

藉由 Simulink 結合 ModelSim 學習單相相控整流器原理與其實驗 驗證

蔡明發* 周家榮 柯富瀾 張逸凡 黃彥騰 王瑞坤

明新科技大學電機工程系

摘要

學習相位控制整流器原理是電力電子與電動機控制課程重要的一環，本文藉由 Simulink 與 ModelSim 連結之模擬軟體工具，學習相位控制整流器的工作原理，文中分別建構單相相控整流器之類比與數位控制模型，進行模擬與分析，並分別利用類比運算放大器與 Altera Flex8282 FPGA 可程式數位邏輯元件設計相控整流器控制電路，來進行實驗驗證。學生們可藉此 Simulink 與 ModelSim 連結之共同模擬環境，配合硬體實作與實驗結果，更能清楚地瞭解相控整流器驅動原理。

關鍵字：相控整流器、Simulink 模擬軟體、ModelSim 模擬軟體、FPGA 可程式邏輯元件

Learning the Principle of Single-Phase Controlled Rectifier via Simulink Linked with ModelSim and Experimental Verifications

Ming-Fa Tsai Chia-Jung Chou Fu-Ching Ke Yi-Fan Zhang Yan-Teng Huang Jui-Kum Wang

Department of Electrical Engineering, Mingshin University of Science and Technology

Abstract

Learning the principle of phase-controlled rectifier is one important aspect in the courses of power electronics and electrical motor control. In this paper, the application of Simulink linked with ModelSim is developed for simulation and learning the phase-control rectifier technique. The single-phase controlled rectifier simulation model for analog and digital control has been constructed, respectively. For experimental verifications, the phase-controlled rectifier circuits based on analog operational amplifiers and an Altera Flex 8282 FPGA programmable digital logic device have also been designed, respectively. Students can then use the simulation model together with the experimental results to learn the driving principle of the phase-controlled rectifier more easily.

Keyword : Phase-Control Rectifier, Simulink, ModelSim, FPGA Programmable Logic Device.

I. 前言

相控整流器工作原理的學習，是電力電子與電動機控制課程中重要的一環，其中以閘流體全橋相位控制整流轉換器來取代傳統的二極體全橋整流器，將市電交流信號經由相位控制，轉換為不同的直流平

* 電機工程系助理教授 地址：新竹縣新豐鄉新興路 1 號 Tel : 03-5593142 E-mail : mftsai@must.edu.tw

均電壓輸出，其應用如直流馬達驅動器、粒子加速器 (particle accelerator) 與磁界定熔合反應爐 (magnetically confined fusion reactor) 等之高功率電源供應器 [1]-[3]。

欲讓學生了解相控整流器工作原理，利用模擬軟體工具進行系統的模擬與分析是非常重要的，Matlab/Simulink [4][5] 是目前最常採用的控制系統模擬軟體工具，因為它不但提供了豐富的元件庫，以便使用者可以建構多種不同運算與機電整合之動態模擬系統模型；且可與數位 IC 設計模擬軟體 ModelSim 相連結，形成一個共同模擬環境 [6][7]。一個實際的單相相控整流器系統如圖一所示，其基本的架構可分為閘流體全橋相控整流轉換器與相移觸發控制電路兩部份，使用者可在 Simulink 與 ModelSim 相連結的共同模擬環境下，建構以上兩個部份之模型方塊 (model block) 並做連接，以便進行模擬分析。

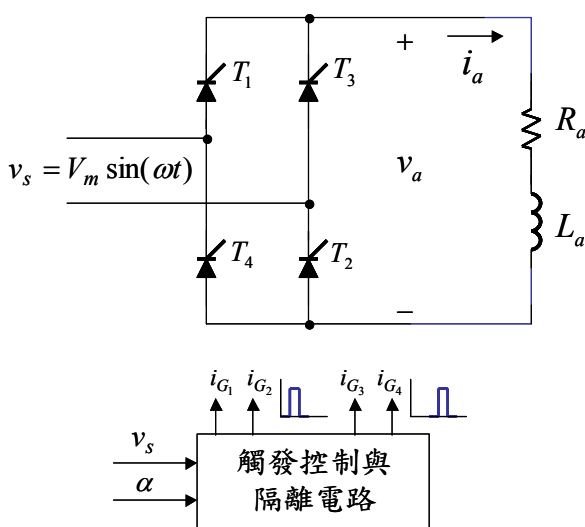
雖然文獻上已有不少應用 Matlab/Simulink 於各種轉換器與馬達控制器設計的報導 [8]-[13]，但卻未見其結合 ModelSim 模擬軟體應用於相控整流器的例子，本文的目的即在提出在 Simulink 與 ModelSim 之共同模擬環境下，建構單相相控整流器之模擬模型方塊，進行類比與數位控制之模擬與分析，其中在數位控制方面，作者使用 VHDL 硬體描述語言來設計數位控制 IC 電路 [14]。之後，利用類比運算放大器與 FPGA 可程式數位邏輯元件，分別實現類比與數位控制電路，來進行實驗驗證。如此可做為電力電子學或電動機控制實習課程之教材，亦可做為 FPGA 數位電路設計應用之教材，使學生能藉由模擬與硬體實作後，更容易瞭解相控整流器工作原理，以收到事半功倍的學習效果。

II. 相控整流器與其觸發控制原理

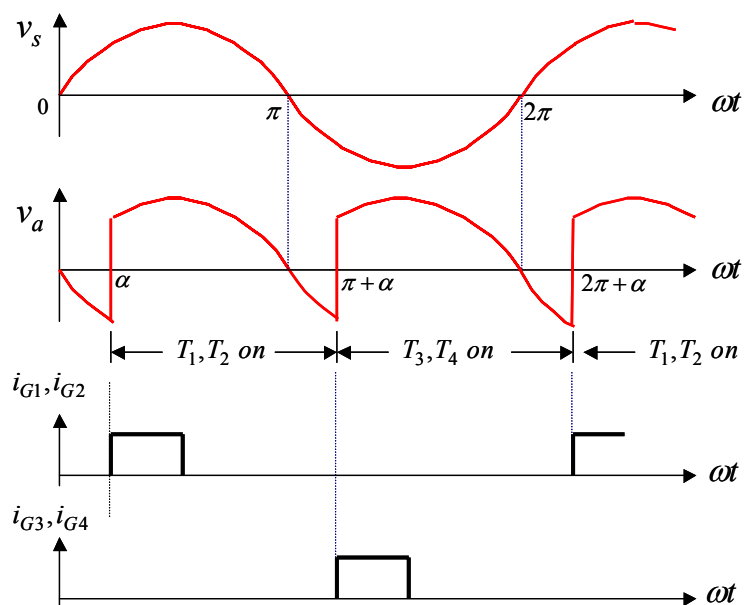
相控整流器的目的，即是將市電交流信號轉換為不同的平均直流電壓輸出。一個單相相控整流器電路如圖一所示，輸入信號為市電交流電源

$$v_s = V_m \sin \omega t \tag{1}$$

其中 V_m 為市電單相交流信號振幅， ω 為角頻率，其工作原理為利用一個觸發控制電路，設定相角延遲



圖一 單相相控整流器系統架構



圖二 相控整流器輸出與觸發波形示意圖

命令 α ，使得閘流體 T_1 與 T_2 在輸入波形 v_s 的正零交越點(positive zero-crossing)之後延遲 α 角度導通，並持續導通半週期時間，在此時段 T_3 與 T_4 截止；之後，在 v_s 的負零交越點(negative zero-crossing)之後延遲 α 角度，再切換觸發閘流體 T_3 與 T_4 ，使其導通另半週期時間，在此時段 T_1 與 T_2 被強迫換相截止，如此反覆運作，可得輸入信號 v_s 與輸出信號 v_a 的關係示意圖如圖二之上半部所示，輸出信號 v_a 的平均值如下：

