

# Design and Implementation of a Grid-tied Circuit for Micro Turbine Generator

*Fu-Sheng Pai,\* and Chih-Cheng Hsu*

*Department of Electrical Engineering, National University of Tainan*

**Abstract** — *The MTG is one of distributed generations. The capacity ranges from several kW up to MW, which can be suitably installed at an industrial plant. The MTG is composed of a gas turbine, compressor, and AC generator. They are inertia welded on a single shaft to simplify the mechanical structure of the system. Because the shaft turns at the speed of the turbine, the generator provides high frequency AC electricity. This requires a rectifier and an inverter to interface between the AC generator and the utility network. In this paper, based on the paradigm of current control, a new approach to control the power converter for an MTG will be proposed. By using the developed method, the micro-turbines can be driven as a parallel generator, where the operations of the proposed generator not only can be used to output the sinusoidal current with high power factor, but also is applied for active power filter, helping mitigating the power quality issues caused by the wide uses of nonlinear loads in the demand side. The method proposed in this paper is examined under various scenarios. Test results are not only beneficial for the design of micro-turbines, but also help increase the security and reliability of a future deregulation power system.*

**Index Terms** — *micro-turbine generator, distributed generation.*



-----  
\* Corresponding author: [fspai@mail.nutn.edu.tw](mailto:fspai@mail.nutn.edu.tw)

DOI : 10.6159/IJSE.2015.(5-4).02

# 適用於微型氣渦輪機之市電併聯電路研製

白富升\*

國立臺南大學電機工程學系

許志丞

國立臺南大學電機工程學系

## 摘要

微型氣渦輪機其容量從數十千瓦到數百千瓦，適合安裝於大電力用戶或工廠中，屬於分散型發電系統之一種。微型氣渦輪機受到機組尺寸限制，渦輪機運轉速度常高達每分鐘數十萬轉，導致發電機之輸出電頻率亦高達數千赫茲，因此微型氣渦輪機系統需於發電機之輸出端加入一級電力併聯電路。本文即在研究適用於微型氣渦輪機之市電併聯電路設計法，其中規劃以電流迴授法，完成其市電併聯供電控制，同時亦在發電機的並聯供電模式中，融入負載功因矯正及主動濾波功能，使氣渦輪機的並聯運轉兼具負載管理概念，增加氣渦輪發電機組之經濟運轉價值。由電腦模擬及系統測試結果顯示，本文所提之方法確具可行性，該研究成果應具實務參考價值。

關鍵字：微型氣渦輪機、併聯電路

## 壹、簡介

隨著經濟進步，台灣電力事業已漸漸朝向智慧化、自由化發展，在自由競爭的導向下，用戶對於電力公司之供電品質必然日漸重視，因此如何提供穩定可靠的電力給用戶，已成為當前電業經營者所需具備之基本條件。台灣電力自由化初期曾允許合格民營發電廠加入電力市場營運，而現今智慧電網下開放負載端之小型發電系統併入配電系統運轉，亦已成為電力自由市場發展之常態，因此實有必要對此小型分散式發電系統進行研究。目前應用新興能源科技發電的小型發電系統包括氣渦輪機、燃料電池、沼氣、風力及太陽光電能發電系統等，其中此類系統由於發電機裝設位置接近負載中心，可減少輸電損失，同時採用新興電能轉換技術發電，效率常高於傳統電廠，發電過程亦僅排放少量污染物，相對較少對環境產生衝擊[1-3]。

在小型分散式發電系統中，微型氣渦輪機具高效率、低成本、及低污染等優點。微型氣渦輪機組態包含氣渦輪機、發電機及電能轉換器三大部分，圖 1 繪出該組態圖，由該圖可看出，氣渦輪機組包括進氣系統、排氣系統、壓縮機、復進機、燃燒室、及渦輪機等子系統，空氣進氣經壓縮後，首先在燃

燒室與燃料混合，燃燒後產生高壓氣體送入渦輪機，此時高壓氣體將在渦輪機內膨脹並生成機械功，最後帶動渦輪葉片，經齒輪組換成適當轉速後驅動發電機轉子；另一方面根據卡諾循環等式，氣渦輪機反應溫度越高、排氣溫度越低，則引擎效率越高，因此渦輪機的高溫排氣亦可利用復進機設計與壓縮空氣混和，藉以提高進氣溫度；然而在某些特殊場合中，由於渦輪機的高溫排氣可直接被工業製程引用，因此某些系統並不使用復進機，亦即以犧牲部分氣渦輪機效率方式，換取工業製程蒸汽使用[4-6]。

