

Design of Unified Power Conditioner for Dual Loop Power System

Fu-Sheng Pai^{}, Jung-Lung Tsai, Che-Jung Chuang, and Chih-Cheng Hsu*

*Department of Electrical Engineering,
National University of Tainan
33, Sec. 2, Shu-Lin St, Tainan, Taiwan, R.O.C.*

Abstract — *In recent years, many applications of power technologies have been developed for power power-supplying quality enhancement. Among them, Unified Power Quality Conditioner (UPQC), which consists of double converters connected by a DC capacitor with each other, has great potential because of its high controllability. Therefore in this paper, a new scheme for an UPQC is studied. The proposed UPQC uses the power converters to bridge the adjacent two power feeders. Then, the operation of UPQC is not only operated for keeping the load voltage at constant in either of the two feeders, but also for transferring desired power between the bridged feeders. This method has been tested through simulation studies. Test results help consolidate the feasibility of the approach for the applications considered*

Index Terms — *Smart Grid, Distributed Generations, Unified Power Quality Conditioner.*



^{*} Corresponding author: fspai@mail.nutn.edu.tw
DOI : 10.6159/IJSE.2015.(5-2).04

應用於雙饋電迴路之整合電力品質調節器 設計與分析

白富升 蔡謹隆 莊哲榮 許志丞

國立臺南大學電機工程學系

摘要

隨著分散式發電系統漸獲矚目，其雖將在未來之智慧電網內佔舉足輕重之地位，但分散式發電系統加入配電系統運轉仍有許多系統衝擊問題尚待解決，其中配電系統即常受到電力饋線可允許之承載電流量因素，無法於任意饋線位置皆允許再生能源加入並聯運轉，其可能影響再生能源之廣泛設置。為解決此一問題，不同饋線間之電力轉移即顯得非常重要，因此本文基於現代電力系統在高品質需求之供電地區常採雙迴路配電架構，故提出利用相鄰的兩供電迴路，在兩電力饋線間分別串接換流器，並令其共用直流電壓匯流排，則所提系統除有助於主電力饋線之電壓驟降保護外，電力潮流亦得透過所提系統從副饋線移轉到主饋線迴路，以線間調度方式解決部分輸電線路承載電流量之問題，進而得提高其於電力系統應用之彈性。為評估掌握所提方法的可行性，本文已發展雛形電路，並經由相關電路測試予以驗證理論分析結果確具可行性。相關研究心得與經驗，未來應可提供電力從業人員進行電力品質改善工程時之施行參考。

關鍵字：電壓驟降，整合型電力品質調節器，功率移轉。

I. 前言

長久以來電力系統受輸電線路故障、開關突波、諧波污染及大電力用戶急劇負載變動之影響，常有電壓驟降及電力中斷等問題，其可能影響電力系統的供電可靠度。然而目前在智慧電網全球施行之際，電力系統智慧化之內容已被各國業者高度期待，期使電力系統運轉得以確實改質，具備較佳之狀態自動檢知、控制與自我療癒能力[1-3]。而為在智慧電

網內實施功率、電壓、電流之管理，近年來各種新式電力調度、穩壓策略不斷被研究討論，包括配電系統對於分散式發電系統之功率潮流管理、系統故障、電壓控制等議題，皆已顯日趨重要及具實務應用之參考價值[4-7]。今為達到最大之控制廣度，以同時進行配電系統電壓、電流管理或補償，近年來整合型電力品質調節器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)已陸續被提出討論，如圖 1 所示，UPQC 之結構包括一串聯電力轉換器，藉以補償市電電壓之變化，同時再加入一並聯電力轉換器，以抑制電流諧波及改善其功率因數。另其串聯及並聯電力轉換器採同一直流端連接，如此一來，透過兩者間之能量傳遞與平衡，所提電路即無須再使用儲能電池，故 UPQC 可達到簡化架構，提高系統運轉可靠度，進而裨益於系統電路操作效能之提升。整體而言，整合型電力品質調節器之串聯電力轉換器其動作行為類似一個受控電力線串聯電壓源，以 PWM 控制換流器輸出電壓，使得負載電壓維持穩定；另其並聯電力轉換器其工作行為類似一個受控電力線並聯電流源，亦即以 PWM 控制換流器，以補償諧波電流並改善功率因數為主要控制設計[15]。

