

Design and Implementation of an Utility Interface for Micro-turbine Generation System

Fu-Sheng Pai , Po-Shing Tseng , Hsiang-Yun Liao

Department of Electrical Engineering,
National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

¹*E-mail : fspai@mail.nutn.edu.tw

Abstract

In this paper, based on the paradigm of power converter technique, a new approach to control the micro turbine generator had been proposed. The control goals of the proposed converter merge with the concepts of power generation and quality enhancement, which can supply active power and compensate reactive power simultaneously to keep the unity power factor of the AC source at the customer site. The method proposed in this paper had been examined under various scenarios, including the loss of grid and the parallel operation. By those case studies with computer simulations and hardware experiments, the results show that the proposed approach not only effectively compensate the mains current to be sinusoidal for the grid-tied operation, but also ensure the voltage quality at the demand side in spite of loss of mains.

Keywords: micro turbine generator, power converter.

微型氣渦輪機之電網併聯介面設計

白富升, 曾寶勳, 廖緝芸

國立臺南大學電機工程系

摘要

本文旨在發展適用於微型氣渦輪機電能轉換器的整合控制策略,除規劃以單一電流迴授路徑,完成其市電併聯供電及備用發電機兩種模式控制外,亦擬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,本計劃所提之方法確具可行性,該研究成果應具實務參考價值。

關鍵詞：微型氣渦輪機，電能轉換器

1. 緒論

隨著經濟進步，台灣電力事業已漸漸朝向自由化發展，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已允許合格民營發電廠加入電力市場營運，而開放負載端的小型發電系統併入配電系統運轉，亦已成未來電力自由化之發展方向[1-3]，因此實有必要對此小型分散式發電系統進行研究。

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，其容量從數十千瓦(kW)到數百千瓦，適合安裝於大電力用戶或小型工廠中。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。

在微型氣渦輪機的運轉模式方面，由相關文獻可看出，其可分為並聯供電模式及備轉發電機模式[4,5]，前者指微型氣渦輪機與市電並聯運轉，故可等效為電流源。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逆變器，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。至於備轉發電機模式係指市電網路故障或供電品質不佳時，發電機與市電系統解聯，轉而充當用戶端之備用電源使用，此功能即類似用戶裝設不斷電系統，可確保其用電品質。

