

第四章

單相直交流轉換器之並聯控制

4.1 前言

採用並聯技術主要有以下兩項優點：(1) 提高系統之可靠度，利用並聯模組化之轉換器作為電源供應設備時，每組轉換器只須承受部分負載電流，相對減少開關元件之電流應力，進而延長轉換器之使用壽命；(2) 可隨時擴充系統容量，無須重新設計功率轉換器，因此節省成本及提升設計效率。雖然並聯有以上優點，但若並聯時無法達到均流之控制[27,28,31,32,37,38]，則會造成轉換器之間有誤差電流產生，造成開關損壞。在本章中將第三章所提閉迴路控制器延伸應用在並聯系統上，下一節先提出兩台轉換器並聯之控制策略，再延伸至多台並聯，最後以商用軟體 MATLAB/SIMULINK 模擬驗證之。

4.2 雙轉換器之並聯控制策略

為進一步了解轉換器並聯時之特性，吾人將先推導出兩台轉換器並聯時之責任週期函數，進而從數學式中分析造成系統無法達到均流控制之因素。兩台轉換器並聯之電路架構如圖 4-1 所示。在推導責任週期函數之前，茲先作下列定義：

$$1、v_o = V_m \sin \omega t \quad (4-1)$$

$$2、d_1 \sim d_8 \text{ 依序為 } S_1 \sim S_8 \text{ 之責任週期比}$$

$$3、d_n + d_{n+1} = 1, n=1,3,5,7. \quad (4-2)$$

由於開關切換採用單極性切換模式，依第二章所述，可得到下列關係

式

$$d_k = \frac{1+m_k}{2}, \quad k=1\sim 8 \quad (4-3)$$

$$m_p = -m_{p+2}, \quad p=1,2,5,6. \quad (4-4)$$

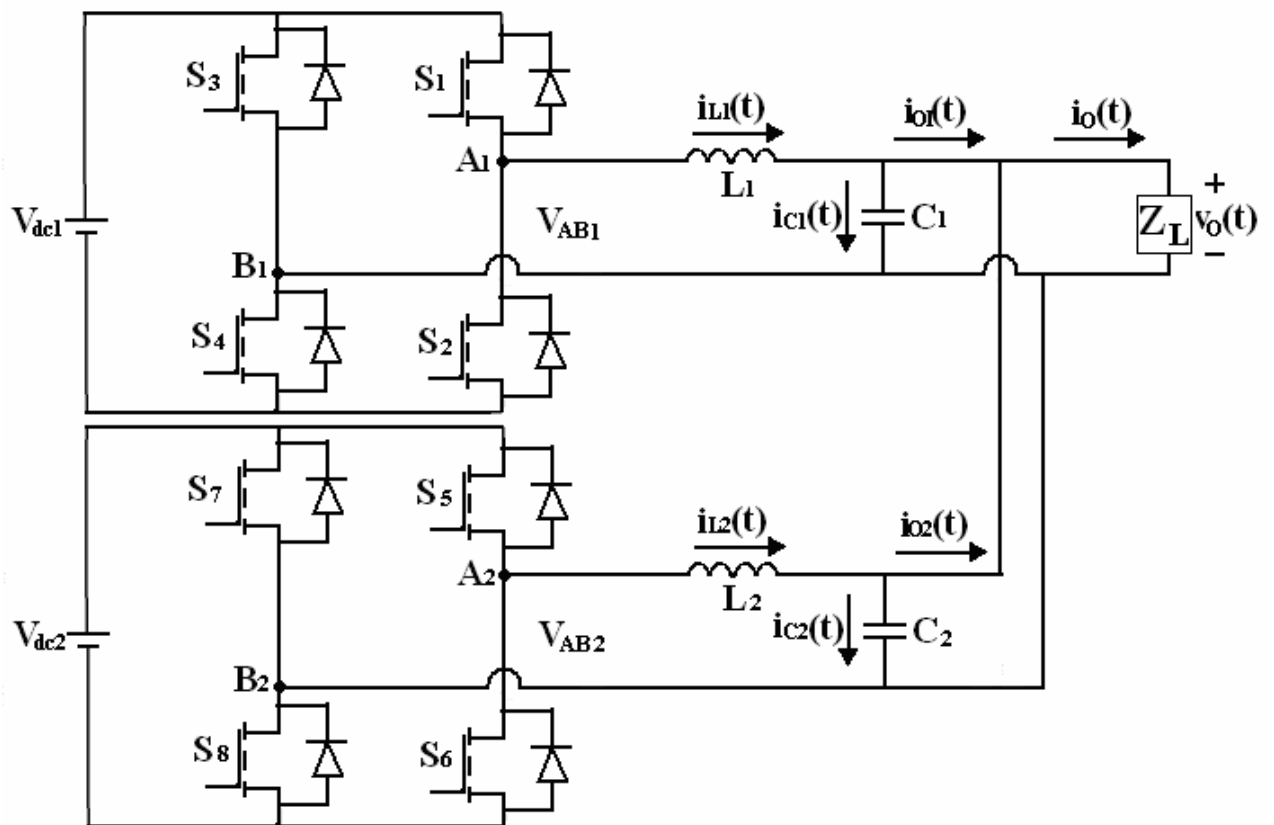


圖 4-1 兩台轉換器並聯之電路架構圖

參照圖 4-1，根據克希荷夫電壓定律可得到下列關係式

$$v_{AB1} = (d_1 - d_3)V_{dc1} \quad (4-5)$$

$$v_{AB2} = (d_5 - d_7)V_{dc2} \quad (4-6)$$

另外，根據克希荷夫電流定律可得到下列關係式

$$d_1 * i_{L1} = d_4 i_{L1} \Rightarrow d_1 = d_4 \quad (4-7)$$

$$d_5 * i_{L2} = d_8 i_{L2} \Rightarrow d_5 = d_8 \quad (4-8)$$

$$i_{L1} = i_{C1} + i_{o1} \quad (4-9)$$

$$i_{L2} = i_{C2} + i_{o2} \quad (4-10)$$

$$i_{o1} + i_{o2} = i_o = \frac{v_o}{Z_L} \quad (4-11)$$

將(4-7)式與(4-8)式代入(4-2)式可得到下列關係式

$$d_1 - d_3 = 2d_1 - 1 \quad (4-12)$$

$$d_5 - d_7 = 2d_5 - 1 \quad (4-13)$$

將(4-9)式與(4-10)式整理可得下列關係式

$$\frac{1}{L_1} \int (v_{AB1} - v_o) dt = C_1 \frac{dv_o}{dt} + i_{o1} \quad (4-14)$$

$$\frac{1}{L_2} \int (v_{AB2} - v_o) dt = C_2 \frac{dv_o}{dt} + i_{o2} \quad (4-15)$$

將(4-5)式、(4-6)式、(4-12)式與(4-13)代入(4-14)與(4-15)式中經整理可得下列關係式

$$(2d_1 - 1)V_{dc1} - v_o = L_1 C_1 \frac{d^2 v_o}{dt^2} + L_1 \frac{di_{o1}}{dt} \quad (4-16)$$

$$(2d_5 - 1)V_{dc2} - v_o = L_2 C_2 \frac{d^2 v_o}{dt^2} + L_2 \frac{di_{o2}}{dt} \quad (4-17)$$

為了達到均流之目的，作下列假設：

$$i_{o1} = i_{o2} = \frac{i_o}{2} \quad (4-18)$$

將(4-18)式代入(4-11)式中可得到下式

$$i_{o1} = i_{o2} = \frac{v_o}{2Z_L} \quad (4-19)$$

將(4-1)式與(4-19)式代入(4-16)式與(4-17)式中經整理可得

$$d_1 = \frac{V_m}{2V_{dc1}} \left[(1 - L_1 C_1 \omega^2) \sin \omega t + \frac{L_1 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-20)$$

$$d_2 = \frac{V_m}{2V_{dc1}} \left[-(1 - L_1 C_1 \omega^2) \sin \omega t - \frac{L_1 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-21)$$

$$d_3 = \frac{V_m}{2V_{dc1}} \left[-(1 - L_1 C_1 \omega^2) \sin \omega t - \frac{L_1 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-22)$$

$$d_4 = \frac{V_m}{2V_{dc1}} \left[(1 - L_1 C_1 \omega^2) \sin \omega t + \frac{L_1 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-23)$$

$$d_5 = \frac{V_m}{2V_{dc2}} \left[(1 - L_2 C_2 \omega^2) \sin \omega t + \frac{L_2 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-24)$$

$$d_6 = \frac{V_m}{2V_{dc2}} \left[-(1 - L_2 C_2 \omega^2) \sin \omega t - \frac{L_2 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-25)$$

$$d_7 = \frac{V_m}{2V_{dc2}} \left[-(1 - L_2 C_2 \omega^2) \sin \omega t - \frac{L_2 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-26)$$

$$d_8 = \frac{V_m}{2V_{dc2}} \left[(1 - L_2 C_2 \omega^2) \sin \omega t + \frac{L_2 \omega}{2Z_L} \cos \omega t \right] + \frac{1}{2} \quad (4-27)$$

(4-20)式至(4-27)式為雙轉換器並聯時，開迴路控制下之各個責任週期比函數。接下來將從數學式中分析造成系統不均流之因素，茲先定義

二台轉換器之輸出電流誤差量為 i_{oe1} 與 i_{oe2} ，如下所示：

$$i_{oe1} = \frac{i_{o1} + i_{o2}}{2} - i_{o1} = \frac{i_{o2} - i_{o1}}{2} \quad (4-28)$$

$$i_{oe2} = \frac{i_{o1} + i_{o2}}{2} - i_{o2} = \frac{i_{o1} - i_{o2}}{2} \quad (4-29)$$

其中 i_{o1} 為第一台輸出電流， i_{o2} 為第二台輸出電流， i_o 為負載電流，將(4-28)式與(4-29)式整理可得下列關係式

$$i_{oe1} = \frac{V_{dc2}}{L_2} \int d_5 dt - \frac{V_{dc1}}{L_1} \int d_1 dt + \int \left(\frac{V_{dc1}}{2L_1} - \frac{V_{dc2}}{2L_2} \right) dt + \left(\frac{1}{2L_1} - \frac{1}{2L_2} \right) \int v_o dt + (C_1 - C_2) \frac{dv_o}{dt} \quad (4-30)$$

$$i_{oe2} = \frac{V_{dc1}}{L_1} \int d_1 dt - \frac{V_{dc2}}{L_2} \int d_5 dt + \int \left(\frac{V_{dc2}}{2L_2} - \frac{V_{dc1}}{2L_1} \right) dt + \left(\frac{1}{2L_2} - \frac{1}{2L_1} \right) \int v_o dt + (C_2 - C_1) \frac{dv_o}{dt} \quad (4-31)$$

