



Advanced topic of Microgrid Systems

利用智慧型控制配電型靜態同步補償器(DSTATCOM)改善電力品質及 直流鏈電壓調控

*Intelligent Controlled DSTATCOM for Power
Quality Improvement and DC-Link Voltage
Regulation*

Chair Prof. Faa-Jeng Lin
PhD, Fellow IEEE/IET
linfj@ee.ncu.edu.tw

Dec. 3, 2019



目錄

一、緒論

二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路

五、模擬結果

六、硬體與實作結果

七、結論與未來研究方向



一、緒論

• 研究背景與動機

1. 台灣因應全球二氧化碳排放量管制，近年政府推動「太陽光電2年推動計畫」與「風力發電4年推動計畫」。
2. 在使用再生能源時，需透過電力電子轉換器例如：變流器、整流器等。這些電力電子之設備會造成大量的電流諧波與功率因數之落後，因此在傳輸電能過程中會造成電力的損失，也會產生機械噪音與溫度上升，進而引起公共安全與貴重設備受損等問題，故如何補償電流諧波與改善功率因數，將成為電力系統一大課題。

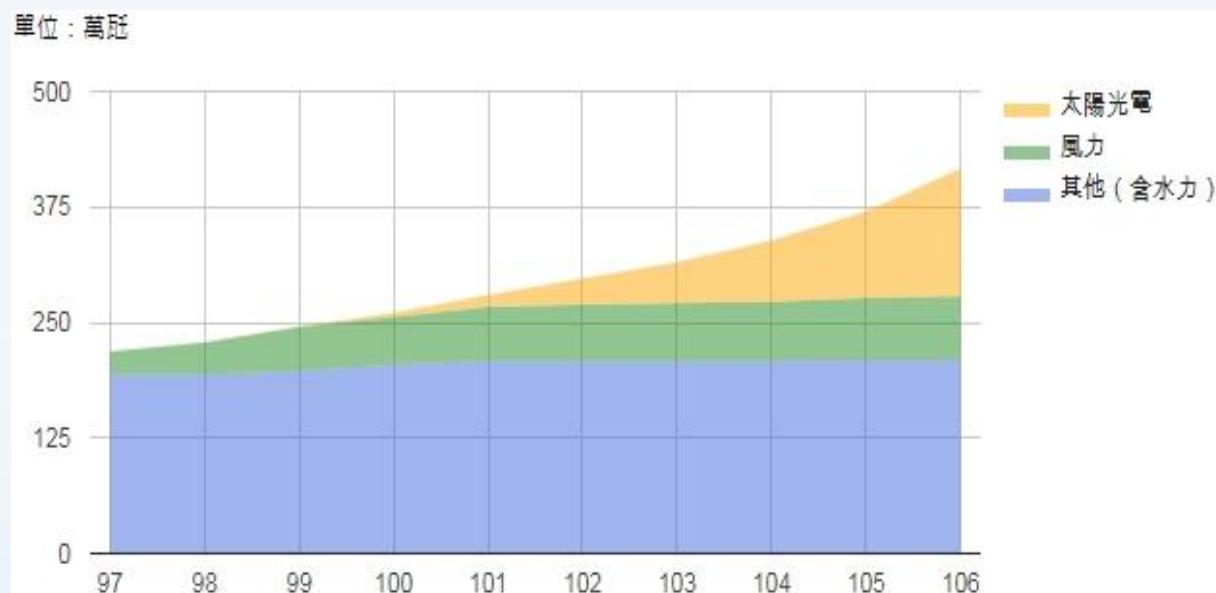


圖1.1 台灣歷年再生能源裝置容量



一、緒論

• 文獻回顧

1. 在電力系統中各種交\直流轉換器之設備會產生大量的電流諧波，使得電力品質下降；此外，生活當中馬達、日光燈等負載大部分為電感性負載。因此，發展出配電型靜態同步補償器(Distribution Static Compensator, DSTATCOM) 以改善因非線性負載所造成的電流諧波與線性負載造成之功率因數落後。
2. 配電型靜態同步補償器除了解決責任分界點(Point of Common Coupling, PCC)電流諧波與功率因數問題之外也可以改善責任分界點之電壓驟升、驟降及電流不平衡等問題。
3. 配電型靜態同步補償器的控制方法會有一定的瞬時功率流入或流出配電型靜態同步補償器，所以直流鏈電容需控制為恆定的電壓以釋放或吸收能量。而由於日常生活中負載經常變動，會影響到直流鏈電壓之穩定性，因此如何快速穩定控制直流鏈電壓的控制方法顯得格外重要。
4. 本文提出一新式非對稱補償模糊類神經網路(Compensatory Fuzzy Neural Network with Asymmetric Membership Function, CFNN-AMF)，來應用於配電型靜態同步補償器的直流鏈電壓調節，以改善電力品質及提升直流鏈電壓之穩定性。



目錄

- 一、緒論
- 二、規範與配電型靜態同步補償器介紹
- 三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略
- 四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實作結果
- 七、結論與未來研究方向



二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

• 電流諧波

- 諧波電流定義為電流訊號除了基頻成分之外還有其他頻率之整數倍及非整數倍之交流訊號合成的週期性波形，此波型透過傅立葉級數(Fourier series)來表示成式(2.1)：

$$I(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega_1 t + \phi_h) \quad (2.1)$$

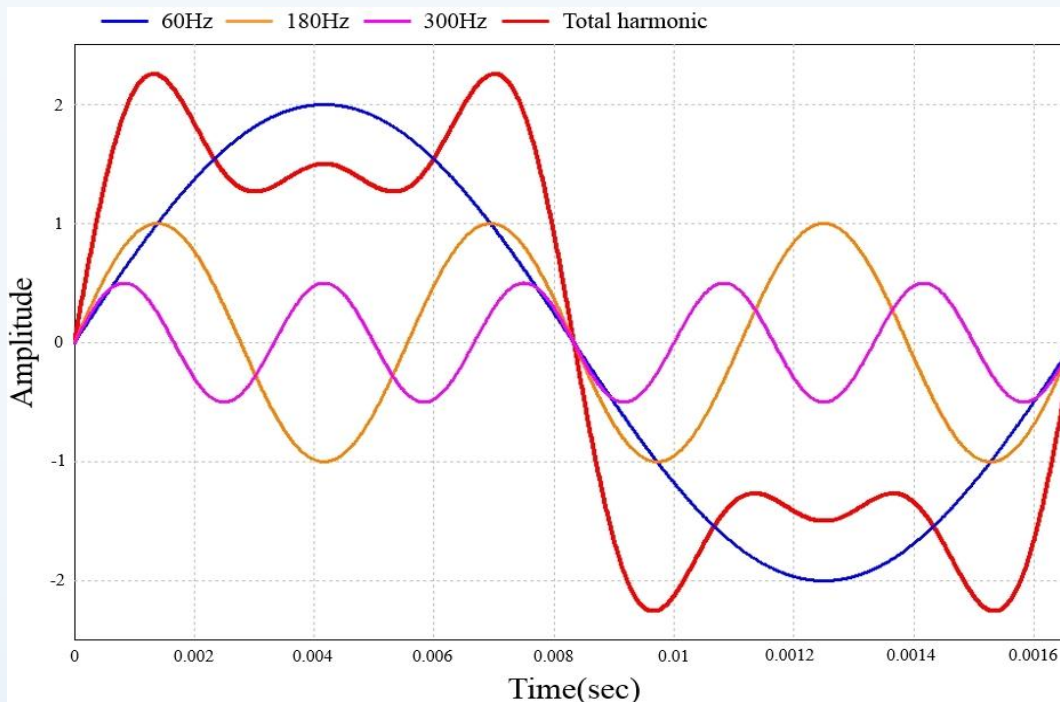


圖2.1 1、3、5次合成諧波



二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

- 諧波失真率公式及現行諧波管制標準

- 電流諧波指標可利用計算諧波電流的失真率，進而評估電流失真程度，最常用的為總諧波失真(Total Harmonic Distortion, THD)、總需量失真(Total Demand Distortion, TDD)和總間諧波失真因子(Total Inter-Harmonic Distortion Factor, TIHD)等各項指標[31]。

(一) Total harmonic distortion (THD)：

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H G_h^2}}{G_1} \quad (2.2)$$

其中 G_1 為基本頻率之電壓或電流之均方根值(Root Mean Square, RMS)； h 為第幾次整數次諧波； G_h 為第 h 次諧波之均方根值。

(二) Total demand distortion(TDD)：

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I_L} \quad (2.8)$$

其中 I_L 為在PCC點上基頻最大負載電流； I_h 為第 h 次整數倍之諧波流。

(三) Total inter-harmonic distortion factor (TIHD)：

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^H G_i^2}}{G_L} \quad (2.9)$$

其中 G_L 為基本頻率之電壓或電流之均方根值； G_i 為第 i 階諧波電壓或電流； H 為總間諧波階數。



二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

- 諧波失真率公式及現行諧波管制標準

- 在電力系統中，不同系統電壓的情況下，根據IEEE Std. 519-2014所制定的一般分散式系統對電流失真的限制。

表2.1 電流失真限制範圍(120 V至69 kV)

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

- 國內政府為了確保用戶端之電力品質，以減少電流諧波汙染問題，現階段對於電流諧波的規範是透過台灣電力公司依照國際電機電力工程協會，IEEE Std.519-1992諧波管制標準。

二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

- 功率因數定義及管制標準

- 功率因數(Power Factor, PF)定義為負載所消耗之實功率與視在功率之比值如式(2.18)：

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_{rms} I_{rms} \cos(\theta_v - \theta_i)}{V_{rms} I_{rms}} = \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (2.18)$$

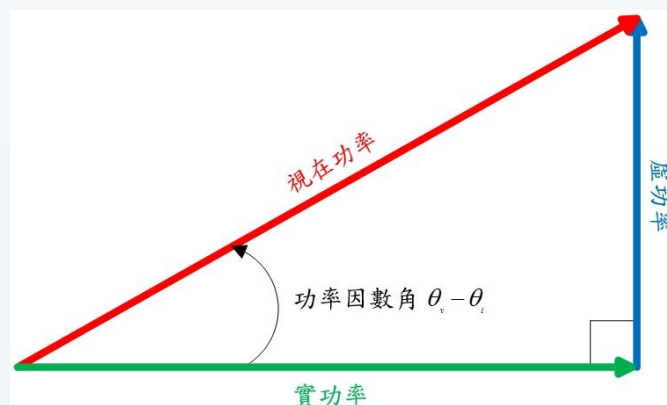


圖2.2 功率因數向量圖

- 國內目前對於功率因數標準是使用台灣電力公司的電業法規定「電業對於功率因數低於百分之八十之用戶，得酌加電價，並得由用戶負擔裝置功率因數表，其電價標準，應於營業規則內定之。」目前台灣電力公司的功率因數計算方式為有效電度(kWh)率與無效度電(kVARh)值據以計算用戶之平均功率因數公式如式(2.19)：

$$PF = \frac{(\text{kWh})}{\sqrt{(\text{kWh})^2 + (\text{kVARh})^2}} \times 100\% \quad (2.19)$$



二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

- 配電型靜態同步補償器介紹

- 1986年美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)專家N.G. Hingorani首次提出彈性交流輸電系統的概念。而在彈性交流輸電系統元件中，靜態無效功率補償器(Static Var Compensator, SVC)是最早應用在傳輸系統虛功補償，但SVC在提供或吸收虛功時，仍然是用傳統的被動元件電容器與電感器等元件來補償，而有容量不足與損耗等問題。所以發展出以電壓源變流器為基本架構的靜態同步補償器(STATCOM)，在STATCOM與SVC相比之下，STATCOM具有調節範圍廣、調節響應速度快與低壓條件下的虛功調控能力更強之優點。
- 由於大多數的STATCOM都用在傳輸方面，而配電型靜態同步補償器(DSTATCOM)大多用在配電端的虛功補償。DSTATCOM相較STATCOM下有幾項優點：
- (1) DSTATCOM具有響應速度快，可以快速補償虛功與電流諧波之變化，以提供更好的電力品質。
- (2) DSTATCOM使用直流電容來維持穩定之直流鏈電壓，這樣省去了STATCOM所需的大電感與大容量切換設備，所以DSTATCOM的體積更小以及損耗降低。



二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

• 配電型靜態同步補償器介紹

- 對於彈性交流輸電系統依照功能與組成元件不同而有不同的名稱，依據與系統連接支架構可分成串聯型、並聯型以及混合型。依其裝設位置之不同，可用來解決不同之電力品質問題，如表 2.5 所示：

表2.5 不同種類之控制器對電力品質補償之比較

	串聯型	並聯型	混合型
電壓驟升(降)	YES	Limited	YES
諧波隔離	YES	NO	YES
諧波補償	NO	YES	YES
功因校正	NO	YES	YES
不斷電系統	YES	YES	YES
電壓閃爍	YES	YES	YES
電力潮流控制	NO	NO	YES

二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

• 配電型靜態同步補償器之工作原理

- 圖2.8為本論文中之DSTATCOM的系統架構，DSTATCOM裝設於電壓端與負載端之間經由電感與配電系統進行連接。藉由調整輸出電壓 V_o 的振幅大小，來決定對系統提供虛功或是吸收虛功以改善電力品質。在DSTATCOM在運作時，實功率 P_o 與虛功率 Q_o 之關係式如式(2.20)與式(2.21)：由式(2.20)與式(2.21)可得知，因為DSTATCOM的電感阻抗 X_o 為定值，故DSTATCOM提供或吸收虛功率與其輸出電壓 V_o 及PCC點電壓有關。

$$P_o = -\frac{V_o V_{PCC}}{X_o} \sin \theta_o \quad (2.20)$$

$$Q_o = \frac{V_{PCC} (V_{PCC} - V_o \cos \theta_o)}{X_o} \cong \frac{V_{PCC} (V_{PCC} - V_o)}{X_o} \quad (2.21)$$

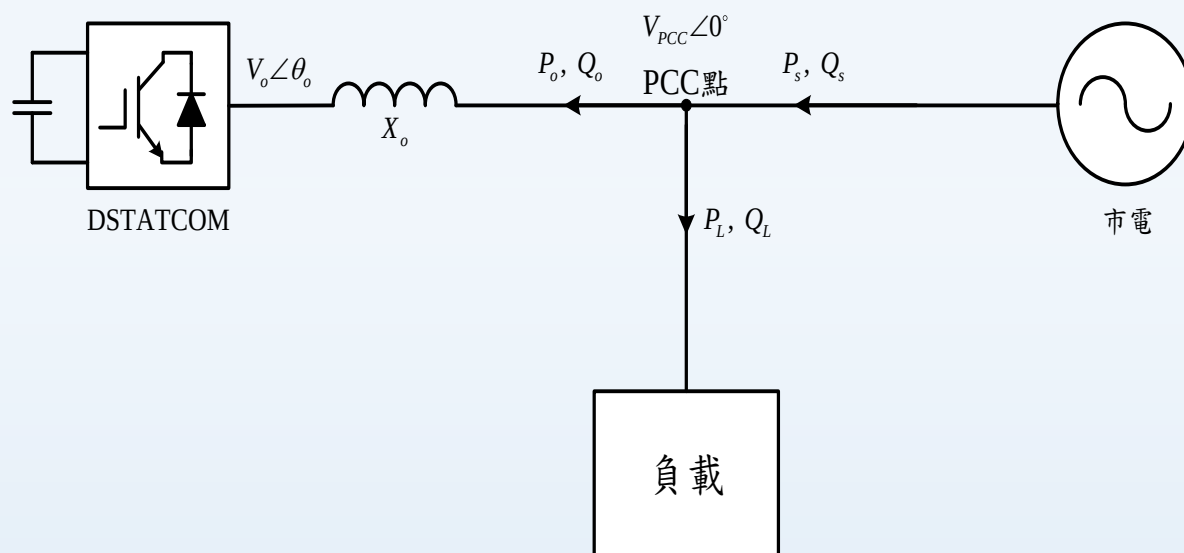


圖2.8 DSTATCOM的系統架構

二、規範與配電型靜態同步補償器介紹

- 配電型靜態同步補償器之工作原理

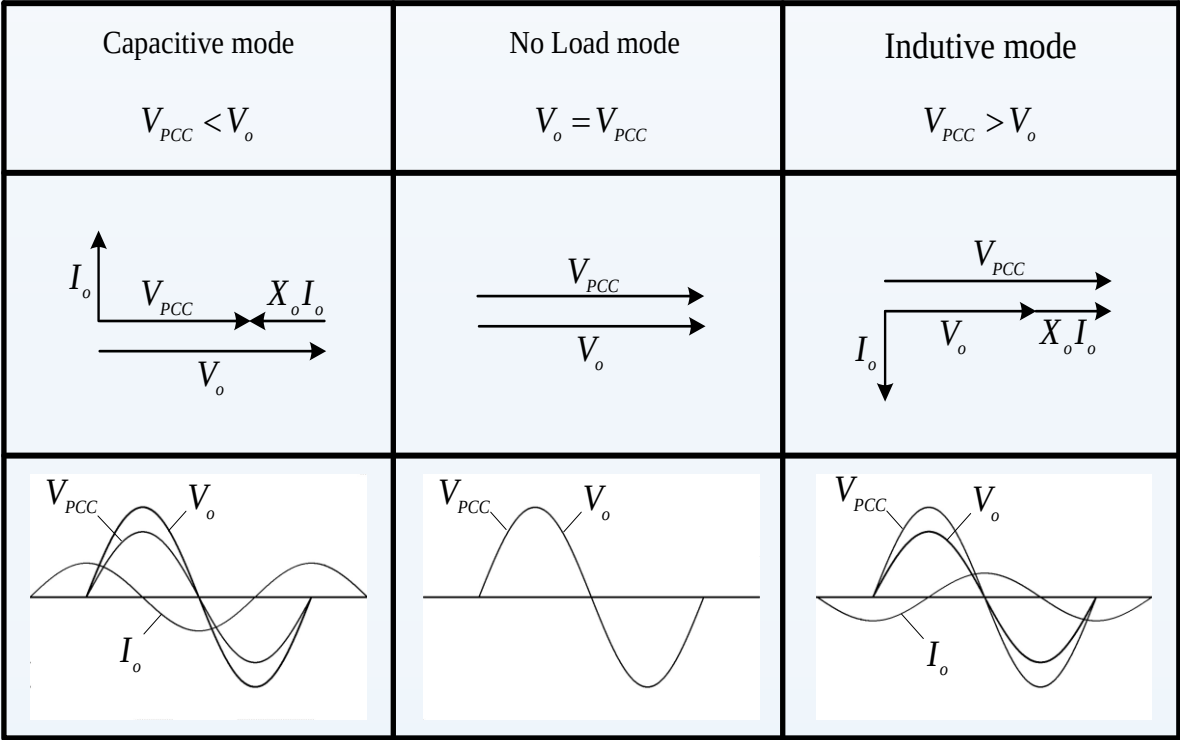


圖2.9 DSTATCOM之操作原理



目錄

- 一、緒論
- 二、規範與配電型靜態同步補償器介紹
- 三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略
- 四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實作結果
- 七、結論與未來研究方向



二、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

• 座標軸轉換

- 配電型靜態同步補償器系統中，因電壓、電流和開關函數是非線性時變且互相耦合，所以在分析上相當困難。我們藉由座標軸轉換將三相座標軸(a-b-c軸)轉換至交、直軸(α - β 軸)之靜止座標軸，將可使系統的分析與控制較為容易。