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (2)$$

因此，改變 α 值，可得到不同的整流輸出波形與其平均值。由(2)可知當 $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ ，則 $V_{dc} \geq 0$ ；當 $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ ，則 $V_{dc} \leq 0$ 。但因閘流體開關電流為單向流動，故輸出電流恆大於等於零($i_a \geq 0$)，且整流器負載必需為電感性負載，否則，若為電阻性負載，因輸出電流恆大於等於零，則輸出負載電壓不可能為負值。

相控整流器輸出電流之微分方程式如下：

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_s \sin \omega t, \quad \alpha \leq \omega t < \pi + \alpha. \quad (3)$$

此輸出電流波形方程式之解包含齊次解(homogeneous solution)與特解(particular solution)如下：

$$i_a = i_h + i_p. \quad (4)$$

其中齊次解

$$i_h = k_1 e^{-R_a/L_a t}, \quad (5)$$

特解

$$i_p = k_2 \sin \omega t + k_3 \cos \omega t, \quad (6)$$

k_1 、 k_2 及 k_3 為待解之常數，先將特解 i_p 代入(3)式後可得

$$(L_a \omega k_2 + R_a k_3) \cos \omega t + (R_a k_2 - L_a \omega k_3) \sin \omega t = V_s \sin \omega t. \quad (7)$$

由(7)式利用等號兩邊比較係數，可得

$$L_a \omega k_2 + R_a k_3 = 0, \quad (8)$$

$$R_a k_2 - L_a \omega k_3 = V_s. \quad (9)$$

可解得 $k_2 = R_a V_s / Z^2$ ， $k_3 = -L_a \omega V_s / Z^2$ ，其中 $Z = \sqrt{L_a^2 \omega^2 + R_a^2}$ ，再代入(6)式後得

$$i_p = \frac{V_s}{Z} \sin(\omega t - \theta) \quad (10)$$

其中

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{L_a \omega}{R_a} \right). \quad (11)$$

整合(5)及(10)式得

$$i_a = k_1 e^{-\frac{R_a t}{L_a}} + \frac{V_s}{Z} \sin(\omega t - \theta). \quad (12)$$

因在穩態時，輸出電流之起始值 $i_a(\omega t = \alpha)$ 與終止值 $i_a(\omega t = \pi + \alpha)$ 相同，可解得

$$k_1 = \frac{-\frac{2V_s}{Z} e^{\frac{R_a \alpha}{L_a \omega}} \sin(\alpha - \theta)}{1 - e^{-\frac{R_a \pi}{L_a \omega}}}. \quad (13)$$

代回(12)式得

$$i_a(t) = \frac{-\frac{2V_s}{Z} e^{\frac{R_a \alpha}{L_a \omega}} \sin(\alpha - \theta)}{1 - e^{-\frac{R_a \pi}{L_a \omega}}} e^{-\frac{R_a t}{L_a}} + \frac{V_s}{Z} \sin(\omega t - \theta). \quad (14)$$

由(14)式知，此輸出電流將隨輸入電壓的變化而波動起伏，當整個半週期輸出電流大於零時，整流器工作在連續導通模式(continuous conduction mode, CCM)，否則，若有一段輸出電流下降至零，整流器工作在不連續導通模式(discontinuous conduction mode, DCM) [15]。

當工作在不連續導通模式時，輸出電流之起始值與終止值為零，故由(12)式當 $\omega t = \alpha$ 時，令 $i_a = 0$ ，則 k_1 可寫成

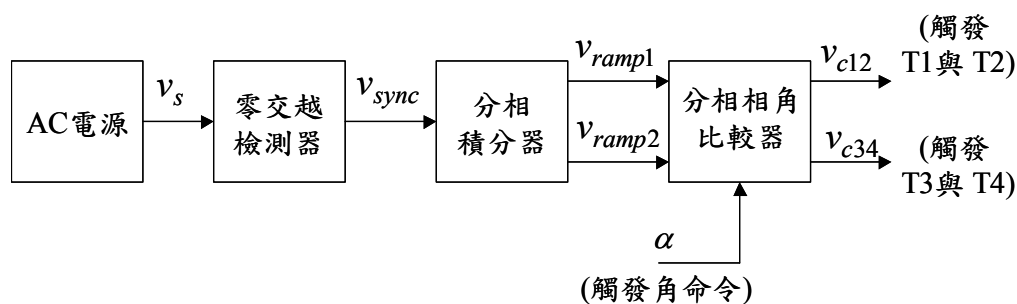
$$k_1 = -\frac{V_s}{Z} e^{\frac{R_a \alpha}{L_a \omega}} \sin(\alpha - \theta). \quad (15)$$

再代回(12)式，得出在不連續導通模式輸出電流方程式為

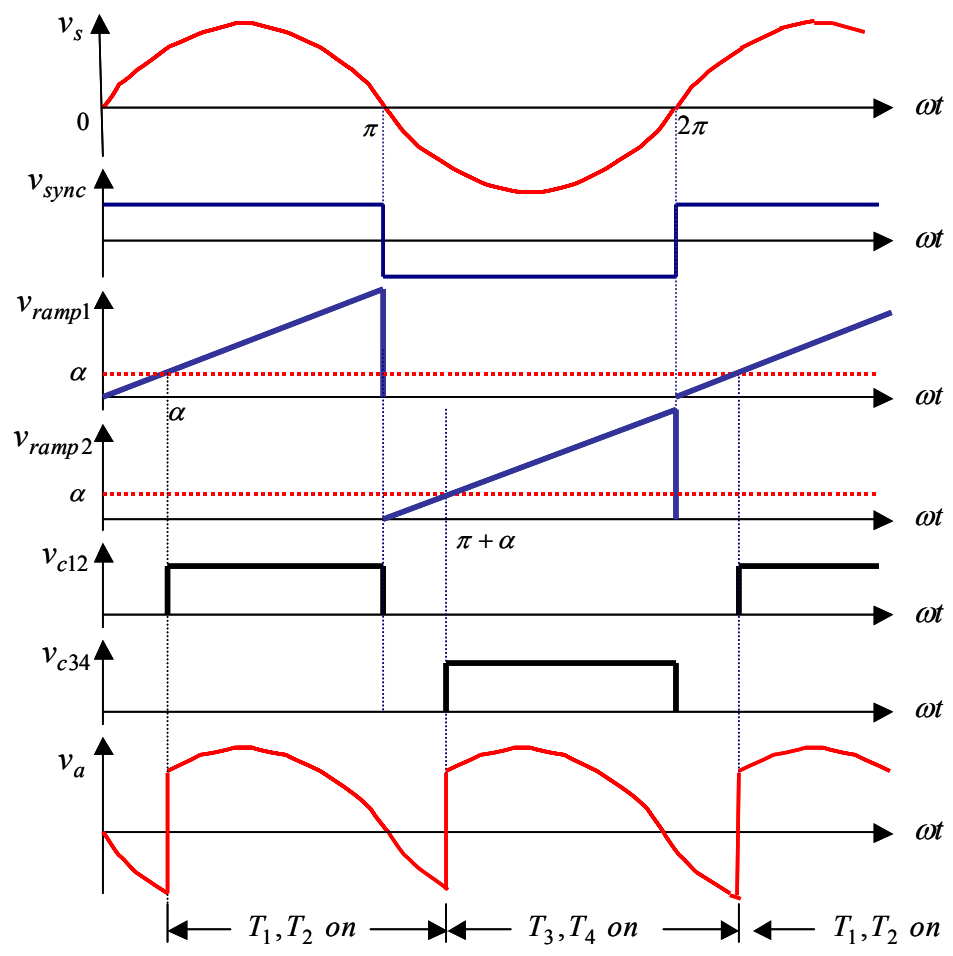
$$i_a(t) = \frac{V_s}{Z} [-e^{-\frac{R_a t}{L_a}} \sin(\alpha - \theta) + \sin(\omega t - \theta)]. \quad (16)$$