基於上述背景，目前學術文獻及工程技術報告已見多篇文章研究探討 UPQC 系統[4,15-17]，例如 W. C. Lee 等人曾提出控制輸出電壓之相位，可減少電壓驟降發生時串聯電源所需補償之實功率大小；V. Khadkikar 與 V. G. Kinal 等人探討不同負載情境下之系統補償與功率潮流之關係，並推導所需之換流器額定；P. E. Melin 等學者以電流源換流器(Current Source Inverter, CSI)取代常見之電壓源換流器(Voltage Source Inverter, VSI)為主結構，設計出不同型態之 UPQC[5]；M. Basu 等人則探討電力系統故障發生時之串聯電力轉換器過電壓、過電流現象，並提出保護電路設計方法[19]。另一方面部分控制見長之學者則專司 UPQC 內使用之換流器運動結構研究，

包括 V. G. Kinalh、Y. Rong、R. Liu 及 A. Take 等人分別透過系統結構建模之研究，輔以模糊理論、類神經理論、粒子群優理論等智能演算法設計控制器，使得系統可得到快速的電壓補償效果；近年來因分散式發電系統已被允許加入配電系統運轉，亦有文獻研究結合再生能源之 UPQC 系統設計與運轉效能分析。最後則有學者利用兩組換流器輔以直流匯流排共用結構，分別連結於不同配電站之兩迴路組成線間型 UPQC，且確能達到雙電力饋線電壓控制之目的。

然而目前分散式發電系統雖可與配電系統並聯運轉，但配電系統卻常受到電力饋線可允許之承載電流量與負載等因素，致其無法於任意饋線位置皆允許再生能源加入並聯運轉。為解決此一問題，不同饋線間之電力轉移即顯得非常重要。今基於現代電力系統在高品質需求之供電地區常採雙迴路配電架構特性，因此本文即在研究使用雙電源迴路之 UPQC 系統特性，以掌握其在協助電力品質改善功能之外之電力潮流轉移運作能力，期可委其在必要時協助配電系統完成電力轉移之操作目的。

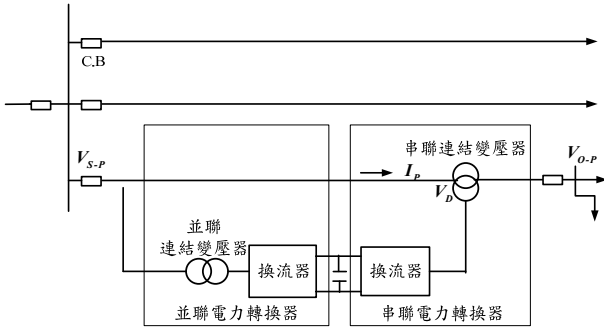


圖 1：傳統 UPQC 電力架構圖

II. UPQC 電力轉換器功率特性分析

傳統 UPQC 內部之串聯電力轉換器動作原理可由圖 1 之電壓架構圖與圖 2 之電壓補償相量圖看出。如圖所示，串聯電力轉換器由換流器與串聯連結變壓器構成。在此一電路中，若輸電端發生線路故障至產生電壓驟降情況時，則串聯於輸電線路之換流器需能夠快速的偵測到電壓異常狀況，並適當的提供補償電壓，以保持輸電線受電電壓之穩定。今假設輸電系統上游之輸入電壓相量為 V_{S-P} 、下游受電電壓相量為 V_{O-P} ，則換流器透過變壓器注入輸電系統的電壓相量 V_D 可表示為：

$$V_D = V_{O-P} - V_{S-P} \quad (1)$$

若流經輸電線路系統的電流相量表示為 I_p ，則可推算 UPQC 之串聯電力轉換需承載之複數功率 S_p ：

$$S_p = (V_{O-P} - V_{S-P}) \times I_p^* \quad (2)$$

續令下游電壓為參考零相量，且 α_p 定義成輸出入電壓比：

$$\alpha_p = \frac{|V_{S-P}|}{|V_{O-P}|} \quad (3)$$

此時如遠方之輸電線路發生故障，而招致上游電壓 V_{S-P} 發生電壓驟降時，串聯電力轉換器為補償電壓需輸出實、虛功率 (P_p 、 Q_p) 各為：

$$P_p = |S_p| [\cos\theta_p - \alpha_p \cdot \cos(\delta_p + \theta_p)] \quad (4)$$

$$Q_p = |S_p| [\sin\theta_p - \alpha_p \cdot \sin(\delta_p + \theta_p)] \quad (5)$$