座標軸轉換公式：

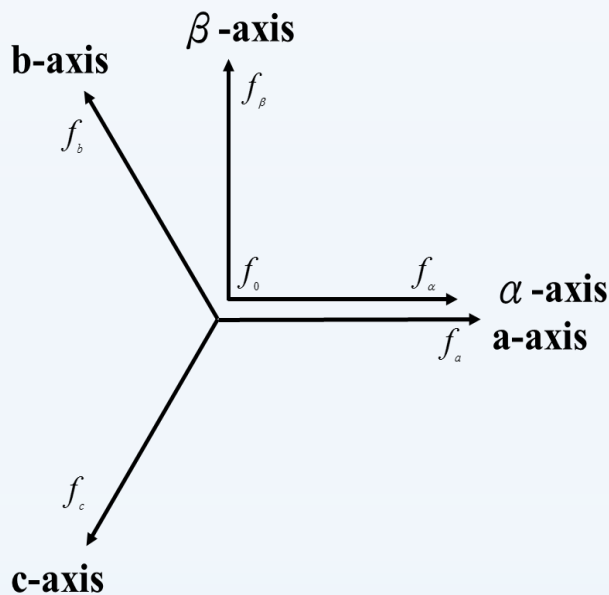


圖2.5 a-b-c軸與 α - β 軸之幾何關係圖

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = f_{abc} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = f_{\alpha\beta 0} \quad (3.4)$$



三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

- 瞬時功率理論(Instantaneous Power Theory)

- 瞬時功率理論(Instantaneous Power Theory)也稱作為P-Q控制法，主要將偵測到的負載三相電壓值與電流值，三相線電壓先利用式(3.5)將線電壓轉為相電壓：

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ac} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

再分別做靜止座標軸轉換，將 $a-b-c$ 軸座標轉換成 $\alpha-\beta$ 軸，如下式(3.6)與式(3.7)：

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{L\beta} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$



三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

• 瞬時功率理論(Instantaneous Power Theory)

由於在三相三線平衡系統中，零序電壓 v_0 與零序電流 i_{L0} 皆為零，所以可把零序電壓 v_0 與零序電流 i_{L0} 忽略。因此瞬時電壓 v 與瞬時電流 i_L 可以被定義為式(3.8)與式(3.9)：

$$v = v_\alpha + jv_\beta \quad (3.8)$$

$$i_L = i_{L\alpha} + ji_{L\beta} \quad (3.9)$$

由式(3.8)與式(3.9)計算瞬時視在功率 S_L ，可以被定義為瞬時電壓與取共軛複數的瞬時電流之內積為式(3.10)：

$$S_L = vi_L^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_{L\alpha} - ji_{L\beta}) = P_L + jQ_L \quad (3.10)$$

將式(3.10)整理為矩陣為式(3.11)：

$$\begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

將瞬時實功率 P_L 及瞬時虛功率 Q_L 分別寫成直流成份 $\bar{P}_L$ 、 $\bar{Q}_L$ 加上震盪成份 $\tilde{P}_L$ 、 $\tilde{Q}_L$ 如式(3.12)和式(3.13)：

$$P_L = \bar{P}_L + \tilde{P}_L \quad (3.12)$$

$$Q_L = \bar{Q}_L + \tilde{Q}_L \quad (3.13)$$



三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

• 瞬時功率理論(Instantaneous Power Theory)

接著使用低通濾波器來取得直流成份的實功率 $\bar{P}_L$ ，再與瞬時實功率 P_L 相減而算出震盪成份的實功率 $\tilde{P}_L$ ，最後透過式(3.14)方程式將其推導成座標之參考補償電流命令：

$$\begin{bmatrix} i_{oa}^* \\ i_{ob}^* \\ i_{oc}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{P}_L + \bar{P}_{loss} \\ -Q_L \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

最後將 α - β 軸座標透過反靜止座標軸轉回成 a - b - c 軸，如式(3.15)：

$$\begin{bmatrix} i_{oa}^* \\ i_{ob}^* \\ i_{oc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o\alpha}^* \\ i_{o\beta}^* \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

綜合上述各式理論，透過圖3.5可表示瞬時功率理論運作方式。

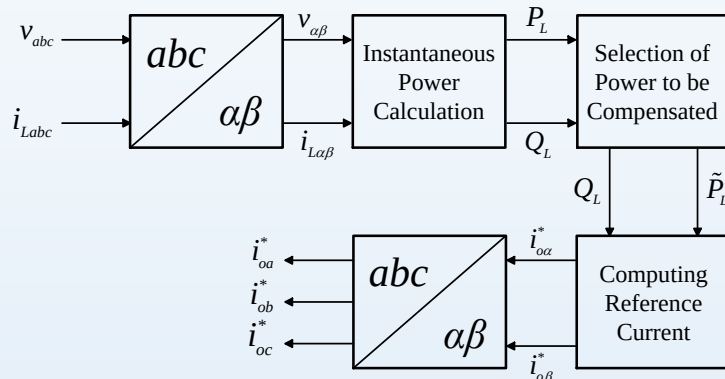


圖3.5 瞬時功率理論流程圖



三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

• 直流鏈電壓控制

- 配電型靜態同步補償器中的直流鏈電壓，主要是透過電容儲存電能來提供變流器所需要的直流電壓源，而直流電壓源的穩定程度會影響補償效果以及操作效率。因此直流鏈電壓必須能夠維持在一定的範圍，而直流鏈電壓值如式(3.20)：

$$\frac{1}{2}C_{dc} \frac{dV_{dc}^2(t)}{dt} = -P(t) \quad (3.20)$$

- 然而在本系統中不只有非線性負載會消耗功率，也有開關切換與元件損失等。因此為了使直流鏈電壓保持穩定，藉由電壓控制器與直流鏈電壓之迴授訊號，組成一閉迴路架構，使得直流鏈電壓可保持穩定值。傳統控制直流鏈之方法皆採取比例積分控制器，而本論文所提出一新式非對稱補償模糊類神經網路控制器應用在直流鏈電壓控制中，取代傳統的比例積分控制器，在穩態或暫態皆達到更好的效果。

三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

- 整體控制策略

- 圖3.7為配電型靜態同步補償器整體架構圖。本論文是使用三相三線式變流器做為配電型靜態同步補償器系統，三相三線式變流器輸出補償諧波電流與功率因數後再經過三相變壓器送至市電系統。

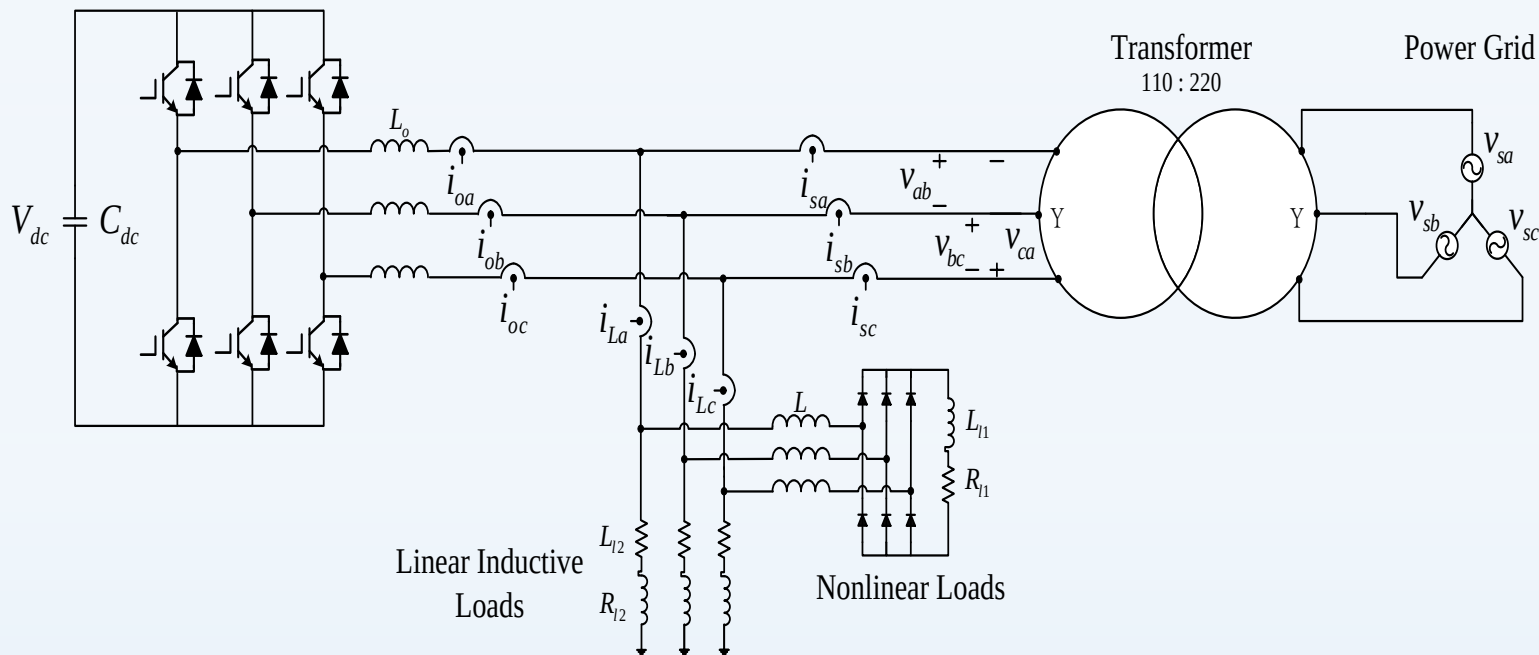


圖3.7 整體架構圖

三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略

- 整體控制策略

- 本論文是運用瞬時功率理論為基礎發展出的控制架構，首先將非線性負載與線性負載之電壓與電流訊號經由瞬時功率計算得到所需補償功率(P_L 、 Q_L)。接著同時將直流鏈電壓經由直流鏈電壓之控制方法得到電流控制力($\bar{P}_{loss}$)；最後為了使PCC點無虛功率的存在，所以令瞬時虛功命令為0 ($Q_s=0$)，上述結合瞬時實功率 P_L 與瞬時虛功率 Q_L 。利用反瞬時功率計算算出 α 軸與 β 軸的電流命令(i_α^* 、 i_β^*)再經由座標轉換得到三相電流命令(i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^*)，最後將目標參考電流透過電流控制技術產生脈波寬度調變訊號，訊號送入功率開關產生補償電流，以改善電力品質。

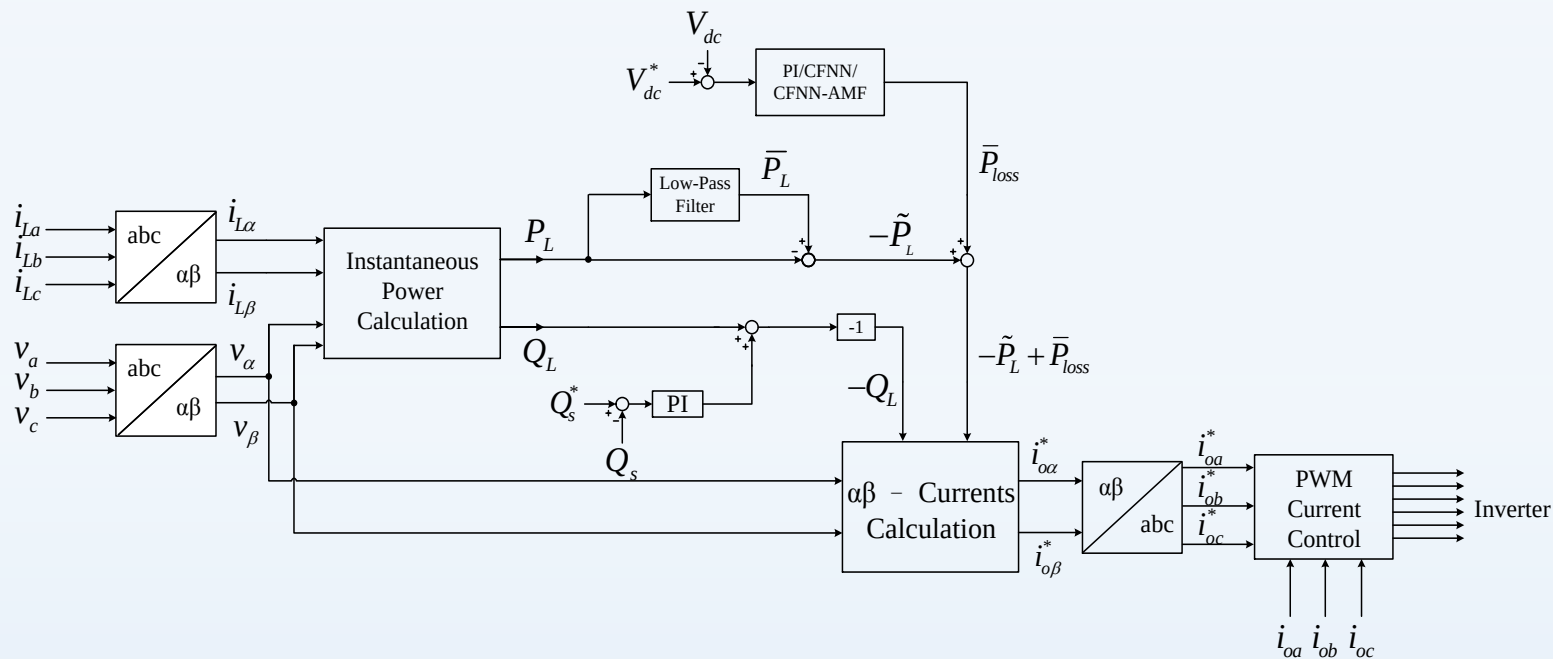


圖3.8 控制方塊圖



目錄

- 一、緒論
- 二、規範與配電型靜態同步補償器介紹
- 三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略
- 四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實作結果
- 七、結論與未來研究方向

四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路 (CFNN-AMF)

- 非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路架構

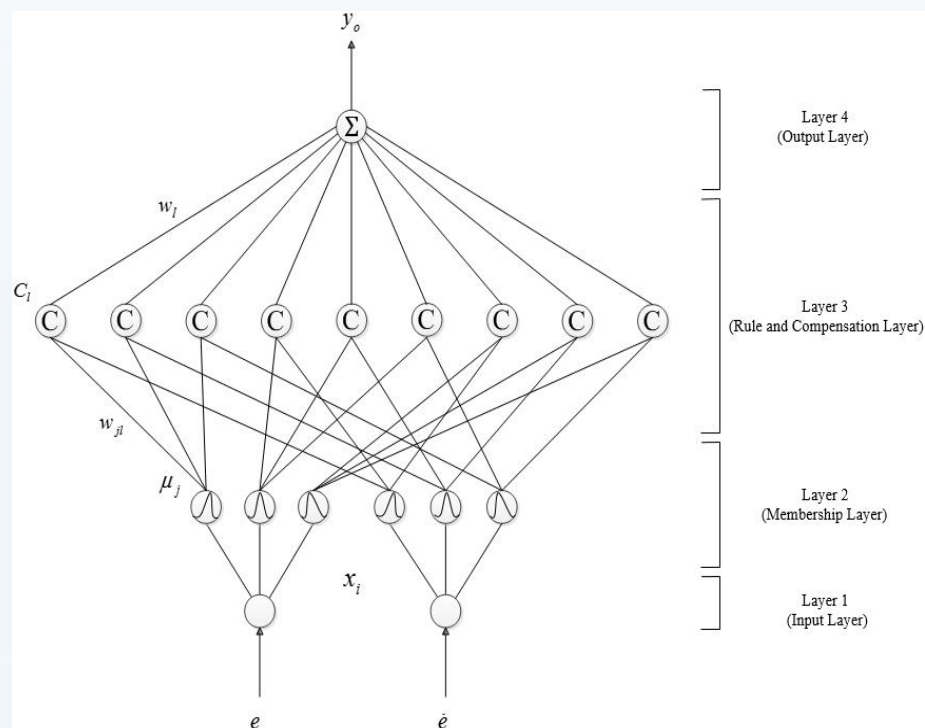


圖4.1 非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路架構

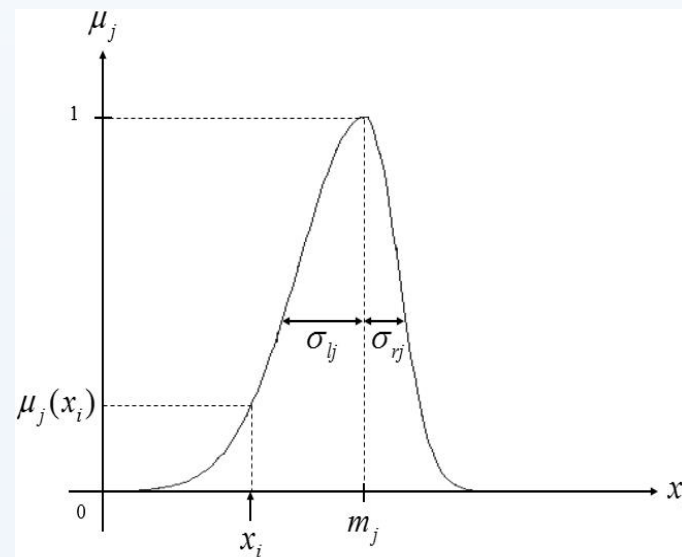


圖4.2 非對稱型高斯函數



四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路

- 非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路架構

第一層(輸入層)：

$$net_i(N) = e_i \quad (4.1)$$

$$x_i(N) = f_i(net_i(N)) = net_i(N), \quad i = 1, 2 \quad (4.2)$$

第二層(歸屬函數層)：

$$net_j(N) = \begin{cases} -\frac{(x_i(N) - m_j(N))^2}{(\sigma_{lj}(N))^2} & , \quad -\infty < x_i(N) \leq m_j \\ -\frac{(x_i(N) - m_j(N))^2}{(\sigma_{rj}(N))^2} & , \quad m_j < x_i(N) \leq \infty \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.3)$$

$$\mu_j(N) = f_j(net_j(N)) = \exp(net_j(N)) \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.4)$$

第三層(規則與補償層)：

$$\mu_l = \prod_j w_{jl} \mu_j \quad (4.5)$$

$$net_l(N) = (\mu_l)^{1-\gamma_l+\gamma_l/n} \quad \gamma_l = [0, 1] \quad (4.6)$$

$$C_l(N) = f_l(net_l(N)) = net_l(N) \quad l = 1, 2, \dots, 9 \quad (4.7)$$

第四層(輸出層)：

$$net_o(N) = \sum_l w_l(N) C_l(N) \quad (4.8)$$

$$y_o(N) = f_o(net_o(N)) = net_o(N) \quad o = 1 \quad (4.9)$$



四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路

• 線上學習法則

定義能量函數 E 如下：

$$E = \frac{1}{2} (V_{dc}^* - V_{dc})^2 = \frac{1}{2} e^2 \quad (4.10)$$

第四層：

$$\delta_o^4 = -\frac{\partial E}{\partial y_o(N)} = -\frac{\partial E}{\partial V_{dc}} \frac{\partial V_{dc}}{\partial y_o(N)} \cong e + \dot{e} \quad (4.11)$$

$$\Delta w_l = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial w_l} = -\eta_1 \frac{\partial E}{\partial y_o(N)} \frac{\partial y_o(N)}{\partial w_l} = \eta_1 \delta_o^4 C_l \quad (4.12)$$

$$w_l(N+1) = w_l(N) + \Delta w_l \quad (4.13)$$

第三層：

在此層中，減少計算量之負擔，本層間之連結權重值皆為1。

$$\delta_o^3 = -\frac{\partial E}{\partial C_l(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o(N)} \frac{\partial y_o(N)}{\partial C_l(N)} = \delta_o^4 w_l \quad (4.14)$$