在觸發控制電路方面，雖然目前市面上已有相控 IC 可取得，如西門子公司提供之 TCA 785 [16]，本文提出與其不同之架構，如圖三所示，其工作原理說明如下：首先利用一個零交越檢測器來檢測交流

輸入電源信號 v_s 之極性，當 v_s 為正半週時，輸出信號 v_{sync} 為一正值常數；當為負半週時，輸出為一負值常數。此輸出信號再經一個分相積分器，使得 v_{sync} 在正值常數時經積分產生三角鋸齒波信號 v_{ramp1} ；在負值常數時經積分產生另一個三角鋸齒波信號 v_{ramp2} ，此兩個三角鋸齒波信號再分別與相角命令 α 比較，以分別產生 v_{c12} 與 v_{c34} 之觸發控制信號，使得 v_{c12} 在 $\omega t = \alpha$ 時同時觸發閘流體 T_1 與 T_2 導通，此時 T_3 與 T_4 強迫換相截止；而 v_{c34} 則在 $\omega t = \pi + \alpha$ 時同時觸發閘流體 T_3 與 T_4 導通，此時 T_1 與 T_2 強迫換相截止

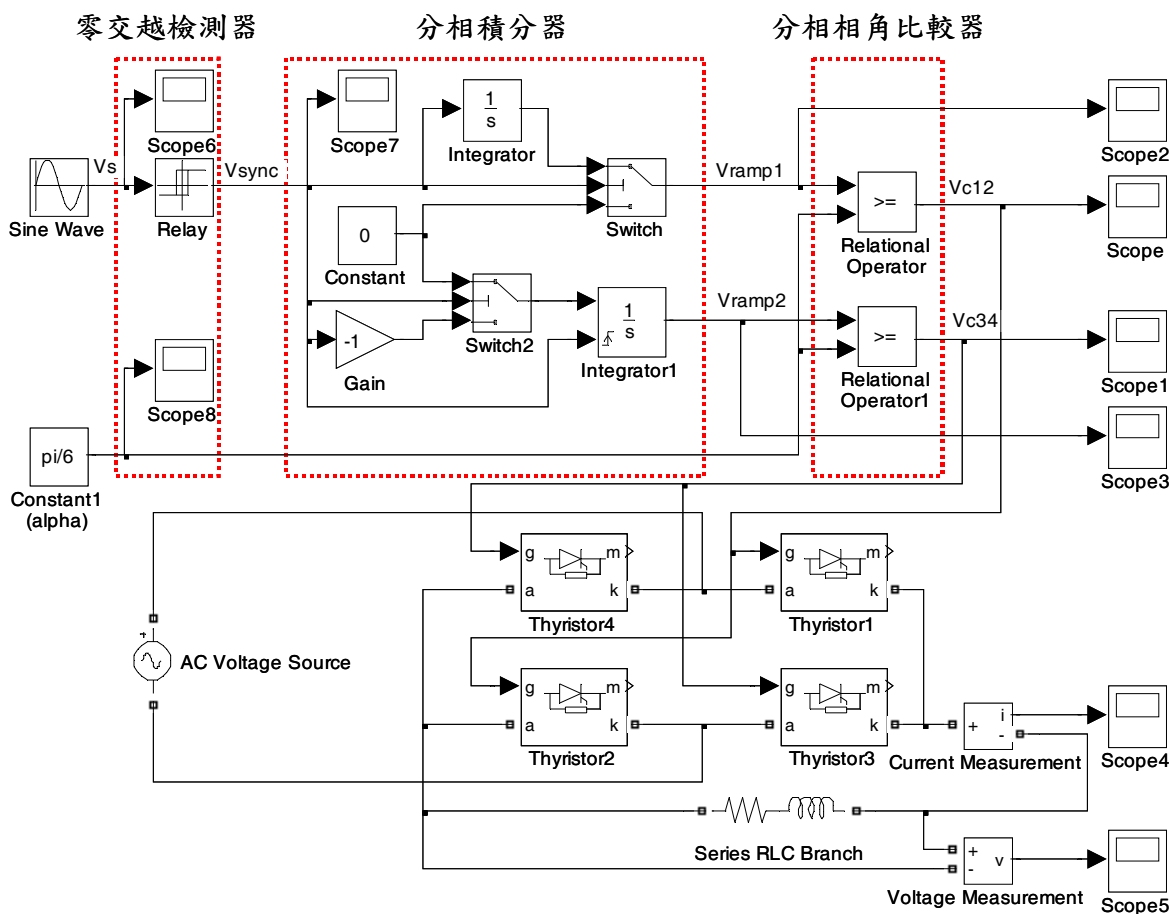


(a)



(b)

圖三 相控整流器觸發控制電路：(a)方塊圖，(b)內部與輸出波形示意圖



圖四 利用Simulink建構之類比控制單相相控整流器模擬模型

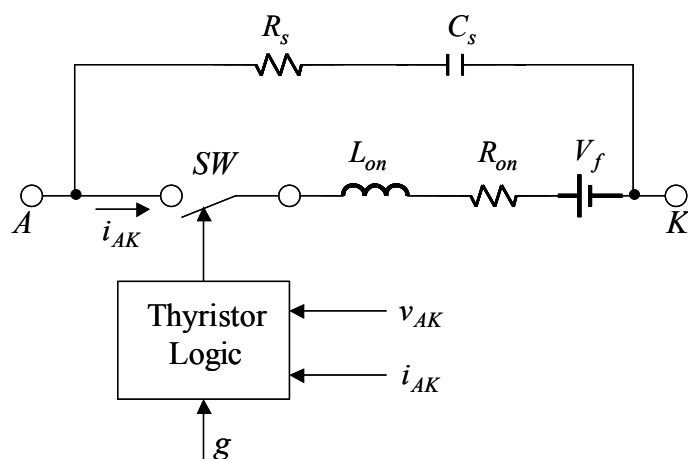
止，如此週而復始，每隔半個週期，即交互觸發一組配對閘流體導通，而另一組配對閘流體被迫換相截止。

III. 類比控制模型建構、模擬與實驗驗證

A. 類比控制模型建構與模擬分析

依據上述之工作原理，藉由 Simulink 建構之類比控制單相相控整流器的模擬模型如圖四所示，圖上半部為類比觸發控制電路模擬方塊模型；下半部為全橋式閘流體電路與其 R-L 負載模型。

在上半部之觸發控制模擬方塊中，零交越檢測器是由一個繼電器(Relay)模型來完成，其中之切換點 (switch on point)設定為零，當 $v_s > 0$ ，繼電器件 switch on， v_{sync} 輸出為 377；當 $v_s < 0$ ，繼電器 switch off， v_{sync} 輸出為 -377，使得右方之分相積分器上半部在積分正半週期時間後，產生 0 至 π 之三角鋸齒波 (v_{ramp1})；分相積分器之下半部之功能，乃是使得輸入信號 v_s 在通過負零交越點(負半週)時才開始積分，當 v_s 在正半週時，此積分器為 reset 狀態，當 v_{sync} 在負半週積分前，先經過一反相器再積分，使得同樣產生 0 至 π 之三角鋸齒波(v_{ramp2})。

