

利用智慧型靜態同步補償器改善下垂控制微電網之電力品質

文/談光雄、林法正、李孟洋、翁祥瑀

關鍵字：微電網、電力品質、智慧型控制、靜態同步補償器

本文提出一種具有靜態同步補償器(Distribution Static Compensator, DSTATCOM)的下垂控制微電網，以改善微電網之電力品質。由於虛功率/電壓 $Q-V$ 下垂特性，以及不平衡、線性和非線性負載的存在，造成微電網於孤島模式下具有嚴重的電力品質問題，包括電壓降、不平衡電流、落後功率因數(Power Factor, PF)和電流諧波等。此外，若微電網中的負載發生變化將造成DSTATCOM中直流鏈電壓產生變化，這會導致DSTATCOM改善電力品質的性能嚴重退化。因此，為了有效改善下垂控制微電網的電力品質以及在負載發生變化下DSTATCOM中直流鏈電壓的暫態響應，本文提出了一種具線上學習能力之多項式派翠模糊神經網路(Polynomial Petri Fuzzy Neural Network, PPFNN)控制器作為直流鏈電壓控制器，以用於取代DSTATCOM中的傳統比例積分(Proportional-Integral, PI)控制器。最後，利用實驗驗證DSTATCOM使用所提出的PPFNN控制器於下垂控制微電網中改善不平衡電流、降低電流總諧波失真(Total Harmonic Distortion, THD)與虛功率補償的有效性。

前言

世界上多數的國家過去都以天然氣、燃煤與核能發電等集中式發電為主，但大量燃燒石油、燃煤與天然氣容易產生大量二氧化碳與懸浮微粒於空氣當中。當這些空氣汙染長時間累積時，會產生溫室效應與酸雨，而空氣中的懸浮微粒會增加人類罹患慢性病及肺癌的風險，最終造成健康與生活品質下降，因此環境保護與能源危機為全球當前關注之問題，也使綠能有增加的趨勢。隨著綠能之興起，人們提出了一種稱為微電網(Microgrid)的新型電力系統[1]。

微電網透過電力電子轉換器集合了分散式電源(Distributed Generator, DG)和鄰近負載[1]，然而微電網中使用的電力電子轉換器如逆變器、變流器與整流器等，這些電力電子設備會產生大量的電流諧波與功率因數落後，這不僅造成傳輸電能過程中的電力損失，也會使溫度與機械噪音上升，進而引發重要設備損壞與公共安全等問題[2]。另一方面，電力系統中連接著許多單相負載[3]，如電風扇、電冰箱、電燈、電視機、電腦與洗衣機等家電，造成位於系統中的三相負載時常處於不平衡狀態，其所產生的三相不平衡電流使得供電方之配電變壓器和線路的電力損耗增加，且可能造成供電端的各項電壓不平衡，以至於輕載之用電設備燒毀[3]。故因上述原因，改

善電力品質之技術以成為現今重要之研究議題。

微電網下垂控制法主要原理為降低頻率和電壓之振幅，使微電網中的分散式電源共同分配實功率和虛功率，此類似於同步發電機(Synchronous Generators, SG)之間的運作原理[4]。此外，下垂控制的主要優點是不需要與各個微電網通信，僅使用局部感測器測量就可以實現分散式電源的“即插即用”功能[4]，且不需要手動下命令，因此下垂控制在微電網系統廣泛採用，下垂控制的缺點則是暫態響應慢、抗干擾能力以及諧波補償能力差等[5]。此外，由於電感性、非線性以及不平衡負載的存在，微電網中可能出現不平衡電流、滯後功率因數(PF)以及電流諧波成份，導致電力品質下降[6]。因此，在孤島模式運行下的下垂控制微電網中，改善電力品質和補償虛功率的方法是非常重要的議題[7]。

靜態同步補償器(DSTATCOM)是改善微電網中電力品質的有效方法之一，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靜態同步補償器[7]，所以直流鏈電容需要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[7]。