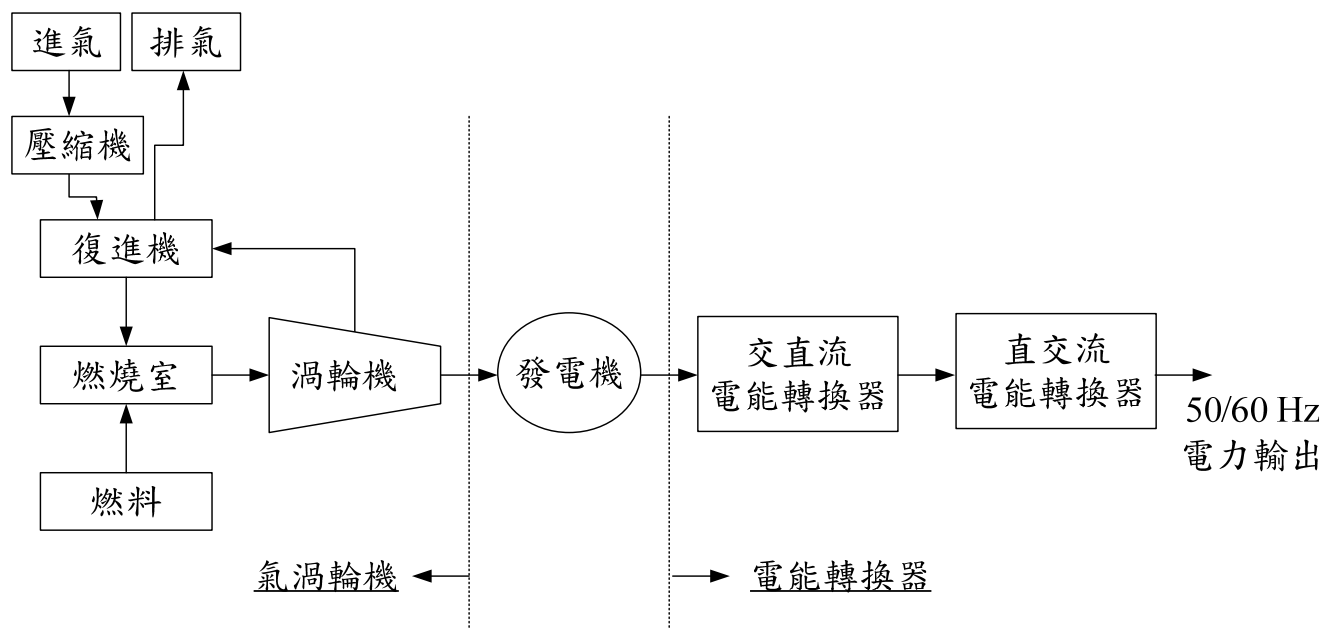


圖 1: 微型氣渦輪機組態圖

當進一步考慮本文所擬系統需相容於並聯供電及備轉發電機兩種不同模式，則如在並聯供電負載時採用電流控制法、備轉發電機模式時採用電壓控制法，則勢必因兩種控制手法迥異，導致控制線路複雜度增加，而不同模式間的切換暫態亦待予以審慎評估，因此如何整合逆變器的控制線路，實為微型氣渦輪機組電氣系統設計之重要關鍵。

有鑑於此，本文即在研究適用於微型氣渦輪機組之電能轉換器控制整合架構，並運用不同的控制策略將發電機組併入市電運轉，期可延伸該機組之運轉功能，以配合配電系統不同時段的特性變化，給予適當補償。本文除研究提出以單一電流迴授路徑，完成所有模式的運轉控制的方法外，亦規劃在發電機的並聯供電模式中，融入主動式濾波器

功能，使氣渦輪機的並聯運轉兼具負載虛功率、諧波功率之補償能力，並允許氣渦輪發電機組關機，僅剩餘逆變器單獨運轉，充作用戶的主動電力濾波器使用。本文所提方法具備下列幾種特性：

- (1) 系統設計融入負載管理概念，可增加氣渦輪發電機組之經濟運轉價值。
- (2) 完成控制線路整合，大幅減少電路的複雜性。
- (3) 逆變器控制系統僅需求一組電流偵測器，可簡化電路設計程序，降低電路製作成本。

2. 研究方法

2.1 系統架構

圖 2 繪出本文所構思之線路架構圖，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，再經逆變器切換後轉換成市電頻率之交流電壓輸出；另外一輸出斷路器被連接在逆變器輸出側，該斷路器設計於系統故障或維修保養時起閉使用。系統中的控制組態，包括電壓電流訊號擷取電路、保護電驛電路、使用者介面電路、及核心控制電子電路。其中電壓電流訊號擷取電路負責主電路迴授訊號的前處理，如濾波、訊號隔離等，保護電驛電路則含發電系統與市電的故障檢測迴路，如系統過載、分散式電源之獨立運轉偵測等。在控制電路方面，其係配合主電力架構的調整而設計，以達成系統穩態控制之目的。

