

Design and Implementation of a Modular Inverter Circuit for Grid-tied Micro-turbine Generating system

Fu-Sheng Pai ^{1,*}, Po-Shing Tseng ^{2,*}, Hsiang-Yun Liao ^{3,*}

^{1,2,3} Department of Electrical Engineering, National University of Tainan, Tainan, 70005, Taiwan

^{1*}E-mail : fspai@mail.nutn.edu.tw

Abstract

This paper is aimed at researching a modular inverter for the grid-tied micro-turbine power generation system. By coupling with the developed method, the operational reliability and loss factor are first evaluated, where the results can output to help further decide the amount of the duty inverter modules. Then, a current-sharing scheme as well as a modular arrangement is developed to expand the inverter circuit being capable of the parallel operation of multi-modular in anticipation of increasing the reliability and efficiency requirements of installed. The method proposed in this paper was examined under various scenarios. The results help consolidate the feasibility and practicability of the approach for the applications considered.

Keywords: Micro-turbine, grid-connected system, modular inverter.

市電併聯型氣渦輪機發電系統之換流電路模組化設計與實現

白富升, 曾寶勳, 廖緬芸

國立臺南大學電機工程系

摘要

本文旨在研究適用於微渦輪發電系統之新型彈性容量換流系統技術，本文所提換流系統採多模組併聯運轉使得系統之發電控制可採計換流系統之功率及損失因素，在適當的時候啟動適當數量之換流模組加入電力系統併聯運轉。經由該彈性換流法之開發，微渦輪發電系統運轉即可具電源冗餘運轉特性同時亦有併聯運轉之高擴充性、高容量等特點。本文除理論分析外，所提方法已於實驗室完成雛形電路進行驗證，相關實驗結果顯示其確具可行性與實用參考價值，研究心得可供電力從業人員深入施行探討之參考。

關鍵詞：微渦輪機、市電併聯系統、模組化換流器

1. 緒論

受到全球石化資源蘊藏量的限制，如何開發替代能源，同時兼顧環境生態之保持，實為電力工業一項具挑戰性的議題，而積極發展應用新興能源科技之小型發電系統，亦已成為產官學各界之共識，相關研究討論包括分散式系統之發電控制、交易模式與電力系統併聯衝擊等。小型發電系統因發電設備裝置接近負載中心，可減少輸電損失，且採新興電能轉換技術發電，效率可高於傳統電廠，發電過程亦僅排放少量污染物，相對較少對環境產生衝擊[1-2]。基於上述特性，美國能源部已在 2000 年公布發展規劃書，該計畫近程目標為發展新式分散型能源(Distributed Generations)技術、排除電力系統並聯障礙及建立發電系統申設管理機制；中程目標則為擴增分散式發電系統的容量，擬在十年內使其佔總電力系統新增發電量之 20%。美國電力研究所(EPRI)亦於電力電子應用中心成立分散型發電系統實驗室，並規劃多項研究計畫。美國電機電子工程師學會(IEEE)則著手討論各項分散式電源設計規範、系統認證及市電並聯程序書。

今如在技術層面觀察，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[3-4]。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(air intake)、排氣系統(exhaust outlet)、壓縮機(compressor)、復進機(recuperator)、燃燒室(combustion chamber)及渦輪機(turbine)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(Carnot cycle equation)，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[5]。

本論文架構共分三節，本節為緒論，說明研究動機與研究方向；第二節將介紹本論文的系統架構與所提出的研究方法；第三節為實務開發上的介紹，包括介紹軟體跟實作的結果；最後第四節為結論與未來展望。