其中 δ_p 為串聯電力轉換器所在電力饋線輸出入電壓相位差、 θ_p 為饋線電流之功率因數角。至於串聯電力轉換器所注入的串聯電壓大小，可在假設其補償後之輸電線下游電壓 V_p 恆為 1 p.u 後，再利用圖 2 之電壓補償向量圖與(3)式求得：

$$|V_D|^2 = \alpha_p^2 - 2\alpha_p \cdot \cos\delta_p \quad (6)$$

利用上述分析可看出：

- (1) 串聯電力轉換器的補償電壓會隨著 δ_p 之變化而改變，換言之如串聯電力轉換器在面臨電壓上游饋電電壓異常時欲採行最小電壓之補償設計，則利用(6)式，取 V_D 大小對 δ_p 一次微分且為零可得到，當 $\delta_p=0$ 時串聯電力轉換器有最小之注入電壓。在此一條件下，由(4)、(5)兩式可推得：

$$P_p = (1 - \alpha_p) |S_p| \cos\theta_p \quad (7)$$

$$Q_p = (1 - \alpha_p) |S_p| \sin\theta_p \quad (8)$$

由(7)、(8)式可看出，當面臨電壓驟降補償要求時，即便處於最小串聯電壓補償，串聯電力轉換器仍需對電力饋線輸出實、虛功率，故 UPQC 系統必須藉由其內部之並聯電力轉換器在直流側加入能量，以應付串聯電力轉換器功率輸出之需求。

- (2) 由(4)、(5)式也可看出，串聯電力轉換器運轉時之輸出功率亦會隨著 δ_p 角變動而改變，亦即藉由 δ_p 角度之控制可改變其串聯電力轉換器運轉之功率。利用此一特性，如電力轉換器串聯之饋線上下游電壓均正常 ($\alpha_p=1$)，且控制使得串聯電力轉換器之負載電壓相位角超前其上游輸入電壓 ($\delta_p>0$)，則在此條件下，根據(4)式可知當 $\delta_p>2\theta_p$ 時，無論系統處於何種負載，串聯電力轉換器均會輸出實功率到所串聯之電力饋線。綜合上述分析可知，串聯電力轉換器的運轉除可提供補償電壓以維持其下游負載之電壓品質外，如適當控制其串聯電壓之相位與振幅，則可同時調整功率潮流之路徑。

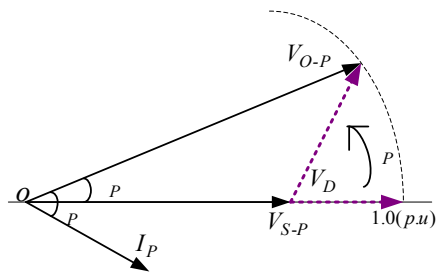


圖 2：UPQC 之串聯電力轉換器之電壓補償相量圖

III. 本文所提系統組態與操作

利用前述串聯電力轉換器特性，圖 3 繪出本文所提系統架構圖。如圖所示，其由兩換流器、兩變壓器組成及雙迴路電源組成，其中換流器 D_P 及變壓器 T_P 與主電力饋線 P (Primary power feeder) 串聯連接，以作為主饋線之電壓補償必要條件；換流器 D_S 及變壓器 T_S 則與次饋線 S (Secondary power feeder) 並接，專司於系統功率平衡之運作。利用上述設計，本文所提系統由於在兩饋線間仍保持變壓器介接結構，因此兩側個別之變壓器可提供適當之匝數比，使得系統得以應用於任意等級之電力饋線上。本文所提系統運轉分析如下：

模式一：主饋線 P 出現線路壓降過高電壓等電力異常事故，系統處於電壓調節模式。如圖 4(a) 所示，在此狀況下，換流器 D_P 將受控插入一適當之電壓以維持主饋線負載電壓之穩定，而換流器 D_S 則需負責注入/抽出直流電壓匯流排之能量，以保持系統運轉能量之平衡。在此運轉條件下，利用前述的功率分析，表 1 列出不同電壓驟降條件下之串聯電力轉換器與並聯電力轉換器所需承載之功率及電流標么值。

模式二：兩饋線電壓正常，系統處於電力轉移模式。如圖 4(b) 所示，次饋線 S 實功率擬經由 UPQC 內部送到主饋線 P。此一狀況下，饋線 S 部分功率將經並聯變壓器 T_S 、換流器 D_S 灌入系統內部直流匯流排，再透過換流器 D_P 及其串聯電壓之移相控制技術，將該直流功率轉換經串聯變壓器 T_P 注入饋線 P，以完成所設定之電力轉移功能。表 2 列出移相角度分別控制在 10、20 及 30 度時，系統可轉移之實功率，其中可轉移功率最高是系統額定功率值的 41%，另如移相角度越大則轉移之功率也越高。

由上述模式分析可看出，本文所提系統不僅可協助主電力饋線進行其下游電壓的調整，亦得於諸如裝置於副饋線之太陽光電系統發電量大的時候，或是主電力饋線 P 上游因某因素限制供電功率的時