在發電機設計方面，微型氣渦輪機常採永磁式轉子設計，先進的氣渦輪機系統，氣渦輪機、發電機組常被安裝在同一承軸上，藉以簡化變速齒輪等機械結構；然而受到微型氣渦輪機組尺寸限制，渦輪機運轉速度常高達每分鐘數十萬轉，此時若將渦輪機直接耦合至發電機，則發電機勢必採高轉速設計，而此舉亦會導致發電機之輸出電頻率可能高達數千赫茲，因此微型氣渦輪機系統尚需於發電機之輸出端加入一級電能轉換器，將高頻電壓整成直流後，再利用換流器(inverter)轉換成商用頻率之電力輸出。值得注意的是，利用電能轉換器換流的方法，可同時簡化渦輪機的機械控速結構，而且使用換流器亦可改善小型發電機因缺乏慣量所造成的負載響應速度緩慢之缺點，而此一方法亦有助於微型氣渦輪機之市電並聯運轉及保護線路設計。

在微型氣渦輪機的運轉模式方面，由相關文獻可看出微型氣渦輪機與市電並聯運轉時，主要設計目的在於進行發電功率控制，由於氣渦輪機可透過整流線路，維持其電能轉換器內之直流電壓值準位，因此只要再利用電流控制手法驅動換流器，即可將渦輪機發電量由直流側抽出，並以單位功因、低諧波失真方式輸出至電力系統[5, 7-10]。基於此，本文即在探討適用於微型氣渦輪機組之電能轉換器設計，並運用不同的控制策略將發電機組併入市電運轉時，同時具備負載功因矯正及主動濾波功能，