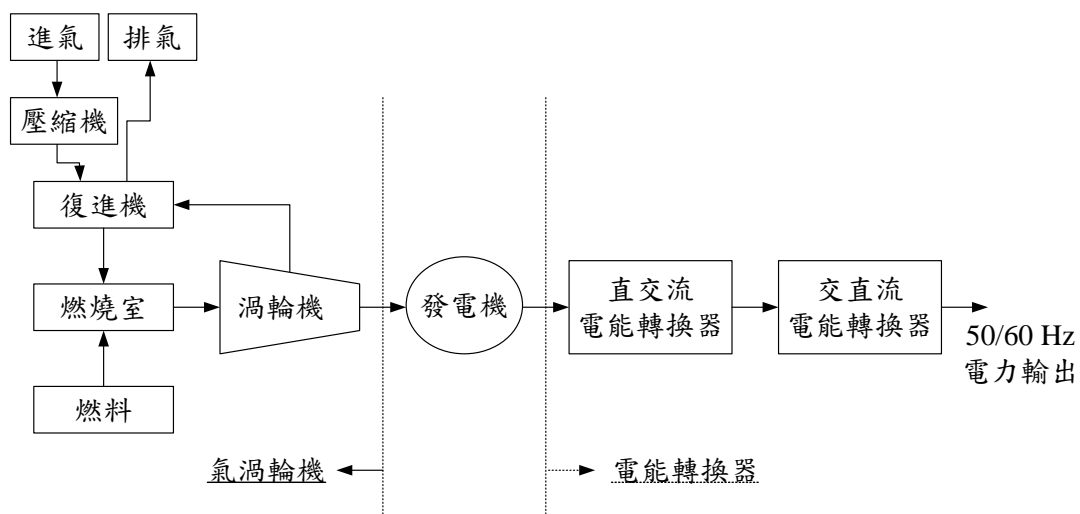


圖 1: 微型氣渦輪機組態圖

2. 研究方法

2.1 電壓控制法分析

電路架構圖如圖 2 所示，電力調節器之實、虛功率發電控制分別由調整控制器內之相位及振幅迴路達成，此時控制電路可推導隸屬於兩階特性[6]。電壓法最大的缺點在於電力調節器輸出阻抗常顯相對不足，故其與市電網路併聯時，需在兩者間使用一只低頻電抗器進行電氣連結，由於該電抗器屬被動元件，因此常有笨重、體積大等缺點，同時電力調節器於市電併聯模式時，係以電壓源併聯方式運作，因此如遇電力系統發生短路故障，則來自分散式電源的故障電流將大幅增加，而該額外之故障電流可能影響輸電線上既有的保護設備動作。另在弱匯流排（weak bus）地區，因電力系統之頻率及相位常有快速變動問題，功率控制之可靠度相對降低。

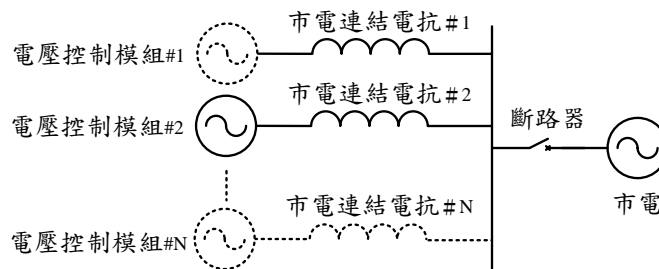
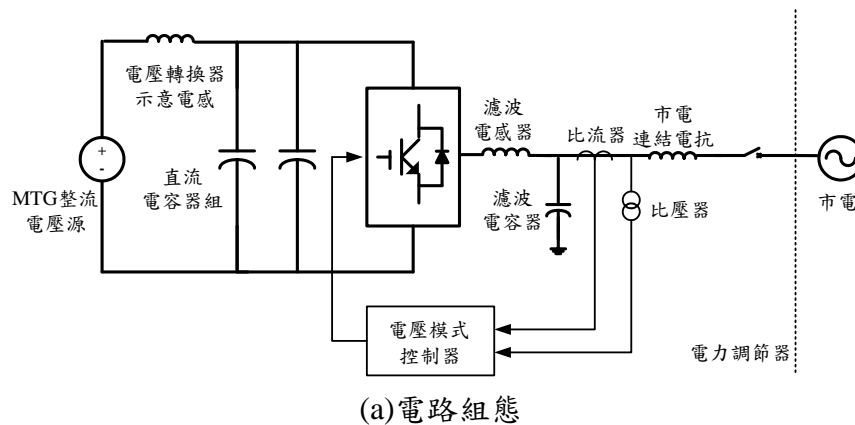