候，透過所提 UPQC 將副饋線功率運往主電力饋線，以協助調度輸電線路承載電流量，進而得提高其於電力系統應用之彈性。

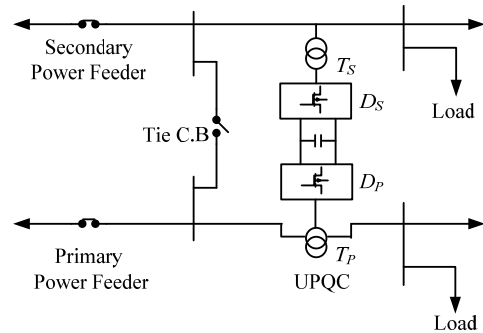
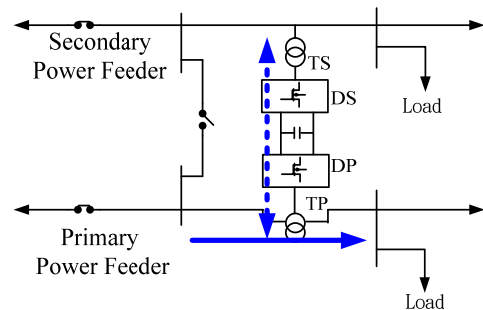
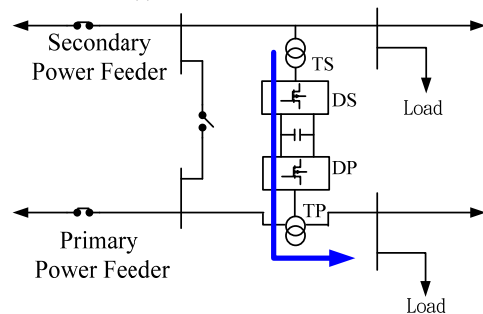


圖 3：本文所擬新式 UPQC 電力架構圖



(a) 模式一之功率潮流路徑



(b) 模式二之功率潮流路徑

圖 4：本文所擬新式 UPQC 運轉功率潮流路徑

表 1：饋線電壓驟降發生時之系統運轉特性表 (標么)

功因	電壓驟降殘值電壓	串聯電力轉換器實功率	串聯電力轉換器虛功率	並聯電力轉換器電流量
0.8	0.3	0.56	0.42	1.87
	0.5	0.4	0.3	0.8
	0.7	0.24	0.18	0.34
0.9	0.3	0.63	0.3	2.1
	0.5	0.45	0.22	0.9
	0.7	0.27	0.13	0.39
1.0	0.3	0.7	NA	2.33
	0.5	0.5		1
	0.7	0.3		0.43

表 2：副饋線轉供部分功率至主饋線負載之運轉特性表

負載功因	相移角度	串聯電力轉換器實功率	串聯電力轉換器虛功率
0.8	10°	20%	-13%
	20°	25%	-24%
	30°	41%	-32%
0.9	10°	9%	-14%

1.0	20°	2%	-28%
	30°	34%	-39%
	10°	2%	-17%
	20°	6%	-34%
	30°	13%	-50%

IV. 轉換器電路分析與建模

(1) 串聯電力轉換器

對於換流器 D_P 之電路設計，除主電力級電路外，尚須有一對應之控制電路，以負責驅動功率晶體開關，達到控制之目的。今由於串聯電力轉換器需完成電力系統故障時之上流電壓振幅偏移之補償任務，故換流器 D_P 常採電壓控制進行功率晶體驅動。典型之電壓控制方塊圖繪如圖 5(a) 所示，其中控制器首先透過比壓器 (K_{PT}) 回授輸出電壓訊號 v_{fb} ，並與參考電壓訊號值 v_{ref} 相減後即可得到一誤差值，而經內迴路補償器之誤差放大 K_V 後可得到控制訊號 v_{com} ，此訊號 v_{com} 再與三角載波訊號進行正弦脈波寬度調變，產生功率晶體之切換訊號。根據圖 5(a) 相關過程可以下列數學表示：

$$v_{com} = (v_{ref} - v_{fb})K_V = K_V v_{ref} - K_V K_{PT} V_o \quad (9)$$

又如 PWM 增益為 K_{PWM} ，且將換流器之輸出濾波電感器視為一由電感繞線造成之內電阻 R_{fP} 及一理想電感 L_{fP} 之組合，則可得到，

$$V_{inv} = (s^2 L_{fP} C_{fP} + s R_{fP} C_{fP}) V_o + (s L_{fP} + R_{fP}) I_o \quad (10)$$