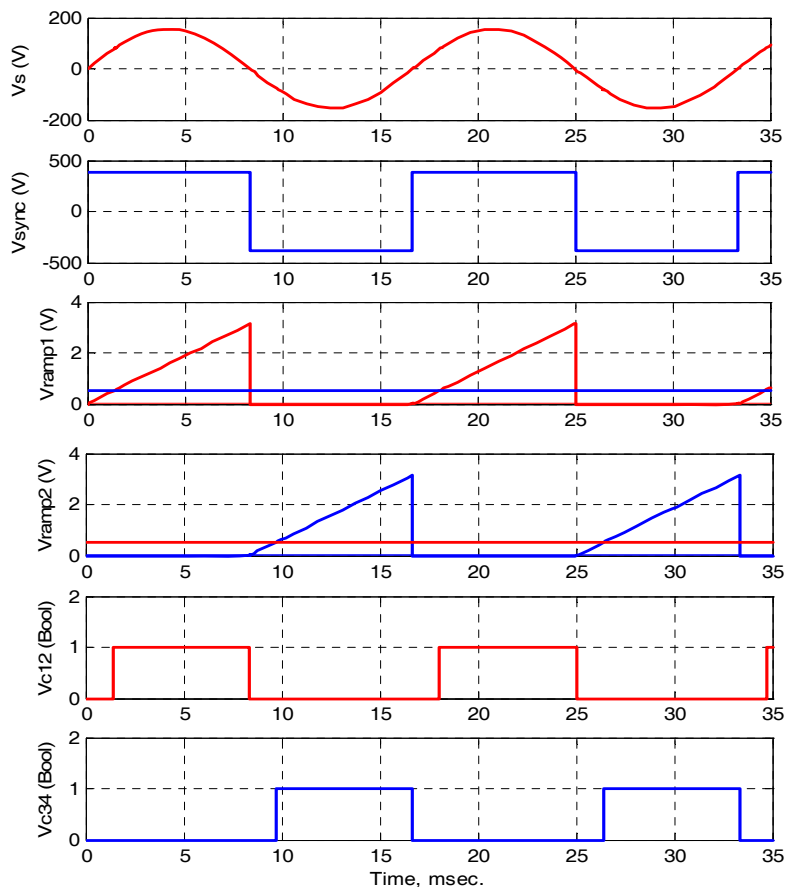


圖五 Simulink內建之閘流體等效電路模型

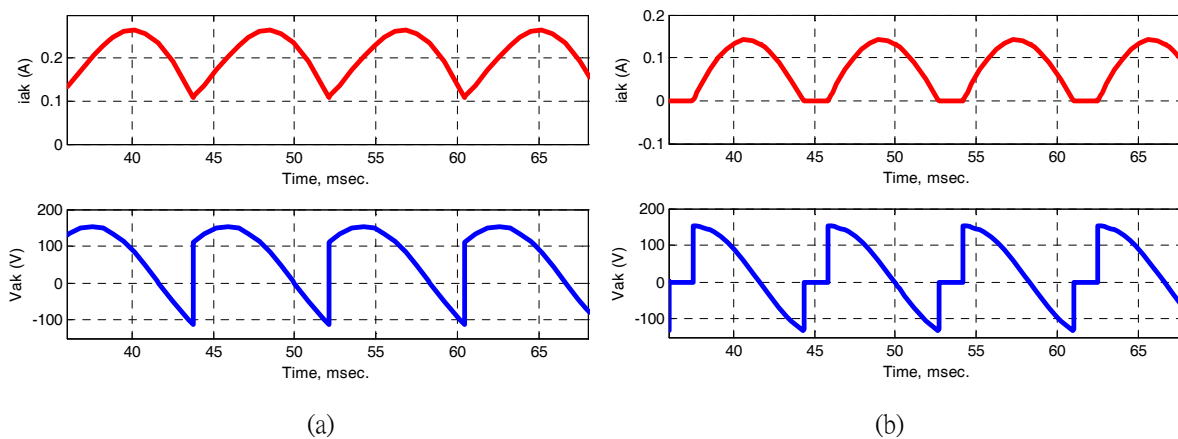
如前所述，此兩個三角鋸齒波信號再分別與相角命令 α 比較，以分別產生 v_{c12} 與 v_{c34} 之觸發控制信號，之後將 v_{c12} 接至全橋式閘流體電路模型元件 T_1 與 T_2 的閘極；並將 v_{c34} 接至模型元件 T_3 與 T_4 的閘極，此四個閘流體模型元件是從 Simulink 的 SimPowerSysytems 內之 Power Electronics 元件庫所叫出，其等效電路模型如圖五所示，是由一個電阻、電感、一個順向電壓源 V_f 以及一個理想開關元件相串聯後，再與一個 RC 緩震電路(snubber circuit)並聯起來而成，使用者可設定此閘流體模型內部之順向電壓降 V_f 與啓始電流 I_c 之參數值，當端電壓 $v_{AK} \geq V_f$ ；且維持 $v_g > 0$ 在一段時間，使得 $i_{AK} > I_c$ 時，則閘流體模型導通；反之當 $i_{AK} = 0$ ，且維持 $v_{AK} < 0$ 在一段截止時間(turn-off time) T_q 時，則閘流體模型截止。此外，使用者可依實際閘流體之資料(data sheet)，在此閘流體模型之參數表設定 R_{on} 與 L_{on} 之值，為方便起見，在一般應用上可將 L_{on} 設定為零。

B. 類比控制模擬分析

當設定閘流體參數為 $R_{on} = 0.001\Omega$ ， $L_{on} = 0H$ ， $V_f = 0.8V$ ， $I_c = 0A$ ， $R_s = 1M\Omega$ ， $C_s = 1.0\mu F$ ，以及 RL 負載之電阻 $R = 333\Omega$ 、 $L = 2H$ ，且設定相角命令 $\alpha = \pi/6$ ，所得觸發控制電路模擬結果如圖六所示，可看出其中觸發電路內部波形 v_{sync} 、 v_{ramp1} 、 v_{ramp2} 與輸出波形 v_{c12} 、 v_{c34} 和前面圖三之示意圖是一致的。圖七(a)是觸發相角 $\alpha = \pi/4$ 之 RL 負載輸出端電流與電壓波形，可看出輸出電流大於零，故在連續導通模式下工作，峯值電流約 0.26A；圖七(b)為觸發相角 $\alpha = \pi/2$ 時之 RL 負載輸出端電流與電壓波形，可看出其電流在後段週期下降至零且保持為零，直到下一次換相觸發時間電流才漸增，故是在不連續導通模式下工作，可知在相角增加時，因平均電壓變少，輸出電流亦變小，將會進入不連續導通模式

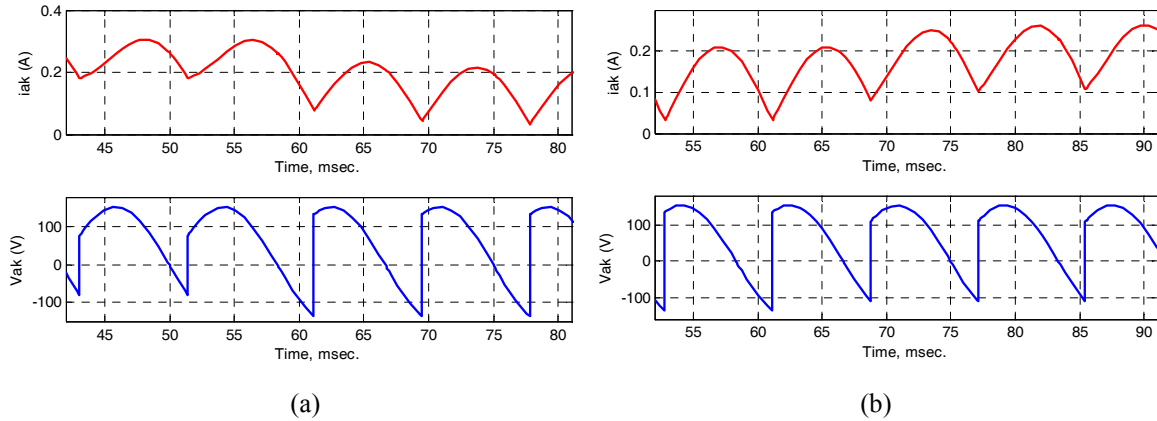


圖六 相控整流器輸出與觸發電路內部模擬波形($\alpha=\pi/6$)