近年來，發展出類神經網路與模糊系統等智慧型控制，具有不需要數學模

型與近似非線性系統之能力，因此有許多利用智慧型控制來呈現複雜的受控體與建構高階控制器之研究[8]。此外，結合模糊邏輯理論與類神經網路的概念已是熱門的研究主題[8]。相較於單一的模糊系統(Fuzzy Control)或類神經網路(Neural Network)，結合兩者的模糊類神經網路(Fuzzy Neural Network, FNN)擁有雙方的優點，不僅利用模糊推論來處理不確定的資訊，也具有自行線上學習之能力[9]，且模糊類神經網路不需要額外複雜的數學理論，便能夠有效近似非線性與不確定性之系統[9]。因而有許多研究利用模糊類神經網路來描述複雜的受控體，並建構一個具有倒傳遞演算法的高性能控制器[9]。除此之外，多項式類神經網路(Polynomial Neural Network, PNN)是一種前饋型的類神經網路，架構是由無數個多項式函數(Polynomial Function)組成的類神經網路，可以描述輸入和輸出之間的高階非線性關係，且優於現有的模糊神經網路[10]。另外，派翠網路(Petri Net, PN)是由Carl Adam Petri於1962年於德國在他的博士論文中提出的圖像化數學工具[11]。在最近十

年中，派翠網路已成為一個強大而有效的工具，其具有並行、非同步、即時、分散及不確定性處理等特性[11]，並且被廣泛的應用在規範、驗證並行與非同步的分散式訊息處理系統[11]。

因上述介紹之不同類神經網路的各自優點，本文提出一種新型智慧型控制器，結合PNN的描述輸入和輸出之間的高階非線性關係之能力與FNN的推論能力，且具有PN的並行、非同步、即時、分散及處理不確定性等特性之多項式派翠模糊類神經網路(Polynomial Petri Fuzzy Neural Network, PPFNN)，並將其應用於靜態同步補償器控制策略的直流鏈電壓控制。

下垂控制與靜態同步補償器控制法則

本文的微電網下垂控制與靜態同步補償器控制架構是由儲能、電力電子元件、濾波電感、電壓感測器、電流感測器、三相不平衡負載、線性負載與非線性負載組成，如圖1所示。經由撰寫控制法則，寫入數位訊號處理器，使儲能系

