於正負電壓變換電路之開關訊號，可改變施加於電致變色層之電壓極性，進而控制其著色與去色。依照個人主觀判斷認定以 400 W/m^2 做為變色控制之界線，而 400 W/m^2 時太陽能模組所輸出之功率約為 25 W 。故控制程式設定變化條件為輸入功率小於 25 W 時，輸出正電壓極性，電致變色層開始去色；當輸入功率大於 25 W 時，輸出負電壓極性，電致變色層開始著色。因為程式設計為每秒進行一次判斷，以避免電致變色層來不及反應，因此加載之後經過一秒控制訊號才會進行改變。

圖 13 為轉換器輸入功率 P_{pv} 、電壓 $V_{gs(SED+)}$ 與 $V_{gs(SED-)}$ 之波形圖，測試時以瞬間加載之方式改變輸入功率，而同時偵測電壓與電流訊號以示波器內部數學功能相乘，而得到圖中 P_{pv} 之波形。由圖中可知當輸入功率小於 25 W 時，訊號 $V_{gs(SED-)}$ 為低準位、訊號 $V_{gs(SED+)}$ 為高準位，表示電致變色層進行去色；由圖中可知當輸入功率大於 25 W 時，訊號 $V_{gs(SED-)}$ 為高準位、訊號 $V_{gs(SED+)}$ 為低準位，表示電致變色層開始著色。圖 14 為轉換器輸入功率 P_{pv} 、電壓 V_{ED} 波形圖，由圖中可知當輸入功率 P_{pv} 轉變為大於 25 W 時，供給電致變色層之輸出電壓 V_{ED} 電位由正電壓變成負電壓，由此驗證控制程式之判斷功能變換電路動作正確。

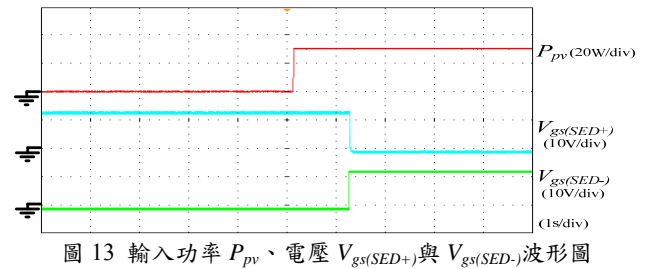


圖 13 輸入功率 P_{pv} 、電壓 $V_{gs(SED+)}$ 與 $V_{gs(SED-)}$ 波形圖

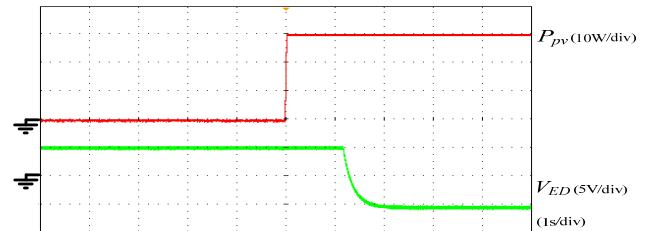


圖 14 輸入功率 P_{pv} 、電壓 V_{ED} 波形圖

V. 結論

本論文研製一個應用於光伏系統之新型高升壓多輸出轉換器，其規格為 75 W 。文中提出一新型高升壓轉換器，以提供高電壓輸出，並加入第二組輸出之正負電壓變換電路，以控制電致變色層。新型高升壓多輸出轉換器於輸入電壓為 $10 \text{ V} \sim 21 \text{ V}$ ，第一組輸出電壓約為 $180 \text{ V} \sim 220 \text{ V}$ ，而第二組輸出透過控制可進行極性變換而輸出約 $+5 \text{ V}$ 或 -5 V 。並且使用 FPGA 進行轉換器控制，以擾動觀察法達成對太陽能電池模組之最大功率追蹤功能，並自動判斷控制第二組輸出正負電壓變換電路之輸出極性。當日射量上升使模組功率大於 25 W 時，正負電壓變換電路輸出負電壓於電致變色層，以進行著色反應遮蔽透入室內之光線；反之小於 25 W 則輸出正電壓，使電致變色層進行去色反應。

致謝

本研究感謝國科會計畫 NSC 98-3114-E-006-010 與經濟部能源局計畫 98-D0204-2 之經費贊助。

參考文獻

- [1] 陳建富，太陽光電能之應用，電機月刊，第二十卷第二期，第 118-127 頁，2010 年。
- [2] 楊素華、蔡泰成，太陽光能發電元件—太陽能電池，科學發展，第 390 期，第 51-55 頁，2005 年。
- [3] 鄭惟元，淺談玻璃表面處理之技術發展，玻璃資訊月刊，第 1-12 頁，2007 年。
- [4] A. A. Boora, F. Zare, G. Ledwich and A. Ghosh, "A New DC-DC Converter with Multi Output : Topology and Control Strategies," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 13, pp. 468-474, Sep. 2008.
- [5] F. L. Luo and H. Ye, "Positive Output Super-Lift Converters," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 18, no. 1, part 1, pp. 105 - 113, Jan. 2003.
- [6] R. J. Wai and R. Y. Duan, "High-efficiency DC/DC converter with high voltage gain," IEE Proc. Electric Power Applications, vol. 152, no. 4, pp. 793-802, July 2005.
- [7] K. C. Tseng and T. J. Liang, "Analysis of integrated boost-flyback step-up converter," IEE Proc. Electric Power Applications, vol. 152, no. 2, pp. 217-225, March 2005.
- [8] 鄭群星，FPGA/CPLD 數位晶片設計入門使用 xilinx ise 發展系統，全華科技圖書股份有限公司，2005 年。