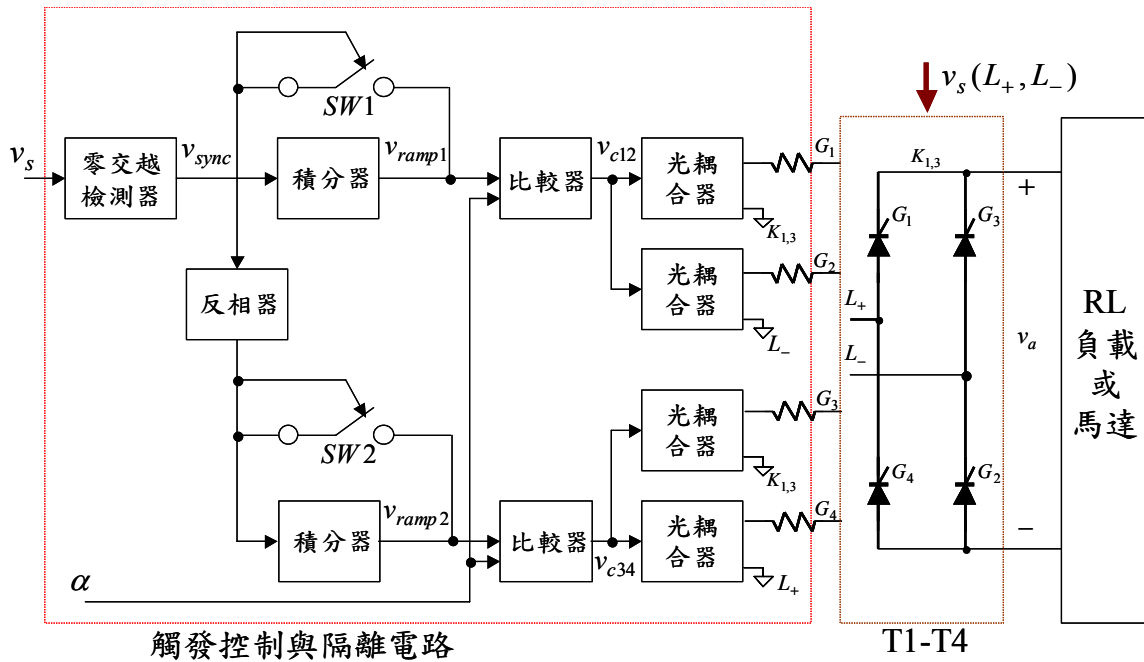


圖七 整流器電流與電壓輸出波形: (a) $\alpha=\pi/4$ (連續導通模式), (b) $\alpha=\pi/2$ (不連續導通模式)

下工作，從圖七(b)中亦可看出當電流下降至零時，其電壓波形亦由負值快速地回復至零。圖八所示為瞬間改變觸發角時，整流器輸出電流與電壓波形之動態行為，由圖八(a)可看出當觸發角 α 從 30° 瞬間變化至 60° 時，約經過一個週期後，輸出電流之峯值約從 0.3A 漸漸下降至 0.21A ；由圖八(b)可看出當觸發



圖八 瞬時改變觸發角整流器電流與電壓輸出波形: (a) 當 Time=55ms, $\alpha = 30^\circ \rightarrow 60^\circ$, (b) 當 Time=65ms, $\alpha = 60^\circ \rightarrow 45^\circ$

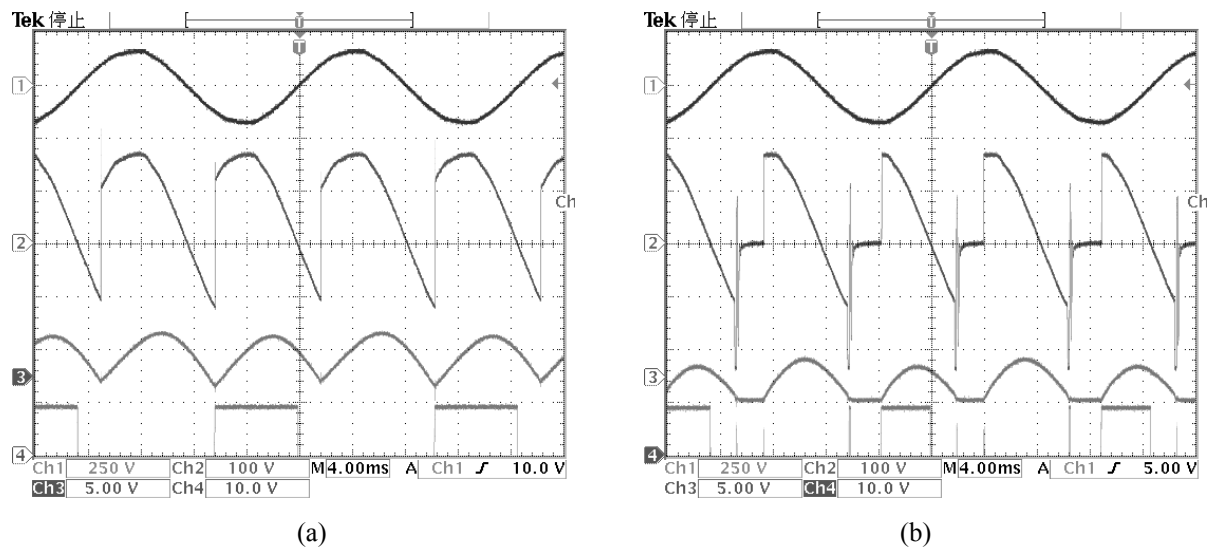


圖九 相控整流器電路方塊圖

角 α 從 60° 瞬間變化至 45° 時，約經過一個週期後，輸出電流之峯值約從 0.21A 漸漸上升至 0.26A。

C. 類比控制電路設計與實驗驗證

經由前述之相控整流器中觸發控制與閘流體換相工作原理，利用運算放大器之類比相控整流器電路其方塊圖如圖九所示。類比電路相角命令以一個電位計(可變電阻)來設定，電位計輸出分別與觸發控制電路中之上、下兩個積分器產生的三角鋸齒波比較，以產生觸發脈波，再利用四個光耦合器 TLP250 [17]，或一個四通道光耦合元件 PC847[18] (PC847 較便宜，但其輸出為反相)，產生觸發四個閘流體



圖十 類比控制實驗波形：Ch1：輸入電壓 v_s ，Ch2：輸出電壓 v_a ，Ch3：輸出負載電流 i_a (0.05A/V)，Ch4：觸發控制信號 v_{cl2} ，(a) $\alpha = \pi/4$ ，(b) $\alpha = \pi/2$ 。

TYN690 (耐壓 600V、耐流 20A) 的控制信號[19]，其中光耦合器需另外以三組隔離電源(12V)來供應其電源，三組隔離地線分別為 $K_{1,3}$ 、 L_+ 與 L_- ，其中 L_- 亦是輸入交流電源與觸發控制電路地線。但若為更精簡電路起見，可用脈衝變壓器(pulse transformer)取代光耦合器，此時可以省略該三組隔離電源。在觸發控制電路方塊中兩個開關(SW1 與 SW2)是以電晶體來實現，此電路架構簡單，很容易在連續三小時的實習課中完成，並進行實驗。