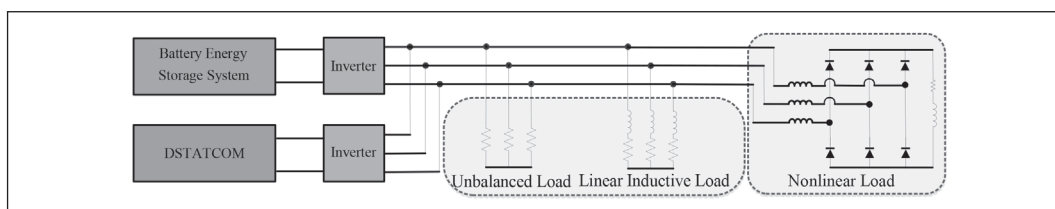


圖1 靜態同步補償器結合下垂控制微電網架構圖

統可以模仿出具同步發電機之下垂控制之運作特性，以實現靜態同步補償器來維持儲能系統之電力品質。

圖2(a)為儲能系統寫入下垂控制法則之控制架構圖，儲能系統根據負載自行調節電壓與頻率進而調節輸出實功率與虛功率，使微電網系統在負載變動時，電壓、頻率、實功率與虛功率的變化符合下垂控制方程式，儲能系統使用 $P-\omega$ 下垂控制、 $Q-V$ 下垂控制，此控制方法會根據下垂係數 K_p 、 K_q 與負載，分配實功率與虛功率，進而調節頻率與電壓。首先由儲能系統的 $P-\omega$ 下垂控制得到估測之相位 θ_m ，接著利用電壓感測器取得三相電壓 v_a 、 v_b 、 v_c 以及運用儲能系統端的電流感測器取得線電流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} ，經由座標軸轉換至同步旋轉座標軸，可得 V_{sd} 、 V_{sq} 、 I_{sd} 及 I_{sq} ，接著計算儲能系統輸出的實功率 P_s 、虛功率 Q_s 、角頻率 ω_g 與相電壓峰值 $V_{an,peak}$ ，實功率 P_s 代入 $P-\omega$ 下垂控制方程式可獲得角頻率命令 ω_m 並與角頻率 ω_g 相減產生誤差後，藉由PI控制器得到 d 軸電流命令 I_{sd}^* ，再與儲能系統輸出端的 d 軸電流 I_{sd} 相減，所得到的誤差通過PI控制器可得控制力 u_{sd} ；而虛功率 Q_s 代入 $Q-V$ 下垂控制方程式，可獲得電壓命令 V_m ，與微電網的相電壓峰值 $V_{an,peak}$ 相減後，藉由PI控制器得到 q 軸電流命令 I_{sq}^* ，再與儲能系統輸出端的 q 軸電流 I_{sq} 相減，所得到的誤差通過PI控制器可得控制力 u_{sq} ， dq 軸的控制力 u_{sd} 、

u_{sq} 經由反座標軸轉換到三相固定座標軸上，其中 u_{coma} 、 u_{comb} 、 u_{comc} 為三臂的控制力，此三個控制力會進入正弦脈波寬度調變(Sinusoidal Pulse-width modulation, SPWM)，可得到三臂控制訊號，以控制功率開關，以實現電壓與頻率的調節。

圖2(b)為靜態同步補償器之控制架構圖，其為本文參考瞬時功率理論(Instantaneous Power Theory)作為基礎，進而發展出之控制架構。此控制架構以抑制儲能系統因連接非線性負載、線性負載與不平衡負載造成的電流諧波、功率因數落後與電流不平衡，並降低電流總諧波失真(Total Harmonic Distortion, THD)以及提升功率因數，來提升儲能系統之電力品質。首先利用電壓感測器取得三相電壓 v_a 、 v_b 、 v_c ，經由座標軸轉換至 $\alpha\beta$ 靜止座標軸，得到 v_α 、 v_β 電壓。然後運用靜態同步補償器端的兩組電流感測器取得儲能線電流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 與負載線電流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} ，經由座標軸轉換至 $\alpha\beta$ 靜止座標軸，得到 $\alpha\beta$ 軸之負載電流 i_{La} 、 $i_{L\beta}$ 及 $\alpha\beta$ 軸之儲能電流 i_{sa} 、 $i_{s\beta}$ 。將負載實功率 P_L 送入低通濾波器取得負載實功率之直流成分 $\bar{P}_L$ ，再與負載實功率 P_L 相減求得負載實功率之交流成份 $\tilde{P}_L$ ，如(1)式所示：

