

Novel Design of a Modular Dynamic Voltage

Fu-Sheng Pai*, Ru-Hong Xue, Wei-Ting Lee

Department of Electrical Engineering, National University of Tainan, Tainan, Taiwan

Abstract— In this paper, based on the paradigm of the cascade inverter technique, a new approach to control the dynamic voltage restorer will be proposed. In the method, the required series voltage for the sag correction is first decoupled by the vertical and horizontal component referred to the phase of load current. The vertical and horizontal voltage component is then generated and compensated via the different reactive and active power module. In this case, as the super capacitor-aided reactive power module can output a large amount of the compensation power, the proposed system will take full advantages of less real power injection during the DVR operation, mitigating a severe and long duration voltage sag with a significantly smaller energy demand from the cascaded inverter. The method proposed in this paper will be examined under various scenarios. The results help consolidate the feasibility and practicability of the approach for the applications considered.

Index Terms— Power Quality, Dynamic voltage restorer, Inverter

* Correspondence author : fspai@mail.nutn.edu.tw



新式動態電壓恢復器之模組化設計

白富升*

薛儒鴻

李威廷

國立臺南大學電機工程學系

國立臺南大學電機工程學系

國立臺南大學電機工程學系

摘要

本文旨在研究新型動態電壓恢復之電能轉換技術，本文利用串接型變流模組結構進行輸配電系統電壓驟降補償，包括使用虛功換流模組，並令其專司於虛功率補償；另再利用實功變流模組進行純實功率補償，由於此模組不需輸出虛功率故不會在模組的直流電容上產生大量的漣波電壓，此設計有助於提供電池較佳的使用環境，裨益於電池儲能裝置使用年限之延長。為實際評估本文所提方法的可行性，本文已於實驗室完成一雛形電路，經由實際電路之測試結果驗證所提方法之可行性，而相關研究心得與經驗應可提供電力從業人員進行電力品質研究時之施行及參考。