圖十為分別在連續導通模式($\alpha = \pi/4$)與不連續導通模式($\alpha = \pi/2$)之輸入、輸出電壓、輸出電流與觸發控制(v_{cl2})實驗波形，可看出當觸發相角增加，負載電流峯值變小，且進入不連續導通模式，與前面圖七之模擬結果相一致。

IV. 數位控制模型建構、模擬與實驗驗證

A. 數位相位觸發控制器設計

在數位觸發控制電路設計方面，圖九中之積分器與比較器可分別利用8位元計數器與數位比較器取代，圖十一(a)所示為使用VHDL硬體描述語言所設計之數位觸發控制電路，其單體宣告(entity)包括3個輸入信號(clk 、 V_{sync_in} 、 α)與2個輸出信號(V_{c12_out} 、 V_{c34_out})，輸入時脈(clk)為3.6864 MHz， V_{sync_in} 為經零交越檢測電路產生的相位同步信號， α 為數位相角命令，架構(architecture)由三個

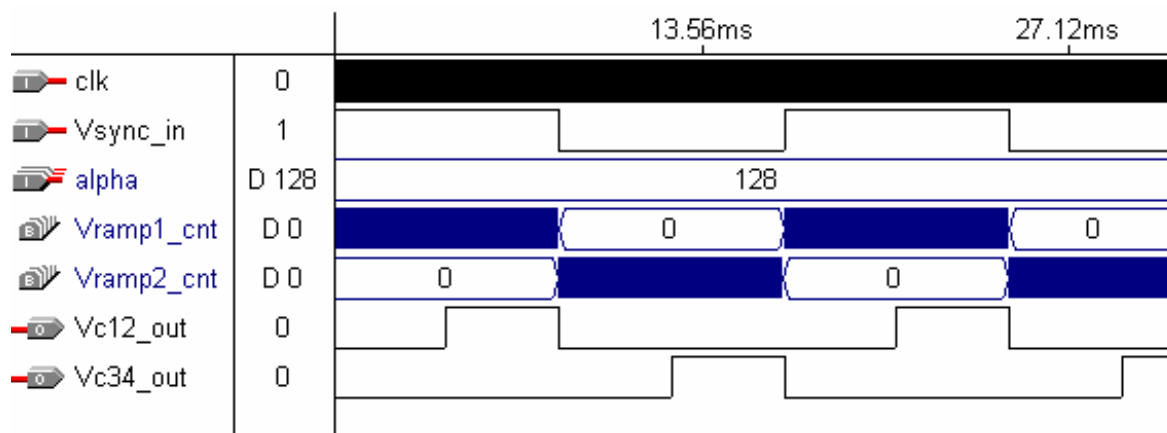
```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;
entity phase_ctrl_5 is
    port( clk,Vsync_in:in std_logic;
          alpha:in std_logic_vector(7 downto 0);
          Vc12_out,Vc34_out:out std_logic);
end phase_ctrl_5;
architecture behav of phase_ctrl_5 is
    signal counter_clk:std_logic:= '0';
    signal cnt:std_logic_vector(6 downto 0):="0000000";
    signal Vramp1_cnt:std_logic_vector(7 downto 0):=
        "00000000";
    signal Vramp2_cnt:std_logic_vector(7 downto 0):=
        "00000000";
begin
    process(clk) --clk freq=3.6864MHz,div by 120
    begin
        if (clk'event and clk='1')then
            if cnt = 120 then
                counter_clk <= not counter_clk;
                cnt <= "0000001";
            elsif cnt = 60 then
                counter_clk <= not counter_clk;
                cnt <= cnt + '1';
            else cnt <= cnt + '1';
            end if;
        end if;
    end process;

    process(counter_clk,Vsync_in)
    Begin
        if (counter_clk'event and counter_clk='1')then
            if Vsync_in='1' then
                Vramp2_cnt <= "00000000";
                if Vramp1_cnt < 255 then
                    Vramp1_cnt <= Vramp1_cnt + '1';
                else Vramp1_cnt <= "00000000";
                end if;
            else
                Vramp1_cnt <= "00000000";
                if Vramp2_cnt < 255 then
                    Vramp2_cnt <= Vramp2_cnt + '1';
                else Vramp2_cnt <= "00000000";
                end if;
            end if;
        end if;
    end process;
end behav;

```

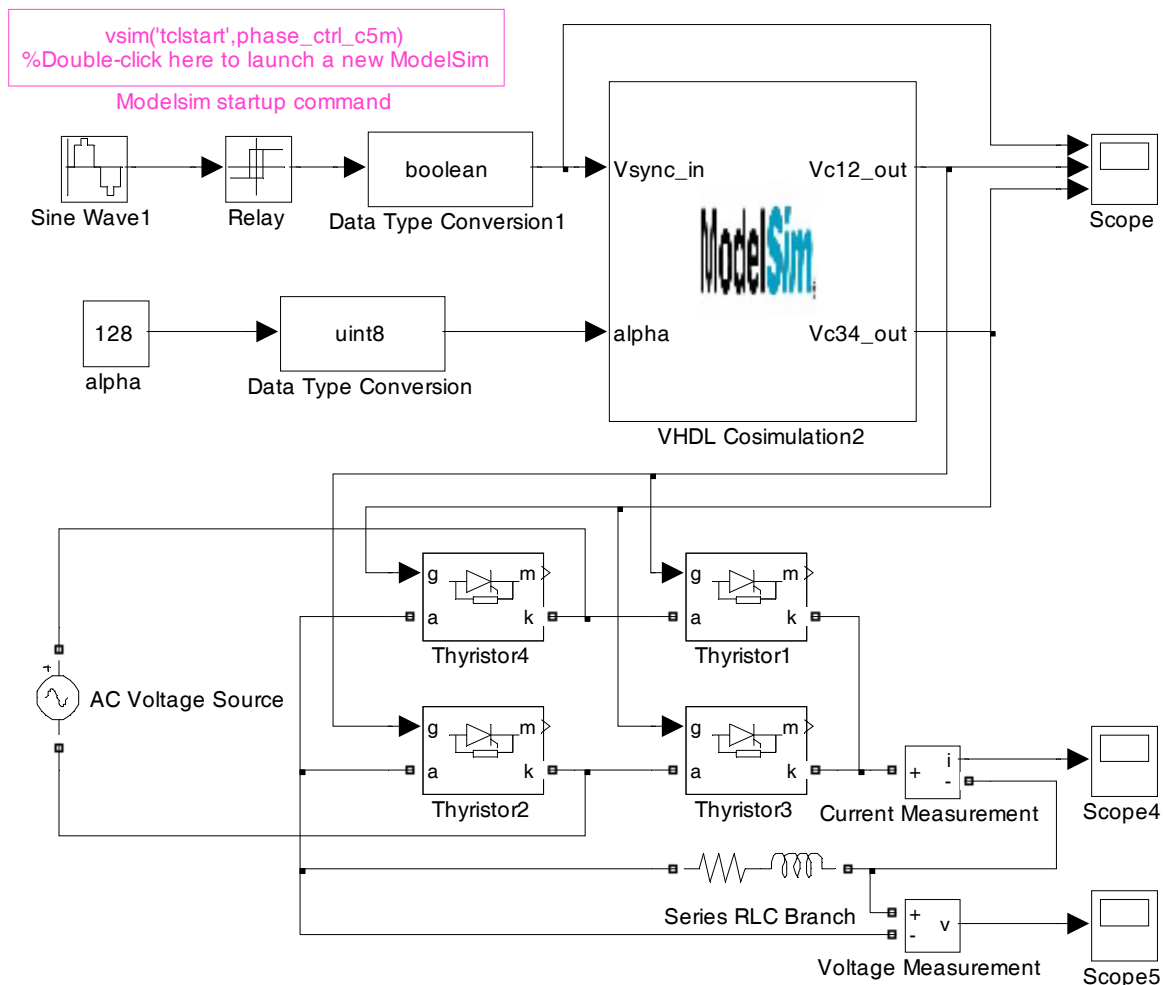
(a)