$$\tilde{P}_L = P_L - \bar{P}_L \dots\dots\dots(1)$$

接著將直流鏈電壓命令 V_{dc}^* 和實際直流鏈電壓 V_{dc} 相減後送入比例控制器(Proportional-Integral, PI)或本文所提出

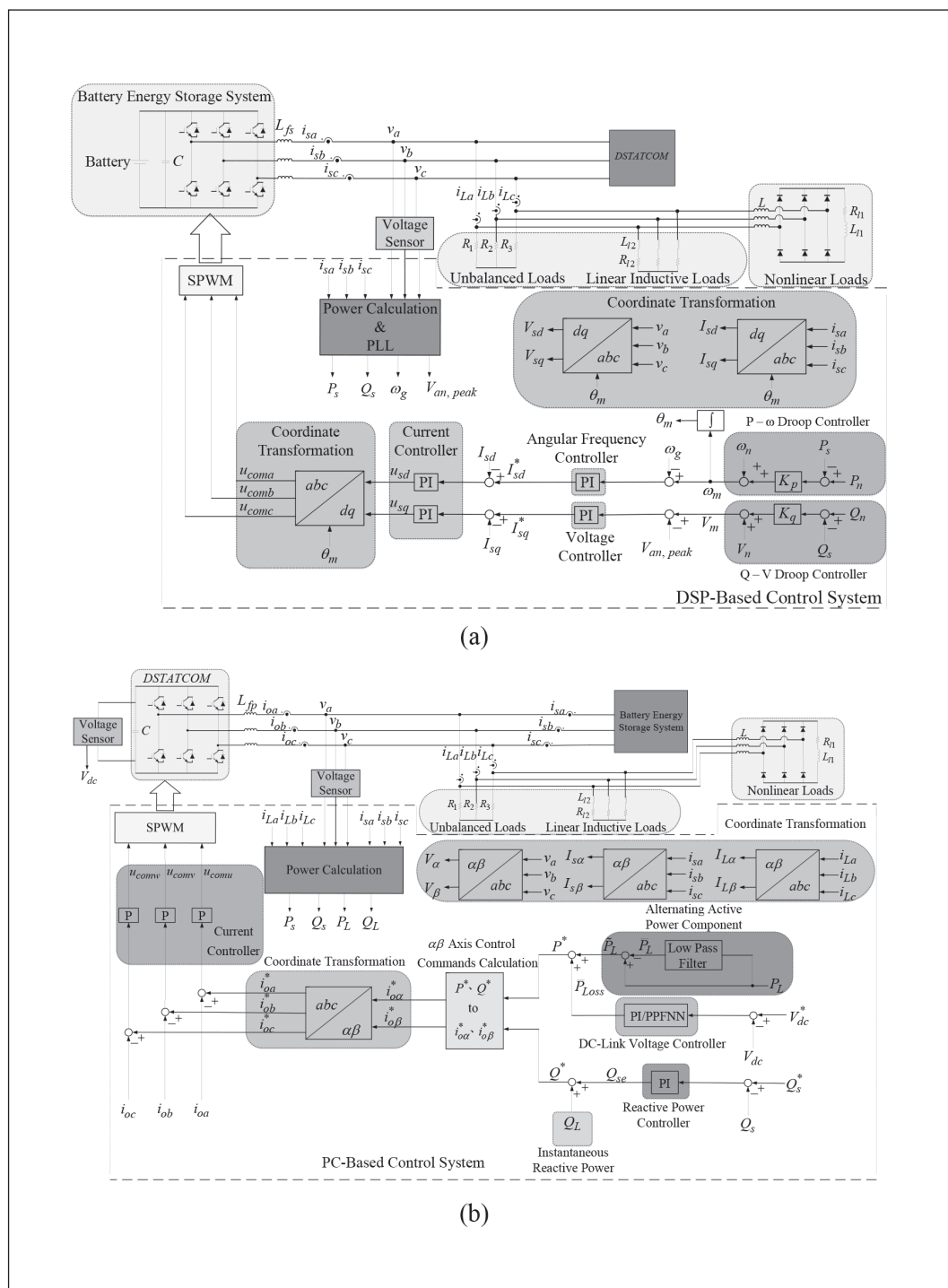


圖2 (a)儲能系統寫入下垂控制架構圖;(b)靜態同步補償器控制架構圖

之多項式派翠模糊類神經網路控制器 PPFNN 得到電流控制力 $\bar{P}_{loss}$ ，再與負載實功率之交流成份 $\tilde{P}_L$ 相加求得實功率命令 P^* 。為了使系統維持無虛功率的狀態，所以令儲能虛功率之命令 Q_s^* 為 0，並與儲能實際虛功率 Q_s 相減後，藉由 PI 控制器得到電流控制力 Q_{se} ，再與負載虛功率 Q_L 相加求得虛功率命令 Q^* 。最後實功率命令 P^* 與虛功率命令 Q^* 經由瞬時功率反轉換求得 α 軸與 β 軸之電流命令 $i_{o\alpha}^*$ 、 $i_{o\beta}^*$ ，如(2)式所示：

$$\begin{bmatrix} i_{o\alpha}^* \\ i_{o\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