圖 2：電壓控制電力調節器

2.2 電流控制法分析

相關架構如圖 3(a)所示，該法首先利用瞬時虛功定理將功率訊號轉換成直、交軸域電流參考命令，再迴授換流器輸出電流進行閉迴路設計，使用此一方法時雖有頗佳之電路響應，但控制步驟稍嫌複雜，需耗費大量硬體資源進行數值運算[7]。電流法亦可利用時域特性設計相關電路，即以基本的直流電容儲能原理，配合各式的控制補償技巧達成控制目的。另一方面，如在電流控制之換流系統內採模組化設計，則相關電路設計如圖 3(b)所示，其中一瞬時分流控制器首先與分散式直流源相連，並產生適當的電流參考命令輸出到各併聯模組，然後各併聯模組再採獨立之電流調整器，以調節個別的輸出電流量。採用電流控制法時電路屬一階模式之範疇，電路複雜度相對較低，然而由於各換流模組缺乏輸出電流訊號的交連，當不同換流模組內發生不同元件或參數誤差時，易產生不等量之控制誤差，因此較難評估掌握該電流誤差所造成之功率失衡問題，可能影響整體系統運作之可靠性。

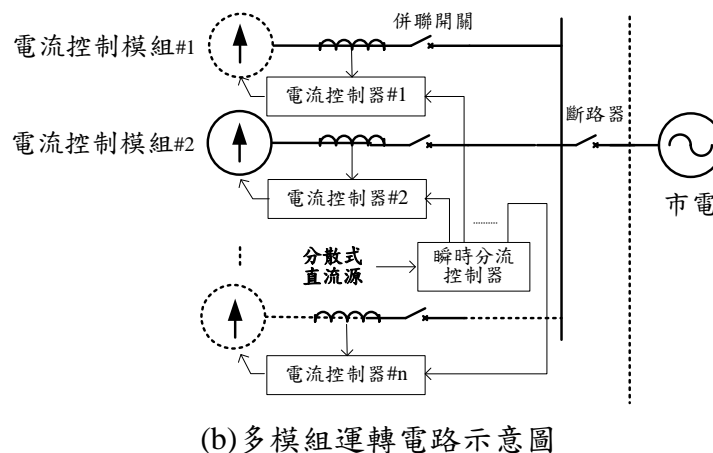
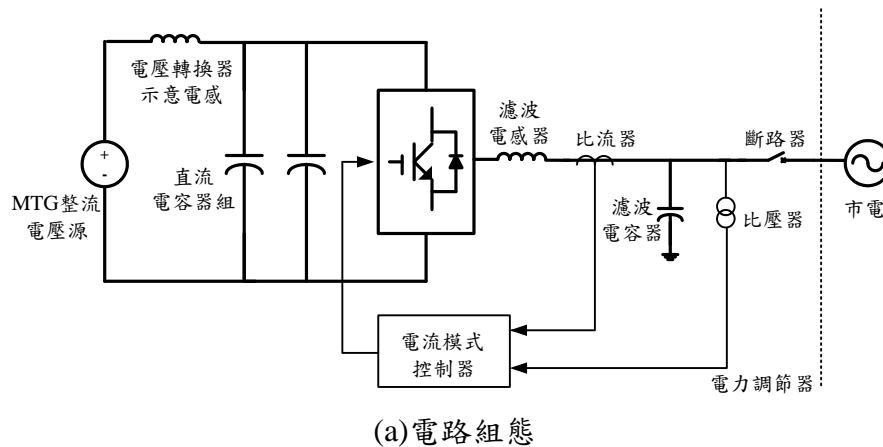


圖 3：傳統電流控制電力調節器

由上述之比較分析可知，電力調節器換流電路之模組化設計以電流法較為簡單，惟其控制系統之可靠性與準確性尚待予以審慎研究討論。基於上述考量，本文即研究換流模組之多機併聯架構，亦即藉由電力調節器換流結構之模組化設計，使系統的發電控制可採計功率及損失因素，在適當的時候啟動適當數量的模組加入電力系統併聯運轉，以提高系統運轉效率。值得注意的是所提方法是基於功率晶體的切換導通損與電流大小呈平方比之特性而設計，亦即採用大功率晶體所發展的電力調節器雖可承載較高之電流安培數，但因受到材料特性影響，其晶體導通阻抗亦相對較高，系統運轉效率隨之降低；同時，採單機設計的系統如內部某一關鍵組件故障，則系統勢必完全失效，系統運轉之可靠度相對較低。因此如可將電力調節器中的換流結構切割成不同的換流模組(inverter unit)，再由換流模組多體併聯供電，則因每一換流體之承載電流減少，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的目的。另一方面在換流器採模組化多體併聯結構後，系統運轉可再融入電源冗餘運轉特性，提高系統運行之可靠性，同時擷取併聯運轉之高擴充性、大容量等特點，增加用戶系統規劃之彈性，使微型氣渦輪發電系統之設置更具經濟參考價值。