由(4-30)式與(4-31)式中可看出有三種情況會造成電流誤差產生，此三種情況分列如下

$$1、L_1 \neq L_2 \quad (4-32)$$

$$2、C_1 \neq C_2 \quad (4-33)$$

$$3、V_{dc1} \neq V_{dc2} \quad (4-34)$$

但是當 $L_1 = L_2$ 、 $C_1 = C_2$ 與 $V_{dc1} = V_{dc2}$ 同時成立時，也就是說當 $i_{o1} = i_{o2} = i_o / 2$ 時，電流誤差量為零。接下來將以 $i_{o1} = i_{o2} = i_o / 2$ 及保持輸出電壓之特性為控制目標提出吾人之並聯控制策略，兩台並聯之控制方塊圖如圖4-2所示：

茲先定義下列變數

$v_o^*(t)$ ：參考輸出電壓

$v_o(t)$ ：輸出電壓

$i_o^*(t)$ ：參考輸出電流

$i_{o1}(t)$ ：第一台之輸出電流

$i_{o2}(t)$ ：第二台之輸出電流

Δv_{dc1} ：第一台直流電壓擾動量

Δv_{dc2} ：第二台直流電壓擾動量

K_{FI1} ：第一台輸出電流回授增益

K_{FI2} ：第二台輸出電流回授增益

K_{FI21} ：第一台電容電流回授增益

K_{FI22} ：第二台電容電流回授增益

K_{FV1} ：第一台輸出電壓回授增益

K_{FV2} ：第二台輸出電壓回授增益

K_{V1} ：第一台電壓調節器增益

K_{V2} ：第二台電壓調節器增益

K_{ic1} ：第一台電容電流調節器增益

K_{ic2} ：第二台電容電流調節器增益

K_{io1} ：第一台輸出電流調節器增益

K_{io2} ：第二台輸出電流調節器增益

K_{F1} ：第一台前饋控制器增益

K_{F2} ：第二台前饋控制器增益

其中 i_o^* 如下所示

$$i_o^* = (i_{o1} + i_{o2}) / 2 \quad (4-35)$$

依照 3-4 節所敘述之控制器設計方式可求得各個調節器參數如下所示

$$K_{ic1} = \frac{\omega_{cic} L_1}{K_{Fic1} K_{PWM1} V_{dc1}} \quad (4-36)$$

$$K_{ic2} = \frac{\omega_{cic} L_2}{K_{Fic2} K_{PWM2} V_{dc2}} \quad (4-37)$$

$$K_{io1} = \frac{\omega_{cio}^2 L_1 C_1 Z_L - \omega_{cio} L_1}{K_{Fio1} K_{PWM1} V_{dc1}} \quad (4-38)$$

$$K_{io2} = \frac{\omega_{cio}^2 L_2 C_2 Z_L - \omega_{cio} L_2}{K_{Fio2} K_{PWM2} V_{dc2}} \quad (4-39)$$

$$K_{V1} = \frac{\omega_{cv}^2 L_1 C_1 - 1}{K_{FV1} K_{ic1} K_{PWM1} V_{dc1}} \quad (4-40)$$

$$K_{V2} = \frac{\omega_{cv}^2 L_2 C_2 - 1}{K_{FV2} K_{ic2} K_{PWM2} V_{dc2}} \quad (4-41)$$

$$K_{F1} = \frac{1}{K_{PWM1} V_{dc1}} + (K_{FV1} - 1) * K_{V1} K_{ic1} + \frac{K_{Fio1} K_{io1}}{Z_L} \quad (4-42)$$

$$K_{F2} = \frac{1}{K_{PWM2} V_{dc2}} + (K_{FV2} - 1) * K_{V2} K_{ic2} + \frac{K_{Fio2} K_{io2}}{Z_L} \quad (4-43)$$

再來將規格中之各個電路參數代入，即可求得控制器中各補償器之參數。接下來於下一節中將介紹 N 台轉換器並聯時之控制策略。

4.3 N 轉換器之並聯控制

當有 N 台轉換器並聯時，吾人所提之控制器亦可延伸至 N 台並聯控制，首先提出 N 台轉換器之控制方塊圖如下所示

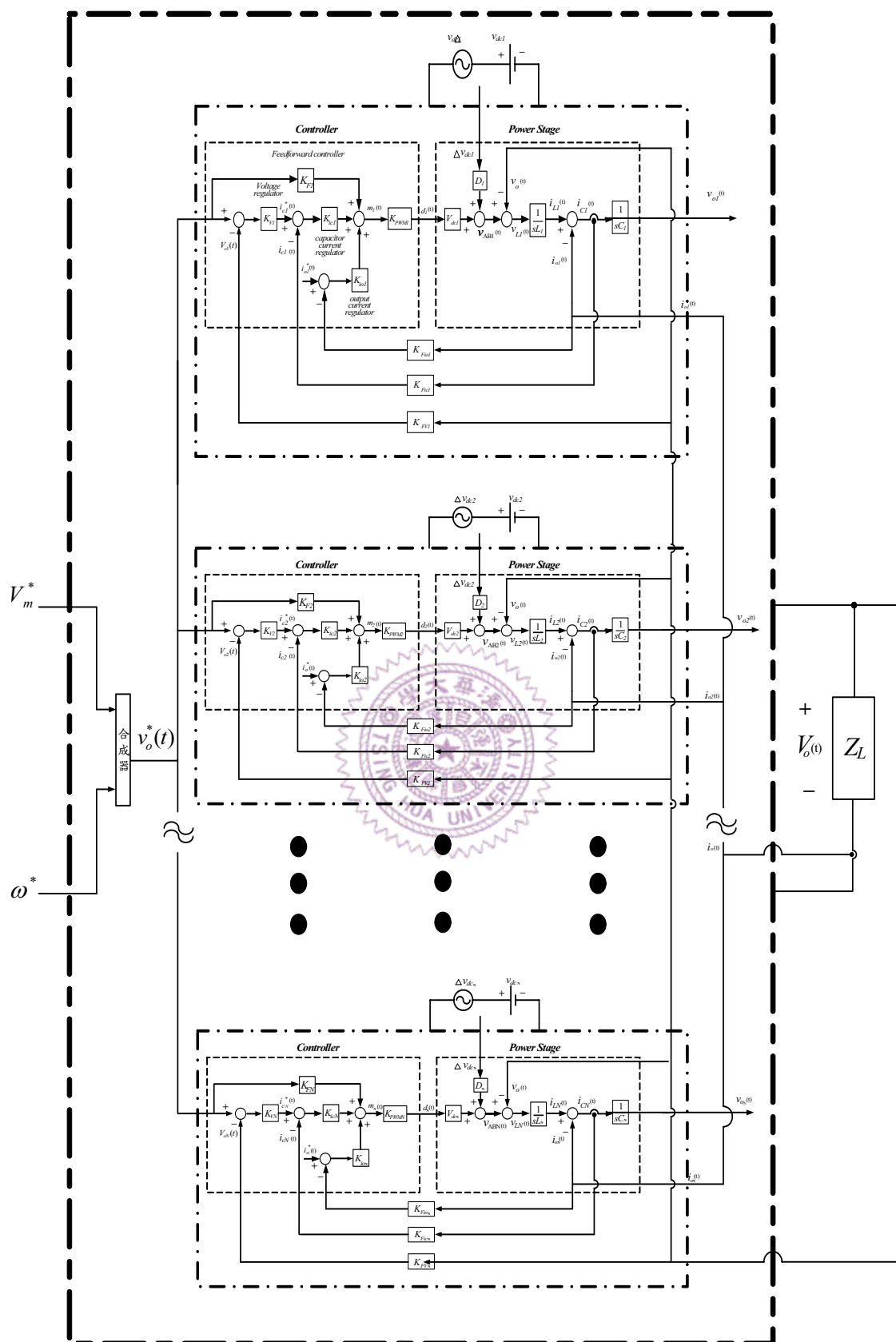


圖 4-3 N 台轉換器並聯之控制方塊圖

其中 $i_o^* = \frac{\sum i_{o_N}}{N}$ ，依據 3-4 節控制器設計方式求得各個調節器參數，以達到均流與保持輸出電壓特性之目標，各個補償器參數通式表示如下所示

$$K_{ic_N} = \frac{\omega_{cic} L_N}{K_{Fic_N} K_{PWM_N} V_{dc_N}} \quad (4-44)$$

$$K_{io_N} = \frac{\omega_{cio}^2 L_N C_N Z_L - \omega_{cio} L_N}{K_{Fio_N} K_{PWM_N} V_{dc_N}} \quad (4-45)$$

$$K_{V_N} = \frac{\omega_{cv}^2 L_N C_N - 1}{K_{FV_N} K_{ic_N} K_{PWM_N} V_{dc_N}} \quad (4-46)$$

$$K_{F_N} = \frac{1}{K_{PWM_N} V_{dc_N}} + (K_{FV_N} - 1) * K_{V_N} K_{ic_N} + \frac{K_{Fio_N} K_{io_N}}{Z_L} \quad (4-47)$$

接下來在下節中將根據本文所提之規格，利用商用軟體 MATLAB/SIMULINK 依開迴路控制及閉迴路控制兩種控制方式模擬出電流誤差之現象與輸出電壓之波形，並比較之。

4.4 模擬結果

為驗證吾人所提並聯控制策略之可行性，接下來，分別以開迴路控制及閉迴路控制兩種方式下模擬出轉換器並聯時之輸出電壓波形、誤差電流現象與暫態現象。藉由模擬波形說明吾人所提並聯控制策略對誤差電流之可控性。本文中之規格如下所示

額定輸出功率：1KW

額定輸入電壓：480V,240V

額定輸出電壓：0~300V, 0~150V

輸出電壓之頻率：15~500Hz

濾波電感：260uH

濾波電容：8uF

開關切換頻率：100KHz

依據 4.2 節中所提到會造成誤差電流之三種情況，列出下列模擬參數

第一台輸入電壓 $V_{dc1} = 485V$

第二台輸入電壓 $V_{dc2} = 475V$

第一台濾波電感 $L_1 = 230uH$

第二台濾波電感 $L_2 = 270uH$

第一台濾波電容 $C_1 = 8.4uF$

第二台濾波電容 $C_2 = 7.7uF$

在此先定義下列參數

v_o ：輸出電壓

i_o ：負載電流

i_{o1} ：第一台之輸出電流

i_{o2} ：第二台之輸出電流

i_{oe1} ：第一台之電流誤差量

i_{oe2} ：第二台之電流誤差量

圖 4-4 至圖 4-11 為開迴路控制下之模擬波形，由圖中可看出並聯系統在開迴路控制下除了不能有效控制輸出電壓之外，而且第一台輸出電

流與第二台輸出電流不相等，進而形成誤差電流。此外，第一台輸出電流與第二台輸出電流除了不相等之外，由模擬圖中可看出第一台誤差電流與第二台誤差電流尚有直流位準(offset)偏移之現象，由(4-30)式與(4-31)式之關係可以看出，當 $V_{dc1} \neq V_{dc2}$ 時，便會造成誤差電流會有一直流位準(offset)。圖 4-12 至圖 4-19 為閉迴路控制下之模擬結果波形圖，由圖中可看出並聯系統在閉迴路控制器下依然能有效控制輸出電壓之外，並且使得第一台輸出電流與第二台輸出電流幾乎相等，達到均流之控制，使得誤差電流很小。在此定義輸出電壓誤差與輸出電流誤差如下所示：

$$\text{輸出電壓誤差百分比}(\Delta v_o) = \left| \frac{\text{額定輸出電壓} - \text{實際輸出電壓}}{\text{額定輸出電壓}} \right| * 100\%$$

$$\text{輸出電流誤差百分比}(\Delta i_o) = \frac{\text{每台輸出電流誤差量}}{\text{每台額定輸出電流}} * 100\%$$