整理(9)-(10)式得到，

$$V_o = G_{DP}(s) v_{ref} - Z_{o-DP}(s) I_o \quad (11)$$

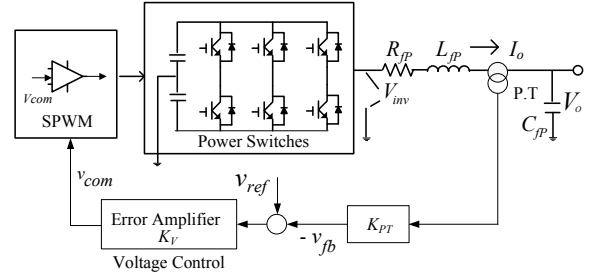
$$\begin{cases} G_{DP}(s) = \frac{K_{PWM} K_V}{s^2 L_{fP} C_{fP} + s R_{fP} + 1 + K_{PWM} K_V K_{PT}} \\ Z_{o-DP}(s) = \frac{s L_{fP} + R_{fP}}{s^2 L_{fP} C_{fP} + s R_{fP} + 1 + K_{PWM} K_V K_{PT}} \end{cases} \quad (12)$$

根據(12)式，串聯電力轉換器之等效電路繪如圖 5(b) 所示，其包括一來自控制電路之訊號源 v_{ref} 、具電壓增益 G_{DP} 之相依電壓源及換流器輸出阻抗值 Z_{o-DP} 等。今如將相關電力係數轉成標么值，且由於換流器 D_P 係透過串聯連結變壓器與輸電線路連接，故可再加入輸電線路線路阻抗 Z_{S-P} 、變壓器等效阻抗 Z_{TR-P} 後，所提 UPQC 之串聯轉換器電路模型繪如圖 5(c) 所示。

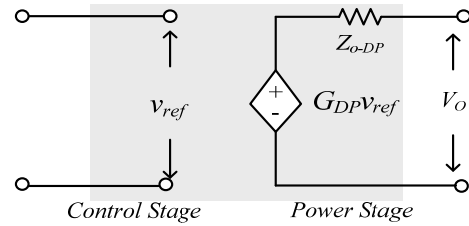
(2) 並聯電力轉換器

如前述由於串聯電力轉換器運作會吸收或釋放電力饋線之功率到 UPQC 內部，故本文之並聯電力轉換器需負責調整該實功率，以保持系統內部之功率平衡。其中若系統運轉，能量由其串聯變壓器經換流器 D_P 灌至直流電容器，則該直流電容電壓值 V_{dc} 將升高；反之若串聯電力轉換器處於供應功率的角色，則直流電容電壓降低，相關能量之變化關係可從(13)式觀察出：

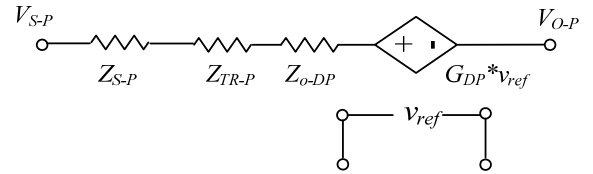
$$\Delta W(t) = \frac{1}{2} C_{dc} \Delta V_{dc}^2 \quad (13)$$



(a) 換流器控制方塊圖



(b) 換流器等效電路模型



(c) UPQC 串聯電力轉換器等效電路模型

圖 5：UPQC 串聯電力轉換器電路模型

式中 $\Delta W(t)$ 為直流電容器在時間 Δt 所儲存之能量變化、 C_{dc} 為直流電容器之電容量、 $\Delta V_{dc}(t)$ 為直流電容器在時間 Δt 之電壓變動量。如(13)式所揭示，如要系統穩定運轉，並聯電力轉換器之換流器需進行電流控制，避免 UPQC 之串聯轉換器電流流入或流出電容，造成直流電壓異常。基於此一目的，圖 6 繪出並聯電力轉換器內 D_S 換流器之控制方塊圖，由該圖可看出，在控制上首先根據功率計算得到電流參考訊號 i_{ref} 後，再用比流器對 D_S 的輸出電流進行取樣得到迴授訊號 i_{fb} ，並將該訊號回饋以負迴授形式送至控制器，與電流參考訊號相減，透過誤差放大器 K_C 調整。另類似前述換流器 D_P 之分析，若將換流器 D_S 輸出濾波電感器視為電感內電阻 R_{SH} 與理想電感器 L_{SH} 之串聯組合，則利用圖 6，換流器 D_S 之輸出電流 I_{SH} 可推得：