2.4 主電路架構分析

圖 4 繪出本文所提研究之電力調節器電路組態，其中微渦輪機整流昇壓到適當之直流準位，而換流電路則先設計 $(n+1)$ 組之電路插槽，再以換流模組置入插槽方式形成平行運轉結構，合力將發電系統所產生之電力送至市電網路，最後系統集成電驛電路則用於

保護發電系統與互聯電力系統之運轉安全，包括系統短路、過載、電壓、頻率異常保護等。

圖 5 則為本文所提之換流模組電路架構圖，如圖所示，各模組含相對小容量功率晶體、輸出濾波器、電流、電壓偵測器、電流控制器及輸出隔離開關，其中初次電壓轉換介面之輸出電壓電流訊號首先被送入控制器內，藉以計算產生個別模組之參考電流參考命令，另再加入一電流匯流排貫穿所有併聯模組以收集系統總輸出電流訊號，最後再將其餽入各模組之電流控制器使用。茲為量化本文所提系統之效能提升能力，本文從系統故障率及功率損耗兩方面進行研究，相關評估分析分述如下：

考慮某傳統型分散式電源換流系統，採單一電能轉換器設計，容量為 S 千伏安(kVA)，運轉可靠度為 λ ，則該換流器故障率 F_T 可表示為：

$$F_T = 1 - \lambda \quad (1)$$

現如將前述換流器切割為 n 個相同大小之換流模組，並加採 1 個冗餘換流模組加入系統運轉以提高可靠度，則新系統 $n+1$ 模組之總裝置容量 S_m 合計為：

$$S_m = \frac{n+1}{n} S \quad (2)$$

此時若透過電路設計技巧使得各換流模組化的運轉可靠度維持在 λ ，則基於 n 組換流模組併聯運轉後合併容量方為原額定滿載容量 S 之事實，該 n 組換流模組之運轉可靠度 \mathfrak{R}_n 可計算為：

$$\mathfrak{R}_n = \lambda^n \quad (3)$$

若再加入第 $n+1$ 之冗餘模組併聯運轉，則該第 $n+1$ 組冗餘模組與其他 n 個模組係形成併聯組態，此時多體換流系統整體之故障率 F_{n+1} 可利用(3)式推導出：

$$F_{n+1} = (1 - \lambda)(1 - \mathfrak{R}_n) \quad (4)$$

比較(1)及(4)式得到：

$$\frac{F_{N+1}}{F_T} = 1 - \lambda^n \quad (5)$$

由(5)式可看出，採用 $n+1$ 冗餘模組併聯結構之換流系統其故障率為傳統單體結構之 $(1 - \lambda^n)$ 倍。現如進一步去除 $n+1$ 冗餘併聯之容量擴增優勢，則(5)式可利用容量因數進行正規化：

$$\frac{F_{N+1} / S_m}{F / S} = \frac{n}{n+1} \times (1 - \lambda^n) \quad (6)$$

在(6)式中，由於該比值恆小於 1，因此由(6)式可看出採用 $n+1$ 冗餘併聯結構，其單位容量所貢獻的故障率實較傳統單體架構為低，換言之，本文所提新型系統確可改善分散式電源換流運轉的故障率，可靠度性能表現較傳統系統優異。

基於上述分析，本文所研究之模組化換流組態無論在故障率表現上，其性能皆較傳統電流控制系統為佳，且模組化設計後又可視財務規劃逐步擴充容量，故本文所提之離形系統應具可行性，對於協助提高微型氣渦輪發電系統的換流效能有實質之效益。