將閉迴路控制下之輸出電壓誤差與輸出電流誤差整理如表 4-1 所示

表 4-1 輸出電壓誤差與輸出電流誤差

	閉迴路控制模式			
	$f = 500Hz$ $v_o = 300V$	$f = 500Hz$ $v_o = 40V$	$f = 15Hz$ $v_o = 300V$	$f = 15Hz$ $v_o = 30V$
Δv_o	0.14%	0.35%	0.23%	0.32%
Δi_o	2.75%	1.32%	2.54%	0.42%

圖 4-20 至圖 4-27 為閉迴路控制下負載減輕 50% 時之模擬波形。當圖 4-28 為開迴路控制之模擬方塊圖，圖 4-29 為閉迴路控制之模擬方塊圖。

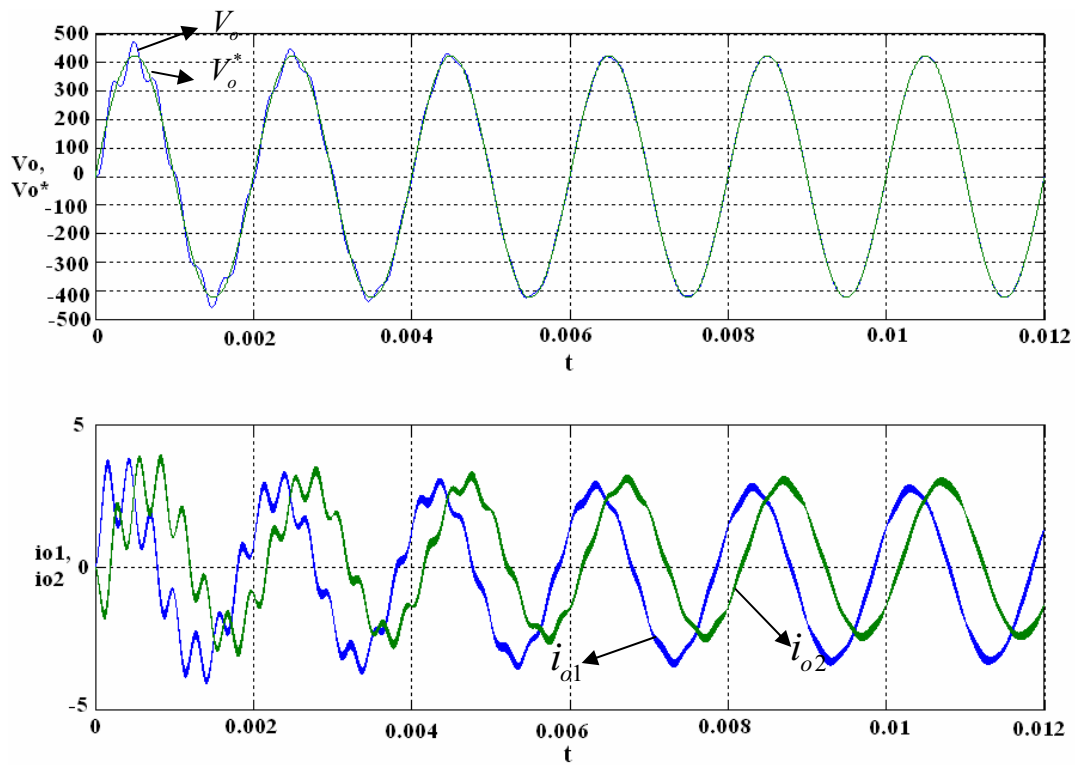


圖 4-4 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 開迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流波形

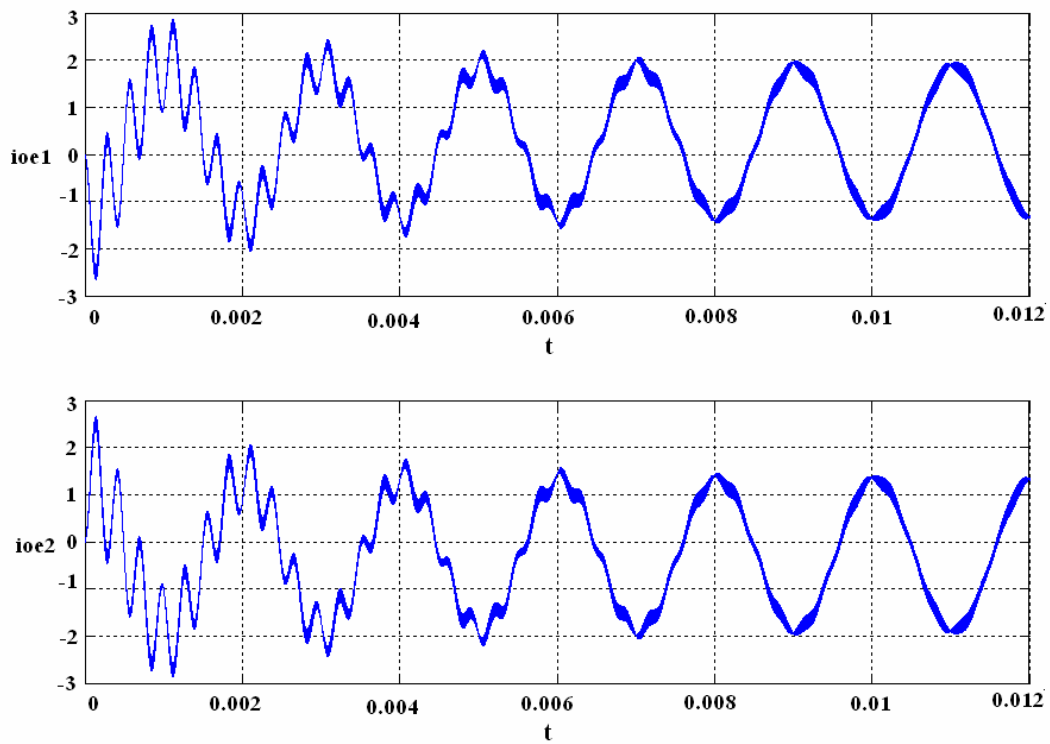


圖 4-5 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 開迴路時之第一台誤差電流與第二台誤差電流波形

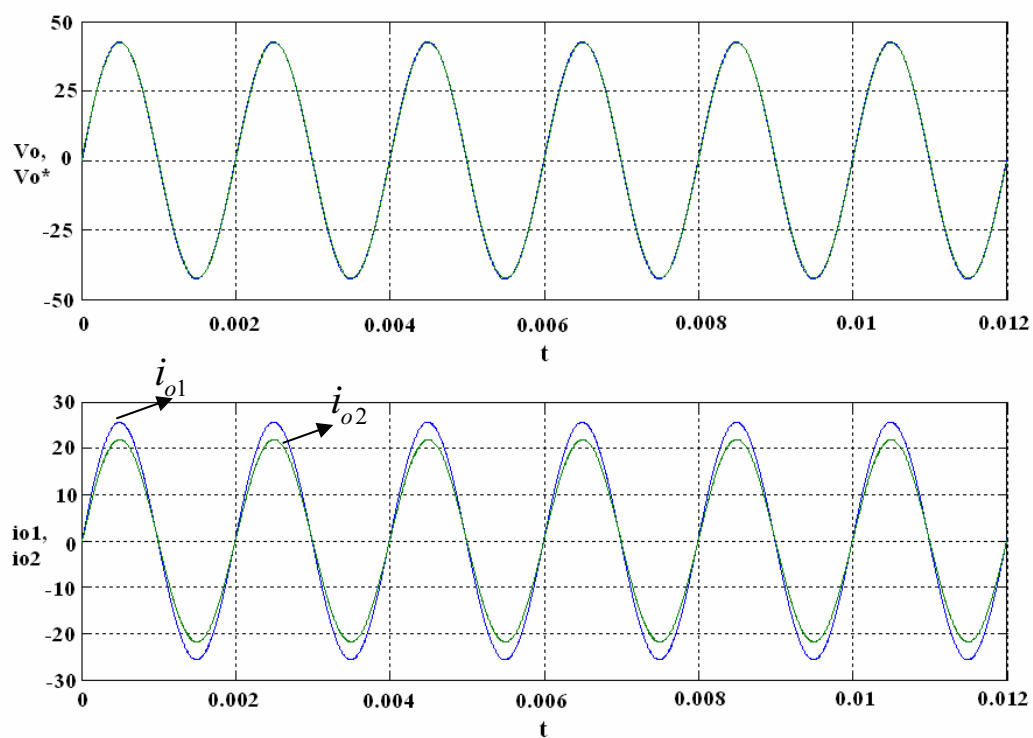


圖 4-6 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 開迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流波形

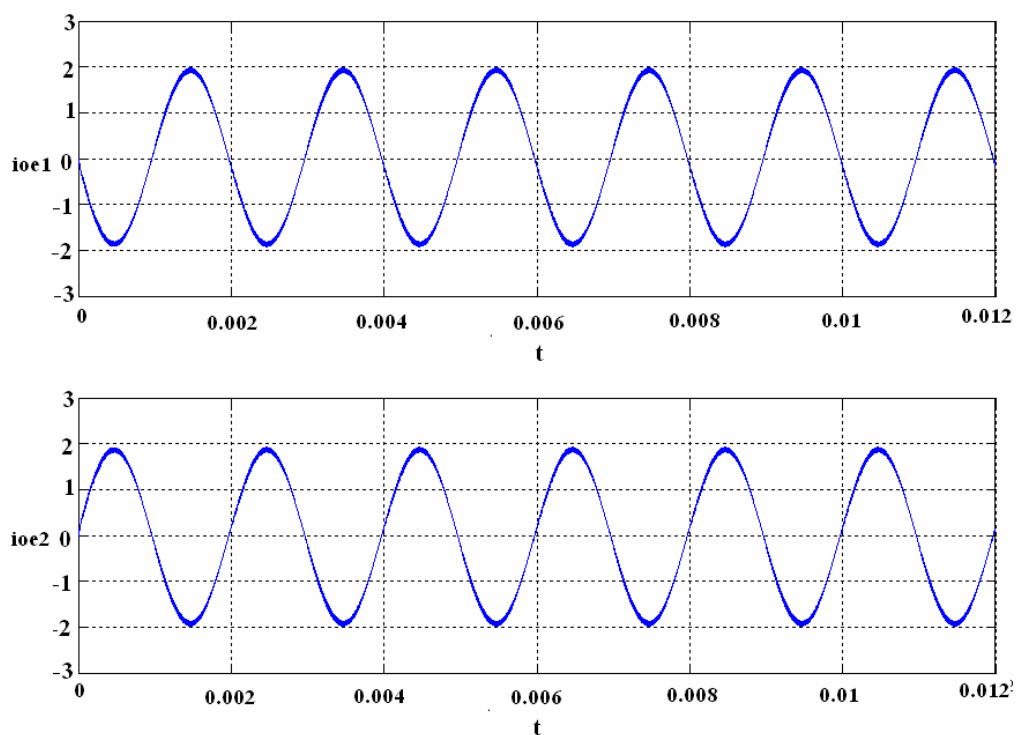


圖 4-7 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 開迴路時之第一台誤差電流與第二台誤差電流波形