四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路

- 線上學習法則

第三層(續)：

補償算子 $\gamma_l(N)$ 被定義如下：

$$\gamma_l(N) = \frac{c_l^2(N)}{c_l^2(N) + d_l^2(N)} \quad \gamma_l = [0,1] \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \Delta c_l &= -\eta_c \frac{\partial E}{\partial c_l(N)} = -\eta_c \frac{\partial E}{\partial r_l(N)} \frac{\partial \gamma_l(N)}{\partial c_l(N)} \\ &= -\eta_c \frac{\partial E}{\partial \gamma_l(N)} \frac{2c_l(N)d_l(N)^2}{(c_l(N)^2 + d_l(N)^2)^2} = \eta_c \Delta \gamma_l \frac{2c_l(N)d_l(N)^2}{(c_l(N)^2 + d_l(N)^2)^2} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \Delta d_l &= -\eta_d \frac{\partial E}{\partial d_l(N)} = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial r_l(N)} \frac{\partial \gamma_l(N)}{\partial d_l(N)} \\ &= -\eta_d \frac{\partial E}{\partial \gamma_l(N)} \frac{-2c_l(N)^2 d_l(N)}{(c_l(N)^2 + d_l(N)^2)^2} = \eta_d \Delta \gamma_l \frac{-2c_l(N)^2 d_l(N)}{(c_l(N)^2 + d_l(N)^2)^2} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\Delta \gamma_l = -\frac{\partial E}{\partial \gamma_l(N)} = -\frac{\partial E}{\partial C_l(N)} \frac{\partial C_l(N)}{\partial \gamma_l(N)} = \delta_o^3 \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \left(\prod_j w_{jl} \mu_j \right)^{1-\gamma_l+\frac{\gamma_l}{n}} \ln \left(\prod_j w_{jl} \mu_j \right) \quad (4.18)$$



四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路

• 線上學習法則

第三層(續)：

$$c_l(N+1) = c_l(N) + \Delta c_l = c_l(N) + \eta_c \left\{ \frac{2c_l(N)d_l^2(N)}{[c_l^2(N) + d_l^2(N)]^2} \right\} \Delta \gamma_l \quad (4.19)$$

$$d_l(N+1) = d_l(N) + \Delta d_l = d_l(N) - \eta_d \left\{ \frac{2c_l^2(N)d_l(N)}{[c_l^2(N) + d_l^2(N)]^2} \right\} \Delta \gamma_l \quad (4.20)$$

$$\gamma_l(N+1) = \frac{c_l^2(N+1)}{c_l^2(N+1) + d_l^2(N+1)} \quad (4.21)$$

第二層：

$$\delta_o^2 = -\frac{\partial E}{\partial net_j(N)} = -\frac{\partial E}{\partial C_l(N)} \frac{\partial C_l(N)}{\partial \mu_j(N)} \frac{\partial \mu_l(N)}{\partial net_j(N)} = \sum_j \delta_o^3 \mu_l \left(1 - \gamma_l + \frac{\gamma_l}{n}\right) \left(\prod_j w_{jl} \mu_j\right)^{-\gamma_l + \frac{\gamma_l}{n}} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \Delta m_j &= -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial m_j} = -\eta_2 \frac{\partial E}{\partial \mu_j(N)} \frac{\partial \mu_j(N)}{\partial m_j} \\ &= \begin{cases} 2\eta_2 \delta_o^2 \frac{(x_i(N) - m_j(N))}{(\sigma_{lj}(N))^2} & , \quad -\infty < x_i(N) \leq m_j \\ 2\eta_2 \delta_o^2 \frac{(x_i(N) - m_j(N))}{(\sigma_{rj}(N))^2} & , \quad m_j < x_i(N) \leq \infty \end{cases} \quad (4.23) \end{aligned}$$



四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路

• 線上學習法則

第二層(續)：

$$\Delta\sigma_{lj} = -\eta_3 \frac{\partial E}{\partial \sigma_{lj}} = -\eta_3 \frac{\partial E}{\partial \mu_{lj}(N)} \frac{\partial \mu_{lj}(N)}{\partial \sigma_{lj}} = 2\eta_3 \delta_o^2 \frac{(x_i - m_j)^2}{(\sigma_{lj})^3} \quad (4.24)$$

$$\Delta\sigma_{rj} = -\eta_4 \frac{\partial E}{\partial \sigma_{rj}} = -\eta_4 \frac{\partial E}{\partial \mu_{rj}(N)} \frac{\partial \mu_{rj}(N)}{\partial \sigma_{rj}} = 2\eta_4 \delta_o^2 \frac{(x_i - m_j)^2}{(\sigma_{rj})^3} \quad (4.25)$$

$$m_j(N+1) = m_j(N) + \Delta m_j \quad (4.26)$$

$$\sigma_{lj}(N+1) = \sigma_{lj}(N) + \Delta\sigma_{lj} \quad (4.27)$$

$$\sigma_{rj}(N+1) = \sigma_{rj}(N) + \Delta\sigma_{rj} \quad (4.28)$$

由於系統有著不確定項的存在，為克服此一問題以及加快連結權重值之線上學習速率，公式調整如下：

$$\delta_o^4 \cong (V_{dc}^* - V_{dc}) + (\dot{V}_{dc}^* - \dot{V}_{dc}) = e + \dot{e} \quad (4.29)$$



目錄

- 一、緒論
- 二、規範與配電型靜態同步補償器介紹
- 三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略
- 四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實作結果
- 七、結論與未來研究方向

五、模擬結果

• 系統簡介

- 本章節先利用Matlab/Simulink模擬軟體來建立電力系統之環境架構，使用PI、CFNN與CFNN-AMF之3種不同控制器來進行模擬，並驗證本論文所提出的控制架構的正確性。

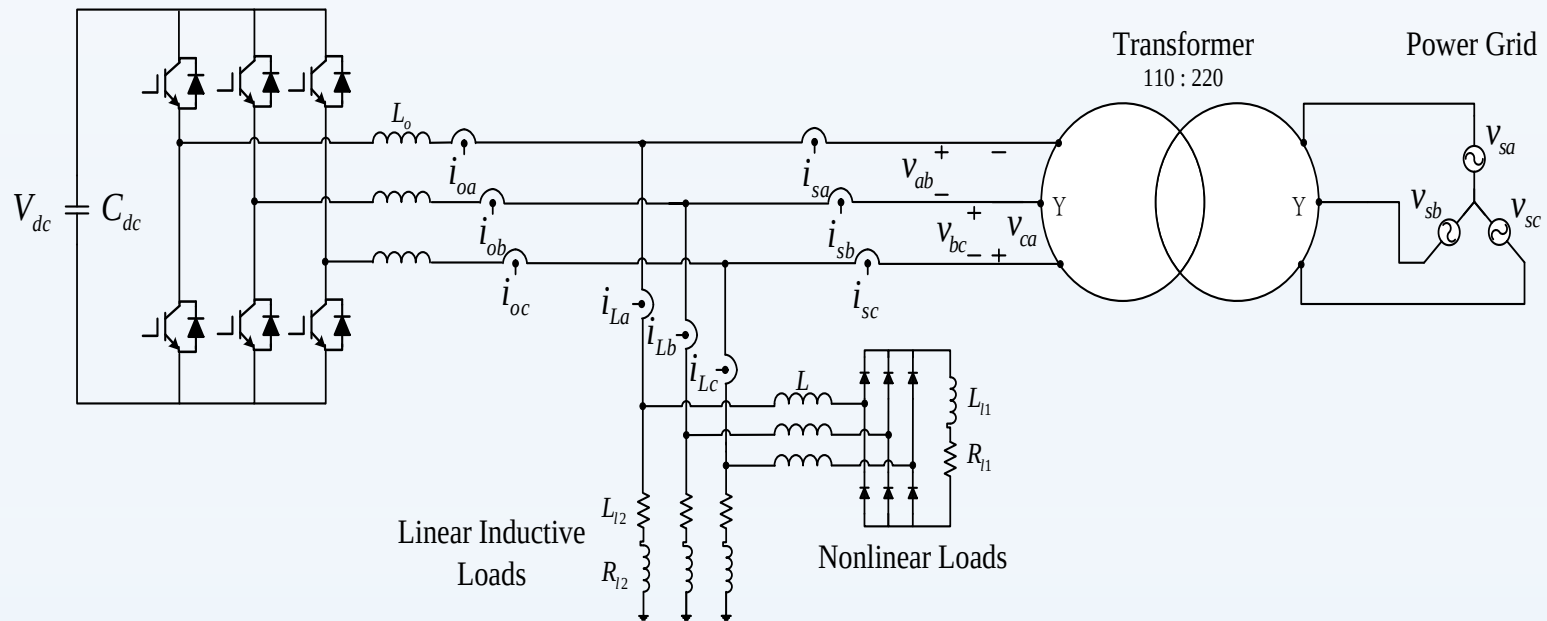


圖3.7 整體架構圖



五、模擬結果

- 系統簡介

非線性負載值

	L	L_{l1}	R_{l1}
Nonlinear Load 1	6 mH	1 mH	100 Ω
Nonlinear Load 2	6 mH	1 mH	75 Ω
Nonlinear Load 3	6 mH	1 mH	50 Ω

線性負載

	R_{l2}	L_{l2}
Linear Inductive Load 1	25 Ω	30 mH
Linear Inductive Load 2	25 Ω	40 mH
Linear Inductive Load 3	25 Ω	50 mH



五、模擬結果

• Nonlinear Load 1

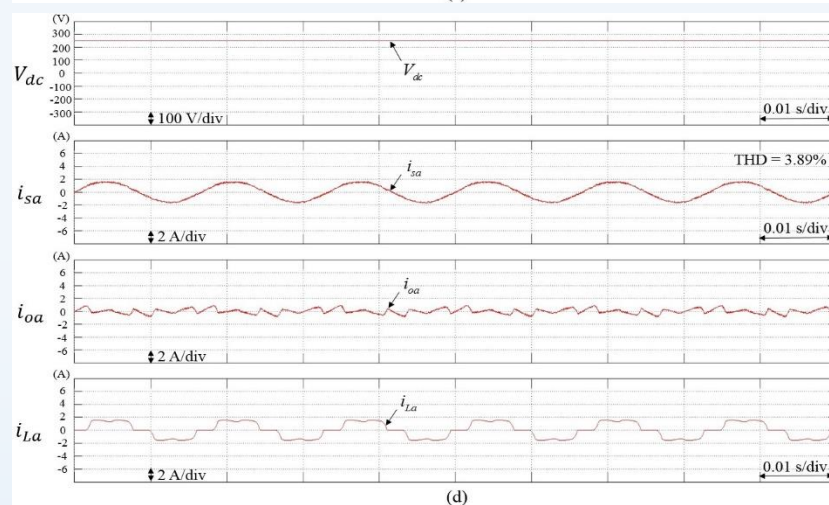
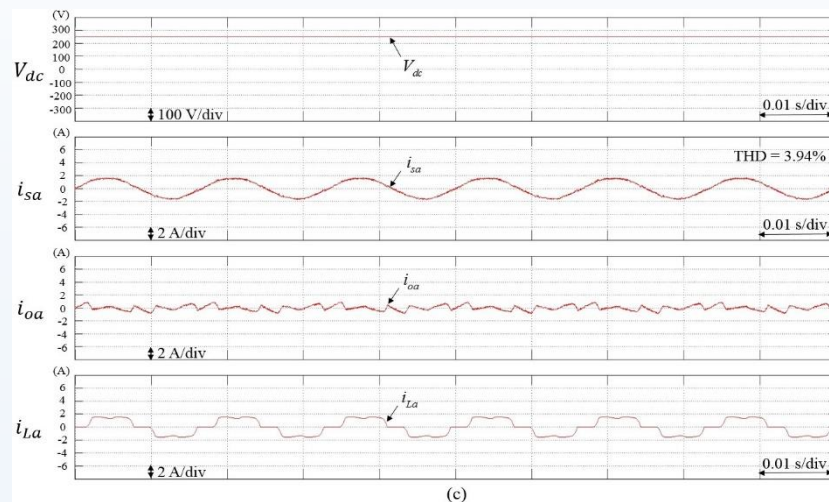
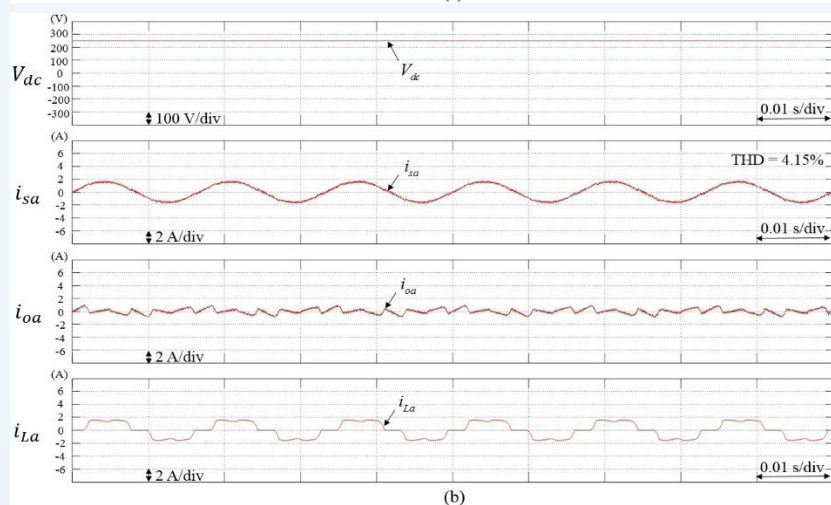
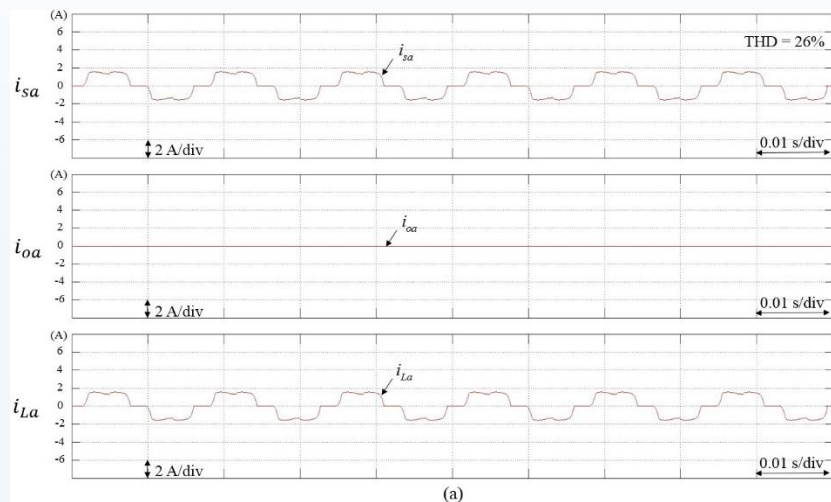


圖5.1 Nonlinear Load 1之模擬結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



五、模擬結果

• Nonlinear Load 2

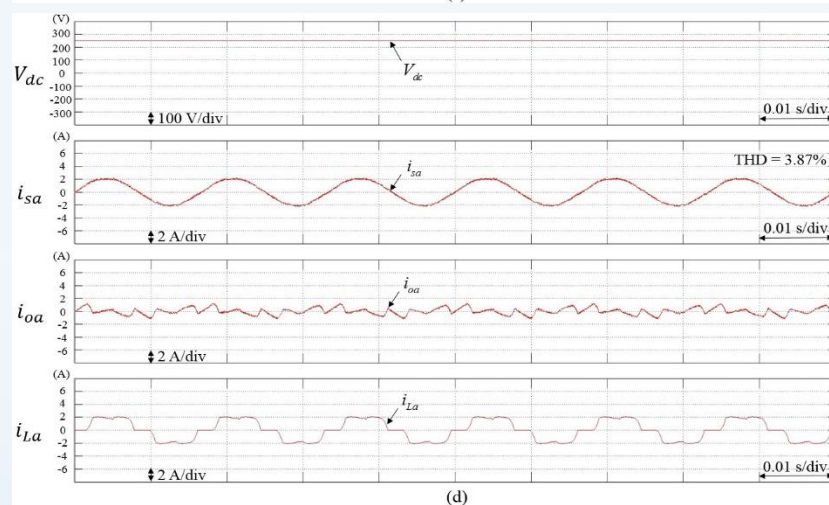
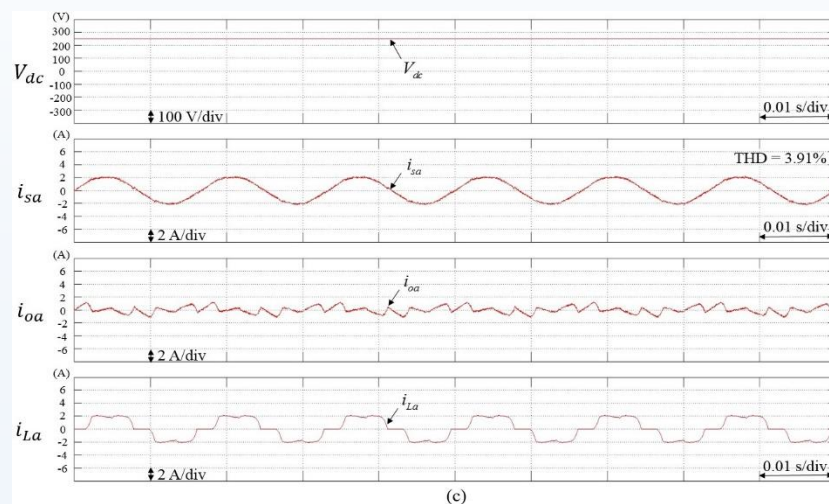
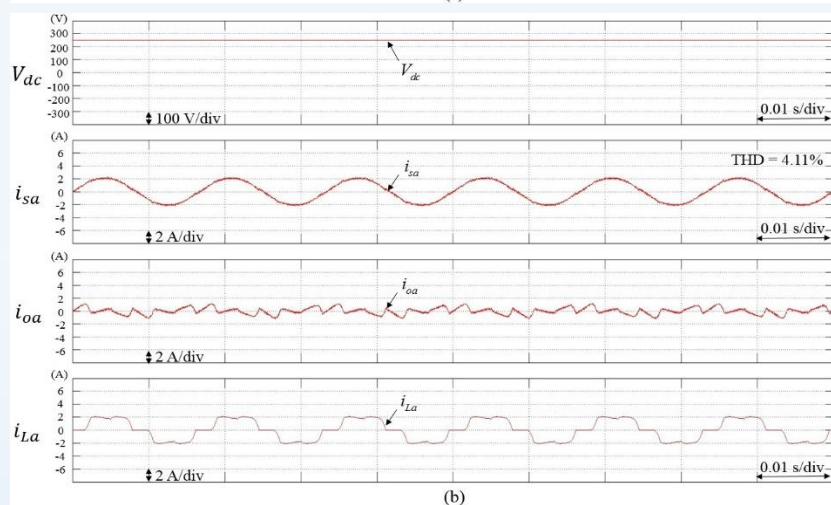
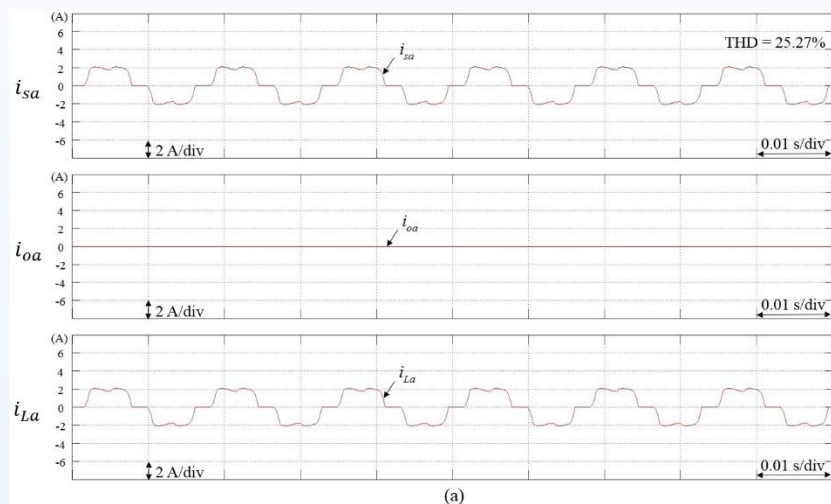