$$I_{SH} = G_{DS} i_{ref} - Y_{o-DS} V_{o-SH} \quad (14)$$

其中

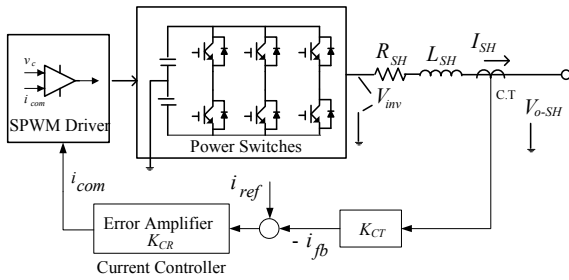
$$\begin{cases} G_{DS}(s) = \frac{K_C K_{PWM}}{sL_{SH} + R_{SH} + K_{CT} K_C K_{PWM}} \\ Y_{o-DS}(s) = \frac{1}{sL_{SH} + R_{SH} + K_{CT} K_C K_{PWM}} \end{cases} \quad (15)$$

利用上述討論，圖 6(b)可繪出 UPQC 並聯電力轉換器內之換流器 D_S 電路模型圖，如圖所示，其包括相依電流源及換流器等效輸出導納等。此時如進一步將並聯電力轉換器內之並聯耦合變壓以一等效阻抗 Z_{SH-Tr} ，同時結合圖 6(b)及實際輸電線路之電感特性視為 Z_{S-S} ，則完整之 UPQC 並聯轉換器電路模型即可繪如圖 6(c)所示。

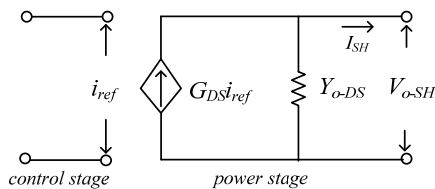
(3) 所提 UPQC 電路模型分析

在本文所提 UPQC 之雙饋線交連運轉分析中，假設 UPQC 連接在饋線 P 之串聯電力轉換器電壓補償時控制 $\delta = 0$ ，此時利用(1)、(3)式可得到換流器 D_P 之電壓參考訊號 v_{ref} 為：

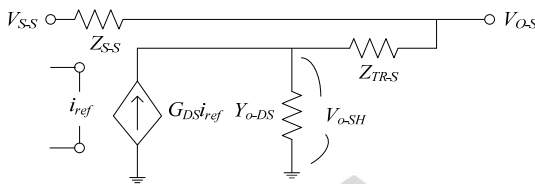
$$v_{ref} = (1-\alpha_P)K_{PT}|V_{O-P}| \quad (16)$$



(a) 控制示意圖



(b) 換流器電路模型



(c) 並聯電力轉換器電路模型

圖 6：UPQC 並聯電力轉換器電路模型

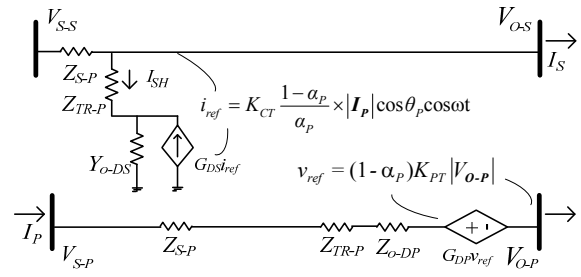


圖 7：本文所提雙饋線 UPQC 之運轉電路模型

另一方面在並聯電力轉換器之參考電流訊號 i_{ref} 部分，由於並聯電力轉換器係與輸入電壓 V_{S-S} 並接，且其輸入電流需保持與電壓同相位，故其在電力系統故障期間換流器 D_S 輸入之實功率 P_{DS} 為：

$$P_{DS} = |V_{S-S}| |I_{SH}| \quad (17)$$

又並聯電力轉換器動作時需提供串聯電力轉換器內換流器動作系統所需之實功率，因此利用(3)、(4)、(17)式可以得到並聯電力轉換器負擔之電流分量大小為

$$|I_{SH}| = \frac{1-\alpha_P}{\alpha_P} \times |I_P| \cos \theta_P \quad (18)$$

該電流經比流器轉換與次饋線的鎖相電路合成即可得並聯電力轉換器之參考電流訊號 i_{ref}

$$i_{ref} = K_{CT} \frac{1-\alpha_P}{\alpha_P} \times |I_P| \cos \theta_P \cos \omega t \quad (19)$$