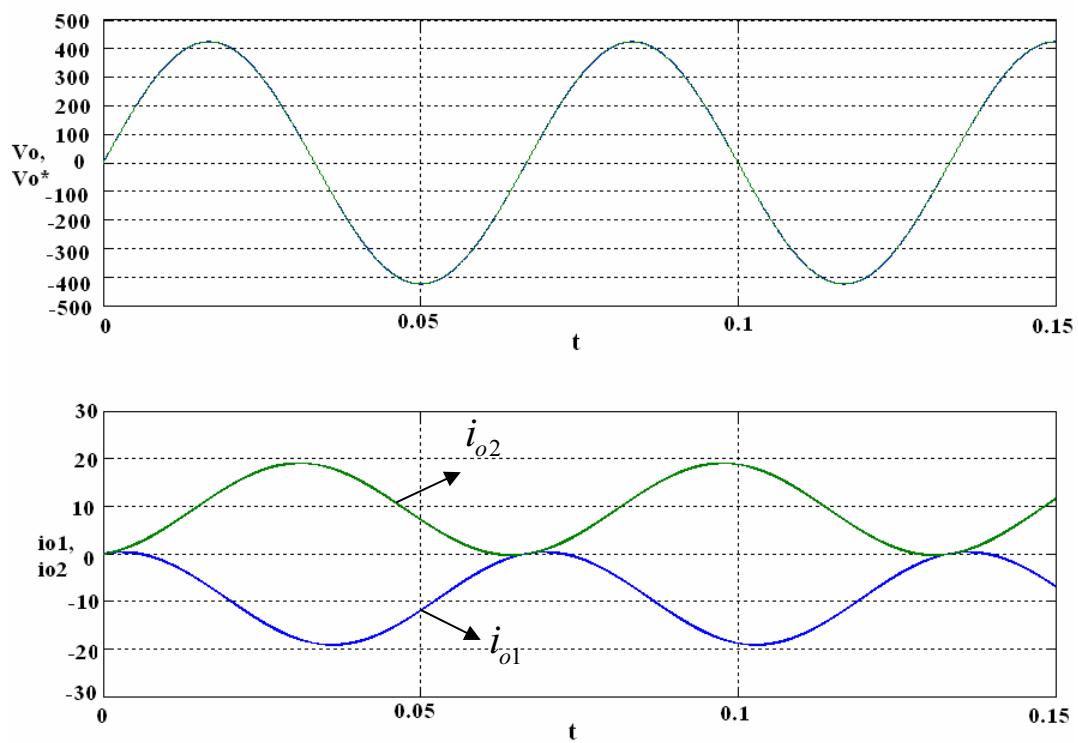


圖 4-8 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 開迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流波形

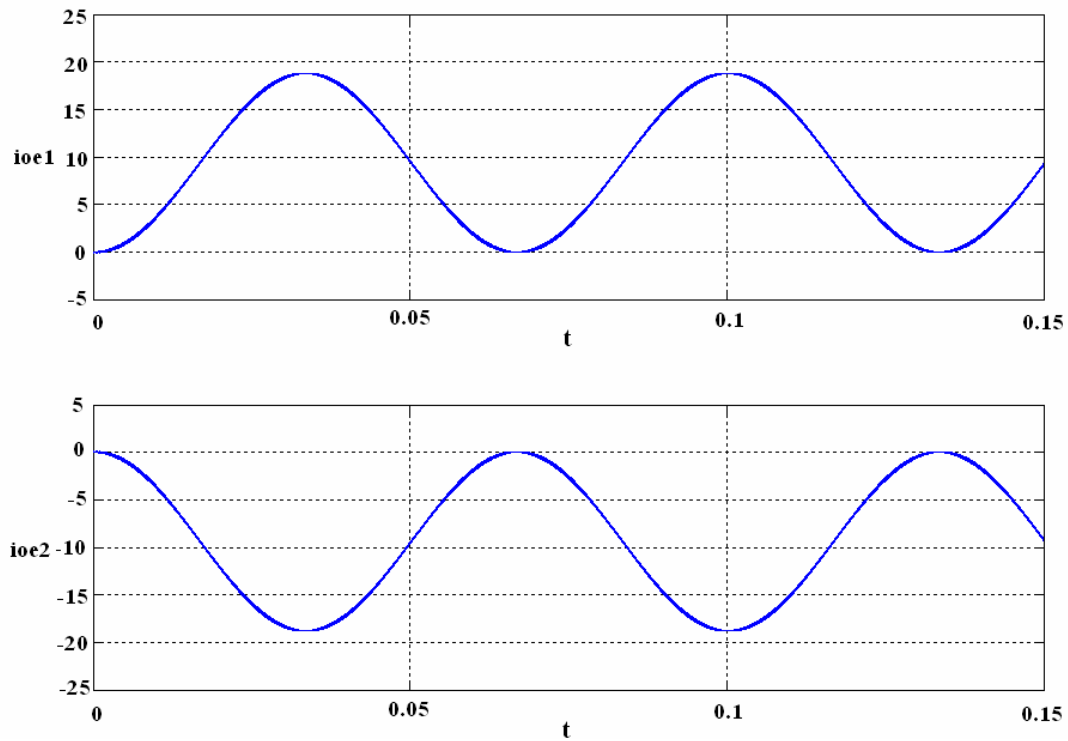


圖 4-9 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 開迴路時之第一台誤差電流與第二台誤差電流波形

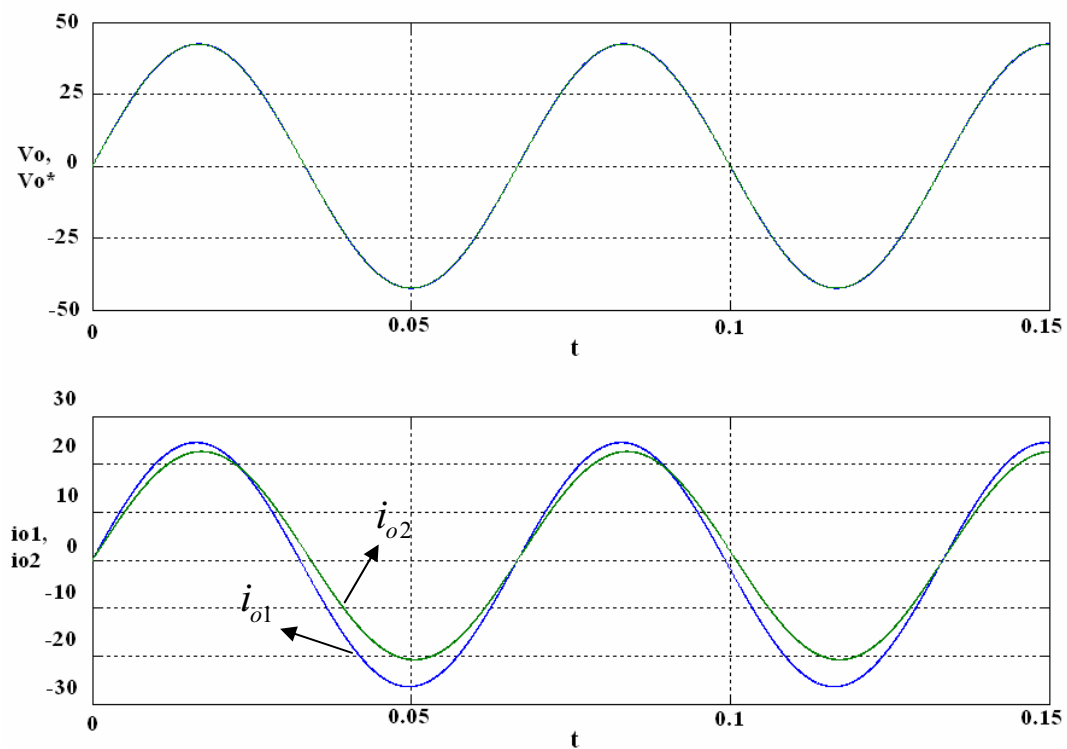


圖 4-10 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 開迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流波形

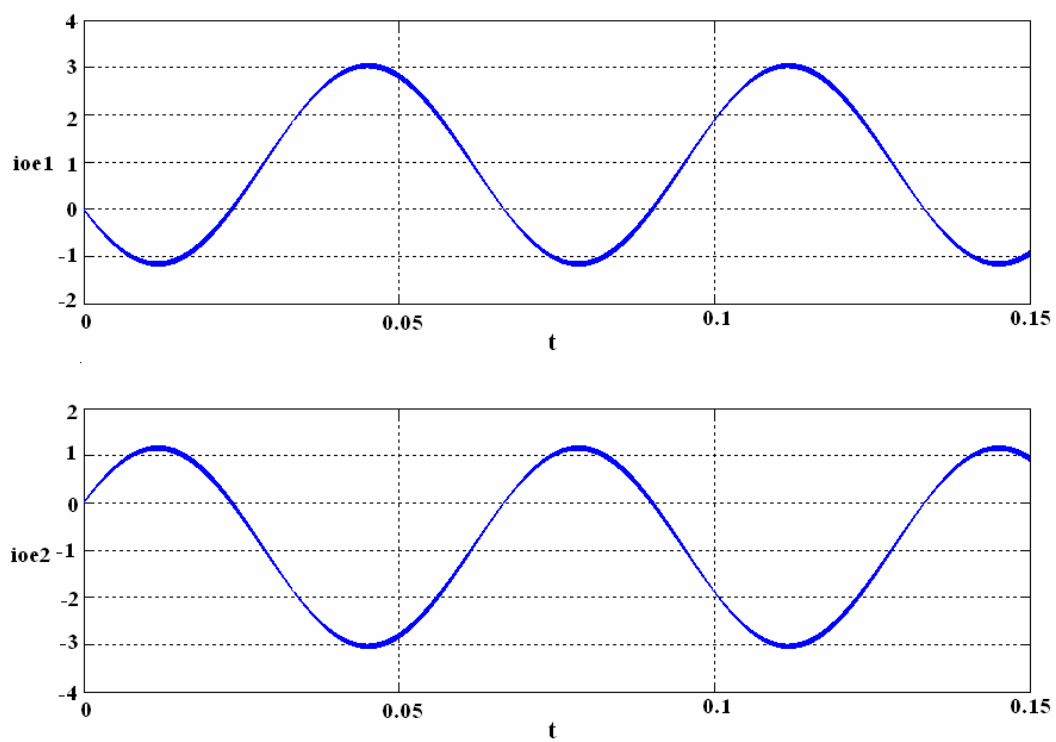


圖 4-11 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 開迴路時之第一台誤差電流與第二台誤差電流波形