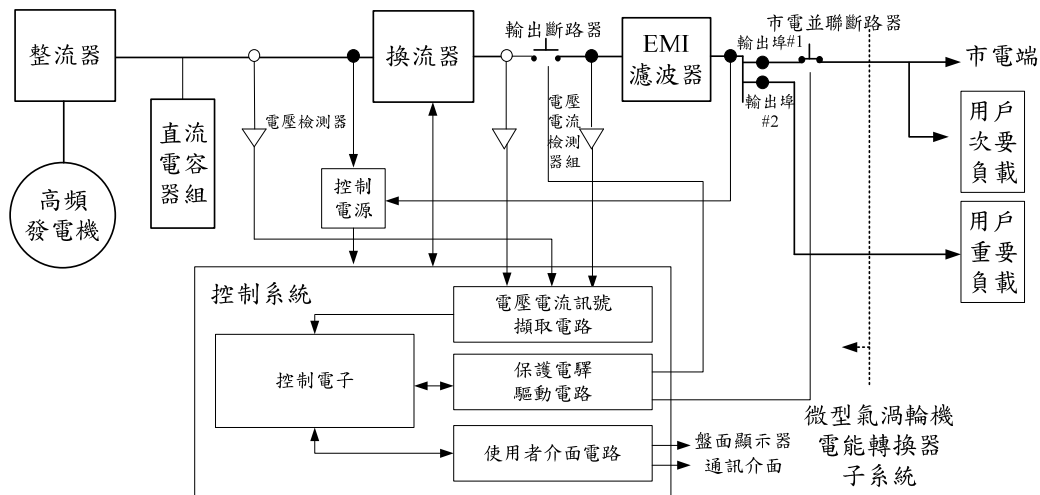


圖 2 本文所提之電能轉換器架構圖

圖 3(a) 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，此時氣渦輪機充作電流源使用。由於發電機組內的逆變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。

另一方面，當市電異常，氣渦輪發電機充作用戶之備用電源，如圖 3(b) 所示，由於缺乏市電挹注，比流器迴授訊號將由並聯模式的市電電流變成電容電流，由於該電容電流訊號與輸出電壓準位相關，故可供逆變器設計發電機輸出穩壓迴路，達到備用電源之目的。此外，若氣渦輪機不運轉（如燃料補給中斷），本文所擬系統機組亦允許逆變器單獨運作，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。

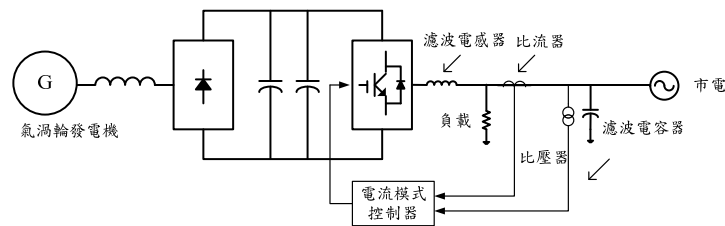


圖 3(a) 並聯供電模式 (比流器取樣市電電流)

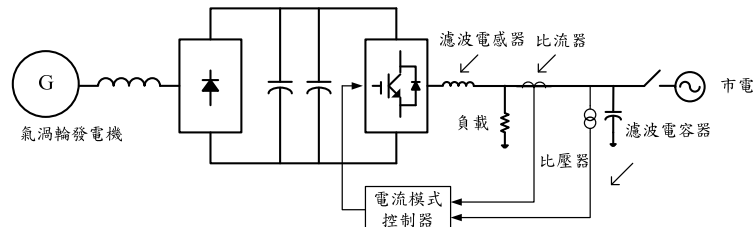


圖 3(b) 備轉發電機模式 (同一比流器取樣濾波電容電流)

2.2 並聯供電模式分析

本模式設計的目標在於控制逆變器的輸出功率，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。在逆變器輸出功率控制方面，考慮本文所擬系統操作於並聯供電模式時，比流器所迴授的訊號為市電電流訊號，其混雜逆變器電流與負載電流兩種資訊，無法提供控制器設計個別之逆變器功率控制迴路，因此本文改採由直流電容電壓值的調整，進行發電機功率控制。圖 4 繪出該控制方塊圖，由此圖可看出，一控制功率第三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_{dcref} 合成，利用逆變器動作，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。

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，乃在於使比流器迴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。綜合上述，逆變器內回路控制轉移方程式可表示為：