藉由圖 5、圖 6 與(16)、(19)式，本文所提 UPQC 之雙饋線運轉電路模型可整理繪出如圖 7 所示。

V. 雛形系統測試

測試一：

在本測試，主饋線 P 出現線路壓降事故，系統處於電壓調節模式。測試波形如圖 8(a)所示，饋線 P 之電壓受驟降影響其殘存電壓為 0.6(p.u)，然而其下游之負載電壓受到串聯電力轉換器之保護仍處在額定電壓之狀況。再者，由圖 8(b)可看出，並聯電力換流器之輸出電壓、電流呈反相狀況，亦即在本測試條件下，換流器 D_S 確實已從饋線 S 汲取功率注入直流電壓匯流排，以供應串聯電力轉換器運作時所需之功率值，進而達成維持系統運轉能量平衡之任務。

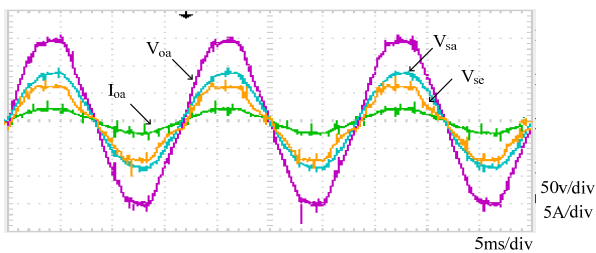
測試二：

本測試旨在驗證所提系統之電力轉移功能，其中測試假設兩饋線電壓正常，實功率受控從饋線 S 流向調度至饋線 P。圖 9(a)為測試波形圖，由圖可看出饋線 P 之上游電壓與下游負載電壓均為處在額定狀況，但兩者具有一相位差 10° ，以利進行功率移轉；又如圖 9(b)所示，連接於饋線 S 之並聯電力轉換器 DS 其輸入電壓與電流相位呈相反態勢，亦即在此一測試中，饋線 S 部分功率確經並聯變壓器 T_S 、並聯

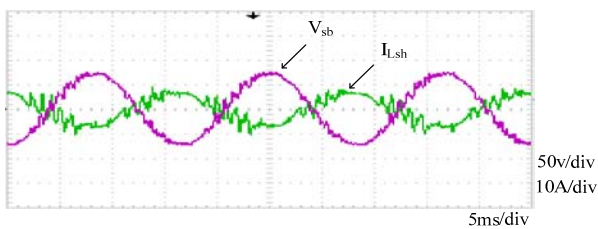
電力轉換器 D_S 灌入系統內部直流匯流排，再透過換流器 D_P 及其串聯電壓之移相控制技術，將該直流功率轉換經串聯變壓器 TP 注入饋線 P，達成所設定之電力轉移功能。

VI. 結論

本文基於現代電力系統在高品質需求之供電地區常採雙迴路供電架構，乃利用相鄰的兩供電迴路，透過跨饋線連接之方式，由電力轉換器輔助，進行主饋線之電壓異常調整及不同饋線間之功率轉移研究。本文已藉由理論分析得到，所提系統除可完成主饋線之電壓驟降異常保護外，亦可利用插入電壓之角度移位設計，使得副饋線上游之功率得利用所提系統運作，移轉給主饋線下游之負載使用。本文由電腦模擬及硬體電路實測比對證實所提電路確可在不同的負載與市電條件下，穩定的提供負載所需之補償電壓或電流，而串、並轉換器之跨饋線聯合運轉測試結果亦可證實所提系統可達跨饋線電力調度之功能。