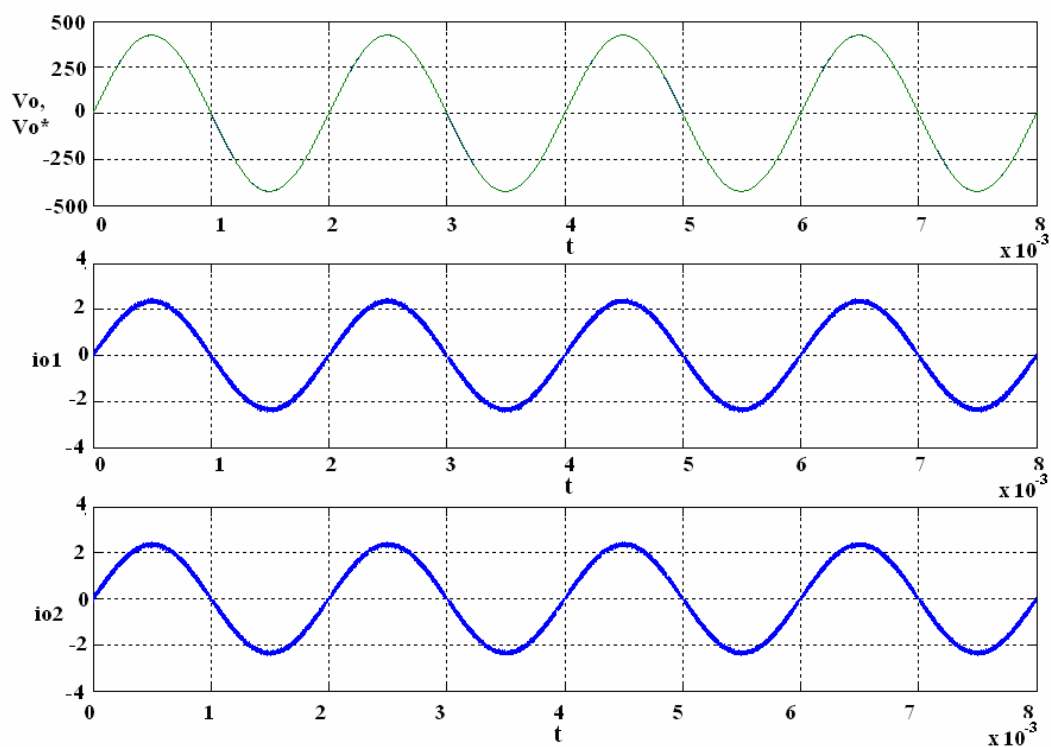


圖 4-12 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流波形

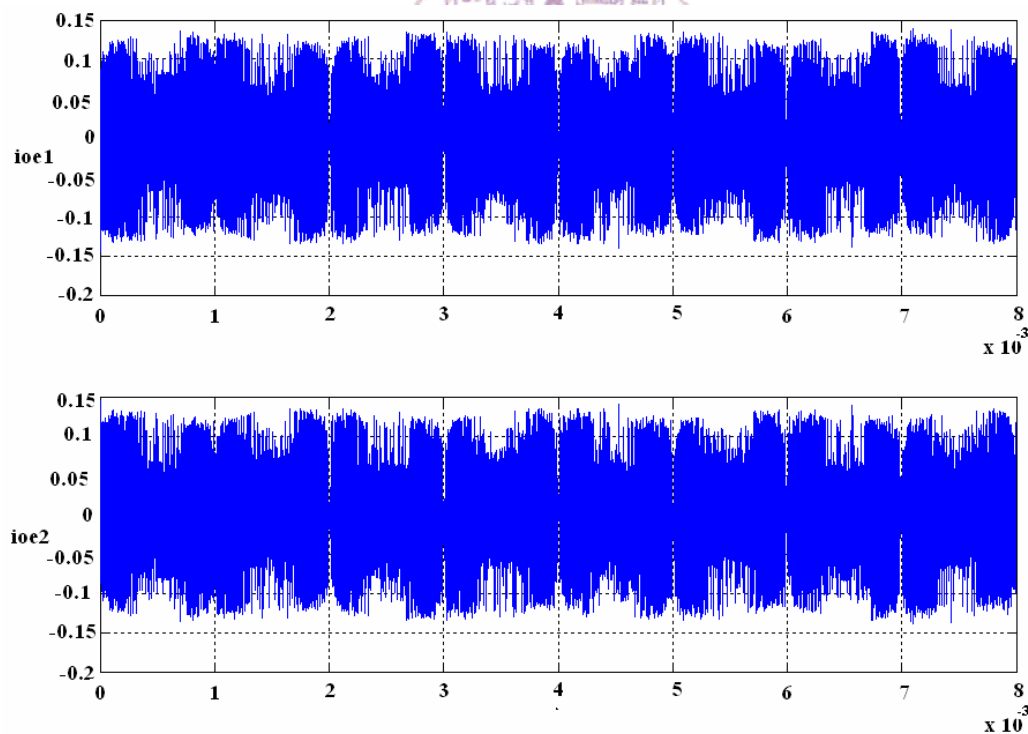


圖 4-13 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二台循環電流波形

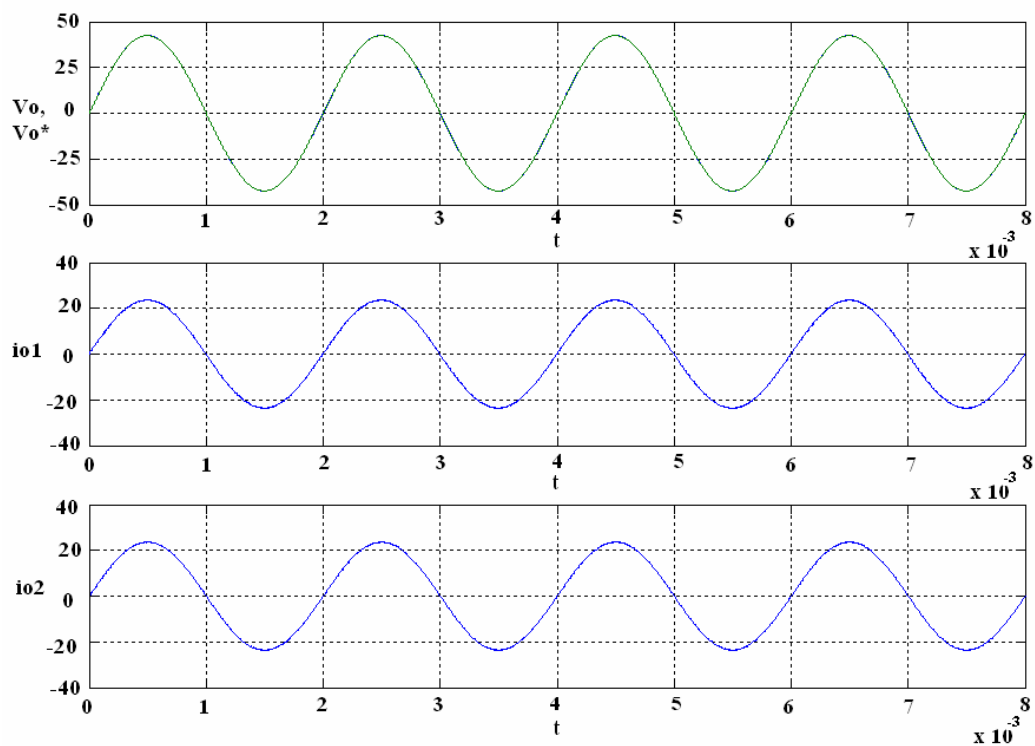


圖 4-14 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流波形

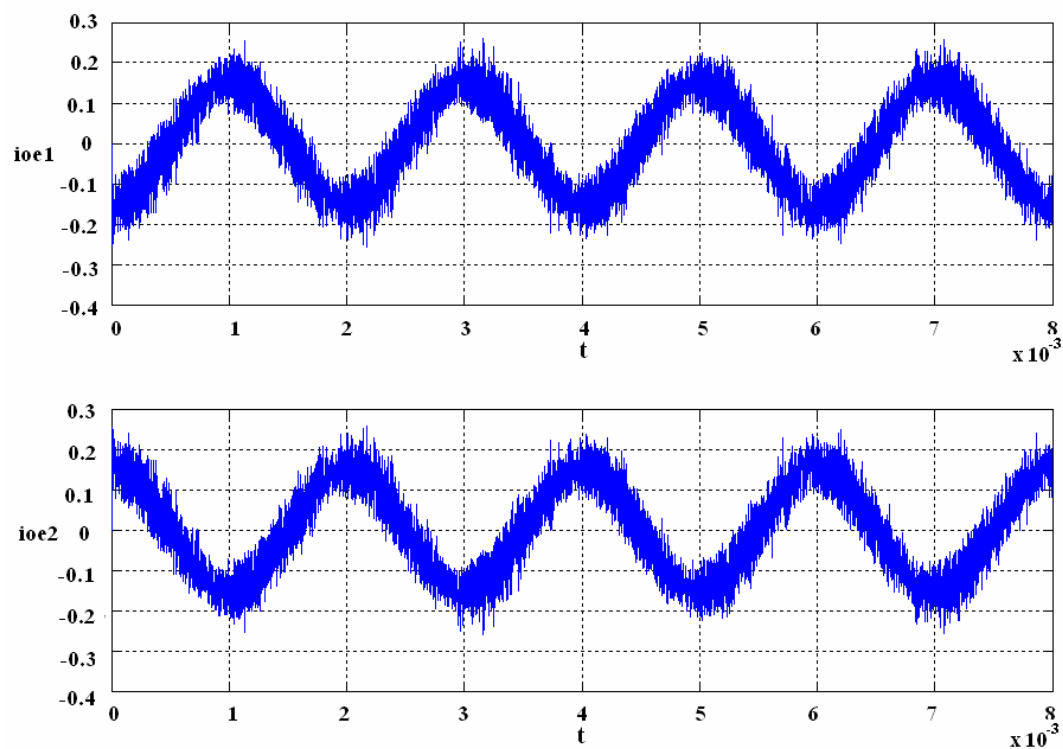


圖 4-15 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二台循環電流波形

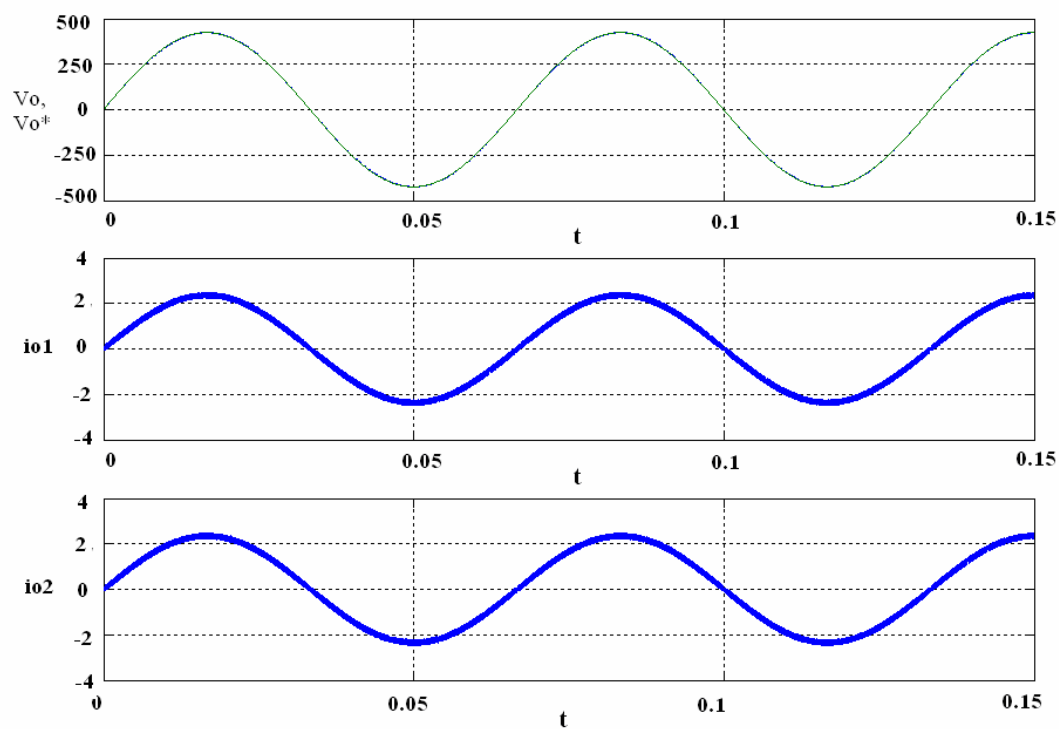


圖 4-16 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 300V(rms)$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流波形