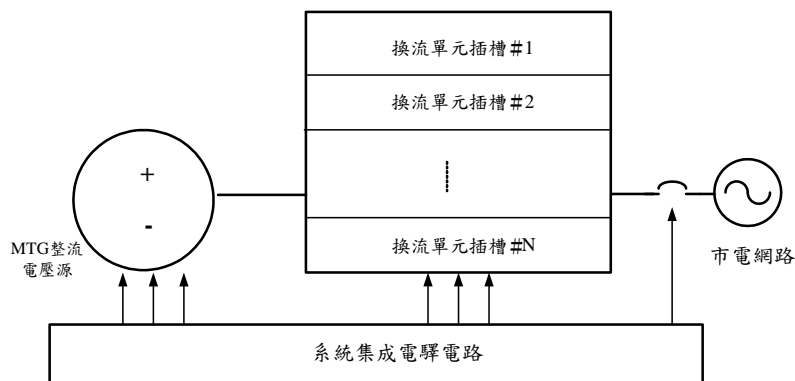


圖 4：本文所提研究之系統組態

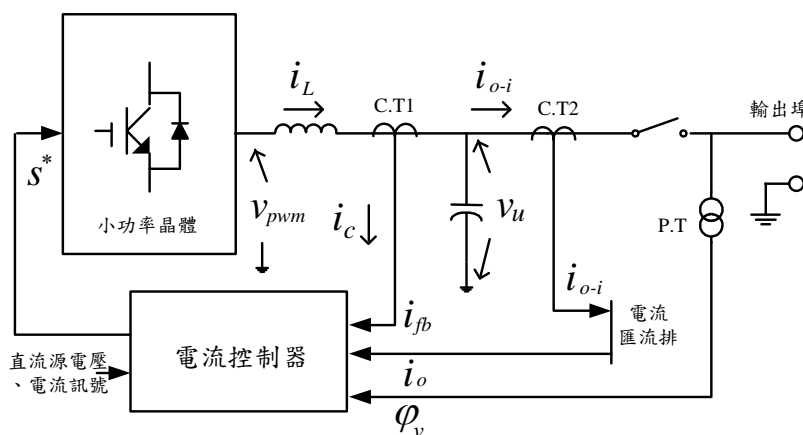


圖 5：本文所提之換流模組架構示意圖

2.5 控制分析

圖 6(a)繪出本文研提之控制方塊圖，其中包括功率控制回路、市電電壓鎖相回路、電流分流迴路、電流放大器及脈波寬度調變器。在功率控制迴路方面，茲考慮系統之運轉安全係數，本文設計採平行計算結構，亦即委由各換流模組自行迴授前級初次電壓轉換器之輸出電壓電流訊號，並自行偵測所加入之換流模組數，相除後即可得各換流模組運轉所需之參考電流命令；在電壓鎖相迴路方面，本文利用市電電壓迴授訊號產生一零交越點觸發訊號，並據此起始存取預錄在唯讀記憶體內的正弦函數表得到與市電電壓同相之正弦波形；在電流分流器設計方面，其主要目的在收集各模組之總負載電流，並產生換流模組之平均電流命令：

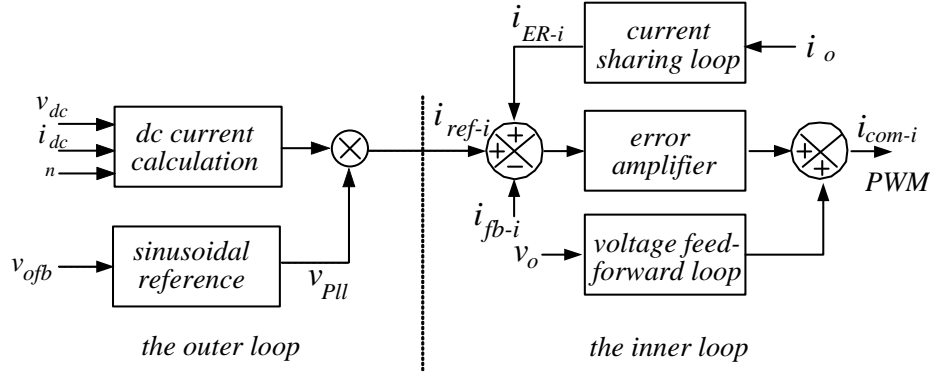
$$i_{cs} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} i_{o-i} \tag{7}$$