關鍵詞：電力品質、動態電壓恢復器、變流器

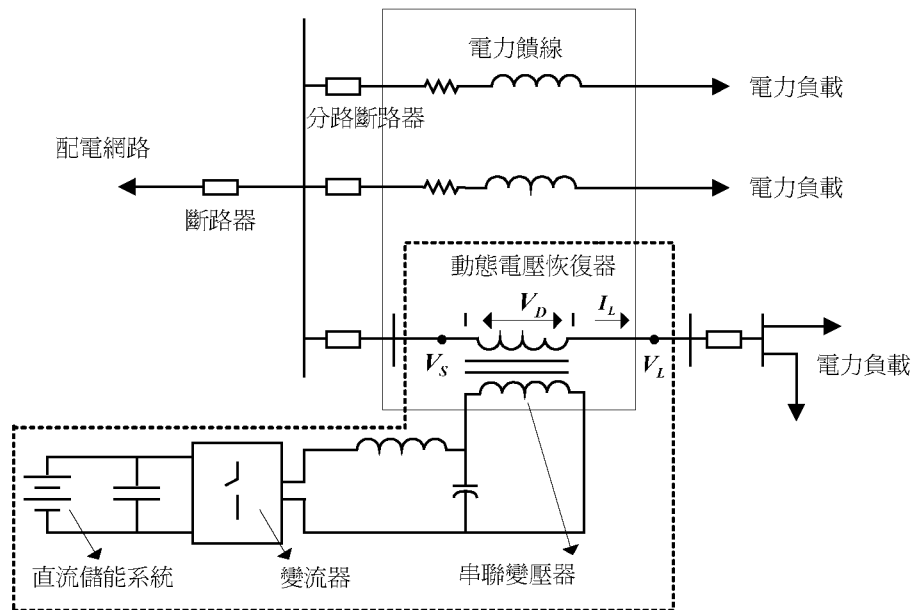
壹、前言

電力系統供電之穩定度為國內產業持續升級之關鍵要素之一，因此電力用戶對於其受電品質的要求將日愈增高。然囿於現代輸配電線路常受到雷擊、鹽害、線路故障及負載劇烈變動等因素影響，造成電力品質異常，往往導致設備壽命大幅縮減，甚至影響儀器設備運轉正常或導致跳脫，致使電力用戶需承受極大損失[1]。因此為了公正評估用戶端受電電壓品質之穩定性，目前已有多个國內外機構組織已對電網可允許之電壓變動範圍制定出相關規範，諸如國內之資訊工業委員會所提出之 CBEMA (Computer Business and Equipment Manufacturers Association) 曲線和國際半導體設備與材料組織 (Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI) 所制定的 SEMI F47 曲線等 [2,3]。

目前這些電力相關規範已經廣泛被各個國家採用參考，然而如進一步考量在電力系統實務運作上，電壓發生驟降的幅度常超出上述設備所能忍受

之範圍，且常導致生產設備發生誤動作或當機等問題造成損失，因此引起產業界對於電力公司供電之電壓品質的注意，也促使電力公司須在輸配電系統上裝設電力調節設備解決相關問題。而在這些電力調節設備中，一結合電力電子脈波寬度調變技術之電力穩壓設備目前正被廣泛研究討論，其中即有電力研究人員提出動態電壓驟降恢復器 (Dynamic Voltage Restorer, DVR) 來解決配電系統之電壓變動問題[4]。如圖一所示，動態電壓恢復器屬串聯電壓補償之設備，其係以變流器為其電能轉換之主要核心，其中變流器為一種可將直流電源轉換成振幅及頻率均可控之交流電源的轉換電路，其已被廣泛應用於交流馬達驅動與不斷電系統上。當輸配電線路發生電力驟降時，動態電壓恢復器之控制電路會產生適當的訊號給變流器，使得變流器輸出一補償電壓，此時動態電壓恢復器可透過變壓器將該補償電壓串接在供電及受電端之間，進而維持負載電壓之穩定。觀察上述補償法可知，動態電壓驟降恢復器在電路拓撲分類上屬串聯型電壓調節裝置，其基於架構優勢補償電壓僅為市電電壓偏離額定部分，因此裝置容量僅為負載部分之額定伏安數，同時因變流器處理功率相對較小，切換損失亦得減少，系統運轉效率相對高，因此就輸配電力系統實務而言，動態電壓恢復器系統確具有發展潛力，近年來亦獲得產學各界廣泛之注意與討論[5-8]。