期可延伸該機組之運轉功能，以配合配電系統不同 機組之經濟運轉價值。  
 時段的特性變化，給予適當補償，增加氣渦輪發電

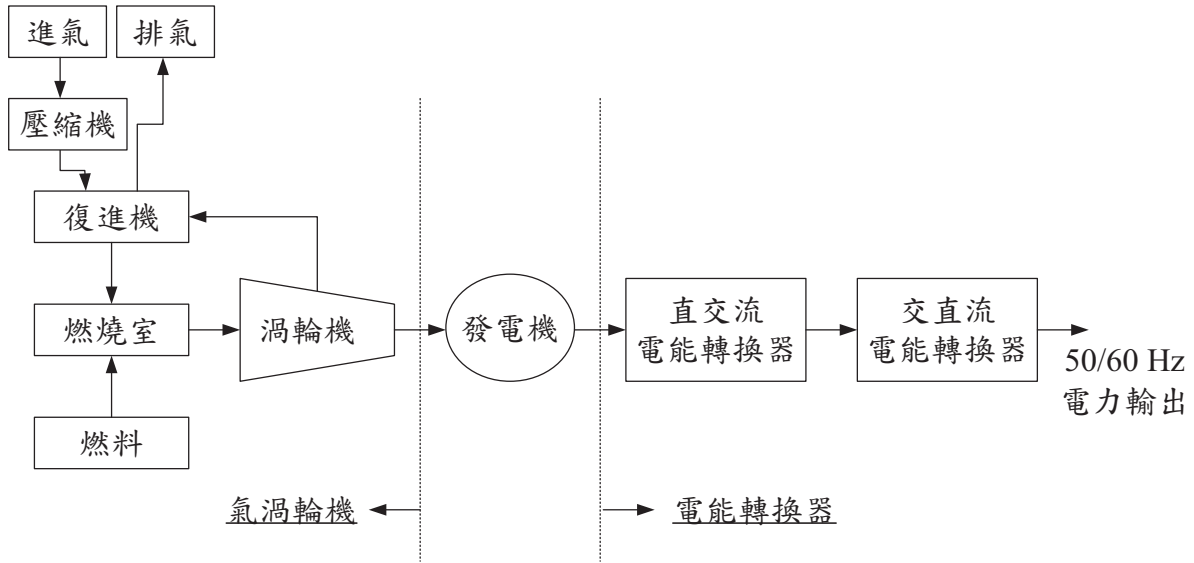


圖 1: 微型氣渦輪機組態圖

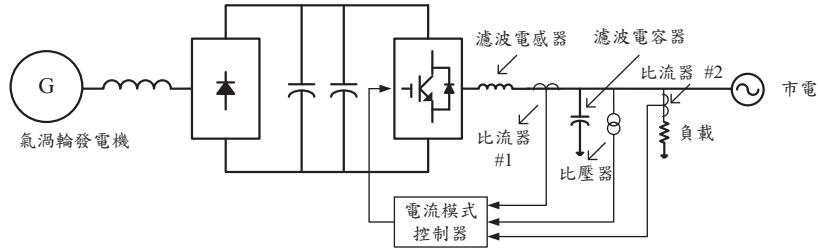


圖 2 本文所提微渦輪機電力介面單相等效電路圖

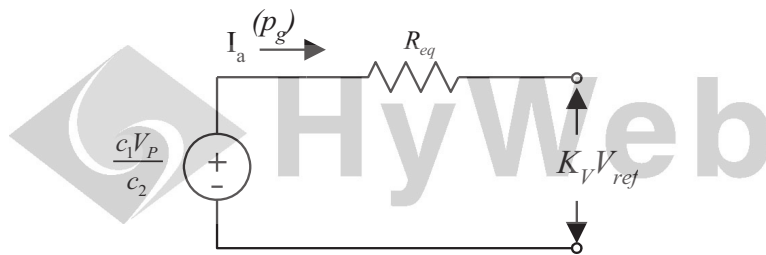
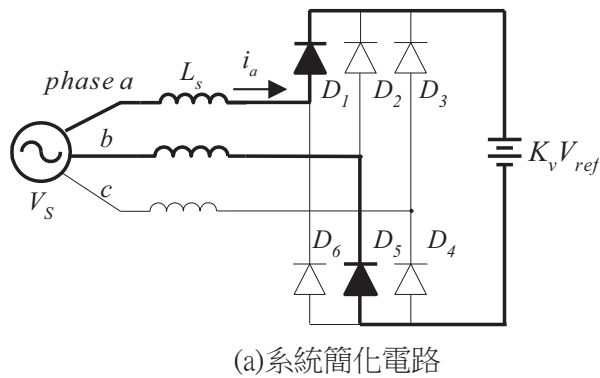


圖 3：並聯供電模式功率控制電路組態圖

## 貳、系統架構與控制法

### (1) 電力架構

圖 2 繪出本文所擬系統操作於並聯供電模式的單相等效電路圖，如圖所示，高頻發電機輸出電壓經整流線路可在電容器上建立直流電壓，再經換流器切換後轉換成市電頻率之交流電壓輸出，此時由於發電機組內的換流器採脈波寬度調變控制，因此輸出電壓需使用電感、電容組成之二階濾波器，以濾除高次諧波。值的注意的是，當本文所擬系統可藉由鎖相回路設計，同時維持市電電流與市電電壓之同相位，此亦意味著本系統在輸送發電機功率的同時，亦可兼具補償重要負載所需虛功率的進相電容器功能。此外，若氣渦輪機不運轉，本文所擬系統機組亦允許換流器單獨運作，充作主動電力濾波器使用，而此設計應可使微型氣渦輪機之運作，融入負載管理概念，進而增加其經濟運轉價值。

### (2) 控制方法

微渦輪機電力介面設計的目標在於控制換流器的輸出功率，同時補償負載所需之虛功率，以達到負載功率因數矯正之目的。在換流器輸出功率控制方面，今如假設換流器動作可維持直流電容電壓值於預設準位，則此時發電機電氣系統之整流及換流線路可等效如圖 3(a)所示，其中高頻發電機以一電壓源 VS 串聯電感器 LS 表示，而直流電容與換流器則被視為一可控直流電壓源 KvVref。另就該電路運作分析，若不考慮整流線路內二極體之換相時間，則該系統同時時間內必有兩個二極體導通，並與輸入電壓源、電感及等效直流電壓源形成一封閉迴路，且若僅考慮兩二極體 D1 及 D5 配對導通之情況，則從圖 3(a)之電路可推導如下：

$$2L_s \frac{di_a}{dt} = V_p \sin \theta - K_v V_{ref} \quad (1)$$

其中  $i_a$  為自電壓源（發電機）流出之交流電流， $V_p$  為發電機線電壓峰值，如今以  $t$  取代，則：

$$di_a = \frac{1}{2\omega L_s} (V_p \sin \theta - K_v V_{ref}) d\theta \quad (2)$$

兩邊積分可得：

$$i_a(\theta) = \frac{-1}{2\omega L_s} (V_p \cos \theta + K_v V_{ref} \theta) + C \quad (3)$$