在(4)-(6)式中， $H_v(s)$ 與 $Z(s)$ 分別為穩壓迴路之系統轉移函數與輸出阻抗，由該式可看出負載電壓 v_o 與所設定的正弦參考信號 v_{oref} 相關，因此可藉由系統增益參數的選定，使得系統輸出電壓穩定在預設值。至於 $Z(s)$ 項的出現，則代表逆變器輸出電壓將受到負載電流之影響，其在控制上可被視為一擾動項，其可利用前饋補償法予以改善。

表 1:測試系統參數

表一:系統參數值

微渦輪機容量	30kVA
輸出電壓、頻率	120V _{ph} /208V _{LL} 、 60Hz
渦輪機電頻率	1.6 kHz
逆變器額定電流	83.3Amp
逆變器濾波電感、電容值	1mH/ 60μF

3. 雛形系統開發

本文已利用電磁暫態模擬程式(Electro-Magnetic Transient Program, EMTP)進行電腦分析，系統參數值如表一，訊號處理部份則以 TACS(Transients Analysis of Control System)完成。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)，測試波形如圖 5 所示，由圖 5 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。

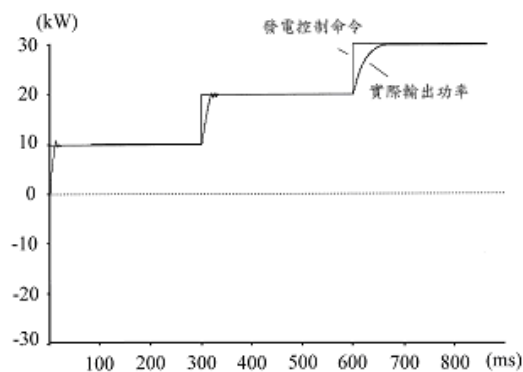


圖 5 並聯供電模式下發電機功率控制波形圖

此外，圖 6 則繪出本文所提系統在備用發電模式下進行負載瞬間加載之測試波形，以測驗系統電壓穩定度及其暫態響應。其中系統起始為無載，並在 20ms 瞬間投入 30kW 之電阻性負載，由該圖可看出，系統負載電壓在負載投入瞬間確會產生暫態變化，然而經由本文所提控制器調整，該暫態電壓可快速消除，負載電壓在滿載下亦維持穩定，且無波形失真現象發生。

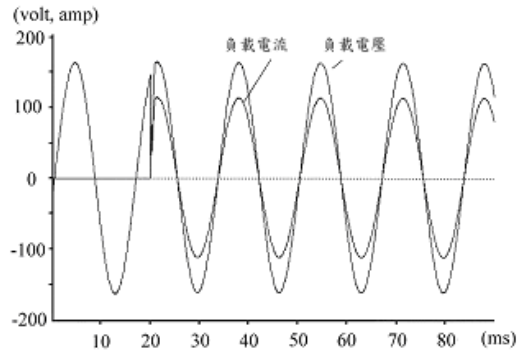
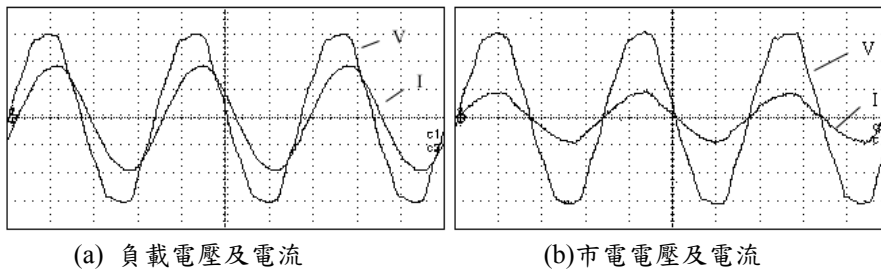