圖一 動態電壓恢復器系統架構示意圖

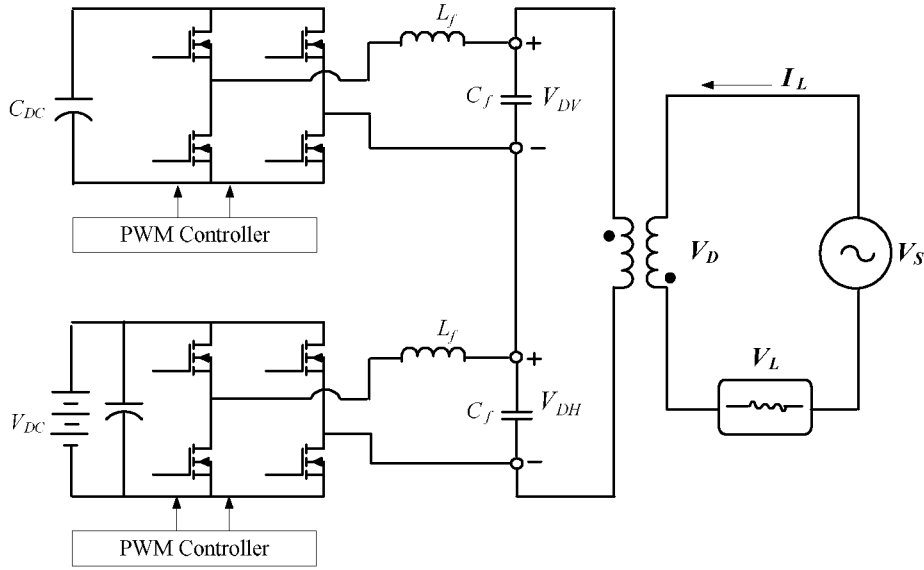
基於上述因素，目前學術文獻及工程技術報告已見多篇文章研究探討 DVR，其中在考慮補償電壓之相位方面，已有學者研究控制輸出電壓之相位方法，目前被提出討論的常見有同相補償與純電容性之正交補償兩種方式[9,10]。使用同相方式補償時，如負載為電阻性負載時，則補償電壓為僅需提供實功率補償，但若負載端為電感性負載，則動態電壓恢復器須同時提供實功率與虛功率，因此採用同相補償方式之系統須同時輸出實、虛功率，故在電路設計上即須於變流器直流鏈上使用儲能電池組與電容器，同時當動態電壓恢復器輸出虛功率時，該變流器直流鏈電容電壓將出現兩倍電力基頻之漣波電壓，此漣波電壓可能使電池與電容的電壓出現常態性之變化，而損及其使用壽命。再者採正交補償之系統，其補償方式為控制變壓器注入電壓與電流相量垂直，故 DVR 實際注入電力系統之交流功率為虛功率。此類動態電壓恢復器內直流側僅須使用直流儲能電容，而不須額外裝設價格昂貴之儲能電池，此一特點使得此類系統甚具經濟實務發展潛力。然而使用純虛功率補償邏輯之動態電壓恢復器，已有文獻證實其可補償的電壓降範圍將與負載功率因數相關，其最惡劣的狀況為負載處於單位功率因數時，動態電壓恢復器並無法達成其補償電壓驟降任務。

為解決上述問題，在電力基頻之漣波電壓方面可以增加電容器儲能容量方式因應。至於前述虛功率補償型動態電壓恢復器其壓降抵補範圍受到負載功率因數限制之問題，本文擬以動態電壓恢復器架構的改良因應。本文提出一具多模組運轉結構的動態電壓恢復器，有別於傳統變流器模組化併聯架構，本文所提系統採模組串聯設計，其中除虛功率型動態電壓補償模組外，亦擬加入部分實功率變流模組，並使其處於純實功率補償狀態，亦即利用部分實功變流模組的加入，輔助虛功模組之運轉，進而協助降低 DVR 系統之運動程式受到負載功因干擾之敏感性。值得注意的是，本文所提之變流器模組化串接設計，使得每一變流體之承載電壓減少，內部電路得以選用低導通內阻的功率晶體元件，達到減少發電系統切換損失、提高系統運行效率之目的。

貳、研究方法

圖二繪出本文所擬之動態電壓恢復器單相電力架構圖，觀察該圖可看出，與傳統架構不同在於本文所擬電路使用兩級串接之電壓型變流模組，得到所需之動態電壓恢復器變流器電壓值，最後透過變壓器將該合成電壓耦合至市電側。今將本文所研究的系統架構分析如下：





圖二 本文所提動態電壓恢復器電力架構圖

(1) 電壓驟降補償器功率潮流分析

如圖二示之電壓驟降補償器電力架構圖。假設配電系統輸入電壓為 V_S 、下游負載端電壓為 V_L ，當輸配電網路發生電壓驟降時，DVR 內的變流器將產生適當的補償電壓 V_D ，並透過變壓器將該補償電壓直接串接於電力系統上，此時 DVR 注入系統的電壓 V_D 可表示為：