其中 C 為積分常數。此時若假設二極體 D1 及 D5 自  $s$  開始導通，且在  $f$  時結束，則(3)式之邊界

$$\begin{cases} i_a(\theta_s) = 0 \\ \theta_f = \theta_s + \pi/3 \end{cases} \quad (4)$$

條件將能寫成：

$$C = \frac{1}{2\omega L_s} (V_p \cos \theta_s + K_v V_{ref} \theta_s) \quad (5)$$

利用(3)式及(5)式， $i_a$  之平均值即可被計算出：

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{2}{\pi} \int_{\theta_s}^{\theta_f} i_a(\theta) d\theta \\ &= \frac{1}{\pi \omega L_s} \left[ \frac{(\theta_s - \theta_f)}{2\omega L_s} (V_p \cos \theta_s + K_v V_{ref} \theta_s) + V_p (\sin \theta_s - \sin \theta_f) + \frac{K_v V_{ref}}{2} (\theta_s^2 - \theta_f^2) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式可再進一步化簡為：

$$I_a = \frac{c_1 V_p - K_v V_{ref}}{R_{eq}} \quad (7)$$

其中  $c_1$ 、 $c_2$  及  $R_{eq}$  均為常數且分別表示如下：

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{(\theta_s - \theta_f) \cos \theta_s + 2\omega L_s (\sin \theta_s - \sin \theta_f)}{2\pi \omega^2 L_s^2} \\ c_2 &= \frac{(\theta_f - \theta_s) [\omega L_s \theta_f + (1 + \omega L_s) \theta_s]}{2\pi \omega^2 L_s^2} \\ R_{eq} &= \frac{1}{c_2} \end{aligned} \quad (8)$$

利用上述(7)、(8)兩式結果，圖 3(b)繪出本文所擬系統之發電機功率控制等效電路圖。由該圖可看出，發電機功率可由直流電壓準位決定，亦即輔以適當的直流電壓參數設定，即可調整系統狀態，滿足氣渦輪發電機功率控制之需求。