(b)

圖十一 (a) 使用VHDL之數位觸發控制電路設計，(b) 模擬結果(alpha=128，即 $\alpha=\pi/2$)

process組成，分別執行計數器時脈產生、雙計數器交互計數以及比較之功能。系統時脈(clk)先經一個除以120之除頻器，以產生8位元雙計數器(Vramp1_cnt與Vramp2_cnt)之輸入時脈(counter_clk)，其頻率為30.72KHz，當相位同步信號Vsync_in為”1”時，計數器Vramp1_cnt從0向上開始計數至255止，而此時段計數器Vramp2_cnt停止在起始計數為0之狀態；反之，當相位同步信號Vsync_in為”0”時，計數器Vramp2_cnt亦從0向上計數至255止，此時段計數器Vramp1_cnt清除且停止在計數為0之狀態。如此兩個計數器交互計數，其輸出信號頻率為60Hz，並與零交越檢測信號Vsync_in同步。此雙計數器之輸出分別

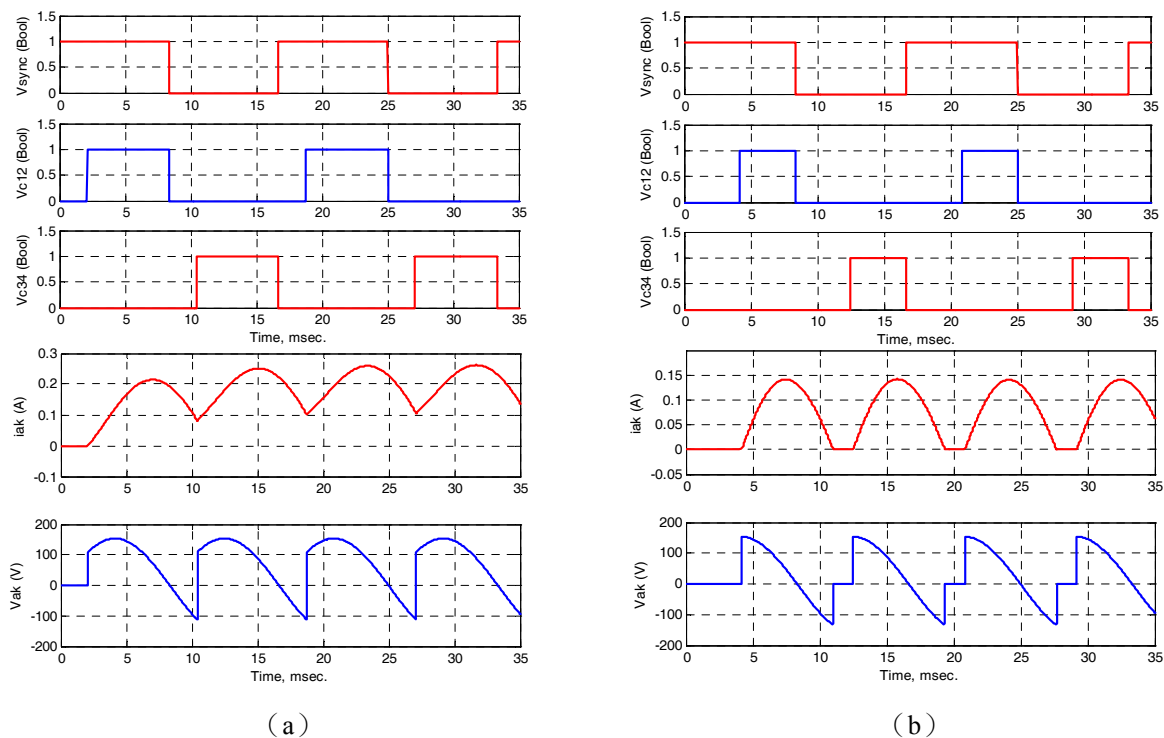


圖十二 Simulink 結合 ModelSim 建構之數位控制單相相控整流器模擬模型

與觸發相角命令alpha做比較，即產生觸發控制輸出信號Vc12_out及Vc34_out。本文利用Altera Max+Plus II發展系統軟體模擬，當設定alpha=128(相當類比命令 $\alpha = \pi / 2$)之模擬結果如圖十一(b)所示，可看出Vc12_out及Vc34_out分別在同步相位信號之上緣與下緣延遲四分之一週期後產生脈衝信號。

B. Simulink與ModelSim共同模擬

因為Simulink提供了與數位IC設計模擬軟體ModelSim相連結的界面[6][7]，圖十二為在共同模擬環境下所建構之數位控制單相相控整流器模擬模型，其中標示ModelSim之方塊即為Simulink與前述之VHDL觸發控制電路相連結之部份，內部可設定輸出入接腳名稱與其屬性；並設定系統時脈clk之頻率為3.6864MHz，另需在Matlab視窗命令下開設一個.m file，如圖左上角ModelSim startup command方塊內所示之檔名為phase_ctrl_c5m.m，在此檔案內建立一個tclcmd function，當點選圖中之ModelSim startup command方塊後，ModelSim模擬軟體即進行該VHDL觸發控制電路的編譯(compiling)，並載入相關連