$$V_D = V_L - V_S \quad (1)$$

今如假設流經系統的負載電流為 I_L ，則可推算 DVR 需承載之功率 S_D ：

$$S_D = (V_L - V_S) \times I_L^* \quad (2)$$

續令負載電壓為參考零相量，且 α 定義成 DVR 輸出入電壓比：

$$\alpha = \frac{|V_S|}{|V_L|} \quad (3)$$

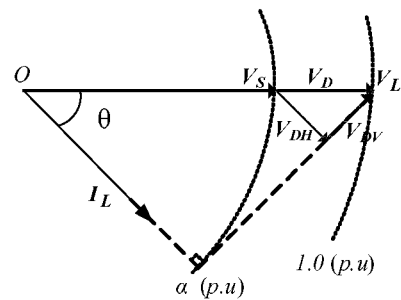
此時面對電壓驟降補償，DVR 需輸出實、虛功率各為：

$$P_D = |S_L| [\cos\theta - \alpha \cdot \cos(\delta + \theta)] \quad (4)$$

$$Q_D = |S_L| [\sin\theta - \alpha \cdot \sin(\delta + \theta)] \quad (5)$$

其中 δ 為 DVR 輸出入電壓相位差、 θ 為負載功率因數。至於 DVR 所注入的串聯電壓大小，可在假設 DVR 補償後之負載電壓 V_L 恆為 1 後，再利用圖三之電壓補償向量圖與(3)式求得：

$$|V_D|^2 = \alpha^2 - 2\alpha \cdot \cos\delta \quad (6)$$



圖三..本文所提之多模組電壓串接補償相量圖

利用上述分析可看出 DVR 之補償電壓與功率會隨著 δ 角之變化而改變，亦即藉由 δ 角度之改變即可控制 DVR 運轉所需的補償功率值。基於上述原理，DVR 應可採行最小電壓補償或是純虛功率補償法進行設計，不同的方法之理論分析如下：



(i) 最小電壓補償法

DVR 如採最小電壓補償法，則設計標的在於調整 δ 角度使其滿足最小注入電壓的條件，此時將 V_D 大小對 δ 取一次微分得：

$$\frac{\partial |V_D|}{\partial \delta} = \frac{2\alpha \cdot \sin \delta}{\sqrt{\alpha^2 - 2\alpha \cdot \cos \delta}} \quad (7)$$

又其二次微分爲

$$\frac{\partial^2 |V_D|}{\partial \delta^2} < 0 \quad (8)$$

由(7)、(8)式可知，當 $\frac{\partial |V_D|}{\partial \delta} = 0$ 時， $|V_D|$ 可經驗最小值，然而由於即便在電壓驟降發生時 α 仍不爲零，故僅在 δ 等於零時，DVR 可得到最小之注入電壓，在此一條件下由(4)、(5)兩式可推得：

$$P_D = (1-\alpha)|S_L| \cos \theta \quad (9)$$

$$Q_D = (1-\alpha)|S_L| \sin \theta \quad (10)$$

由(9)、(10)兩式可看出當面臨電壓驟降補償要求時，處於此模式下之 DVR 需同時輸出實、虛功率，故此類系統必須在變流器直流側加入電池儲能裝置，以應付變流器實功率輸出之需求。然而較不利的是，當變流器輸出虛功率時，其會在直流電容內部造成電壓振盪，使電容電壓呈現六倍電力基頻之漣波波動，而由於變流器的電池與電容組係採併聯方式連接，此一漣波現象可能使得電容及電池電壓不穩定，進而同時損及兩者的使用壽命，致 DVR 系統操作之可靠度受到衝擊。

(ii) 純虛功率補償法

DVR 如採純虛功率注入法進行電壓補償，則系統不需使用電池儲能裝置，此類系統設計從建置成本及後續運維管理層面來看，其甚具經濟效益。而操作在此一模式下的 DVR 設計需滿足下列條件：

$$P_D = 0 \quad (11)$$

此時利用(4)式可得到

$$\cos \theta = \alpha \cdot \cos(\delta + \theta) \quad (12)$$

因此

$$\begin{cases} \delta = \cos^{-1} \frac{p.f.}{\alpha} - \theta \\ \alpha \geq p.f. \end{cases} \quad (13)$$