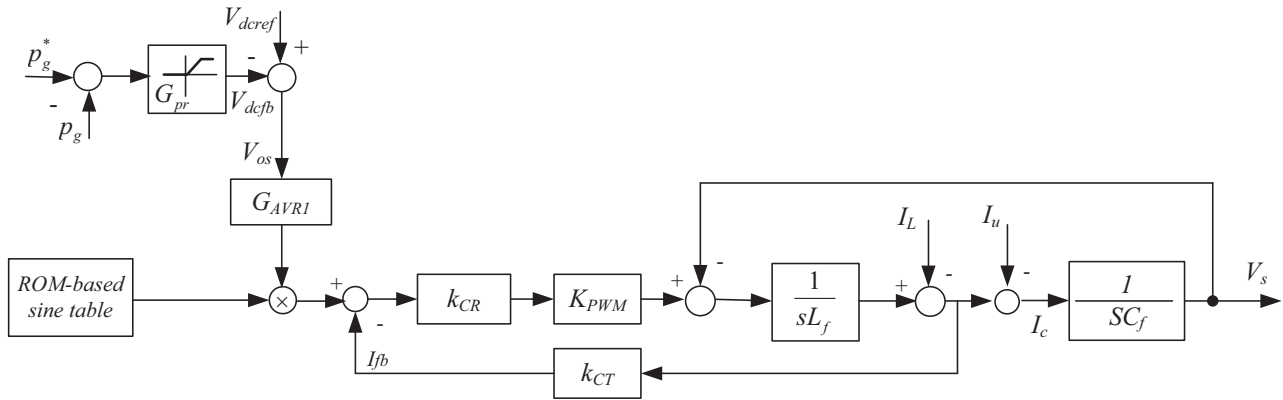


圖 4 本文所提微渦輪機電力介面控制方塊圖

基於上述，圖 4 繪出控制方塊圖，由該圖可看出一控制功率迴路被設計在直流外電壓控制迴路之前端，該線路將產生正確之抵補訊號  $v_{os}$ ，並與預設值  $v_{dc\text{ref}}$  合成，利用換流器動作，強制調整原僅由整流器單獨決定之直流電壓值，並使其關連至高頻發電機的輸出功率。另外若氣渦輪機關機，該抵補訊號將被硬體歸零，此時只要  $v_{dc\text{ref}}$  預設值高於市電峰值電壓，換流器仍可獨立作業，利用既有之外電壓、內電流調整迴路，完成主動濾波器功能。另在直流電容電壓控制方面，其採分壓電路得到回授電壓  $v_{dc\text{fb}}$ ，並應用一比例積分控制器調整電容器電壓  $v_{dc\text{fb}}$  與預設值  $v_{dc\text{ref}}$  間之誤差，其中肇因於直流鏈電壓常含漣波電壓成分，因此，電路設計上需將直流鏈回授電壓，經電阻分壓後先送進帶拒濾波器，避免漣波電壓影響到後級電路之運作。另經由一參考電壓設定及比較電路後，定電壓控制電路可自動計算直流鏈實際電壓與預設值之誤差，並將該誤差值經比例積分器調整，得到直流鏈電壓誤差之參考電壓命令，該參考電壓與同相於市電電壓之正弦訊號相乘後即可得到參考電流命令值。

在電流調整器部分，使用電流調整器之目的，乃在於使比流器回授電流值能與控制器參考電流命令值相同，並產生弦式脈衝寬度調變器所需之調變訊號。因此在該電路中，其係連接到比流器，並將比流器測得之電流訊號經一連串電流電壓訊號轉換後，送至誤差放大電路，

以修正參考電流命令與實際電流間之差異。值得注意的是，由於迴授電流訊號係取自於市電電流，且控制器參考電流命令已被設計鎖相於市電電壓，因此當電流調整器完成迴授訊號追隨參考電流命令，即代表系統之市電電流可受控保持與市電電壓同相位，進而達到功率因數矯正之功能。

### 參、雛形測試結果

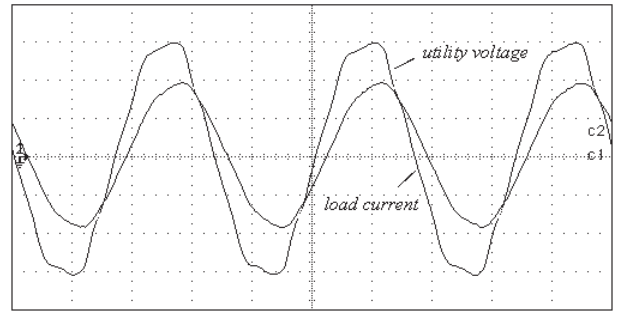
為驗證本文所提方法可行性，本文已利用電磁暫態模擬程式(ElectroMagnetic Transient Program, EMTP)進行電腦分析，系統參數列如表一。在此模擬測試中，首先進行市電並聯供電模式下之發電輸出實功率控制試驗，其中發電控制命令起始設定為 10kW，並分別在 300ms、600ms 變換設定，增加為 20kW 及 30kW（滿載），測試波形列如圖 5 所示，由圖中可看出本文所擬系統確可有效控制渦輪機發電功率，並快速追蹤控制命令，達到市電併聯運轉之功能。此外，圖 6 則繪出本文所提系統在發電控制下同時進行負載瞬間加載之測試波形，以測驗系統功率控制之穩定度及其暫態響應，其中系統起始為無載，並在 100ms 瞬間投入電阻性負載，由該圖可看出，系統功率控制仍保持穩定性，未受負載瞬間投入之影響。

此外本文所提方法亦已進行實驗室硬體雛形電路測試，圖 7(a)為市電並聯供電模式下，系統外接功率因數 0.91 之電感性負載之實測波形圖，由圖中可看出，由於連接電感性負載，如未經適當補償，其可能導致整體系統市電端之功率因數低落，

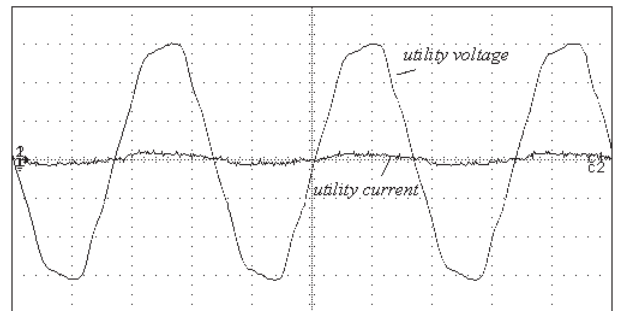
但如利用微氣渦輪機同時進行負載虛功率抵補，則如圖 7(b)所示，市電電壓與市電電壓仍可控制近同相位。在本試驗中負載電流遠大於市電輸入電流，此亦隱喻著部分負載實功功率係由發電機提供，負載功率不足額部分再由市電端供應，以協助裝機用戶減少電費支出，同時協助電力公司降低發電負擔。