其中 i 為換流模組編號。今如定義 i_{ER-i} 為第 i 個併聯模組之控制誤差電流

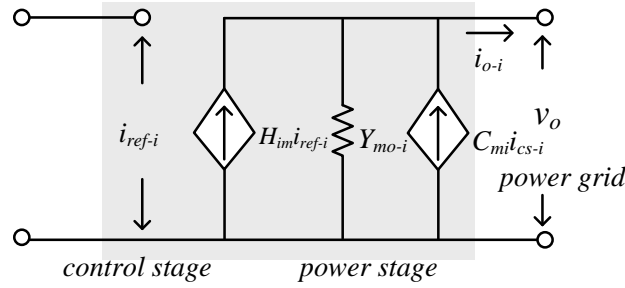
$$i_{ER-i} = (i_{cs} - i_{o-i})k_{CT} \tag{8}$$

此時利用輸出濾波電容之電壓、電流關係得

$$i_{o-i} = H_{mi}(s)i_{ref-i} - Y_{mo}(s)v_o + C_{mi}i_{cs-i} \tag{9}$$



(a) Control block diagram



(b) Circuit Model

圖 6：本文所提換流模組控制方塊圖

$$H_{mi}(s) = \frac{k_{CR}k_{PWM}}{sL_f + r_f + 2k_{CT}k_{CR}k_{PWM}} \quad (10)$$

$$Y_{mo}(s) = \frac{sc_f(sL_f + r_f + k_{CT}k_{CR}k_{PWM})}{sL_f + r_f + 2k_{CT}k_{CR}k_{PWM}} \quad (11)$$

$$C_{mi}(s) = \frac{k_{CT}k_{CR}k_{PWM}}{sL_f + r_f + 2k_{CT}k_{CR}k_{PWM}} \quad (12)$$

利用(9)到(12)式，本文所提之電流控制法個別模組之等效電路可繪如圖 6(b)所示，其中 $H_{mi}(s)$ 及 $Y_{mo}(s)$ 分別表示換流模組電路之電流增益與輸出導納函數，同時另一與控制誤差相關之相依電流源 $C_{mi}(s)i_{cs-i}$ 則被推導出並接於電路之輸出端。使用該電路模型，如僅考慮電力基頻範圍，則電抗 sL_f 與電阻 r_f 與積項 $2k_{CT}k_{CR}k_{PWM}$ 相比即顯微不足道，此時(9)式可被簡化為

$$i_{o-i} = \frac{1}{2k_{CT}} i_{ref-i} - \frac{sc_f}{2} v_o + \frac{1}{2} i_{cs} \quad (13)$$

重新整理得到：

$$i_{L-i} = \frac{1}{k_{CT}} (i_{ref-i} + i_{ER-i}) \quad (14)$$

從(14)式可看出，如第 i 個模組之實際輸出電流大於所期望之電流量，則電流模組控制器將自動產生一負的誤差訊號 i_{ER-i} ，進而使該模組輸出電流降低，反之正的誤差訊號發生於實際輸出電流小於所期望之模組輸出電流量，以協助模組提高實際輸出之電流值。利用此一雙向調整機制，本文所提系統不管是在模組電流輸出電流過高或過低時，皆可

藉由與增入誤差相關之相依電流源設計，形成自動修正補償系統，因此可有效降低個別模組其之電流控制誤差量，進而大幅提高整體系統之電流控制準確度。

3. 實務系統開發

3.1 軟體介紹

本文使用 Modbus 作為軟體與硬體中的溝通橋梁，Modbus 是業界領域中常用的串行通訊協定，主要是遵循主僕系統 (Master And Salve) 之通訊規則，監控系統都為 Master，電表、儀器皆在 Salve 上，且可在自動化裝置之間提供通訊功能。本文中電腦為 Master 角色負責發出指定與接收資訊，每一換流模組為 Slave 角色接收命令，經過計算之後回傳訊息給電腦。