上式中 $p.f.$ 爲負載之功率因數。另將(13)式代入(5)式可求得運行在此模式的 DVR 其輸出之虛功率：

$$Q_D = |S_L| (\sin \theta - \sqrt{\alpha^2 - p.f.^2}) \quad (14)$$

由上述分析可知，操作在此模式下的 DVR 雖不需使用電池儲能裝置，但其可補償的電壓降範圍會受負載功率因數的干擾，特別是在負載處於單位功率因數的情況，DVR 並無法達成任何電壓驟降補償任務。

基於上述分析，爲了使系統順利達成負載端電壓穩定之目的，同時擷取最小電壓法及虛功率補償法的優點，本文即研究利用多模組串接結構進行電壓驟降補償，其中補償電壓相量圖已繪如圖三所示，電壓驟降所需補償的電壓首先被分解成與負載電流垂直之電壓分量 V_{DV} ，及與負載電流垂直平行之電壓分量 V_{DH} ，其中補償電壓 V_{DV} 委由虛功變流模組負責執行，實功變流模組則負責輸出 V_{DH} 電壓分量，在此一設計下，由於虛功變流模組專司於虛功率補償，故其在實現上即予以嵌入超電容，俾利用大電容值減少直流電容器上的漣波電壓振幅，除可避免補償電壓失真的問題外，亦有助於延長電容器之使用壽命。另外實功變流模組由於處於純實功率補償狀態，其不需輸出虛功率而不會在模組的直流電容上產生大量的漣波電壓，故可有利於營造較佳之電池使用環境，裨益於其使用年限之延長。值得注意的是，茲由於部分實功變流模組的加入，其亦可輔助虛功模組之運轉，進而協助降低 DVR 整體之運動程式受到負載功因干擾之敏感性。

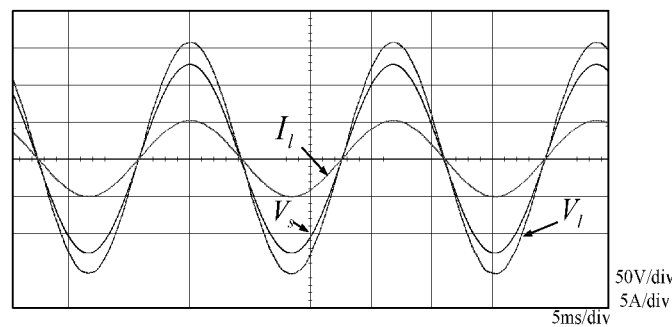


參、結果與討論

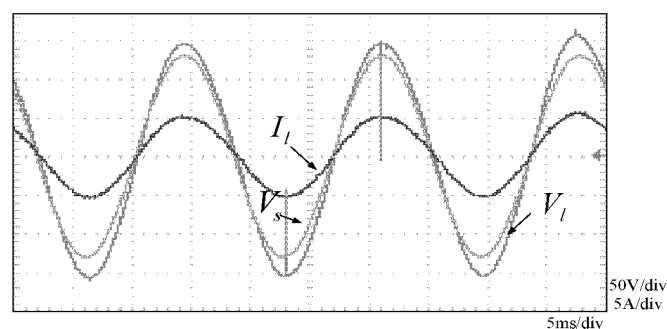
爲了驗證本文所提系統在模組設計分析之準確性與變流控制器應用之可行性，本文已使用美國 Intusoft 公司所發展的模擬軟體 IsSpice 進行運作驗證，同時並於實驗室製作完成一雛形電路，透過示波器觀察系統於不同負載下之實測波形，並與模擬結果進行相互對照，以佐證本系統所提之電路的運轉效能。圖四爲市電 90V 欠電壓於電阻性負載之模擬與實測圖，由圖可看出在欠電壓的條件下，本文所提系統確可達到補償負載電壓至額定值之能力，而負載電流與負載電壓同相亦顯示目前系統處於電阻性負載之情況下。圖五爲市電 90V 欠電壓情形下，電感性負載之模擬與及實測波形，從圖中波形可知，市電電壓於欠電壓狀況，經由動態電壓恢復