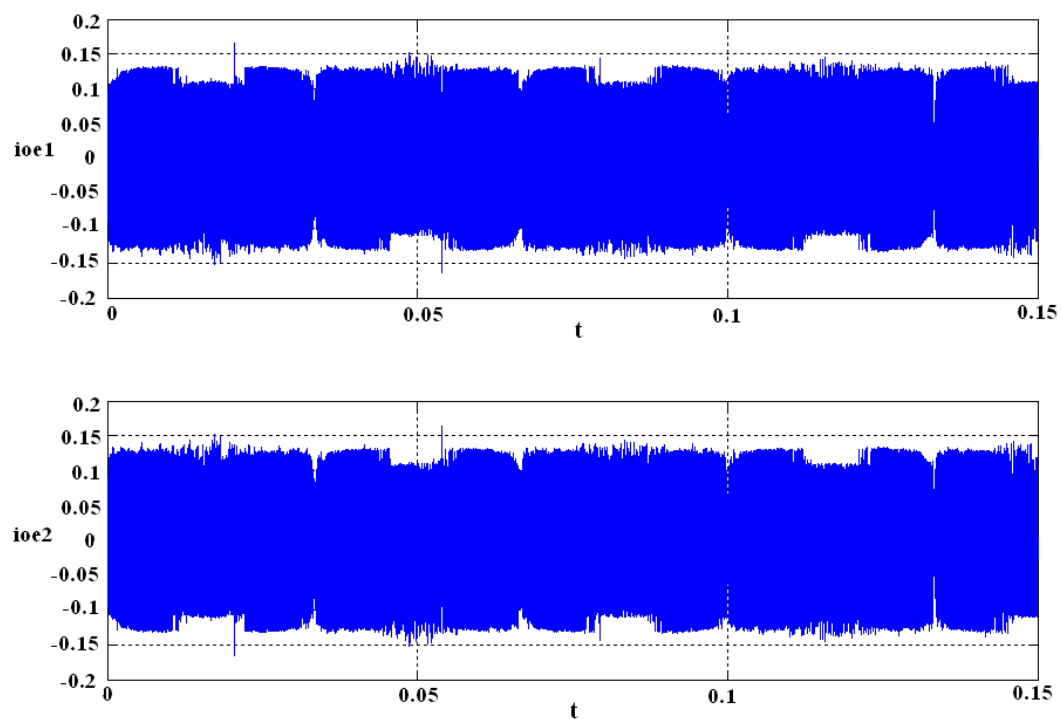


圖 4-17 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 300V(rms)$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二台循環電流波形

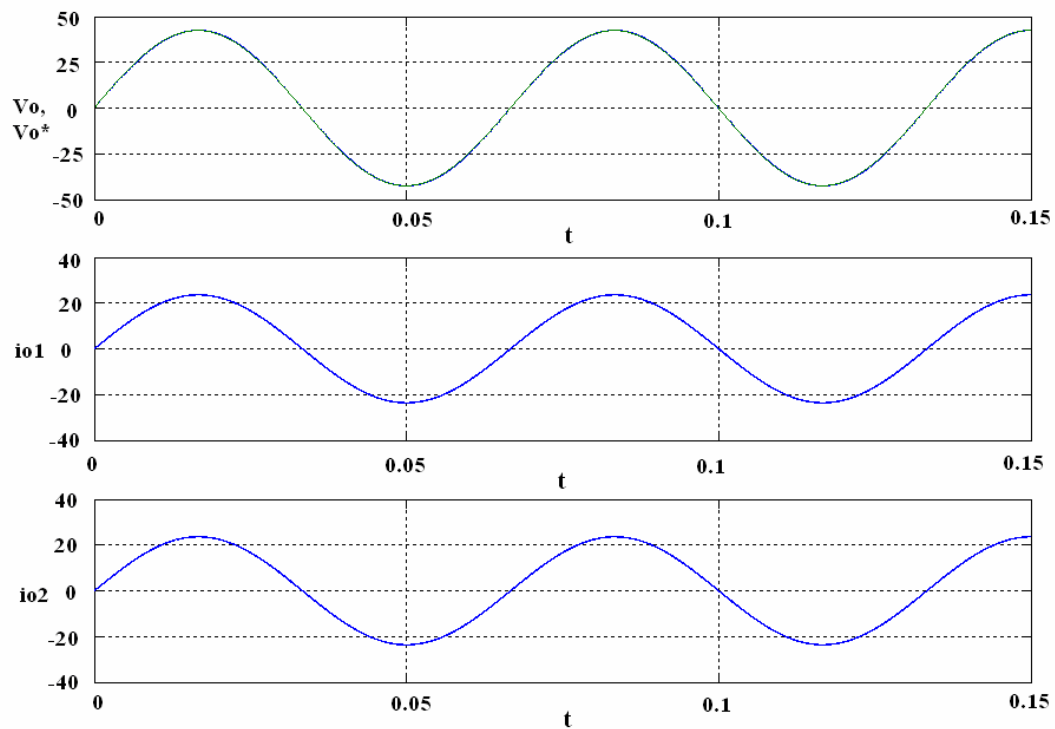


圖 4-18 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 30V(rms)$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流
與第二台輸出電流波形

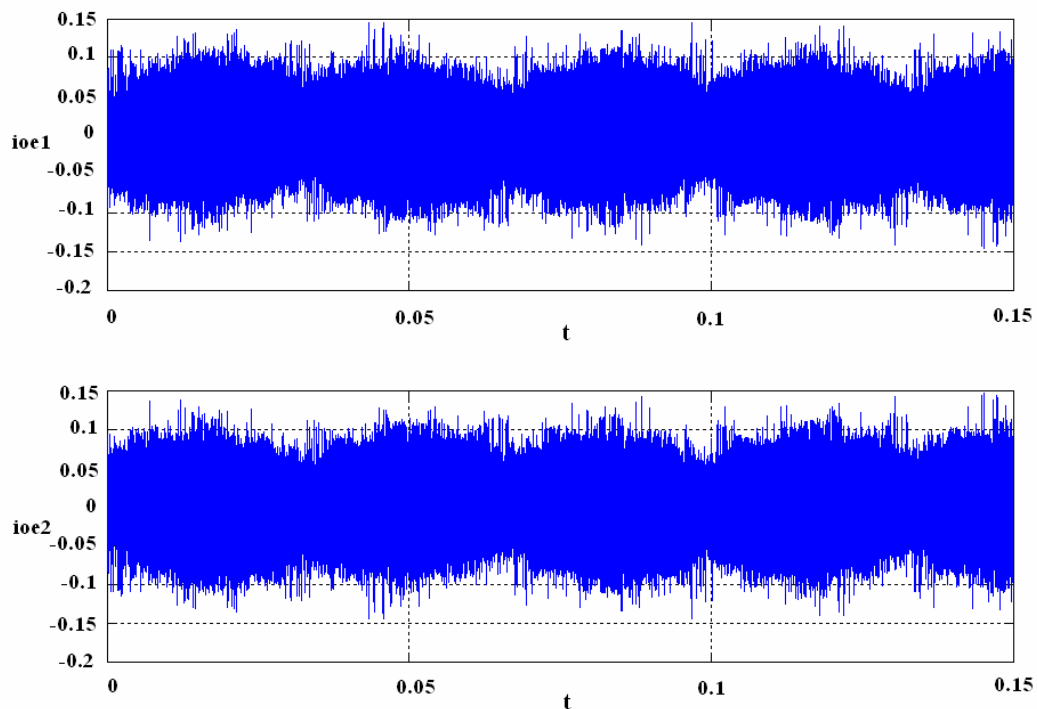


圖 4-19 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 30V(rms)$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二台
循環電流波形