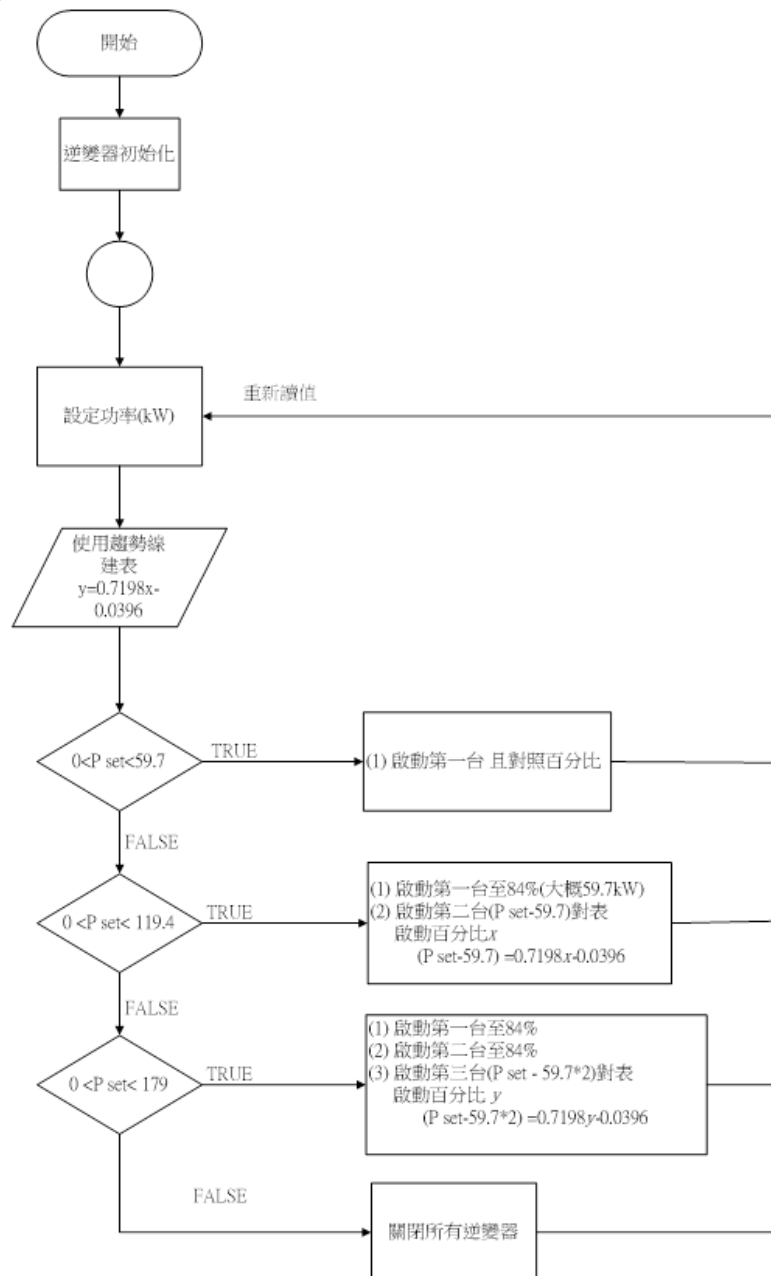


圖 7 本文換流模組調度程式流程圖

3.2 控制調度

圖 7 為本程式流程圖，其中所使用的三台換流模組最大功率皆可以到達 80kW，實驗開始前須單模組燒機測試換流器可正常運作，並在燒機時取得功率與百分比的趨勢線。又為換流模組效率考量，本文設定使得每一換流模組之最大輸出功率為單一模組額定功率之八成，而在本文中啟動換流模組的順序方法是採用累計型，一但換流模組若超過設定值時，將開啟第二模組。