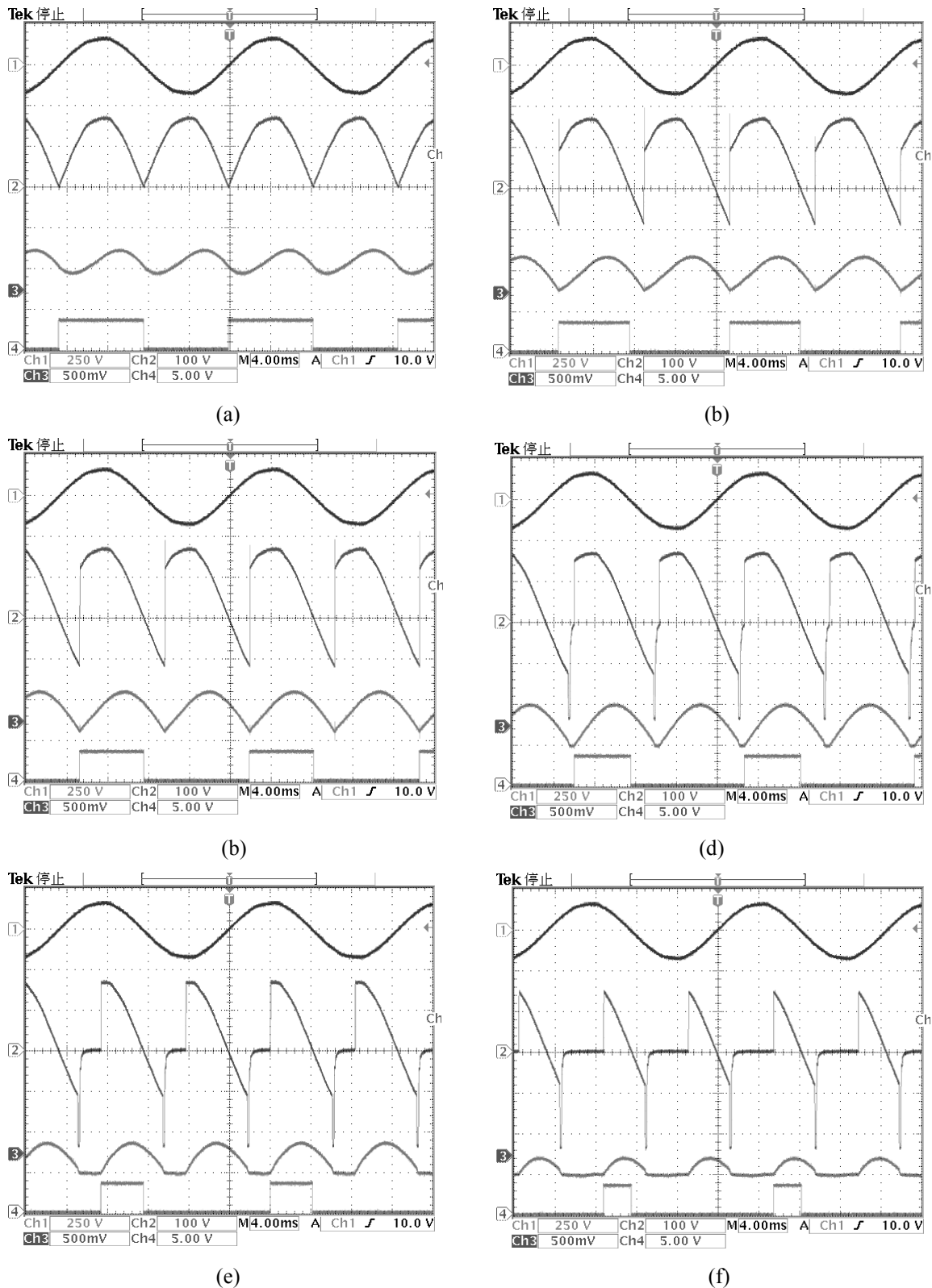


圖十三 數位相控整流器電流與電壓輸出模擬波形: (a) $\alpha = \pi/4$ (連續導通模式), (b) $\alpha = \pi/2$ (不連續導通模式)

結, 使得ModelSim與Simulink二者之時間單位一致, 如此便可在Simulink環境下進行整合模擬, 當設定 $\alpha = \pi/4$ 與 $\alpha = \pi/2$ 之模擬結果如圖十三所示, 可看出在穩態時與前述圖七之類比模擬結果是相一致的。

C. 數位控制實驗與結果

所設計之 VHDL 觸發控制電路程式經過以上之 Simulink 與 ModelSim 共同模擬環境驗證正確後, 即可下載至一個 FPGA 可程式邏輯元件(Altera Flex8284)進行測試, 觸發相角命令 α 由一個電位計(可變電阻)設定, 再經由一個 8 位元 A/D 轉換器(ADC0804)轉成數位輸入命令資料[20], 相位同步信號的產生如同圖九, 以一個類比運算放大器做檢測, 得出數位相位同步信號(V_{sync_in}), 圖十四分別為觸發角 $\alpha = 0$ 、 $\alpha = \pi/6$ 、 $\alpha = \pi/4$ 、 $\alpha = \pi/3$ 、 $\alpha = \pi/2$ 與 $\alpha = 2\pi/3$ 之實驗結果, 可看出負載電流之峯值隨著觸發角 α 之增加而漸減, 並且約在 $\alpha > \pi/3$ 時, 系統進入不連續導通模式工作。



圖十四 數位控制實驗波形：Ch1：輸入電壓 v_s ，Ch2：輸出電壓 v_a ，Ch3：輸出負載電流 i_a (0.5A/V)，Ch4：觸發控制信號 v_{cl2} ，(a) $\alpha=0$ ，(b) $\alpha=\pi/6$ ，(c) $\alpha=\pi/4$ ，(d) $\alpha=\pi/3$ ，(e) $\alpha=\pi/2$ ，(f) $\alpha=2\pi/3$ 。

V. 結論

本文使用 Simulink 與 ModelSim 相結合之模擬軟體，分別建構一個單相相控整流器之類比與數位控制模擬方塊模型，進行相控整流器推動一個RL負載的模擬分析，探討在連續導通模式與不連續導通模式下之模擬結果，可知在相角命令增加時，因平均輸出電壓變少，輸出電流亦變小，此時相控整流器將會進入不連續導通模式下工作。作者並分別設計類比與數位觸發控制電路，進行實驗來驗證，所得實驗結果與模擬結果相一致。

本研究可作為電力電子學或電動機控制實習課程之教材，由於電路架構簡單，很容易在連續三小時的實習課中完成，在數位觸發控制電路部份，亦可作為FPGA數位電路設計應用之教材，使學生能藉由模擬與實作後，更容易瞭解相控整流器工作原理，將可收到事半功倍的學習效果。以此為基礎，未來可進一步設計相控電流源以及相控直流馬達之電流控制與伺服控制器[1]。

參考文獻

- [1] Krishnan, R. (2001). *Electric Motor Drives, Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall.
- [2] Pomilio, J. A., Wisnivesky, D., and Lira, A. C. (1992). "A novel topology for the bending magnets power supply at LNLS", *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 39, no. 5.
- [3] Kassakian, J. G., Schlecht, M. F., and Verghese, G. C. (1991), *Principles of Power Electronics*, Addison Wesley.
- [4] Xu, J. and Grotzbach, M. (1993), "Time-domain analysis of half-wave zero-current switch quasiresonant converters by using SPICE", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, pp. 577-579.
- [5] Chau, K. -T. (1996), "A software tool for learning the dynamic behavior of power electronics circuits", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 39, pp. 50-55..
- [6] Mathworks Inc.(2003), Link for ModelSim User's Guide.
- [7] Hatnik, U. and Altmann, S. (2004), "Using ModelSim, Matlab/Simulink and NS for simulation of distributed systems", International Conference on Parallel Computing in Electrical Engineering (PARELEC'04), pp. 114-119.
- [8] Su, J. -H, Chen, J. J.-, and Wu, D. -S, (2002), "Learning feedback controller design of switching converters via MATLAB/SIMULINK", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 45, no. 4, pp. 307-314.
- [9] Allen, E., LaWhite, N., Yoon, Y., Chapman, J., and Ilic, M., (2001), "Interactive object-oriented simulation of interconnected power systems using SIMULINK", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 44, pp. 87-95..
- [10] Ang, S. S., (1996), "A practice-oriented course in switching converters", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 39, pp. 14-18.
- [11] Logue, D., Krein, P. T. (2000), "Simulation of electric machinery and power electronics interfacing using MATLAB/SIMULINK," in *7th Workshop Computers in Power Electronics, (IEEE COMPEL2000)*, pp. 34-39.
- [12] Wade, S., Dunnigan, M. W., and Williams, B. W., (1997), "Modeling and Simulation of induction machine vector control with rotor resistance identification," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 3, pp. 495-506.

- [13] Sloane, T. H., (1995), "Laboratories for an undergraduate course in power electronics", *IEEE Trans. Educ.*, vol. 38, pp. 365-369.
- [14] Roth, C. H. (1998), *Digital Systems Design Using VHDL*, PWS.
- [15] Mohan, N., Undeland, T. M., and Robbins, W. P., (2003), *Power Electronics*, Wiley International Edition.
- [16] Siemens data sheet, (1994), TCA 785 Phase Control IC, Semiconductor Group.
- [17] TOSHIBA data sheet, (2004), TLP250 photocoupler, pp. 06-25.
- [18] SHARP data sheet, PC817 Series high density mounting type photocoupler.
- [19] SGS-THOMSON data sheet, (1995), TYN682→TYN692 SCR.
- [20] Intersil data sheet, (1997), ADC0802, ADC0803, ADC0804 8-bit microprocessor-compatible A/D converters.