器補償後，已補償原本欠電壓之情況，而由負載電壓與負載電流之相角差，可知負載電流落後於電壓，故系統處於電感性負載狀態。

再者，本文所提 DVR 串接模組共分為實功率補償模組與虛功率補償模組，圖六(a)爲市電處於 80V 欠電壓負載爲電感性之串接系統電腦模擬圖。從圖中波形可知市電確處於欠電壓情況，然而負載電壓經由動態電壓恢復器串接模組補償後，負載端電壓振幅明顯提升至設定值。另外由圖六(b)亦可看出，本文所提 DVR 確可將補償電壓分解成正交及平行於負載電流之兩電壓成分，其中圖中之電壓 V_{DV} 領先負載電流 90 度，爲虛功率模組於欠電壓其間所輸出之補償電壓，同時 V_{DH} 跟負載電流同相位，故確爲實功率模組輸出之補償電壓。

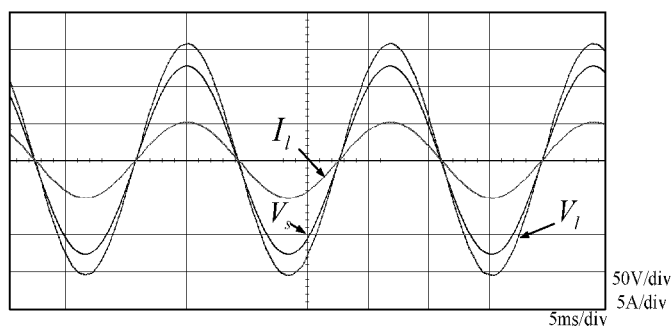


(a) 電腦模擬波形圖

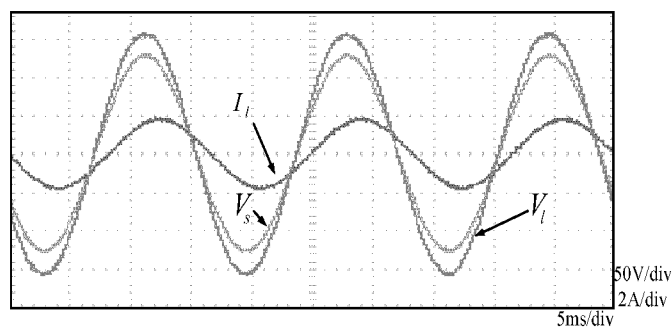


(b) 實測波形圖

圖四 市電 90V 欠電壓、電阻性負載之市電、負載電壓與負載電流波形圖

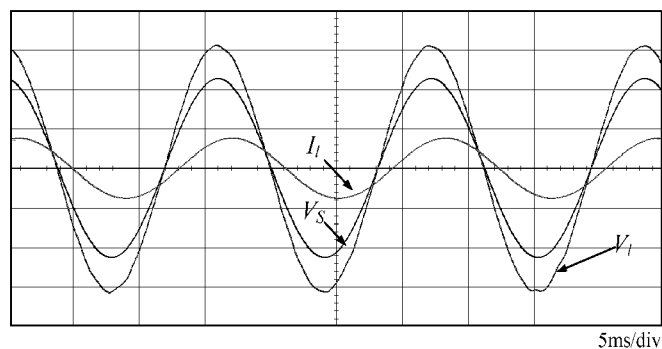


(a) 電腦模擬波形圖

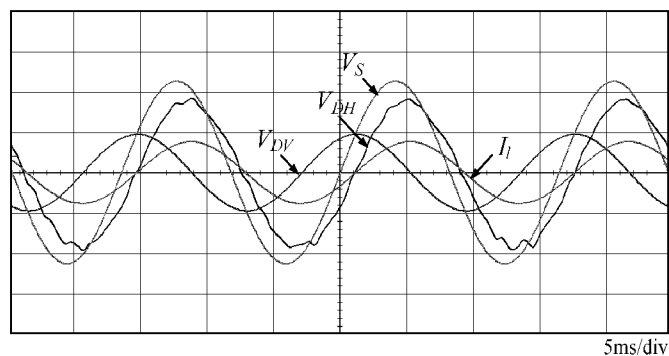


(b) 實測波形圖

圖五 市電 90V 欠電壓、電感性負載之市電、負載電壓與負載電流波形圖



(a) 市電、負載電壓、負載電流波形圖



(b) 實功率模組與虛功率模組補償電壓波形圖

圖六 市電 80V 電感性負載之市電、負載電壓、負載電流、實功率模組與虛功率模組補償電壓之模擬波形圖 (V_s : 市電電壓, 50V/div、 V_l : 負載電壓、 I_l : 負載電流, 1A/div、 V_{DH} : 實功率模組補償電壓, 20V/div、 V_{DV} : 虛功率模組補償電壓)



肆、結論

本文旨在研究動態電壓回復器之功率潮流調度與電壓驟降補償能力，藉由系統模擬並經由硬體電路實測比照驗照證明，確可應用於動態電壓恢復器之系統架構中，且隨著不同負載類型之變動，系統皆具提供電壓補償能力，且能確保負載端設備於穩定電壓下運轉，維持良好的供電品質。由電腦模擬及雛形系統實測可知，本文所提方法確具可行性，相關研究成果應可供電力從業人員實際採行之參考。

誌謝

本研究承蒙國家科學委員會計畫補助（合約編號：NSC 98-2221-E-024-017），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] S. S. Choi, B. H. Li, and D. M. Vilathgamuwa, (2000). Dynamic Voltage Restoration with Minimum Energy Injection. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(1), 51-57.
- [2] CBEMA, (2000). ITI Curve Application Note. Technical Committee3 (TC3) of Information Technology Industry Council.
- [3] SEMI-F47, (1999). Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity. Semiconductor Equipment and Materials International.