α 軸與 β 軸之電流命令 $i_{o\alpha}^*$ 、 $i_{o\beta}^*$ 再經由反座標軸轉換到三相固定座標軸，得到三相電流命令 i_{oa}^* 、 i_{ob}^* 、 i_{oc}^* ，三相電流命令 i_{oa}^* 、 i_{ob}^* 、 i_{oc}^* 與三相實際電流輸出 i_{oa} 、 i_{ob} 、 i_{oc} 相減後經比例控制器 PI 得到三臂的控制力 u_{comu} 、 u_{comv} 、 u_{comw} ，這三個控制力會進入 SPWM，可得到三臂的正弦脈波寬度調變的控制訊號，以實現實功率與虛功率的分配。

多項式派翠模糊類神經網路 (PPFNN) 架構

本文提出了多項式派翠模糊類神經網路，透過線上學習法則調整控制參

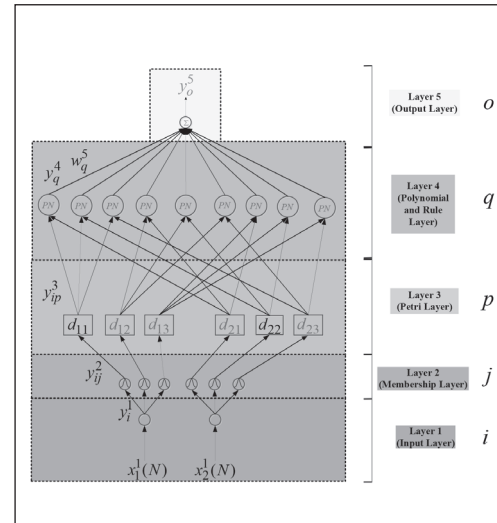


圖3 PPFNN 網路架構

數，來加快響應速度，其網路架構圖如圖3所示。多項式派翠模糊類神經網路總共分成五層，第一層為輸入層；第二層為歸屬函數層；第三層為派翠層；第四層為多項式規則層；第五層為輸出層。多項式派翠模糊類神經網路與傳統控制器相比，傳統控制器需要建立於受控體需具有精確的數學模型上，如果沒有精確的數學模型，傳統的控制理論就無法精確的控制，只能不斷的嘗試錯誤 (Trial and error)，調出受控體所需要的控制力，而智慧型控制不需要精確的受控體模型，即可達到良好的控制效果，且性能會比傳統的 PI 控制器好，藉此與傳統的比例積分控制器比較直流鏈電壓暫態，來改善靜態同步補償器的補償性能與直流鏈電壓暫態的響應。

實驗結果：

爲了驗證下垂控制微電網結合靜態同步補償器控制策略之性能，實驗情境會在未補償與靜態同步補償器分別使用PI以及PPFNN控制器補償之情況下進行，並且同時補償三相非線性負載、三相線性負載與三相不平衡負載，其中本文所使用的負載值爲：

(1) 三相非線性負載：； $L=6\text{mH}$, $L_{11}=1\text{mH}$, $R_{11}=100\Omega$ ；

(2) 三相線性負載：； $L_{12}=50\text{mH}$, $R_{12}=25\Omega$ ；

(3) 三相不平衡負載：； $R_1=80\Omega$, $R_2=40\Omega$, $R_3=160\Omega$ ；

此外，爲驗證三相不平衡電流補償效果，定義一電流不平衡率(Current Unbalance Ratio, CUR)爲三相電流中最大峰值和最小峰值相減後，再除上三相電流峰值之平均，其數學式表示如下：

$$CUR = \frac{\text{Max.}(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) - \text{Min.}(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})}{\text{Avg.}(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})} \times 100\% \quad (3)$$

其中 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 分別爲儲能系統之a相、b相以及c相電流，當CUR越小代表三相電流越平衡。