圖5.2 Nonlinear Load 2之模擬結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



五、模擬結果

• Nonlinear Load 3

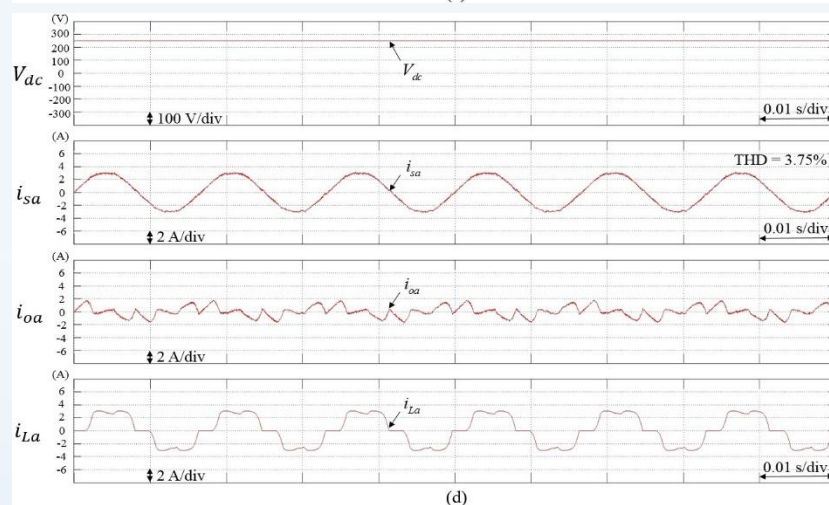
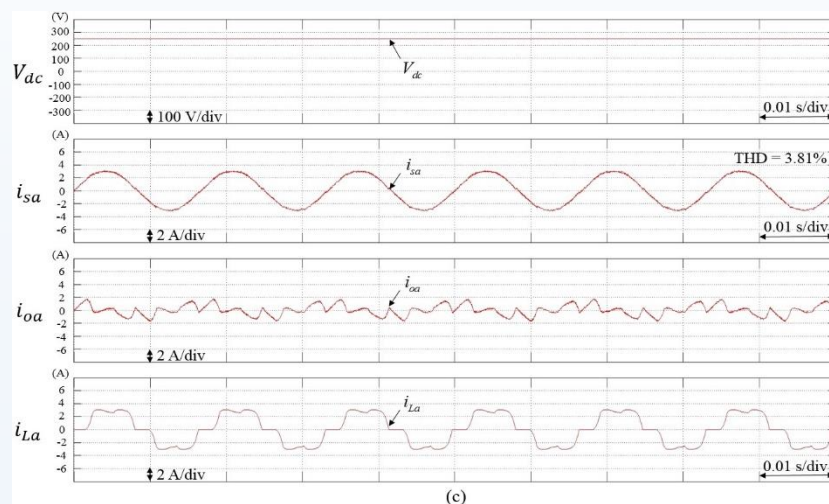
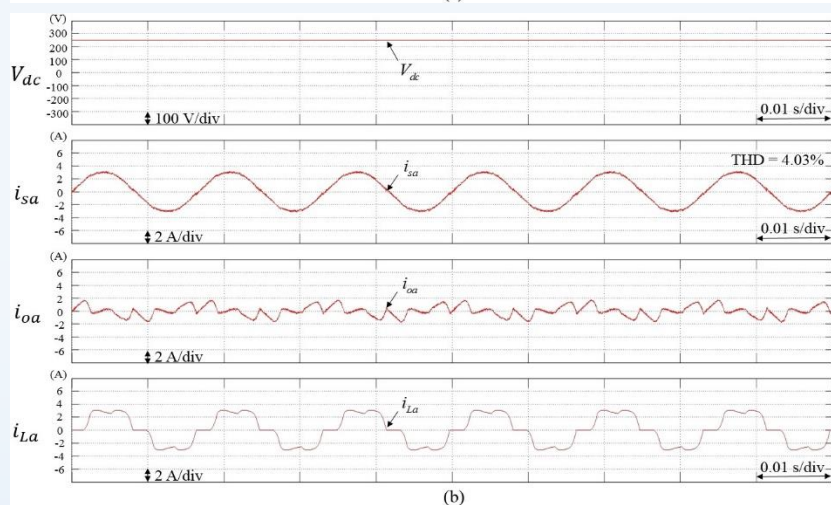
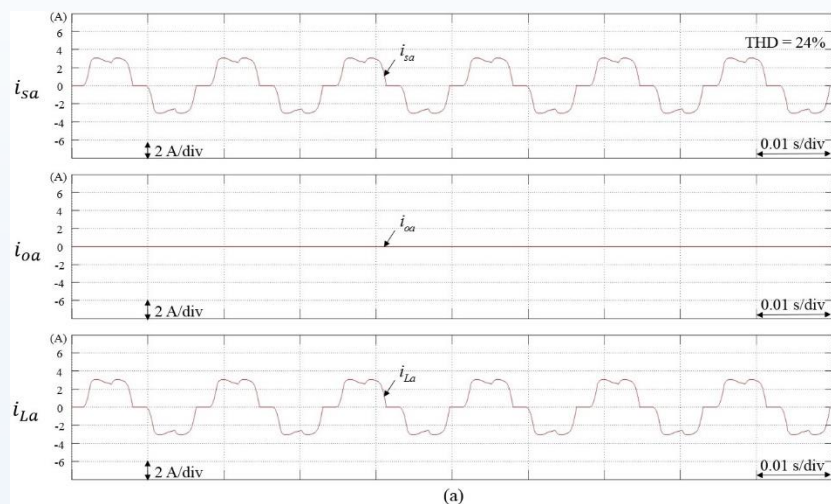


圖5.3 Nonlinear Load 3之模擬結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



五、模擬結果

- 模擬數據整理

表5.1 不同控制器下a相市電電流THD模擬結果

Active Compensation	DC-Link Controllers	THD of Phase-A Grid Current (%)		
		Nonlinear Load 1	Nonlinear Load 2	Nonlinear Load 3
Without DSATATCOM	—	26	25.27	24
DSTATCOM	PI	4.15	4.11	4.03
DSTATCOM	CFNN	3.94	3.91	3.81
DSTATCOM	CFNN-AMF	3.89	3.87	3.75



五、模擬結果

- Linear Inductive Load 1

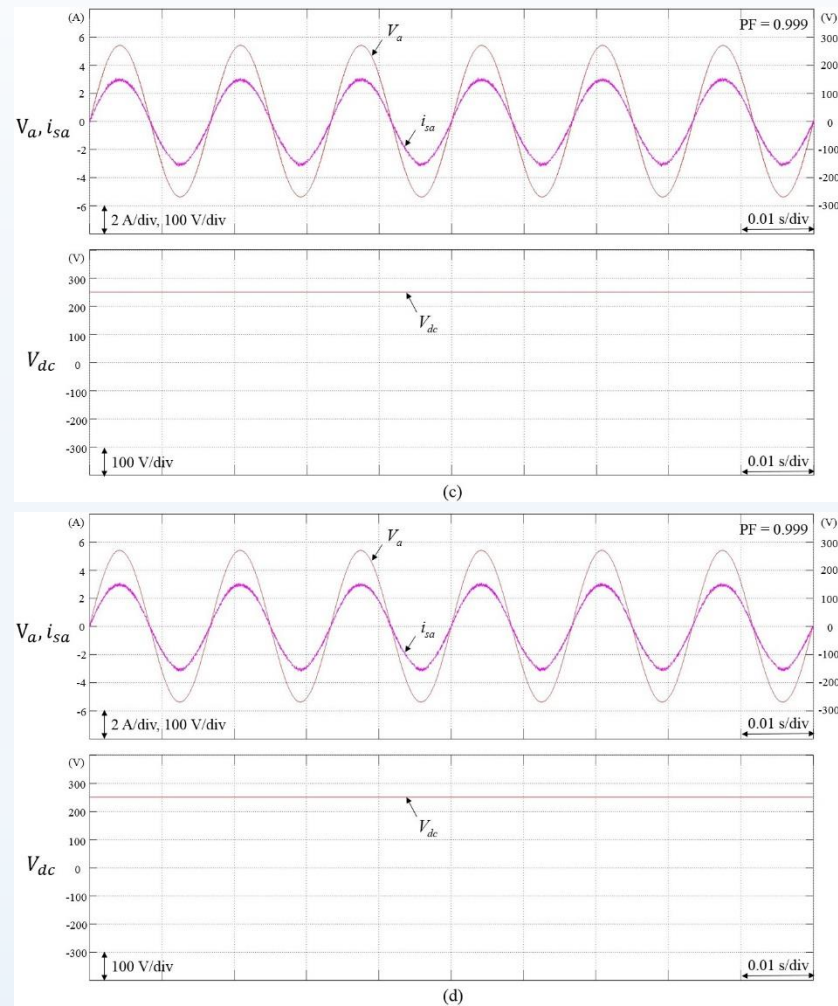
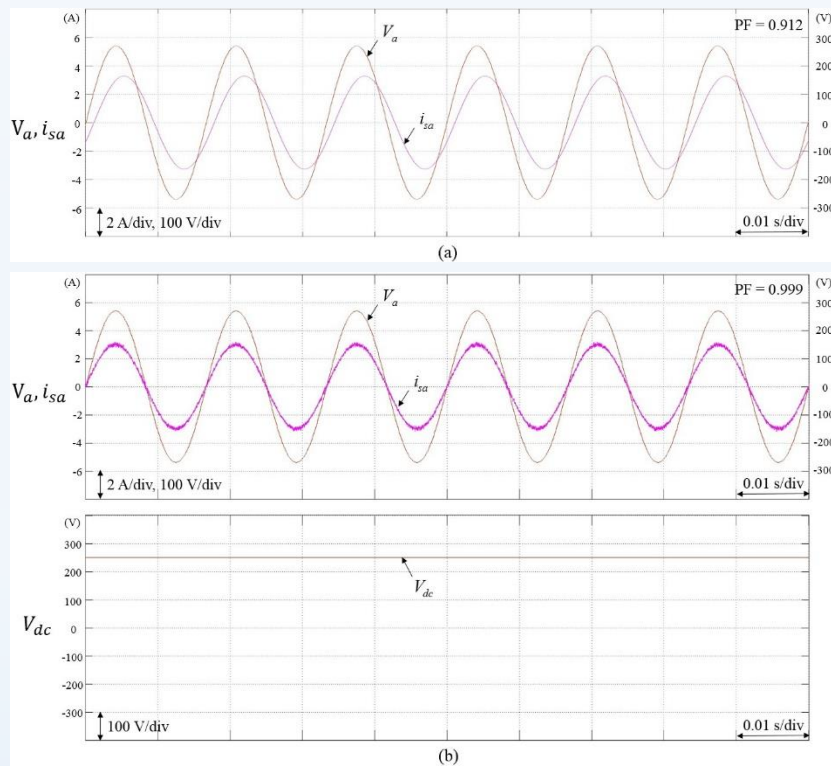


圖5.4 Linear Inductive Load 1之模擬結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



五、模擬結果

- Linear Inductive Load 2

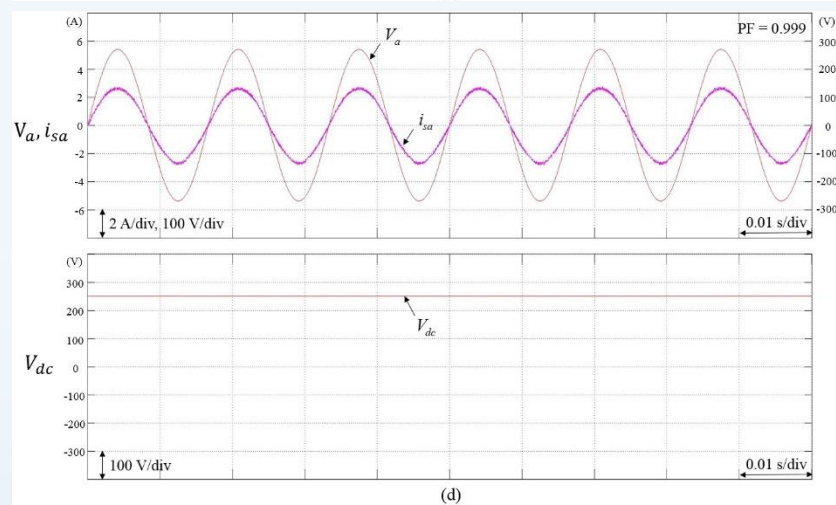
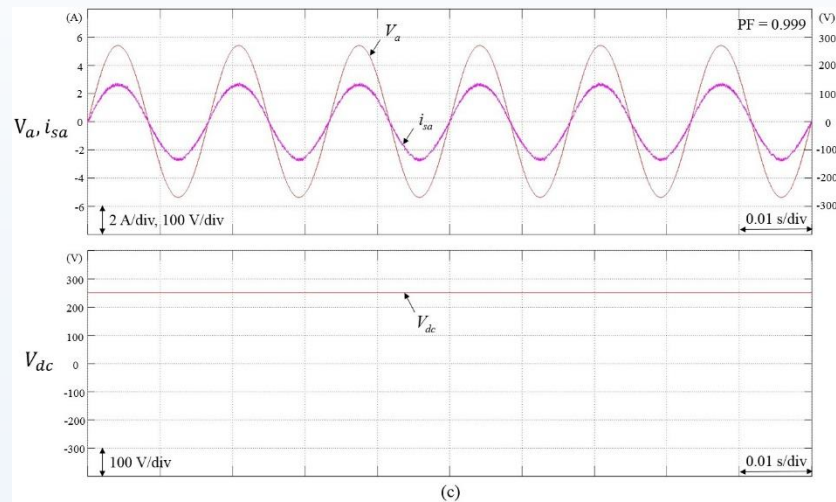
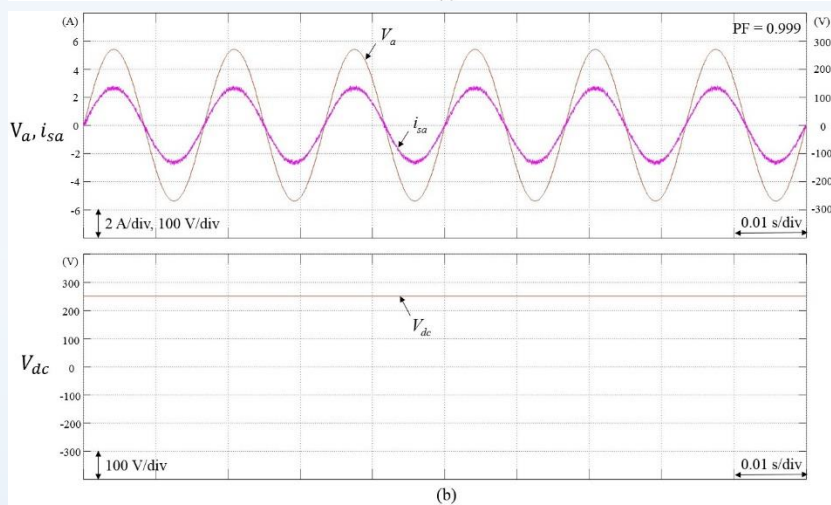
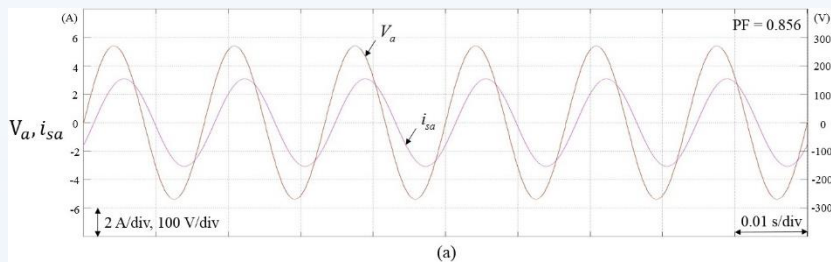


圖5.5 Linear Inductive Load 2之模擬結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