表 1:測試系統參數

微渦輪機容量	30kVA
渦輪機電頻率	1.6 kHz
換流器輸出電壓、頻率	120Vph/208VLL、60Hz
換流器額定電流	83.3Amp



(a) 負載電壓及電流波形圖



(b) 市電電壓及電流波形圖

圖 7：並聯供電下電感性負載測試波形圖

(V: 50V/div, I: 10A/div, t: 5ms/div)

### 肆、結論

本文研究提出一適用於微型氣渦輪機電氣系統的介面電路設計法，即以電流迴授法完成發電機控制之目的。由理論分析及實驗結果可知，本文所提系統確具可行性，其除可協助市電網路進行負載管理，亦可提供用戶負載之虛功率與諧波功率，進而有效提高微型氣渦輪機經濟運轉之實用參考價值。

### 伍、參考文獻

[1] R. Laseter, "Dynamic Models for Micro-Turbines and Fuel Cells," IEEE Power Engineering Society, Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 2001, pp. 761-766.

[2] H. L. Willis and W. G. Scott, Distributed Power Generation Planning and Evaluation,

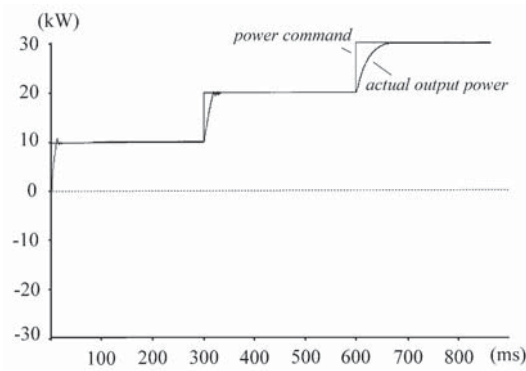


圖 5 並聯供電模式下發電機功率控制波形圖

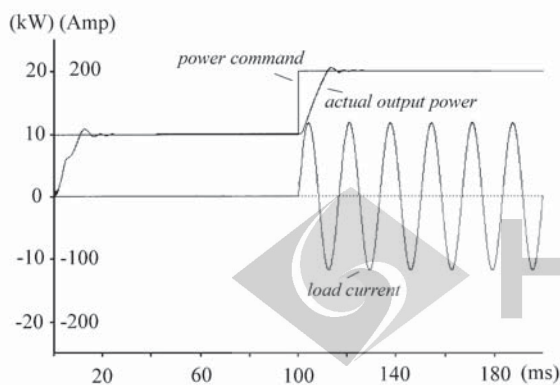


圖 6 瞬間加載下之功率控制波形圖

- Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 2000.
- [3] M. Ortega, F. Jurado, and J. Carpio “Control of Indirect Matrix Converter with Bidirectional Output Stage for Micro-turbine ” IET, Power Electronics, vol. 6, 2012, pp.659-668.
- [4] C. J. Hatziaioniu, A. A. Lobo, F. Pourboghrat, and M. Daneshdoost, “A Simplified Dynamic Model of Grid-Connected Full-Cell Generators,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 467-473.
- [5] M. Illindala and G. Venkataramanan, “Control of Distributed Generation Systems to Mitigate Load and Line Imbalances,” the 33rd IEEE Power Electronics Specialists Conference, Cairns, Australia, June 2002, pp. 2013-2018.
- [6] Automatic Dual Mode Controller, Capstone Turbine Inc, Press, 1999.
- [7] P. G. Barbosa, L. G. B. Rolim, E. H. Watanabe, and R. Hantitsch, “Control Strategy for Grid-connected DC-AC Converter with Load Power Factor Correction,” IEE Proceedings: Generation Transmission Distribution, Vol. 145, No. 5, September 1998, pp. 487-491.
- [8] S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi, and D. Poli, “Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply,” IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting, New York, USA, January 2002, pp. 789-794.
- [9] W. L. Wu, S. N. Yeh, J. C. Hwang, and H. P. Hsieh, ” Development of a Single-Phase Half-Bridge Active Power Filter with the Function of Uninterruptible Power Supplies,” IEE Proceedings of Electric Power Applications, Vol. 147, July 2000, pp. 313 -319.
- [10] S. J. Huang and J. C. Wu, “A Control Algorithm for Three-Phase Three-Wired Active Power Filters under Nonideal Mains Voltages,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, no. 4, July 1999, pp. 753-760.

#### 作者簡介

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.