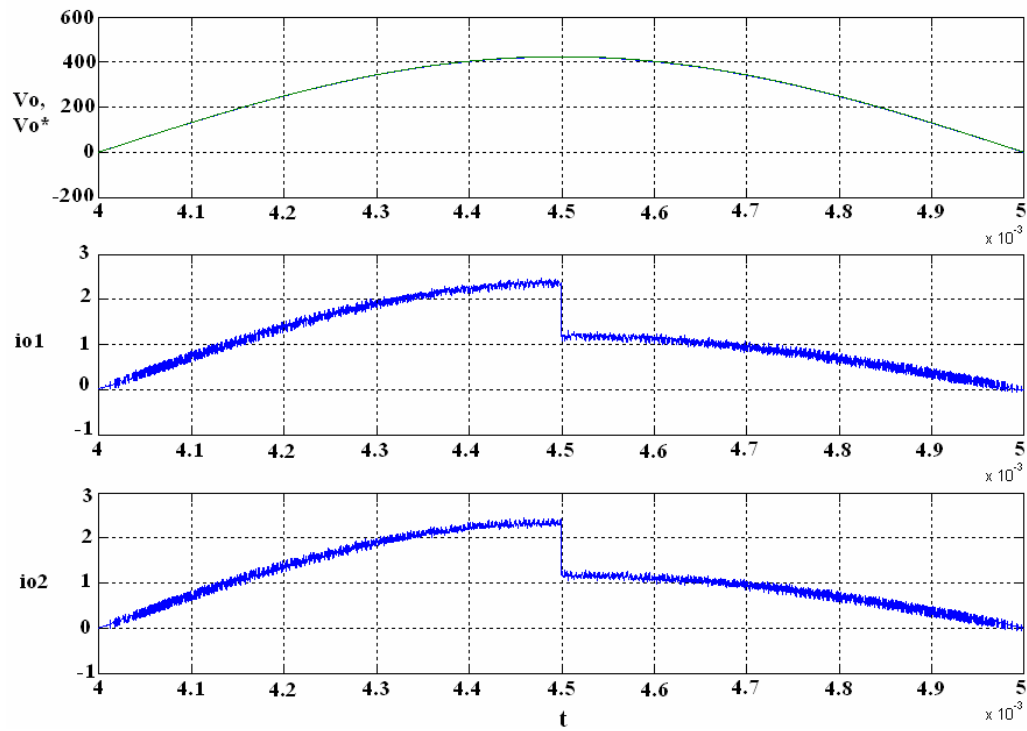


圖 4-20 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電

流與第二台輸出電流負載變化時之波形

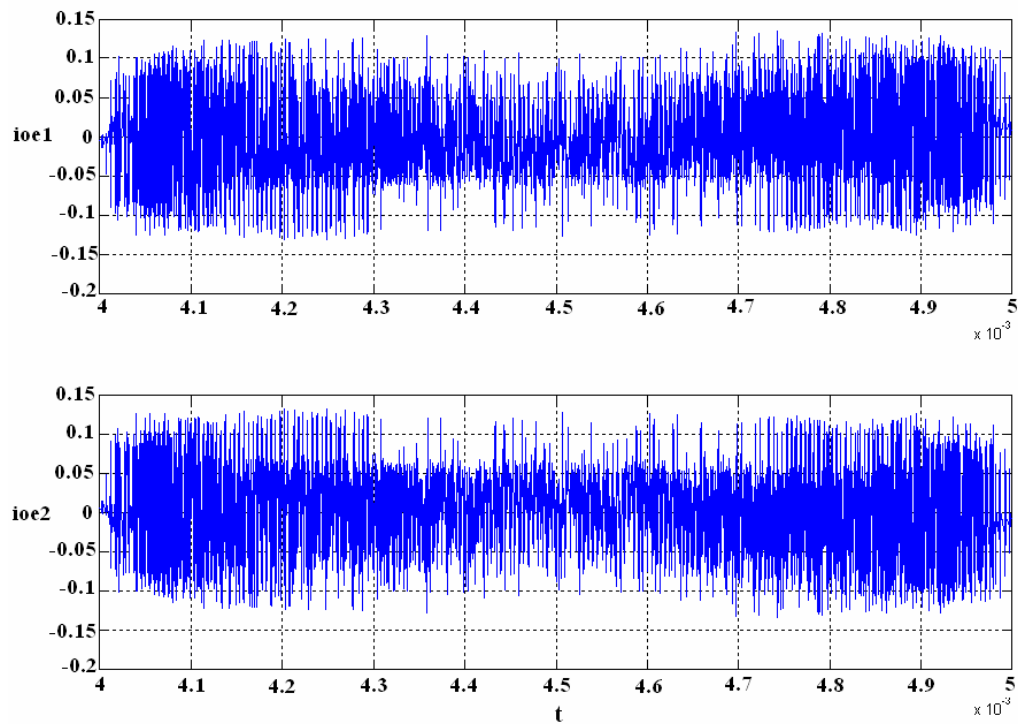


圖 4-21 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二

台循環電流負載變化時之波形

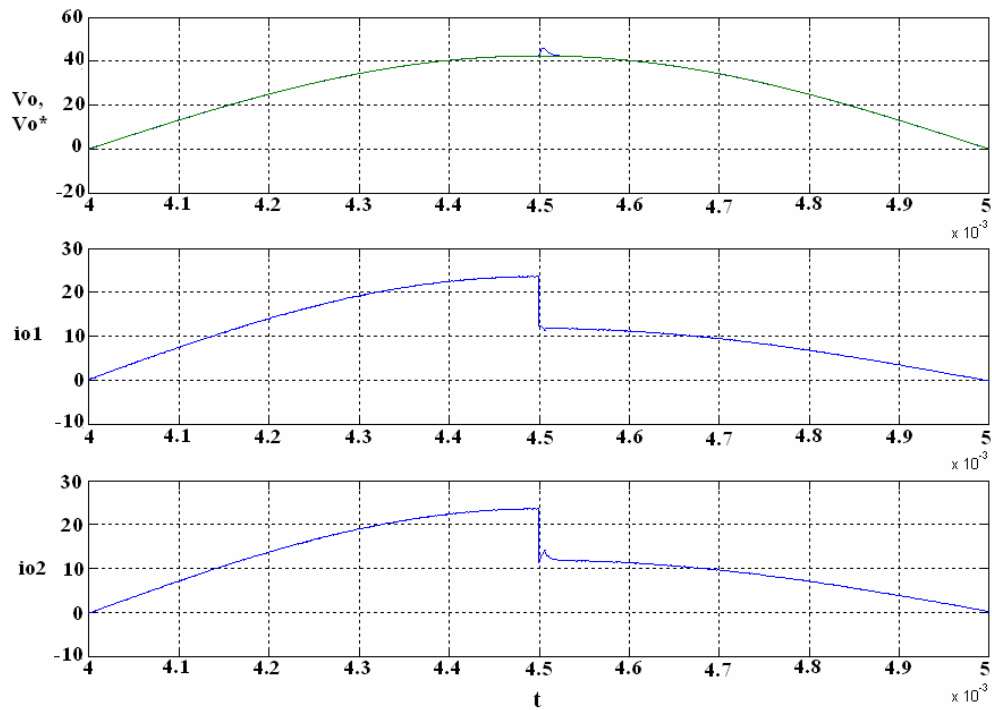


圖 4-22 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流負載變化時之波形

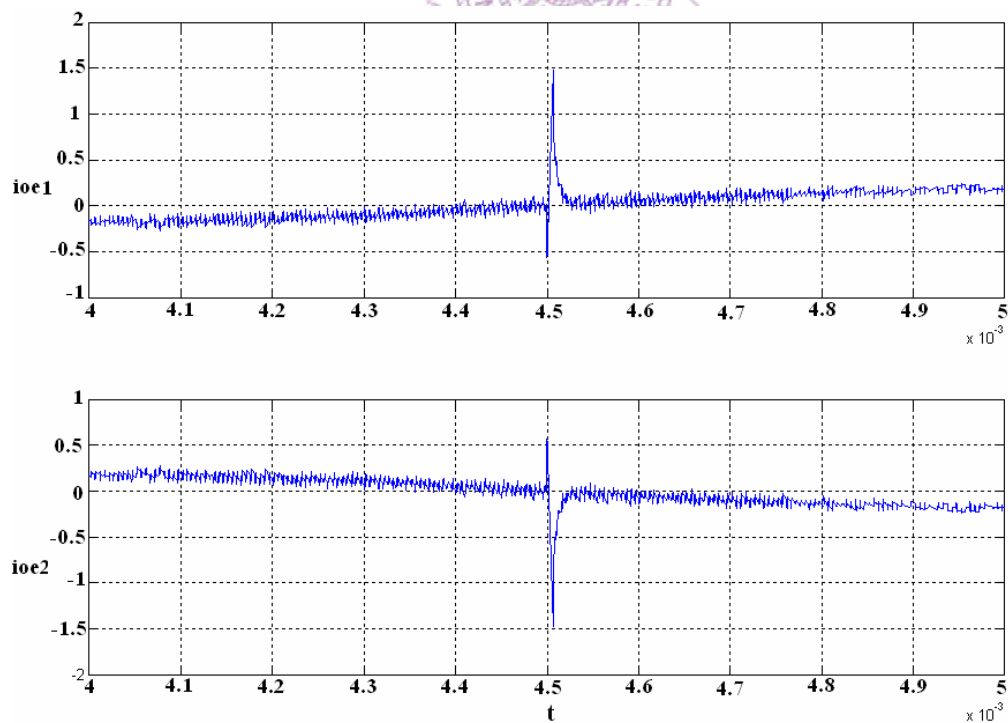


圖 4-23 $f = 500\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二台循環電流負載變化時之波形