圖4爲下垂控制微電網補償前之實驗結果。圖4(a)爲補償前的電壓 v_a 、三相儲能系統電流 i_{sa} 、 i_{sb} 以及 i_{sc} 、三相負載電流 i_{La} 、 i_{Lb} 以及 i_{Lc} 、靜態同步補償器之電流 i_{oa} ，其中電流不平衡是由不平衡負載所造成。由於靜態同步補償器尚未補償，因此 i_{oa} 爲0；圖4(b)爲補償前的儲能系統實功率 P_s 以及頻率 f_{sm} ；圖4(c)爲補償前的儲能系統虛功率 Q_s 以及a相相電壓 $V_{an,peak}$ 的峰值，由於負載中包含非線性以及不平衡負載，因此儲能系統虛功率不爲0；此外，由圖4(a)可以看出，電感性、非線性以及不平衡負載會導致電力品質下降，THD爲8.35%，落後功率因數(Power Factor, PF)爲0.93，三相電流不平衡率CUR爲12%。

圖5爲下垂控制微電網結合靜態同步補償器且直流鏈電壓利用PI控制器補償後之實驗結果，圖5(a)爲補償後的電壓 v_a 、三相儲能系統電流 i_{sa} 、 i_{sb} 以及 i_{sc} 、三相負載電流 i_{La} 、 i_{Lb} 以及 i_{Lc} 、靜態同步補償器之電流 i_{oa} ；圖5(b)爲補償後的儲能系統實功率 P_s 以及頻率 f_{sm} ；圖5(c)爲補償後的儲能系統虛功率 Q_s 以及a相相電壓 $V_{an,peak}$ 的峰值。此外，由圖5(a)可以看出，所提出的靜態同步補償器控制架構可以有效地補償虛功率以及改善下垂控制諧波補償能力較差的缺點[6]。補償後之THD爲4.3%符合IEEE 519-2014小於5%之規範，三相儲能系統電流之CUR值也有很明顯改善降爲1.4%，功率因數提高至0.99。

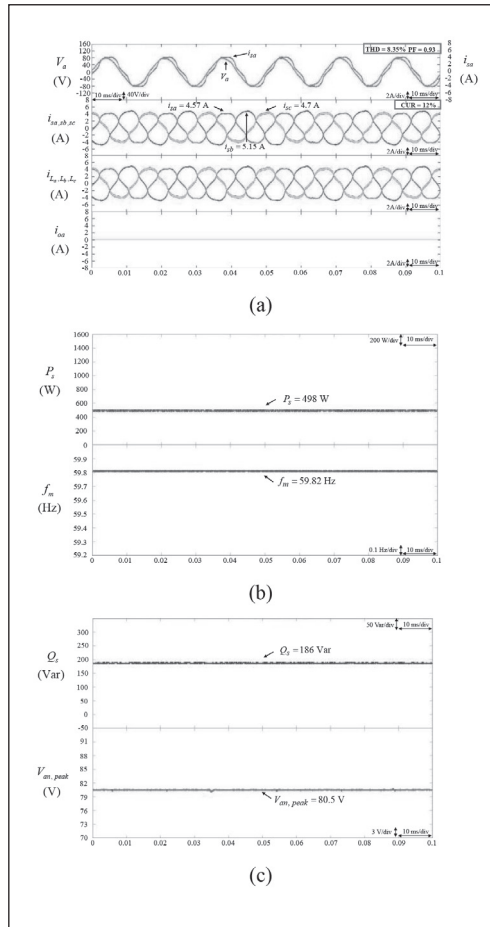


圖4 補償前之實驗結果：(a)三相儲能系統之電壓以及電流、三相負載端電流、靜態同步補償器之a相電流；(b)儲能系統實功率以及頻率；(c)儲能系統虛功率以及a相相電壓峰值

為了改善儲能系統電流 i_{sa} 之THD值以及三相儲能系統電流之CUR值，本文利用PPFNN控制器取代PI控制器。圖6為下垂控制微電網結合靜態同步補償器且直流鏈電壓利用PPFNN控制器的實驗結果。圖6(a)為補償後的電壓 v_a 、三相儲