五、模擬結果

• Linear Inductive Load 3

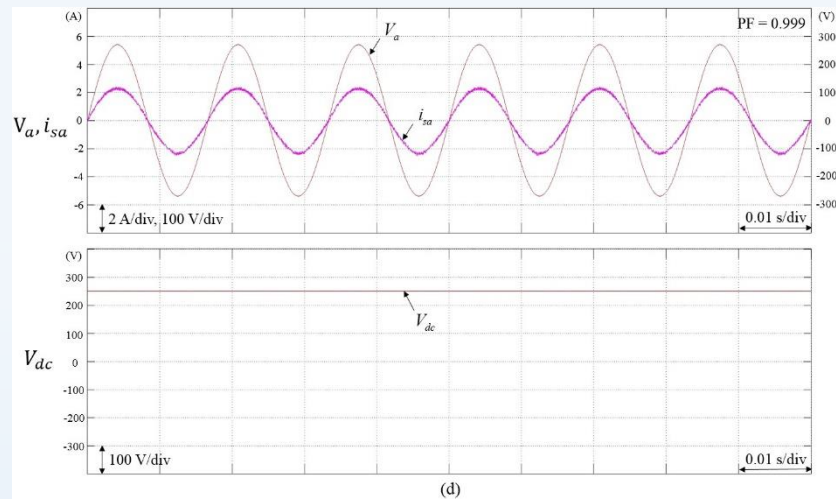
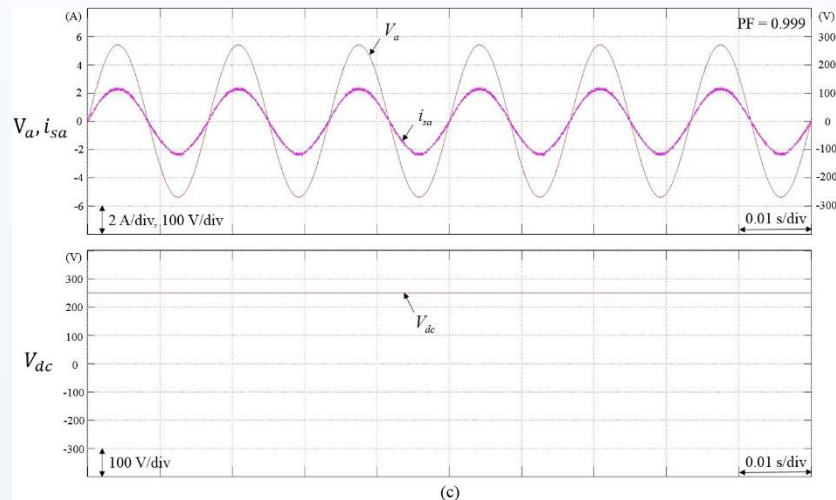
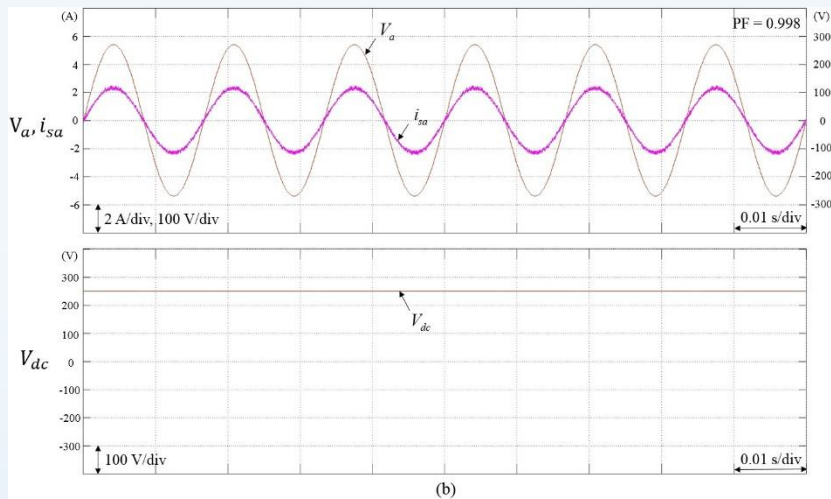
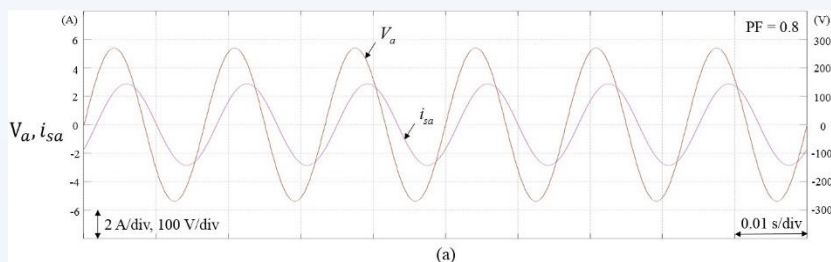


圖5.6 Linear Inductive Load 3之模擬結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



五、模擬結果

- 模擬數據整理

表5.2 不同控制器下功率因數補償模擬結果

Active Compensation	DC-Link Controllers	Power Factor (PF)		
		Linear Inductive Load 1	Linear Inductive Load 2	Linear Inductive Load 3
Without DSATATCOM	—	0.912	0.856	0.8
DSTATCOM	PI	0.999	0.999	0.998
DSTATCOM	CFNN	0.999	0.999	0.999
DSTATCOM	CFNN-AMF	0.999	0.999	0.999



五、模擬結果

- Nonlinear Load 1及 Linear Inductive Load 3

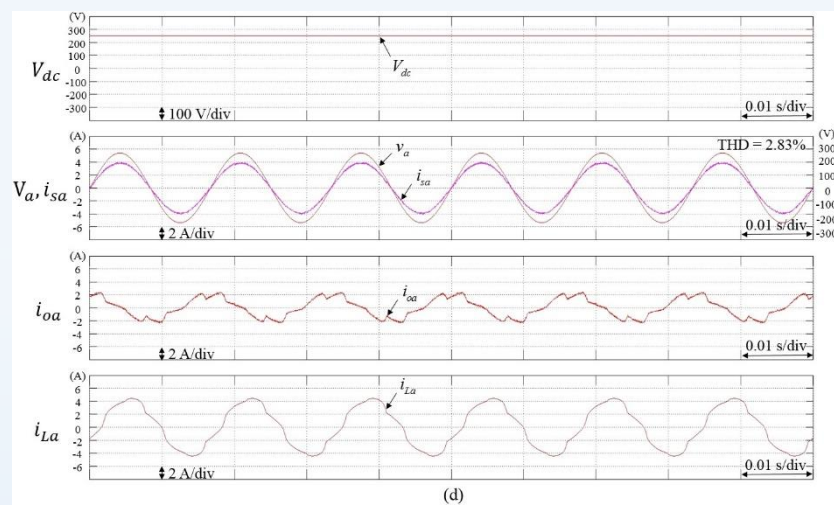
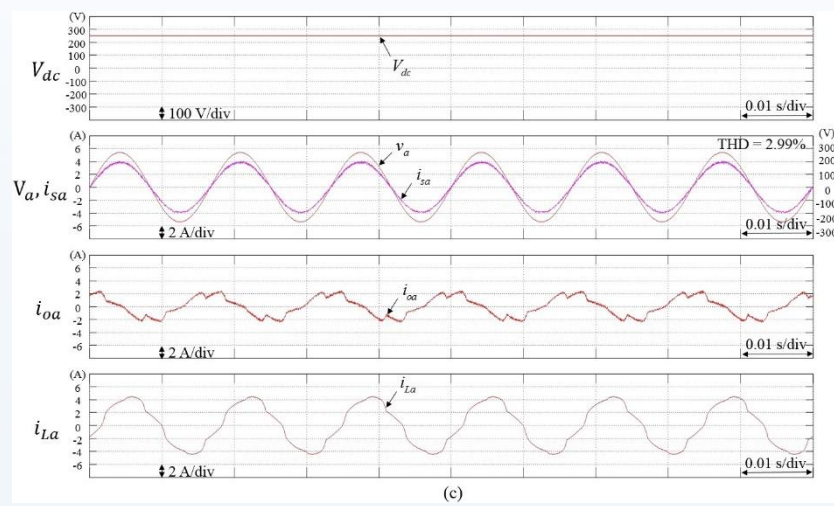
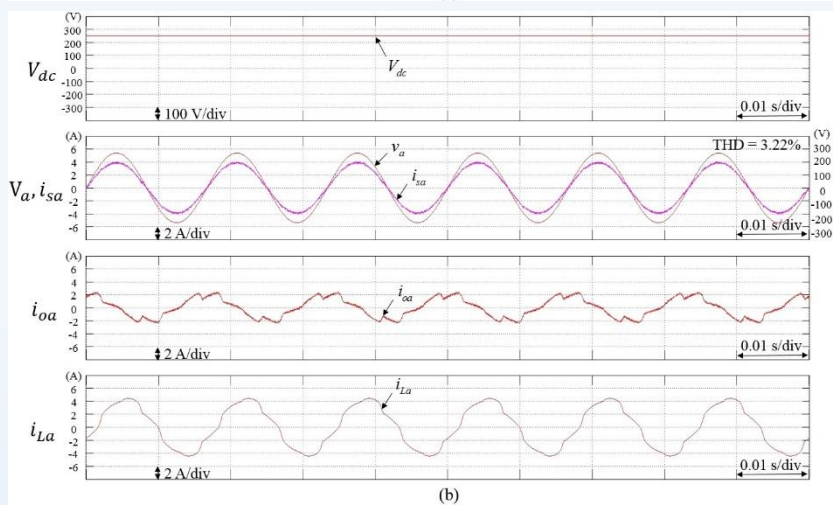
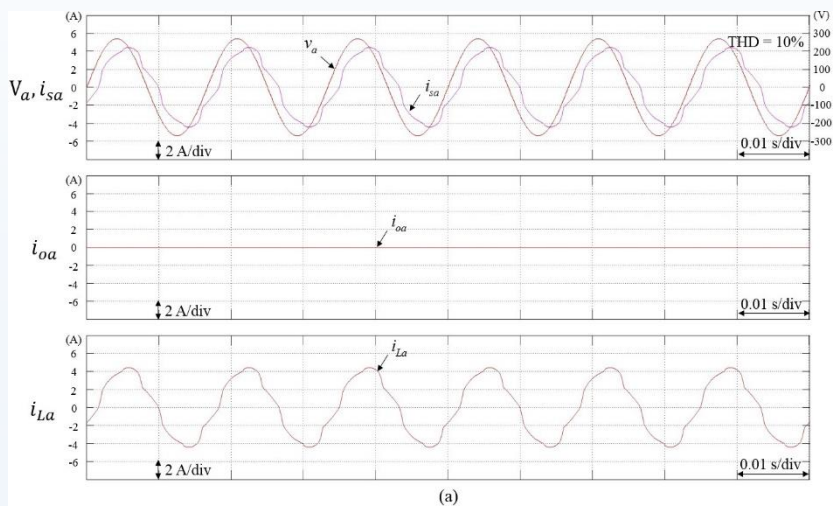


圖5.7 Nonlinear Load 1及 Linear Inductive Load 3之模擬結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



五、模擬結果

- 模擬數據整理

表5.3 不同控制器下a相市電電流THD模擬結果

Active Compensation	DC-Link Controllers	THD of Phase-A Grid Current (%)
		Nonlinear Load1+Linear Inductive Load3
Without DSATATCOM	—	10
DSTATCOM	PI	3.22
DSTATCOM	CFNN	2.99
DSTATCOM	CFNN-AMF	2.83



五、模擬結果

• Case 1

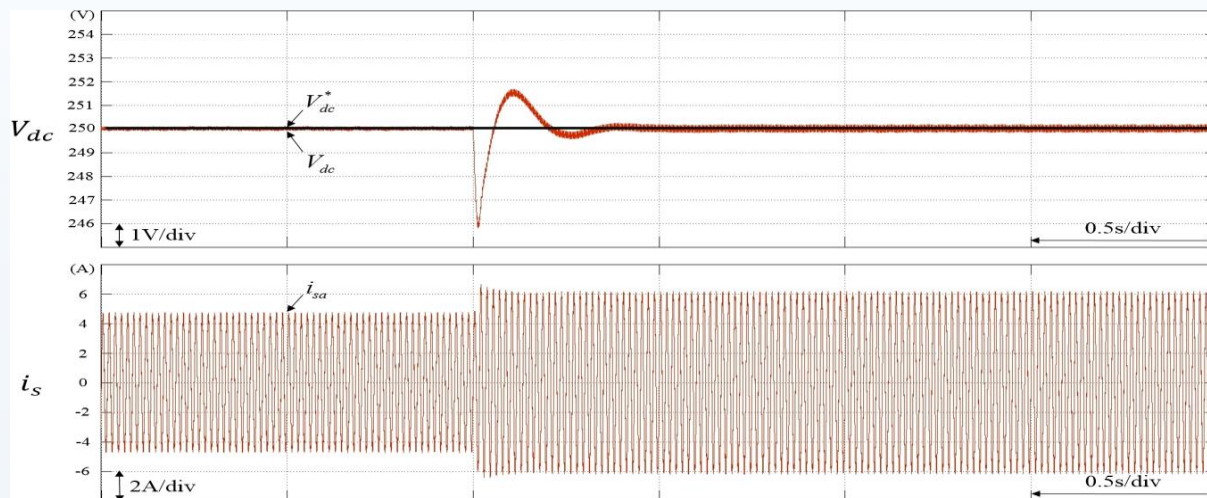


圖5.8 模擬在Case 1情況下利用PI控制器補償

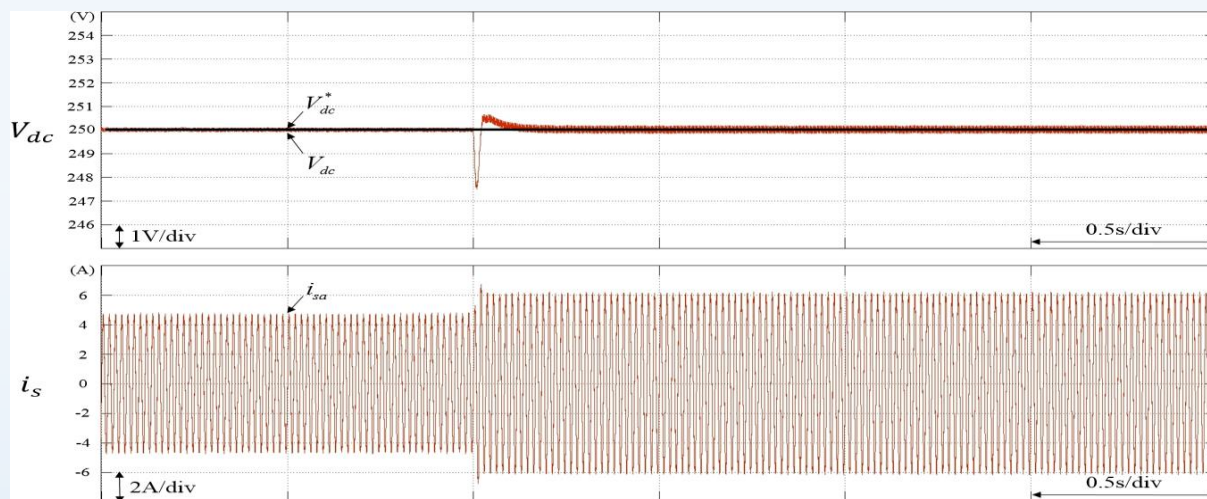


圖5.9 模擬在Case 1情況下利用CFNN控制器補償



五、模擬結果

• Case 1(續)

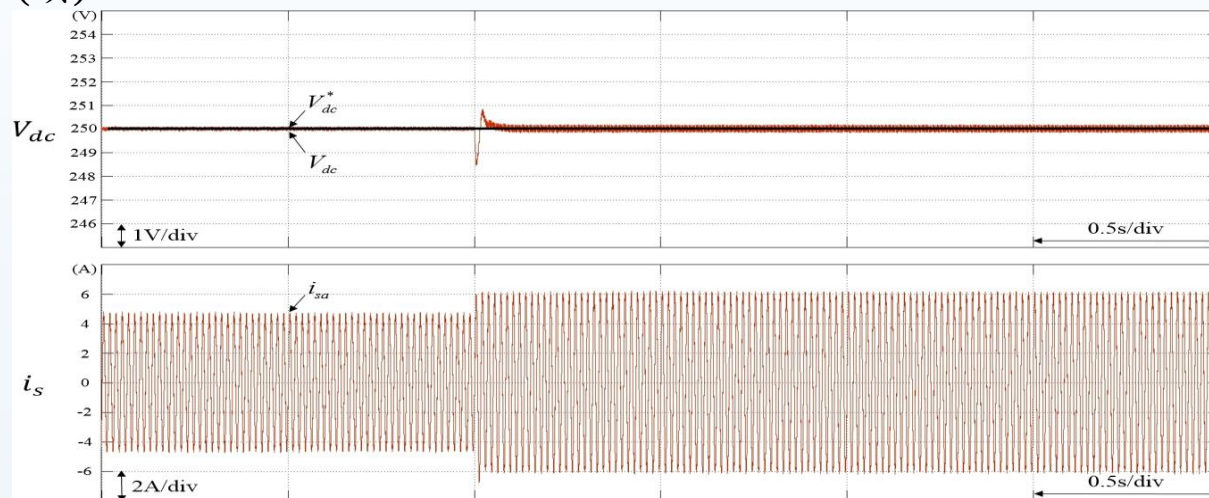


圖5.10 模擬在Case 1情況下利用CFNN-AMF控制器補償

表5.3 不同控制器下Case 1負載變動模擬結果

Case Condition	DC-Link Controllers	Response Time (s)	Overshoot to Undershoot (V)
		Nonlinear Load 1→ Nonlinear Load 3	Nonlinear Load 1→ Nonlinear Load 3
Case 1	PI	0.4	5.88
	CFNN	0.14	3.15
	CFNN-AMF	0.06	2.35



五、模擬結果

• Case 2

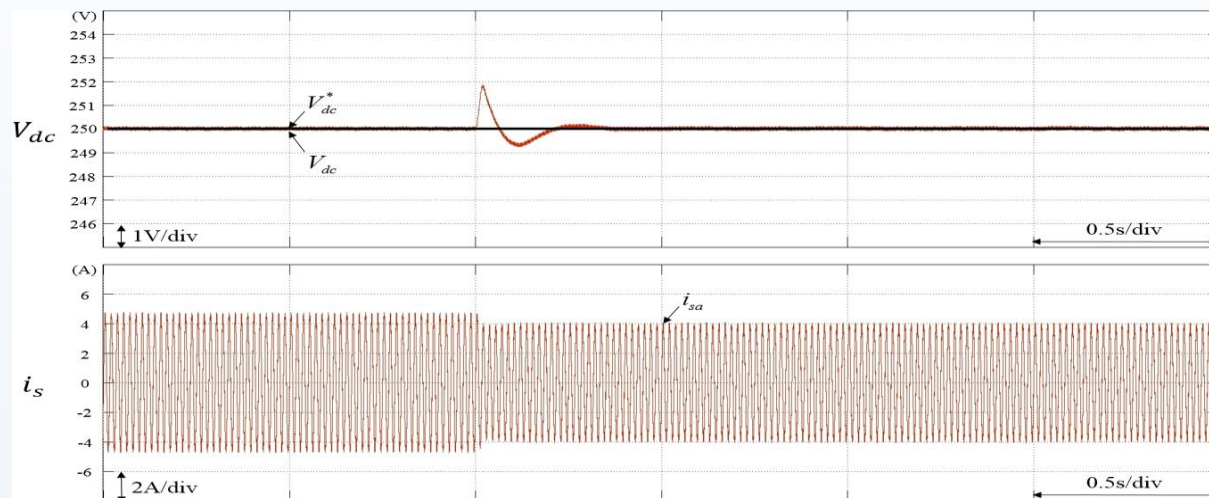


圖5.11 模擬在Case 2情況下利用PI控制器補償

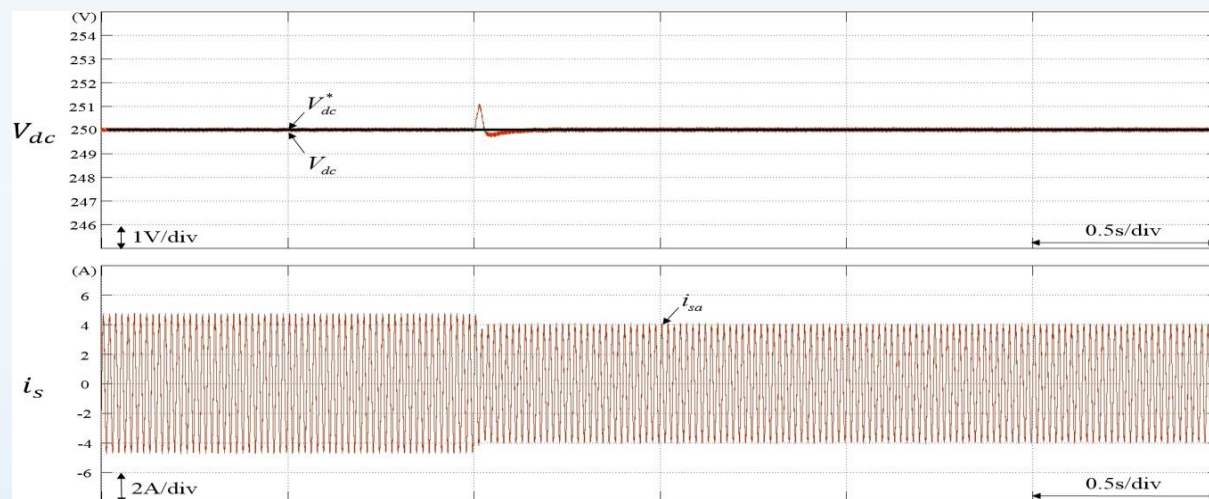


圖5.12 模擬在Case 2情況下利用CFNN控制器補償



五、模擬結果

• Case 2 (續)