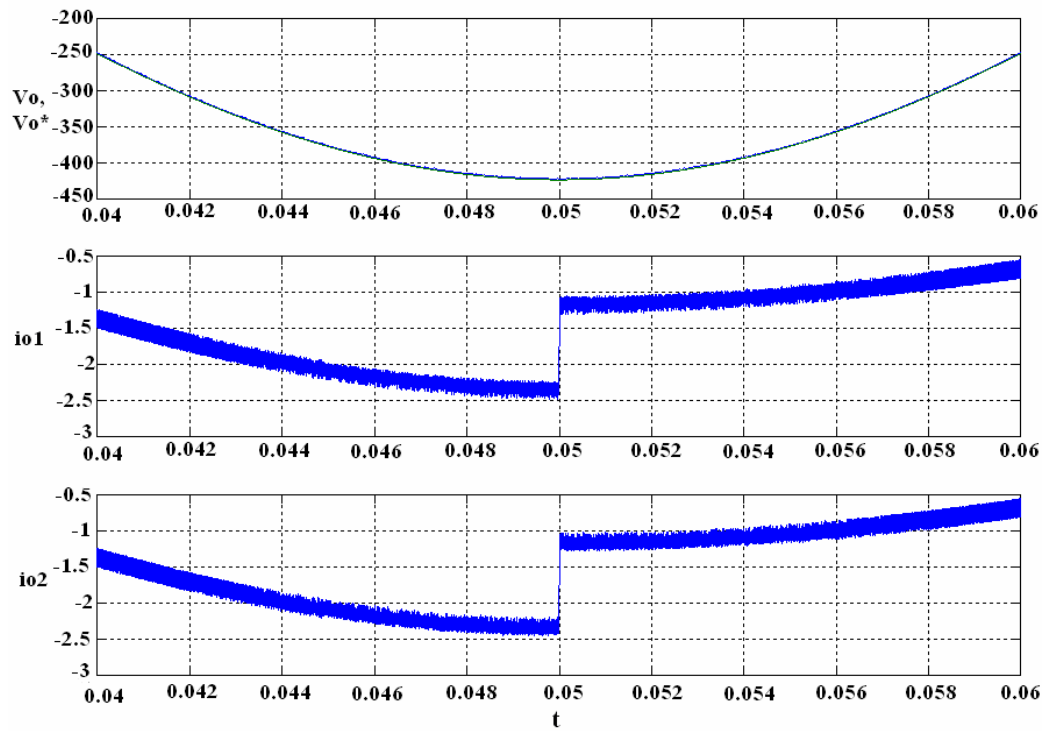


圖 4-24 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流與第二台輸出電流負載變化時之波形

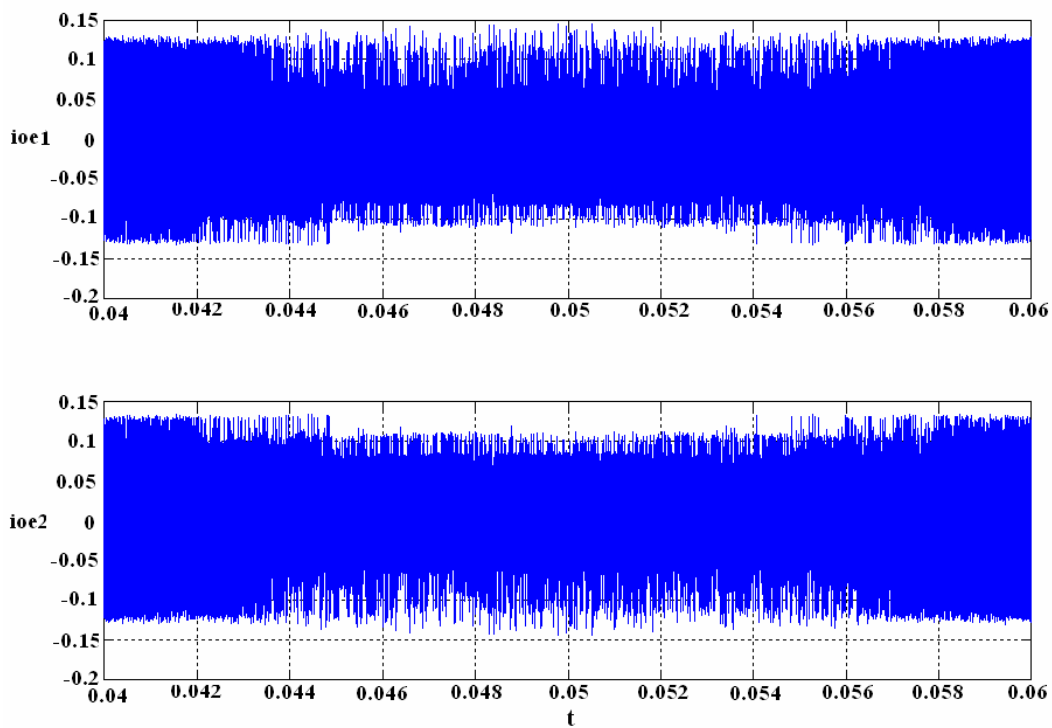


圖 4-25 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 300V(\text{rms})$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二台循環電流負載變化時之波形

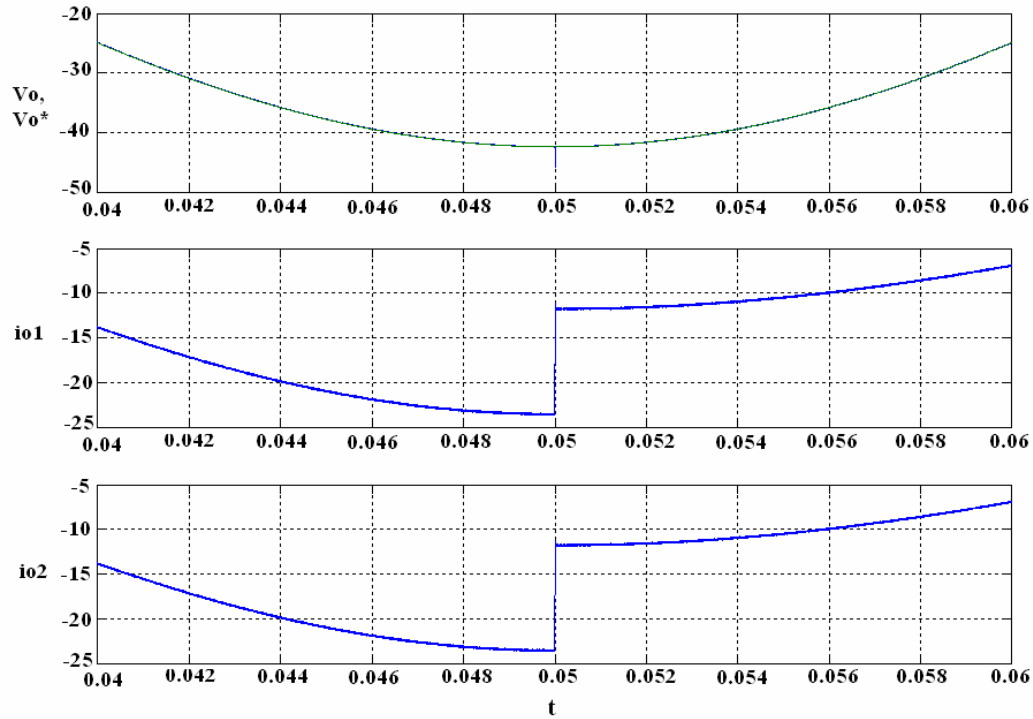


圖 4-26 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 閉迴路時之輸出電壓、第一台輸出電流
與第二台輸出電流負載變化時之波形

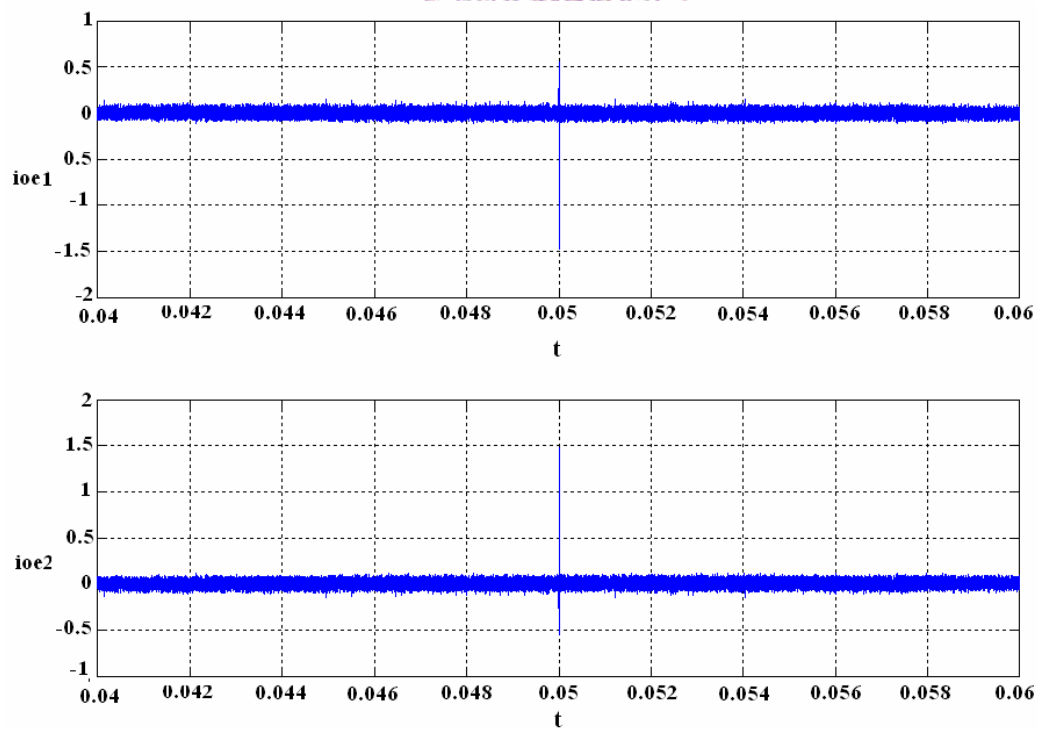


圖 4-27 $f = 15\text{Hz}$, $v_o = 30V(\text{rms})$ 閉迴路時之第一台循環電流與第二台
循環電流負載變化時之波形

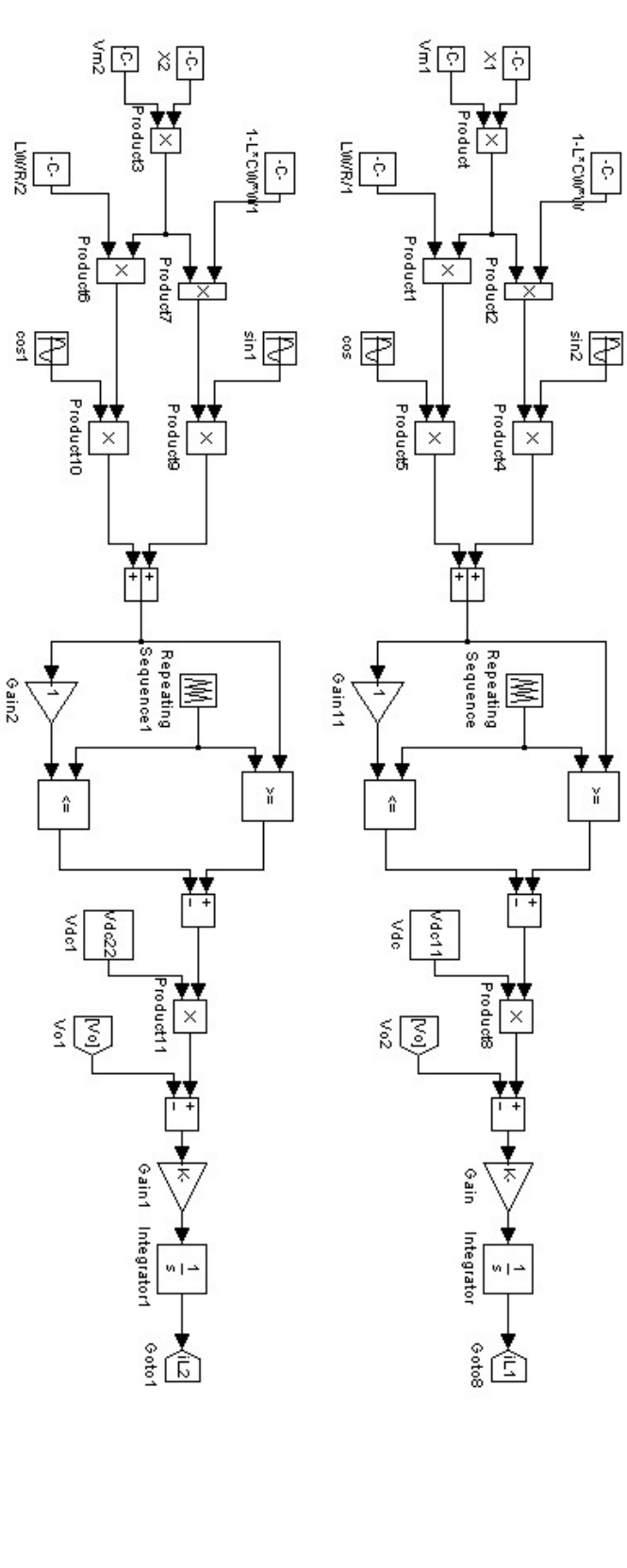


圖 4-28 開迴路控制之模擬方塊圖



圖 4-29 閉迴路控制之模擬方塊圖