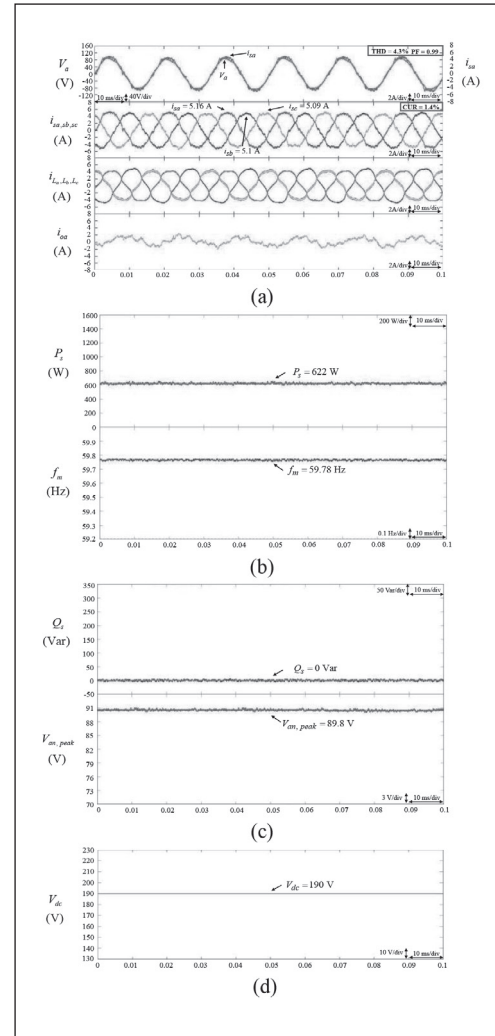


圖5 利用PI控制器補償後之實驗結果：(a)三相儲能系統之電壓以及電流、三相負載端電流、靜態同步補償器之a相電流；(b)儲能系統實功率以及頻率；(c)儲能系統虛功率以及a相相電壓峰值；(d)靜態同步補償器之直流鏈電壓

能系統電流 i_{sa} 、 i_{sb} 以及 i_{sc} 、三相負載電流 i_{La} 、 i_{Lb} 以及 i_{Lc} 、靜態同步補償器之電流 i_{oa} ；圖6(b)為補償後的儲能系統實功率 P_s

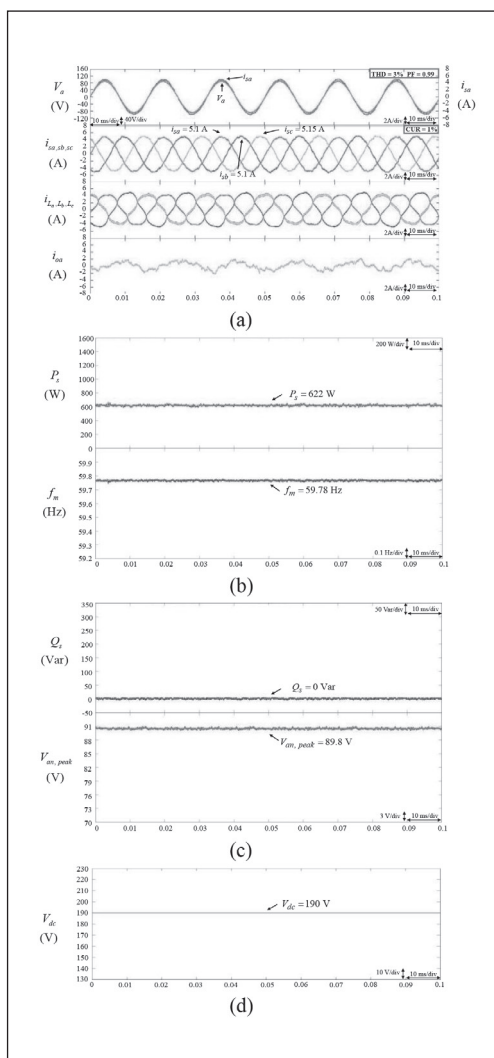


圖6 利用PPFNN控制器補償後之實驗結果：
(a)三相儲能系統之電壓以及電流、三相負載端電流、靜態同步補償器之a相電流；(b)儲能系統實功率以及頻率；(c)儲能系統虛功率以及a相相電壓峰值；(d)靜態同步補償器之直流鏈電壓