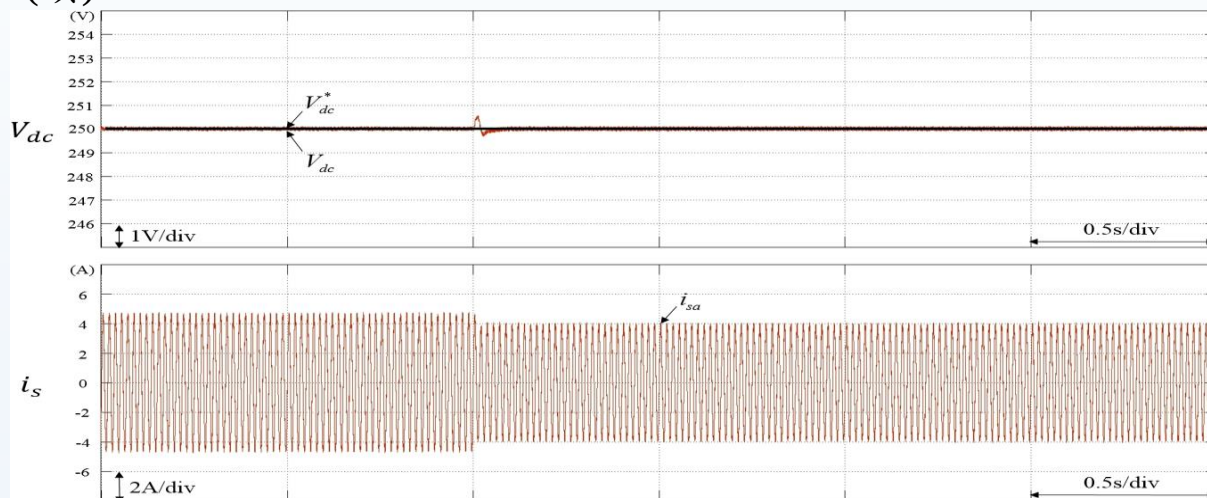


圖5.13 模擬在Case 2情況下利用CFNN-AMF控制器補償

表5.3 不同控制器下Case 2負載變動模擬結果

Case Condition	DC-Link Controllers	Response Time (s)		Overshoot to Undershoot (V)	
		Linear Inductive Load 1	→ Linear Inductive Load 3	Linear Inductive Load 1	→ Linear Inductive Load 3
Case 2	PI		0.35		2.63
	CFNN		0.14		1.55
	CFNN-AMF		0.1		0.8



目錄

- 一、緒論
- 二、規範與配電型靜態同步補償器介紹
- 三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略
- 四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實作結果
- 七、結論與未來研究方向

六、硬體與實作結果

• 硬體設備

- 圖6.2為本論文之配電型靜態同步補償器系統實體圖，本節將介紹此架構上的硬體設備：變流器、非線性負載與線性負載。



圖6.2 配電型靜態同步補償器系統實體圖

六、硬體與實作結果

• 硬體設備－變流器

- 圖6.3為本論文所使用之變流器，其電流控制迴路與脈波寬度調變是由硬體電路實現，如圖6.4所示。



圖6.3 變流器與控制電腦

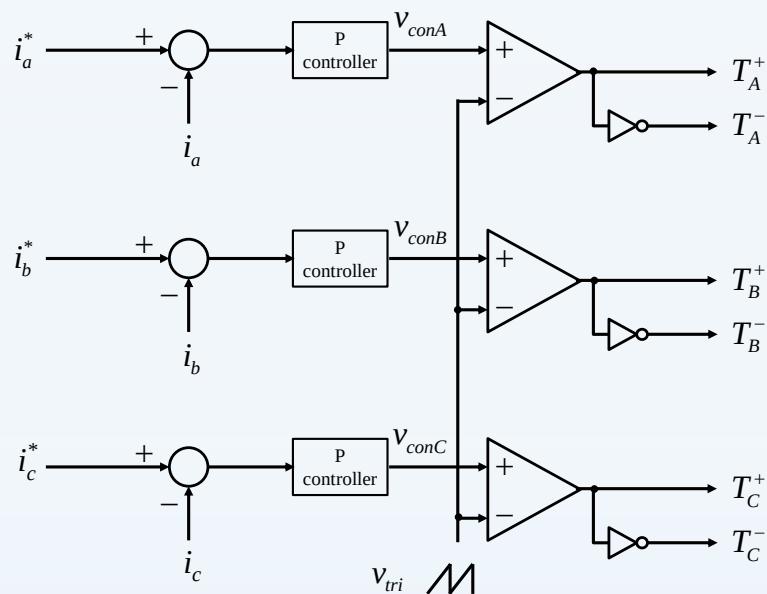


圖6.4 電流控制迴路與脈波寬度調變架構



六、硬體與實作結果

• 硬體設備－輸電線路阻抗

- 非線性負載值為：(1)Nonlinear Load 1： $L = 6\text{ mH}$, $L_{l1} = 1\text{ mH}$, $R_{l1} = 100\Omega$ ；(2)Nonlinear Load 2： $L = 6\text{ mH}$, $L_{l1} = 1\text{ mH}$, $R_{l1} = 75\Omega$ ；(3)Nonlinear Load 3： $L = 6\text{ mH}$, $L_{l1} = 1\text{ mH}$, $R_{l1} = 50\Omega$ 。如圖6.5所示。
- 線性負載值為：(1)Linear Inductive Load 1： $R_{l2} = 25\Omega$, $L_{l2} = 30\text{ mH}$ ；(2)Linear Inductive Load 2： $R_{l2} = 25\Omega$, $L_{l2} = 40\text{ mH}$ ；(3)Linear Inductive Load 3： $R_{l2} = 25\Omega$, $L_{l2} = 50\text{ mH}$ 。如圖6.6所示。



圖6.5 非線性負載實體圖



圖6.6 三相線性負載實體圖



六、硬體與實作結果

• Nonlinear Load 1

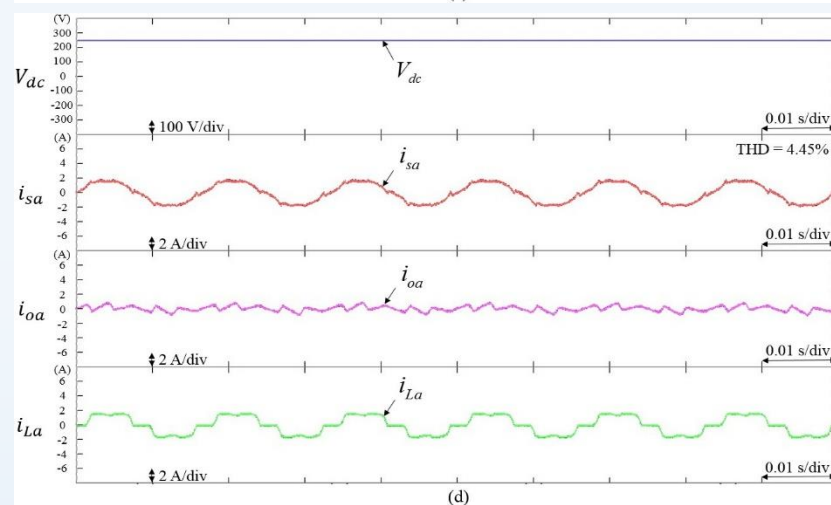
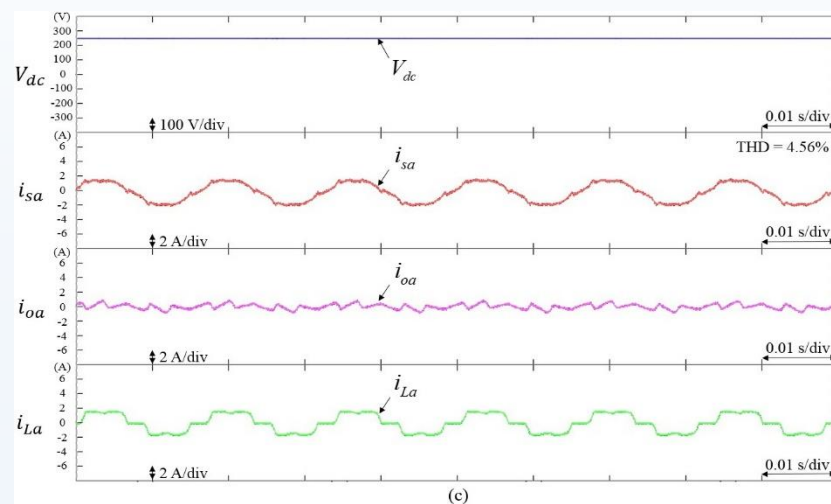
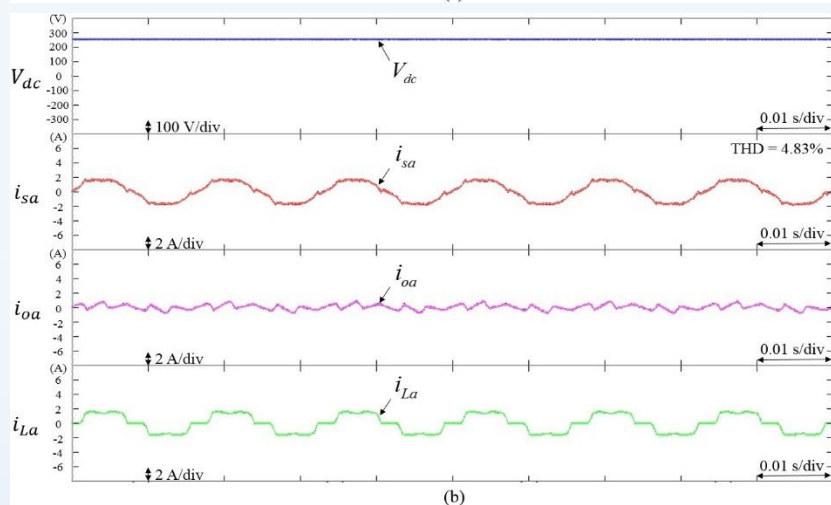
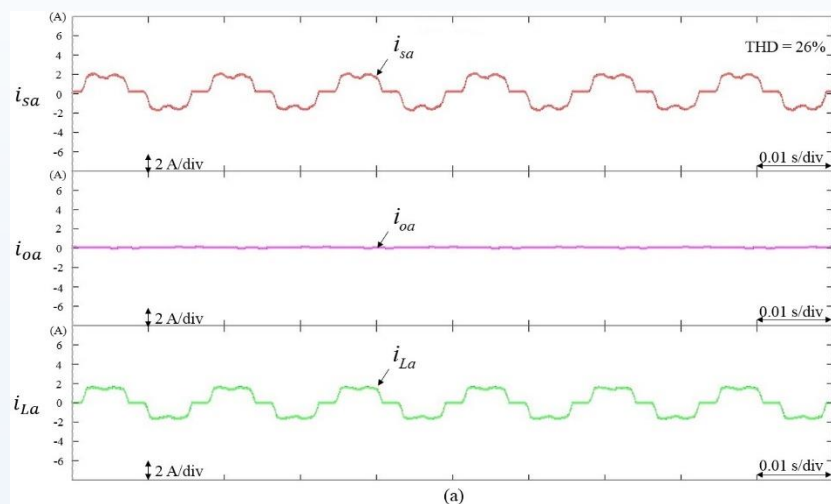


圖6.8 Nonlinear Load 1之實作結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償

六、硬體與實作結果

• Nonlinear Load 2

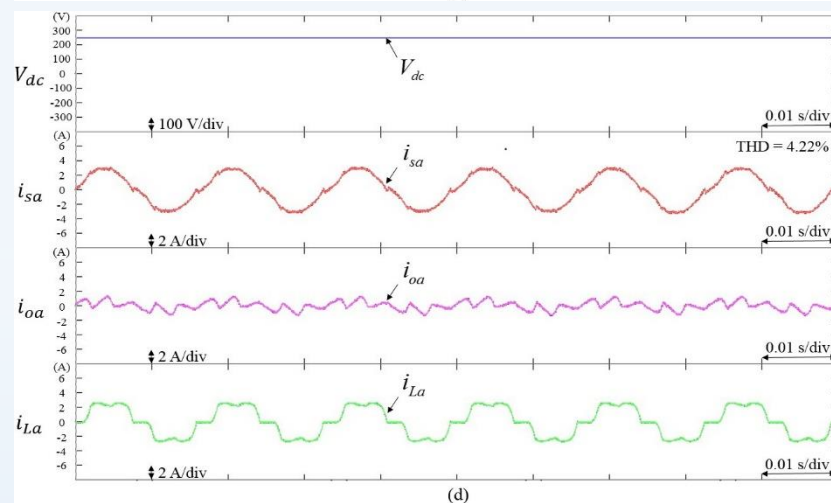
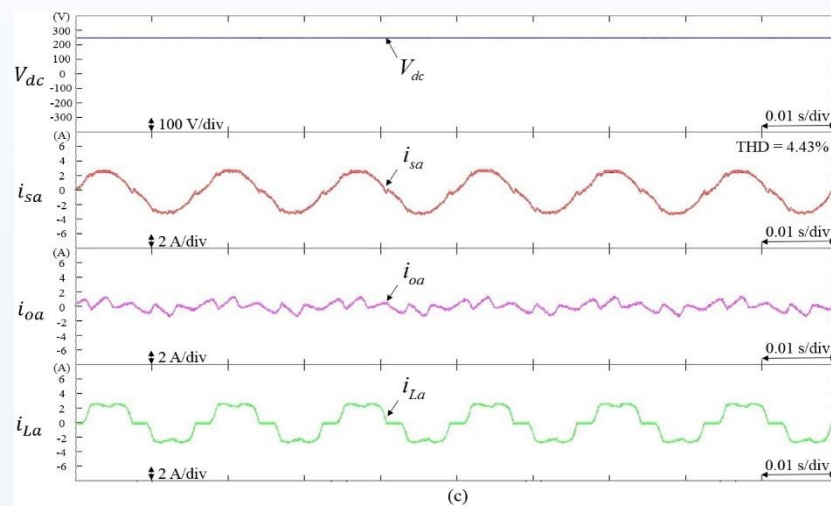
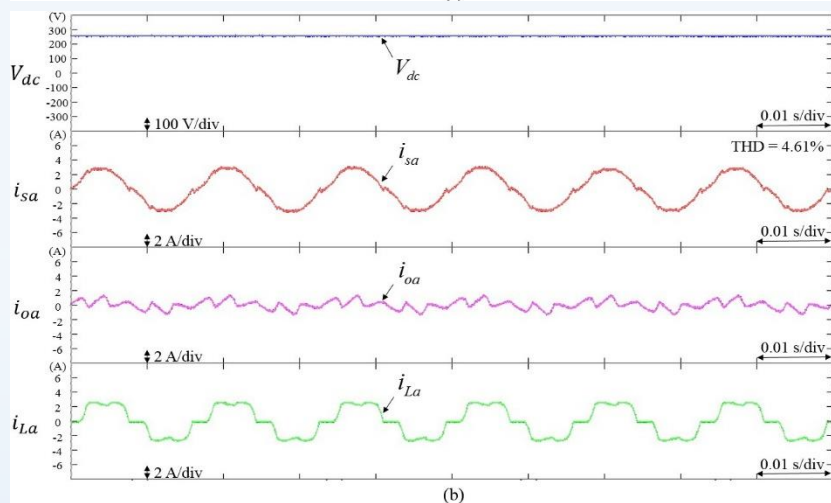
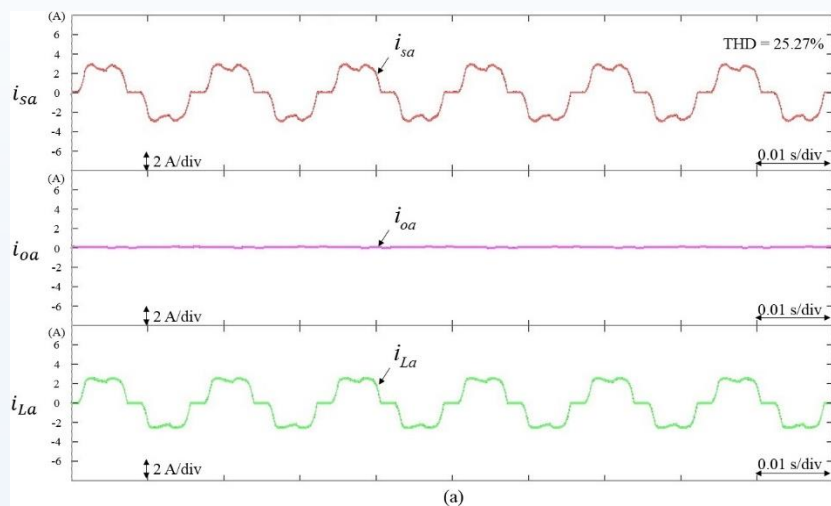