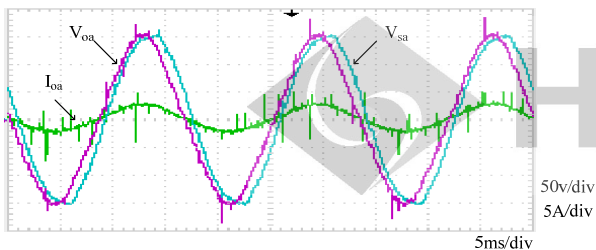


V_{sa} ：市電電壓； V_{sc} ：補償電壓； V_{oa} ：負載電壓； I_{oa} ：負載電流
(a) 饋線 P 串聯電力轉換器 DP 測試波形圖

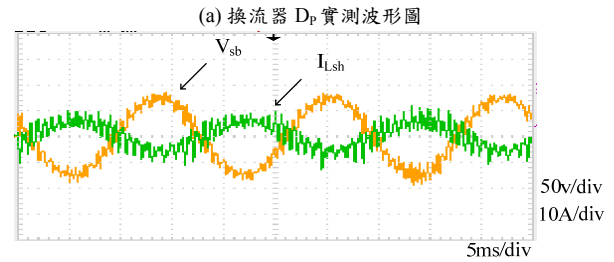


V_{sb} ：市電電壓； I_{Lsh} ：電感電流
(b) 饋線 S 並聯電力轉換器 DS 波形圖

圖 8 饋線 P 發生殘餘電壓 0.6(p.u.) 之電壓驟降測試波形圖



V_{sa} 市電電壓； V_{oa} ：負載電壓； I_{oa} ：負載電流



V_{sb} ：市電電壓； I_{Lsh} ：電感電流

(b) 換流器 D_S 實測波形圖

圖 9 系統從饋線 S 調度實功率至饋線 P 之測試波形圖

誌謝

本文特別感謝科技部專題研究計畫經費補助（合約編號：103-2221-E-024-004），相關經費補助對本文之研究助益頗大，特此致謝。

參考文獻

- [1] J. Li, C. C. Liu, and K. P. Schneider, "Senior Controlled Partitioning of a Power Network Considering Real and Reactive Power Balance," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 261-269, December, 2010.
- [2] K. Moslehi and R. Kumar, "A Reliability Perspective of the Smart Grid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 57-64, June, 2010.
- [3] M. Kezunovic, "Smart Fault Location for Smart Grids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 11-22, March, 2011.
- [4] N. G. Jayanti, M. Basu, M. F. Conlon, and K. Gaughan, "Rating Requirements of the Unified Power Quality Conditioner to Integrate the Fixed Speed Induction Generator-type Wind Generation to the Grid," IET Renew. Power Gener., vol. 3, no.2, June, 2009, pp. 133-143.
- [5] P. E. Melin, J. R. Espinoza, L. A. Moran, J. R. Rodriguez, V. M. Cardenas, C. R. Baier, and J. A. Mounoz, "Analysis, Design and Control of a Unified Power-Quality Conditioner Based on a Current-Source Topology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol 27, no. 4, pp.1727-1736, October, 2012.
- [6] V. Khadkikar, "Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 5, pp. 2284-2297, May, 2012.
- [7] R. A. Wood and T. E. Salem, "Evaluation of a 1200-V, 800-A All-SiC Dual Module," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 9, pp. 2504-2511, September, 2011.
- [8] H. Zhang and L. M. Tolbert, "Efficiency Impact of Silicon Carbide Power Electronics for Modern Wind Turbine Full Scale Frequency Converter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 1, pp. 21-28, January, 2011.
- [9] L. Gyugyi, "Unified power flow control concept for flexible AC transmission systems", IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution. Vol. 139, No. 4, July 1992, pp. 323-331.
- [10] H. Xie, L. Angquist, and H. P. Nee, "Design Study of a Converter Interface Interconnecting Energy Storage With the DC Link of a StatCom," IEEE Transactions on Power Delivery, vol 26, no. 4, pp.2676-2686, October, 2011.
- [11] H. Akagi and K. Isozaki, "A Hybrid Active Filter for a Three-Phase 12-Pulse Diode Rectifier Used as the Front End of a Medium-Voltage Motor Drive," IEEE Transactions Power Electronics, vol. 27, no. 1, pp. 69-77, January, 2011.
- [12] S. M. Hietpas and M. Naden, "Automatic Voltage Regulator Using an AC Voltage-Voltage Converter," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, January/February 2000, pp. 33-38.
- [13] S. S. Choi, B. H. Li, and D. M. Vilathgamuwa, "Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 1, February 2000, pp. 51-57.
- [14] D. Hongfa, G. Jun, and D. Xianzhong, "New Concepts of Dynamic Voltage Restoration for Three-Phase Distribution Systems," IEEE

- Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA, July 2000, pp. 1427-1432.
- [15] H. Fujita and H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: the Integration of Series- and Shunt-active Filters," IEEE Transactions Power Electronics, vol. 13, no. 2, pp. 315-322, March, 1998.
- [16] W. C. Lee, D. M. Lee, and T. K. Lee, "New Control Scheme for a Unified Power-Quality Compensator-Q with Minimum Active Power Injection," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 2, pp.1068-1076, April, 2010.
- [17] V. Khadkikar and A. Chandra, "A New Control Philosophy for a Unified Power Quality Conditioner (UPQC) to Coordinate Load-Reactive Power Demand Between Shunt and Series Inverters," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp. 2522-2534, October, 2008.

BIOGRAPHY

Professor Pai was born in Tainan City, Taiwan, in 1970. He received the Ph.D. degree in Electrical Engineering from National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan in 2002. He is with the Department of Electrical Engineering, and is the project manager in the Energy Electronics Laboratory, at National University of Tainan, Taiwan. His main areas of interests are utility-interfaced power electronics, energy conversion, and UPS.