以及頻率 f_{sm} ；圖6(c)為補償後的儲能系統虛功率 Q_s 以及a相相電壓 $V_{an,peak}$ 的峰值；圖6(d)為靜態同步補償器之直流鏈電壓

V_{dc} 。由實驗結果得知，靜態同步補償器其直流鏈電壓採用所提出之PPFNN控制器，補償後之THD為3%，三相儲能系統電流之CUR值也有很明顯改善降為1%，功率因數為0.99，由實驗可知，靜態同步補償器採用所提出之PPFNN控制器可更有效地改善THD、PF以及CUR，以達到提升電力品質之目的。

比較上述利用PI與PPFNN控制器的實驗結果，從圖5(a)與圖6(a)可以看出，利用PPFNN控制器可得到較好的電流 i_{sa} 之THD值以及CUR值。因此驗證了在微電網系統中的靜態同步補償器利用PPFNN控制器可以相較於PI控制器，得到更好的電力品質。

結論

本文將下垂控制法則寫入儲能系統，並利用三相三線變流器為架構的靜態同步補償器系統補償儲能系統的落後功率因數、電流諧波與電流不平衡，且補償後儲能系統的電流諧符合規範IEEE 519-2014；在下垂控制策略下，儲能系統不須手動下命令即可自行分配實功率與虛功率；在靜態同步補償器控制策略下，利用PPFNN控制器取代直流鏈電壓控制迴路中的PI控制器，以此達到抑制電流諧波與補償電流不平衡之效果。■

參考資料

1. B. Liu, T. Wu, Z. Liu, and J. Liu, "A small-AC-signal injection-based decentralized secondary frequency control for droop-controlled islanded microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 11, pp. 11634-11651, Nov. 2020.
2. Z. Qiang, Q. Lewei, Z. Chongwei, and D. Cartes, "Study on grid connected inverter used in high power wind generation system," *IEEE 41st Annu. Ind. Applicat. Conf. Rec.*, Oct. 2006, p. 6.
3. R. L. Ribeiro, C. C. Azevedo, and R. M. Sousa, "A robust adaptive control strategy of active power filters for power-factor correction, harmonic compensation, and balancing of nonlinear Loads," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 718-730, February 2012.
4. K. Yu, Q. Ai, S. Wang, J. Ni and T. Lv, "Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 695-705, March 2016.
5. L. Wang, M. C. Wong, X. Zhou, Z. He, Q. Xu, and L. Zhou, "A selective power droop control for hybrid interlinking converter in AC/LVDC microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 10, pp. 9046-9057, Oct. 2021.
6. L. Wang, C. S. Lam, and M. C. Wong, "Multifunctional hybrid structure of SVC and capacitive grid-connected inverter (SVC//CGCI) for active power injection and nonactive power compensation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 3, pp. 1660-1670, Mar. 2019.
7. B. Singh, P. Jayaprakash, and D. P. Kothari, "A T-connected transformer and three-leg VSC based DSTATCOM for power quality improvement," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 2710-2718, Nov. 2008.
8. Jang, J. S. R., Sun, C. T., and Mizutani, E., "Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence," Prentice-Hall, New Jersey, pp. 1-614, 1997.
9. F. J. Lin, W. J. Hwang and R. J. Wai, "A supervisory fuzzy neural network control system for tracking periodic inputs," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 41-52, Feb. 1999.
10. W. Huang, S. Oh and W. Pedrycz, "Fuzzy Wavelet Polynomial Neural Networks: Analysis and Design," *IEEE Trans Fuzzy Systems*, vol. 25, no. 5, pp. 1329-1341, Oct. 2017.
11. K. H. Tan, "Squirrel-cage induction generator system using wavelet Petri fuzzy neural network control for wind power applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 7, pp. 5242-5254, July 2016.

作者簡介



談光雄
國防大學理工學院電機電子工程學系
專長：
電力電子
微電網



林法正
國立中央大學電機工程學系
專長：
智慧電網
再生能源



李孟洋
國立中央大學電機工程學系
專長：
AI 加速器之數位邏輯電路架構設計



翁祥瑞
國立中央大學電機工程學系/研究助理
專長：
電力電子
再生能源轉換