圖 6 備用發電機模式下瞬間加載電壓、電流波形圖

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，市電電流與市電電壓仍可控制近同相位。在本試驗中，負載電流經量測為 12.7 安培(功因 0.91)，市電輸入電流為 6.7 安培(單位功因)，此亦隱喻著部分負載實功率係由發電機提供，負載功率不足而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。



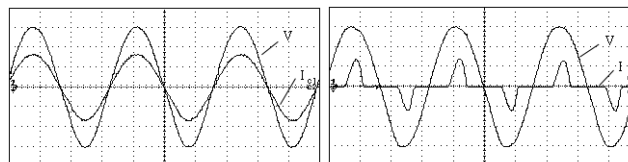
(a) 負載電壓及電流

(b) 市電電壓及電流

圖 7 並聯供電模式下電感性負載測試波形圖

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

再者為實際驗證本文所提系統在備用電源模式下之對於負載電壓之控制成效，本雛形系統亦設計在市電隔離的狀況下，加入不同負載進行測試。實驗結果如圖 8 所示，其中圖 8(a)為系統工作在電阻下之實測波形圖，圖 8(b)則為非線性負載之實測波形圖。由該圖可看出無論系統處於何種負載，經由逆變器控制，輸出電壓均可維持穩定之 60HZ 正弦波，且兩個測試案例負載電壓總諧波失真 (THD) 低於 3%。至於圖 9 則為系統不斷電功能測試波形圖，由圖中波形變化可說明市電瞬間中斷暫態之響應結果，亦即市電中斷後，發電系統仍可輸出穩定的備用電源持續對負載供電，且由控制器單一迴路設計結果，負載端電壓在模式切換時無中斷或震盪問題發生。



(a) 電阻性負載電壓及電流

(b) 流性負載電壓及電流

圖 8 備用發電機模式下系統電壓控制測試波形圖

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

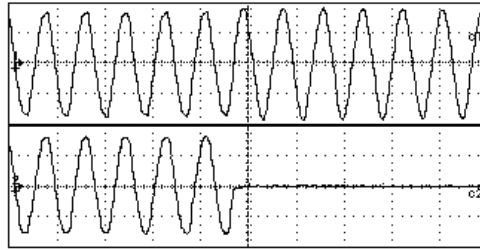


圖 9 市電瞬斷測試波形圖
(上：負載電壓、下：市電電壓波形圖)
(V: 100V/div, t: 20ms/div)

4. 結論與未來展望

本文提出一微型氣渦輪機電氣系統的控制整合策略，即以單一電流迴授路徑配合內控制迴路共用設計，完成發電機併聯及獨立運轉所有模式之控制作業，達到簡化系統電路之目的。由理論分析及實驗測試結果可知，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，亦可提供用戶重要負載之備用電源功能，進而有效提高微型氣渦輪機經濟運轉之實用參考價值。

5. 致謝

本文部分研究成果蒙科技部前瞻技術產學合作計畫-新世代車用動力驅動關鍵模組整合設計之智能化平台建置之補助，計畫編號 107-2622-8-006-015，謹此敬致誠摯謝意。

6. 參考文獻

- [1] R. Laseter, "Dynamic Models for Micro-Turbines and Fuel Cells," *IEEE Power Engineering Society, Summer Meeting*, Vancouver, Canada, 761-766, 2001.
- [2] M. Etezadi-Amoli and K. Choma, "Electric Performance Characteristics of a New Micro-Turbine Generator," *IEEE Power Engineering Society, Winter Meeting*, Columbus, USA, 736-740, 2001.
- [3] R. Tirumala, N. Mohan, and C. Henze, "Seamless Transfer of Grid-Connected PWM Inverters between Utility-Interactive and Stand-Alone Models," *the 17th IEEE Applied Power Electronics Conference*, Dallas, USA, 1081-1086, 2002.
- [4] 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, 789-794, 2002.
- [5] Automatic Dual Mode Controller, Capstone Turbine Inc, Press, 1999.