圖6.9 Nonlinear Load 2之實作結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



六、硬體與實作結果

• Nonlinear Load 3

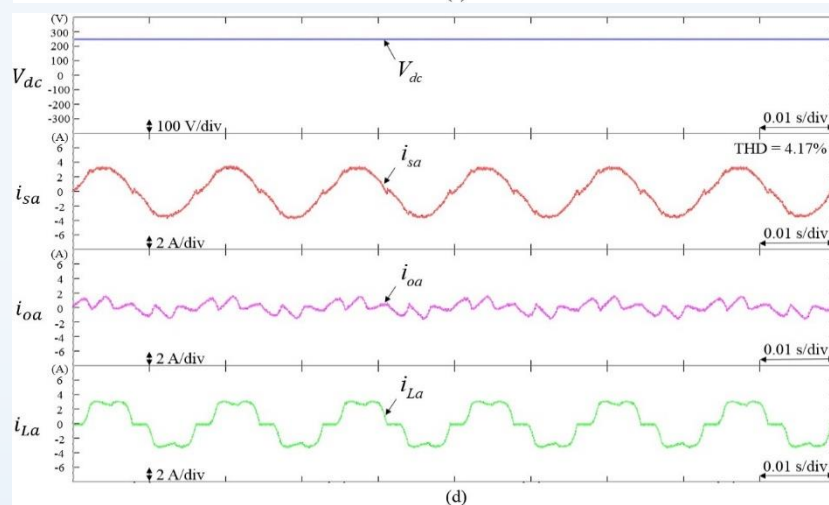
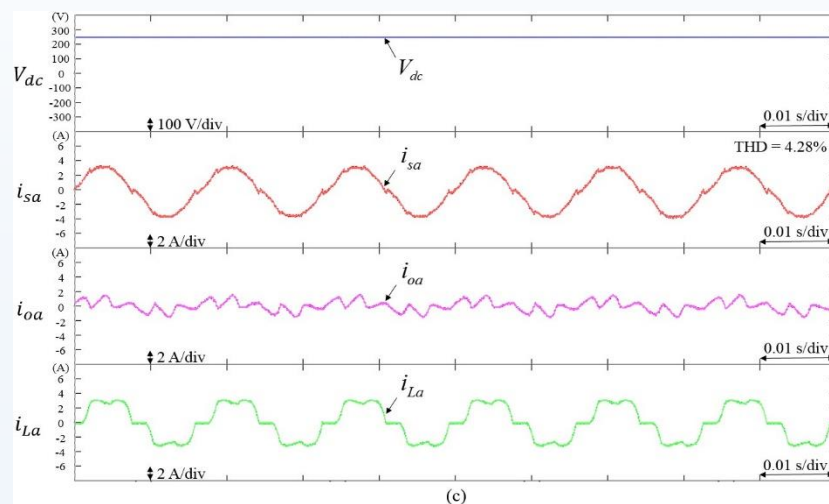
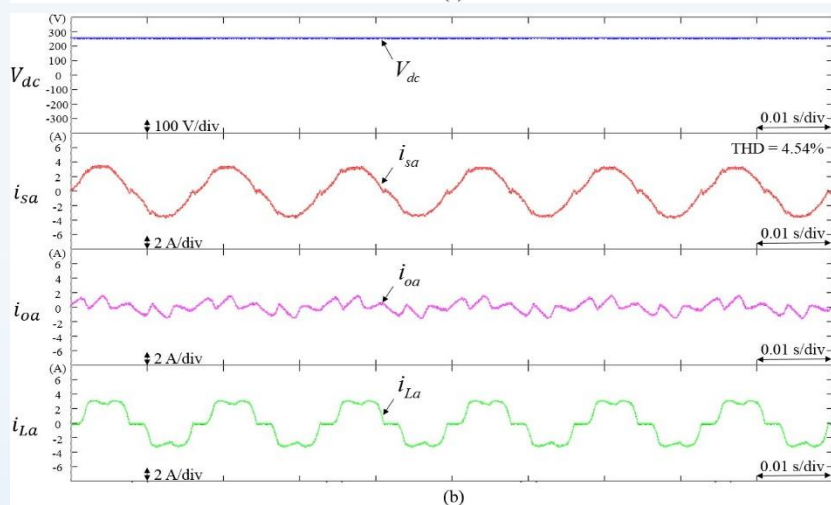
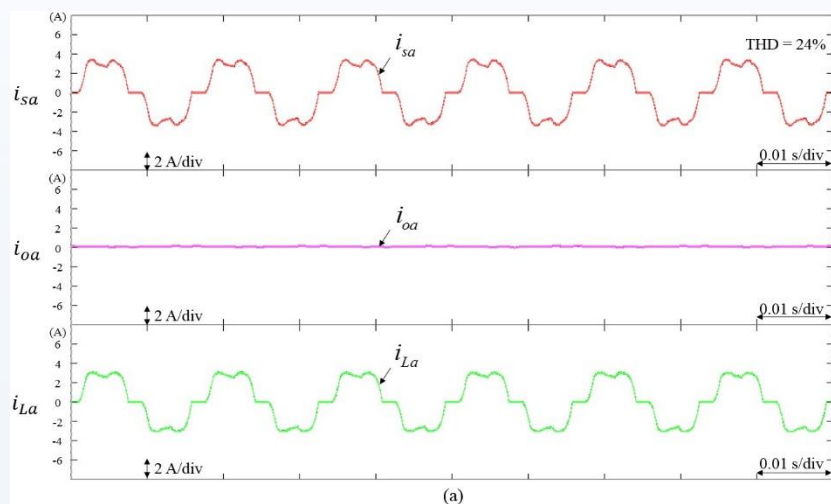


圖6.10 Nonlinear Load 3之實作結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



六、硬體與實作結果

- 實作數據整理

表6.1 不同控制器下a相市電電流THD實作結果

Active Compensation	DC-Link Controllers	THD of Phase-A Grid Current (%)		
		Nonlinear Load 1	Nonlinear Load 2	Nonlinear Load 3
Without DSATATCOM	—	26	25.27	24
DSTATCOM	PI	4.83	4.61	4.54
DSTATCOM	CFNN	4.56	4.43	4.28
DSTATCOM	CFNN-AMF	4.45	4.22	4.17



六、硬體與實作結果

- Linear Inductive Load 1

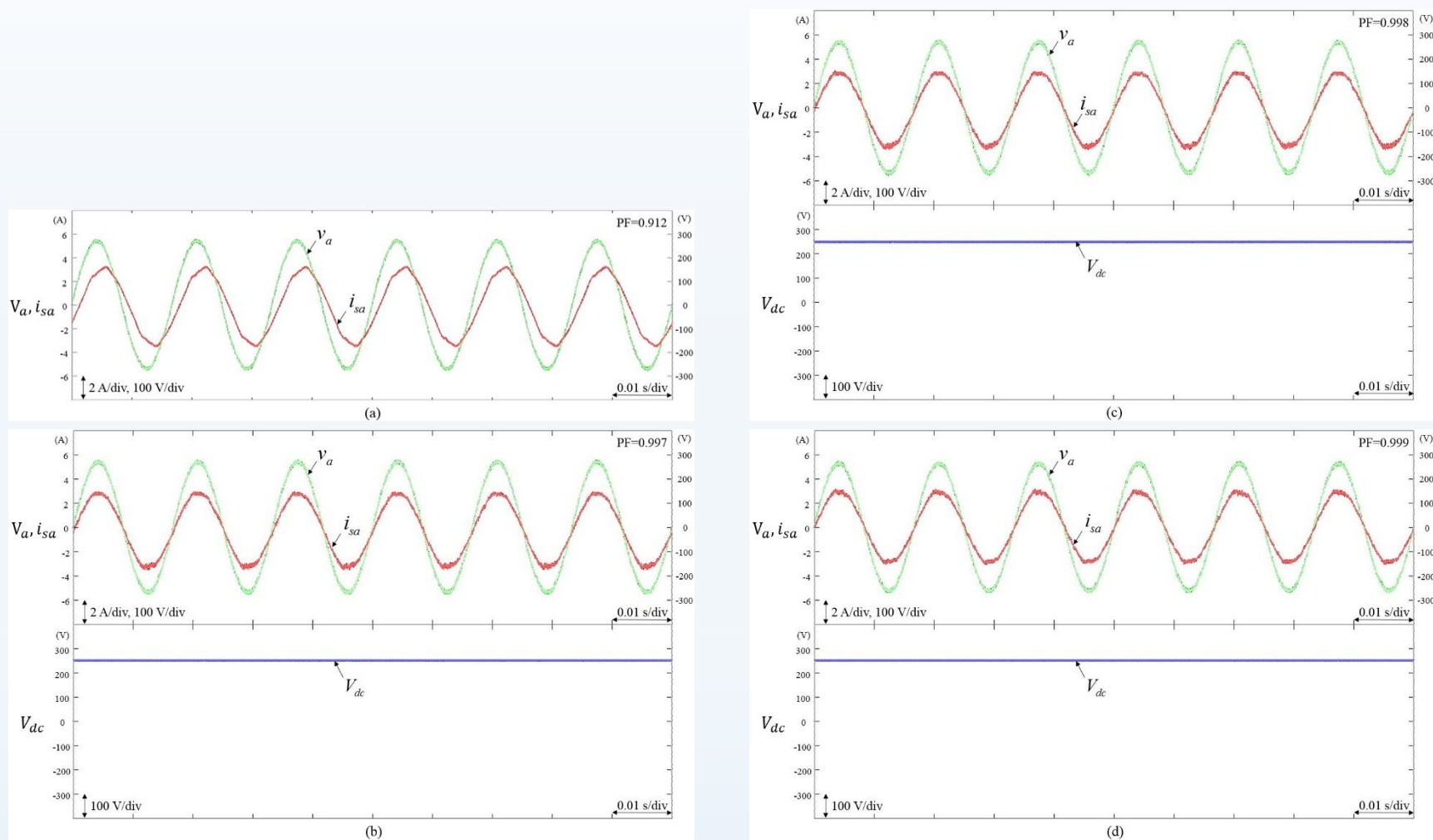


圖6.11 Linear Inductive Load 1之實作結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



六、硬體與實作結果

- Linear Inductive Load 2

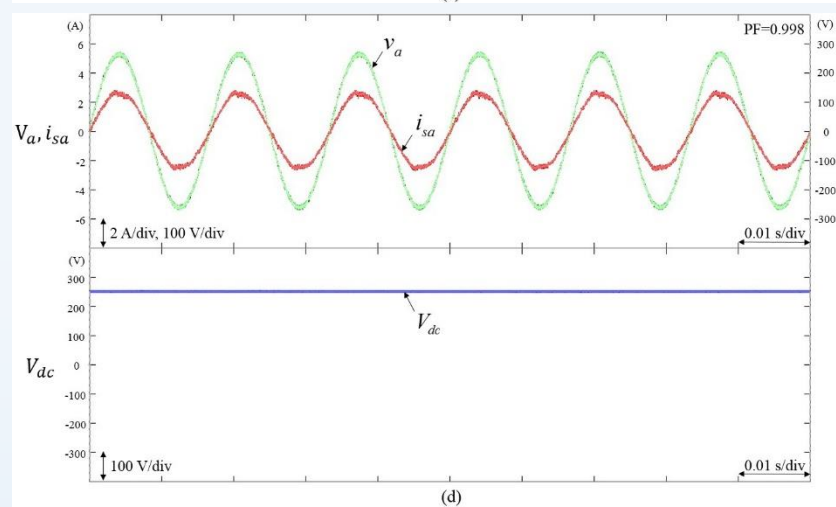
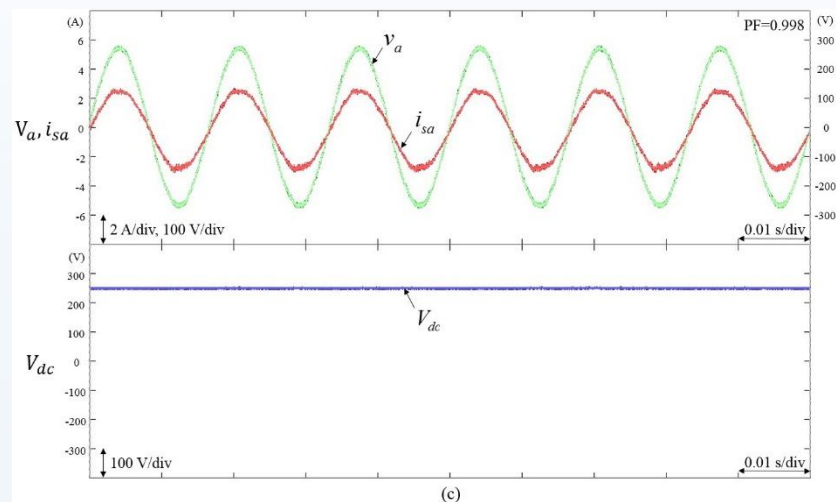
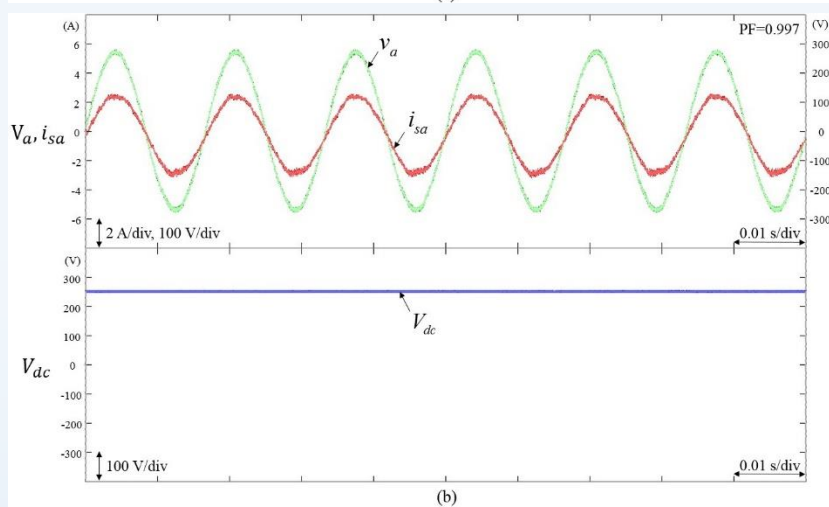
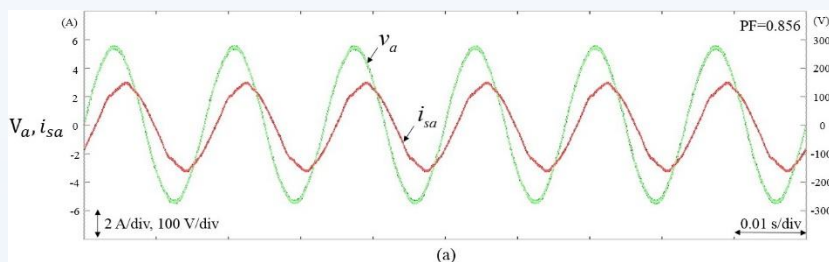


圖6.12 Linear Inductive Load 2之實作結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



六、硬體與實作結果

- Linear Inductive Load 3

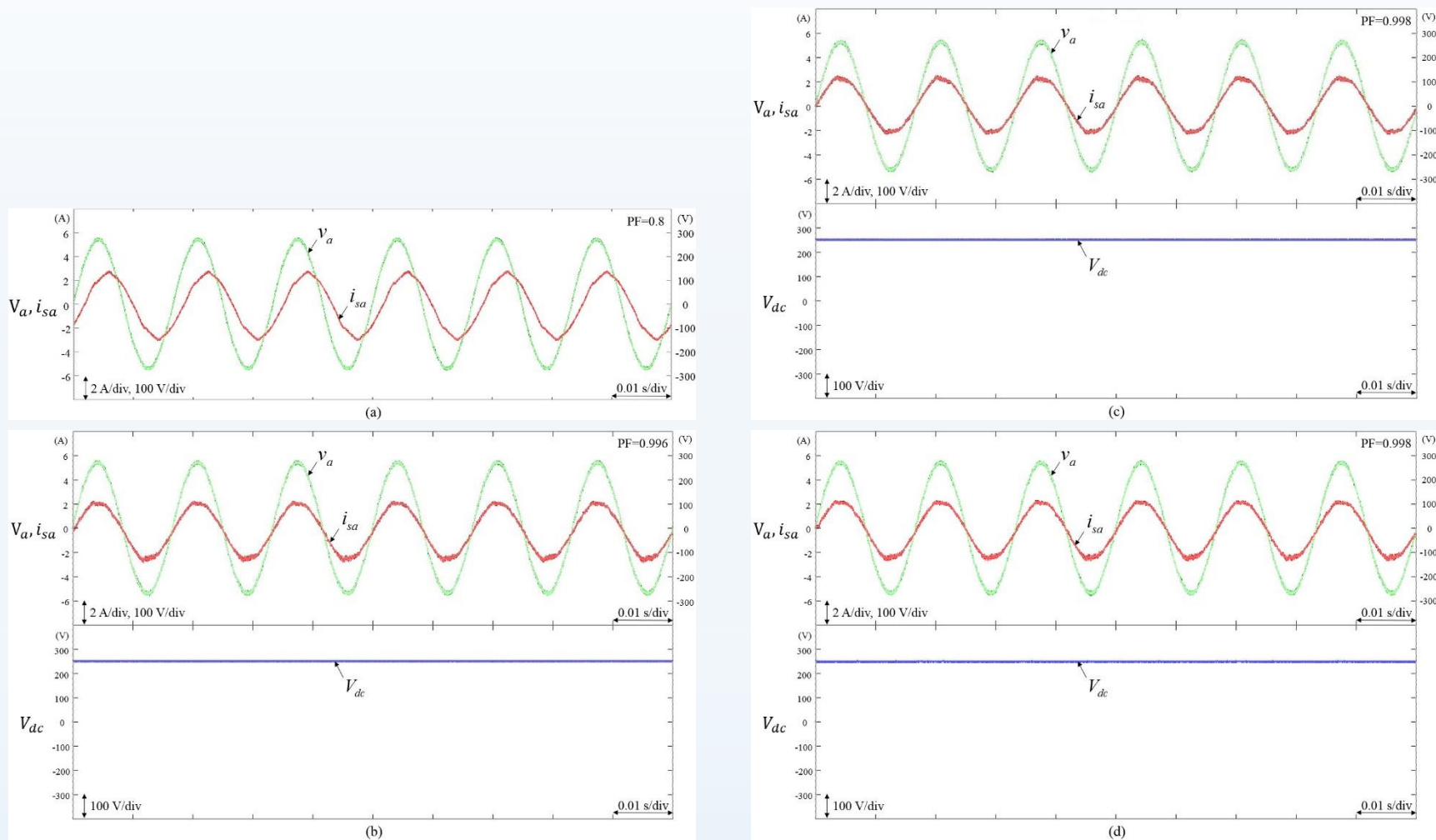


圖6.13 Linear Inductive Load 3之實作結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



六、硬體與實作結果

- 實作數據整理

表6.2 不同控制器下功率因數補償實作結果

Active Compensation	DC-Link Controllers	Power Factor (PF)		
		Linear Inductive Load 1	Linear Inductive Load 2	Linear Inductive Load 3
Without DSATATCOM	—	0.912	0.856	0.8
DSTATCOM	PI	0.997	0.997	0.996
DSTATCOM	CFNN	0.998	0.998	0.998
DSTATCOM	CFNN-AMF	0.999	0.998	0.998