- [4] C. Fitzer, M. Barnes, and P. Green, (2004). Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(1), 203-212.
- [5] A. Ghosh; A. K. Jindal and A. Joshi, (2004). Design of a Capacitor-supported Dynamic Voltage Restorer for Unbalanced and Distorted loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), 405- 413.
- [6] C. N Ho, H. S. H. Chung, and K. T. K. Au, (2008). Design of Implementation of a Fast Dynamic Control Scheme for Capacitor-Supported Dynamic Voltage Restorers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(1), 237-250.
- [7] D. M. Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon and S. S. Choi, (2004). Interline Dynamic Voltage Restorer: a Novel and Economical Approach for Multi-line Power Quality Compensation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(6), 1678-1685.
- [8] D. M. Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon and S. S. Choi, (2006). A Novel Technique to Compensate Voltage Sags in Multi-line Distribution System- the Interline Dynamic Voltage Restorer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), 1603-1611.
- [9] H. K. Al-Hadidi, A. M. Gole, and D. A. Jacobson. (2008). A Novel Configuration for a Cascade Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer with

- Reduced Energy Storage Requirements. *IEEE Transactions on Power Delievery*, 23(2), 881-888.
- [10] H. K. Al-Hadidi, A. M. Gole, and D. A. Jacobson. (2008). Minimum Power Operation for Cascade Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer. *IEEE Transactions on Power Delievery*, 23(2), 889-898.

BIOGRAPHIES



Fu-Sheng Pai (M'05) 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.