六、硬體與實作結果

- Nonlinear Load 1及 Linear Inductive Load 3

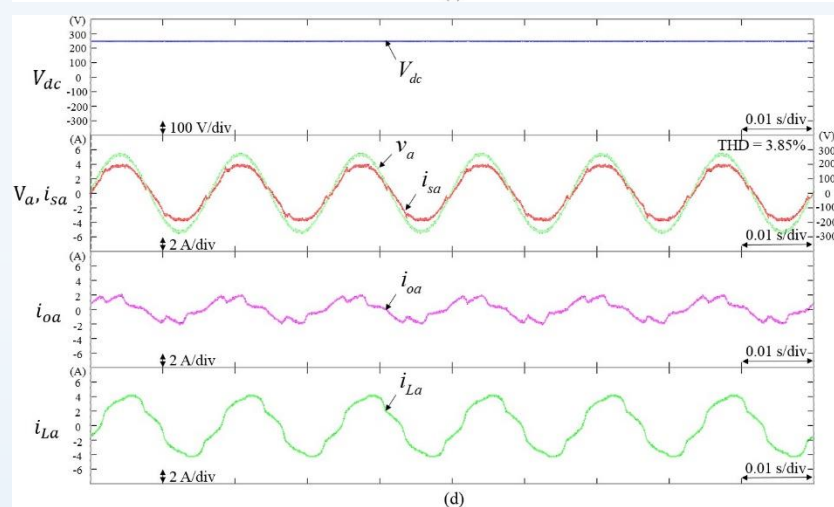
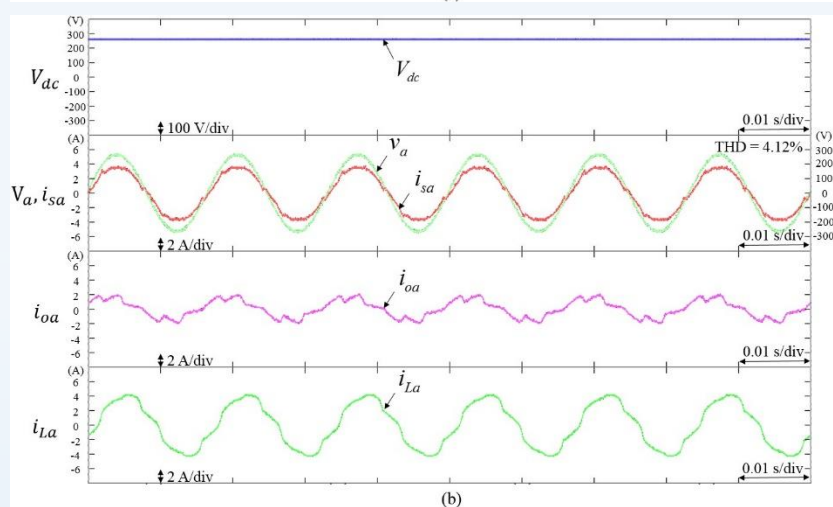
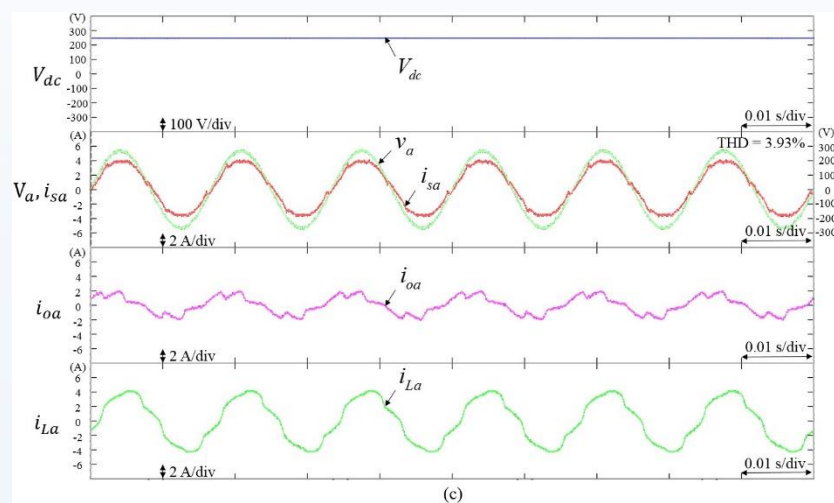
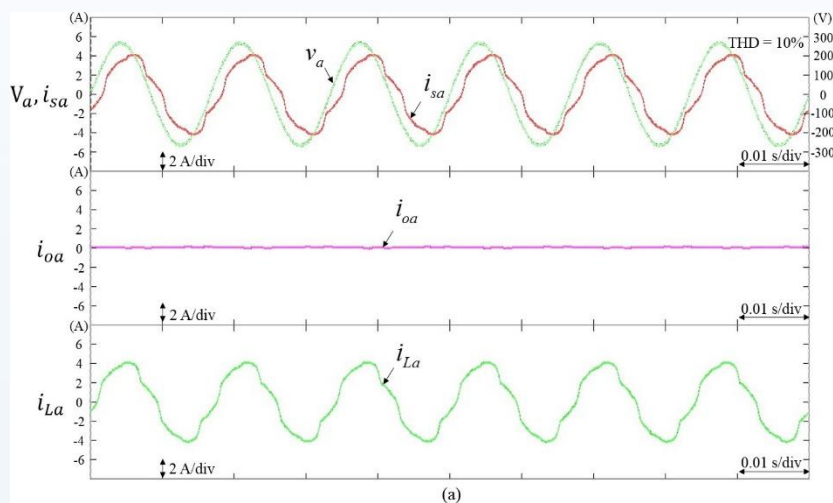


圖6.14 Nonlinear Load 1及 Linear Inductive Load 3之實作結果：(a)未補償；(b)利用PI控制器補償；(c)利用CFNN控制器補償；(d)利用CFNN-AMF控制器補償



六、硬體與實作結果

- 實作數據整理

表6.3 不同控制器下a相市電電流THD實作結果

Active Compensation	DC-Link Controllers	THD of Phase-A Grid Current (%)
		Nonlinear Load1+Linear Inductive Load3
Without DSATATCOM	—	10
DSTATCOM	PI	4.12
DSTATCOM	CFNN	3.93
DSTATCOM	CFNN-AMF	3.85



六、硬體與實作結果

- Case 1

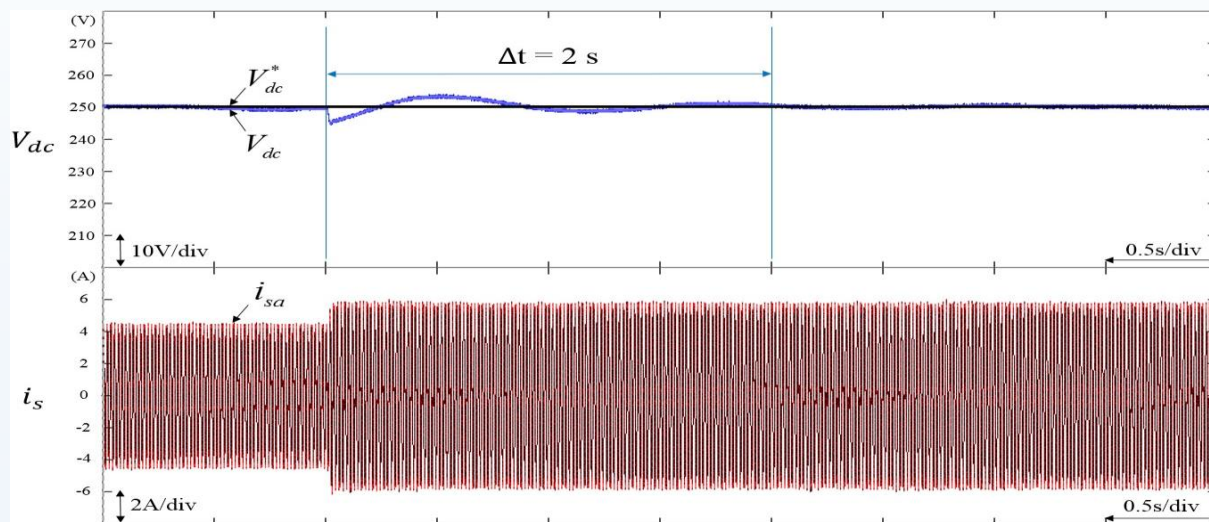


圖6.15 實作在Case 1情況下利用PI控制器補償

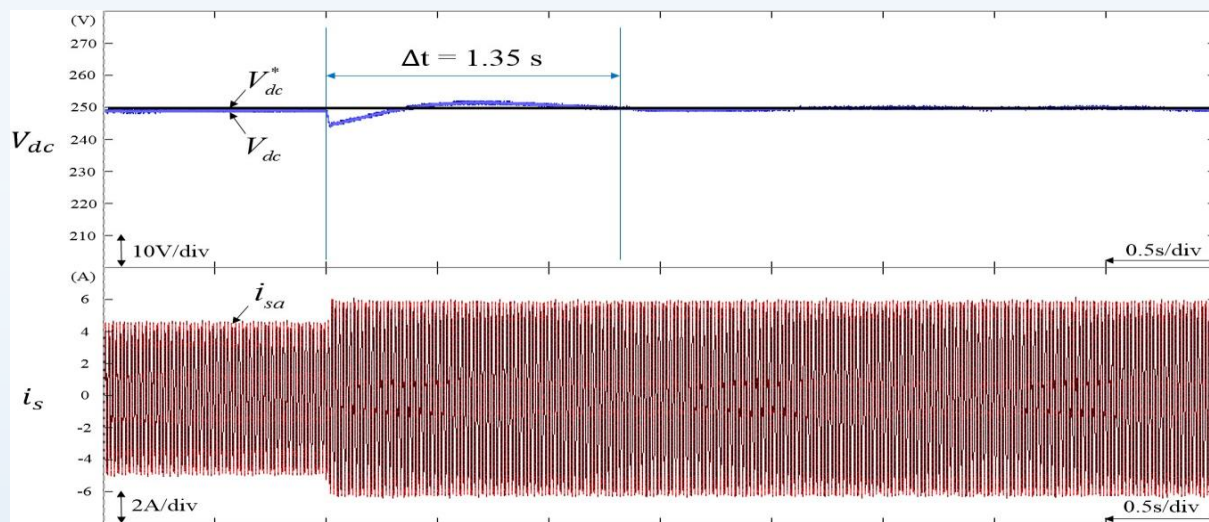


圖6.16 實作在Case 1情況下利用CFNN控制器補償



六、硬體與實作結果

• Case 1(續)

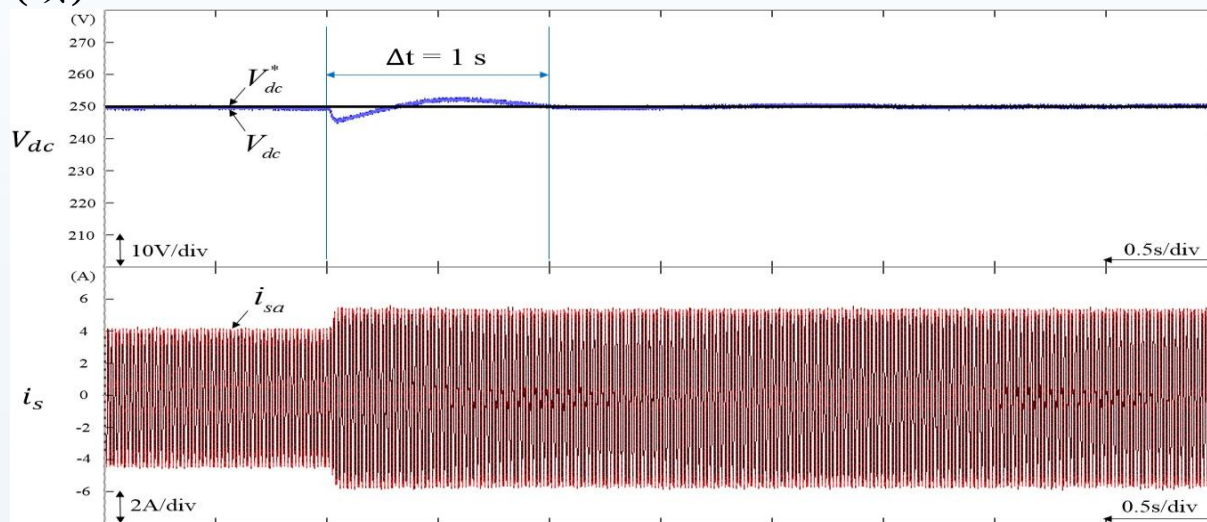


圖6.17 實作在Case 1情況下利用CFNN-AMF控制器補償

表6.4 不同控制器下Case 1負載變動實作結果

Case Condition	DC-Link Controllers	Response Time (s)	Overshoot to Undershoot (V)
		Nonlinear Load 1→ Nonlinear Load 3	Nonlinear Load 1→ Nonlinear Load 3
Case 1	PI	2	9.6
	CFNN	1.35	8.3
	CFNN-AMF	1	7.9



六、硬體與實作結果

- Case 2

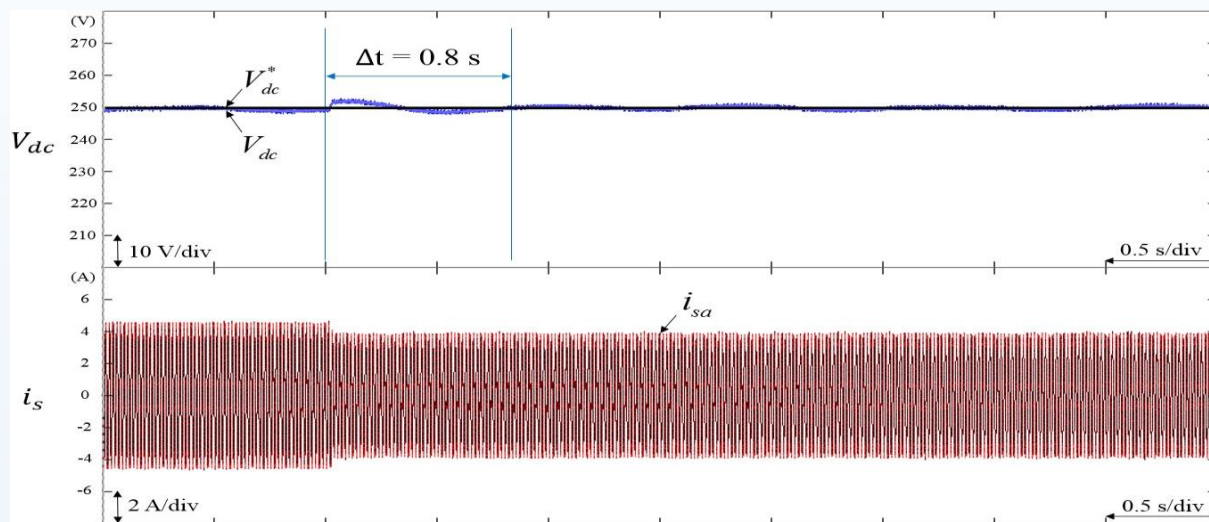


圖6.18 實作在Case 2情況下利用PI控制器補償

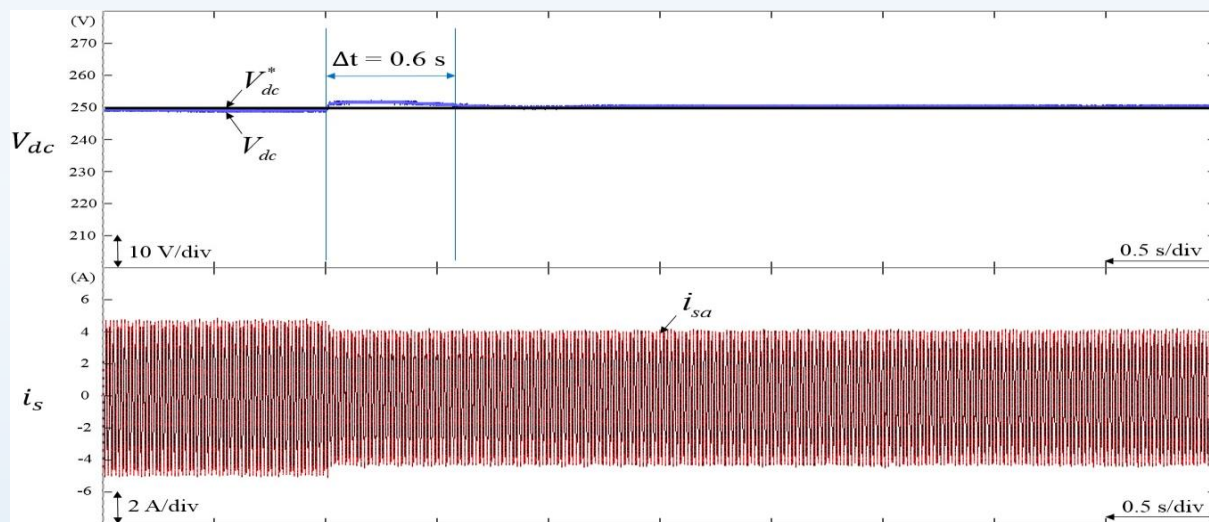


圖6.19 實作在Case 2情況下利用CFNN控制器補償



六、硬體與實作結果

• Case 2 (續)

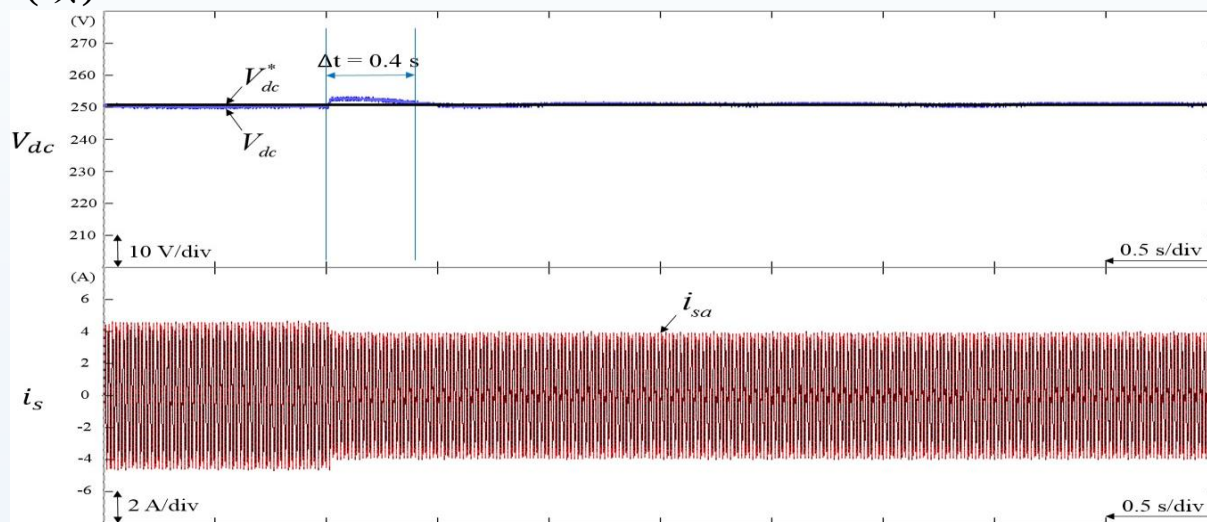


圖6.20 實作在Case 2情況下利用CFNN-AMF控制器補償

表6.5 不同控制器下Case 2負載變動實作結果

Case Condition	DC-Link Controllers	Response Time (s)		Overshoot to Undershoot (V)	
		Linear Inductive Load 1	→ Linear Inductive Load 3	Linear Inductive Load 1	→ Linear Inductive Load 3
Case 2	PI		0.8		5
	CFNN		0.6		4
	CFNN-AMF		0.4		3.6



目錄

- 一、緒論
- 二、規範與配電型靜態同步補償器介紹
- 三、配電型靜態同步補償器系統架構與控制策略
- 四、非對稱歸屬函數之補償模糊類神經網路
- 五、模擬結果
- 六、硬體與實作結果
- 七、結論與未來研究方向



七、結論與未來研究方向

• 結論

1. 本文完成具有同時補償電流諧波與改善功率因數的配電型靜態同步補償器，藉此來改善電力品質。
2. 應用Matlab/Simulink模擬軟體對所提出的控制方法進行相關的模擬，驗證所提出控制方法的成效；之後利用三相三線變流器為架構的配電型靜態同步補償器來進行實作。
3. 提出非對稱歸屬函數之補償模糊類神經控制器取代傳統的PI控制器，藉由非對稱歸屬函數之補償模糊類神經控制器的參數線上學習能力，來使直流鏈電壓控制上有更佳的暫態響應，也相對改善電流諧波與功率因數補償之效果。

• 未來展望

1. 本論文採用傳統脈波寬度調變，未來可以改用空間相量脈波寬度調變使功率輸出之效率提高。
2. 本論文以MATLAB/SIMULINK作為控制架構，可在未來改為以數位訊號處理器做為其驅動核心，以減少硬體成本。



***Thank You for Your
Attention!***