3.3 系統模擬

為驗證本計畫所提方法可行性，本文已利用電磁暫態模擬程式(ElectroMagnetic Transient Program, EMTP)進行電腦分析。在此模擬測試中輸入直流電壓為 400V、交流輸出電壓是 220V、變流模組容量 30kW，系統採用雙換流模組併聯測試，外部功率控制器給予換流模組發電控制命令起始設定為 10kW，並分別在 300ms、600ms 變換設定，功率命令增加為 20kW 及 30kW，測試波形列如圖 8 所示，由圖中可看出本文所提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。再者為發電輸出實功率動態變化控制試驗，其中發電控制命令起始設定為 60kW 及 30kW，測試波形如圖 9 所示，其中在圖 9(a)，20ms 時微氣渦輪發電系統啟動，發電電流（相）瞬間加大至 90 安培，且其與市電電壓關係呈單位功因之正弦波形；在圖 8(b)中，模擬時間 40ms 時微氣渦輪發電系統發電功率減半至 30kW，發電電流（相）由 90 安培減至 45 安培，測試結果由該圖可看出，本文所提系統之輸出電流波形未受發電命令改變之影響，仍可保持與市電電壓同相位之單位功因正弦型態。基於上述測試結果可看出，本文所提系統確可有效控制渦輪機發電功率，並快速追蹤控制命令，於各種可能發生之運轉實務狀況，皆能達到市電併聯運轉之功能。

再者本文所提換流模組電路亦已進行實驗室硬體電路測試，圖 10 與圖 11 分別為輸入直流電壓 200V 與 800V 之測試波形，由圖可看出，透過變流電路控制器之適當調整可驅使變流器輸出電流相位控制與市電端同相且其呈正弦波形，其中測試使用功率分析儀量測，在輸入直流電壓 200V 時，變流器輸出 R、S、T 電流 THDi 分別為 2.73%、2.83% 與 2.83%；又輸入直流電壓 800V 時，變流器輸出 R、S、T 電流 THDi 分別為 1.11%、1.11% 與 1.33% 均符設計規格。

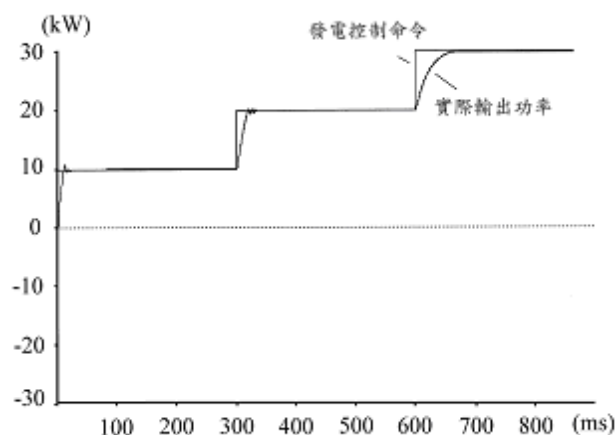
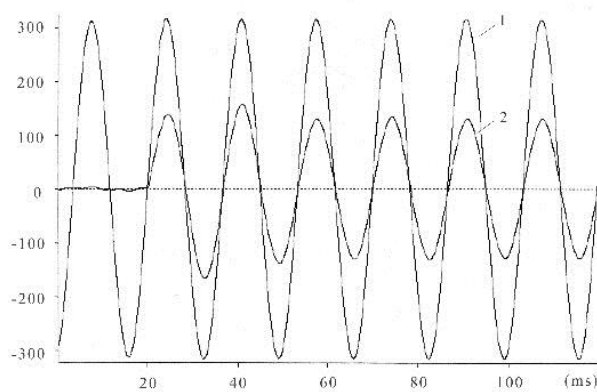
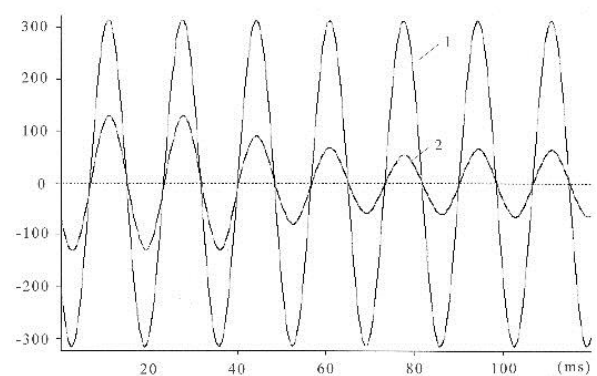


圖 8 並聯供電模式下發電機功率控制波形圖



(a) 0 至 60kW 市電電壓(1)及市電電流(2)波形圖



(b) 60kW 降至 30kW 市電電壓(1)及市電電流(2)波形圖

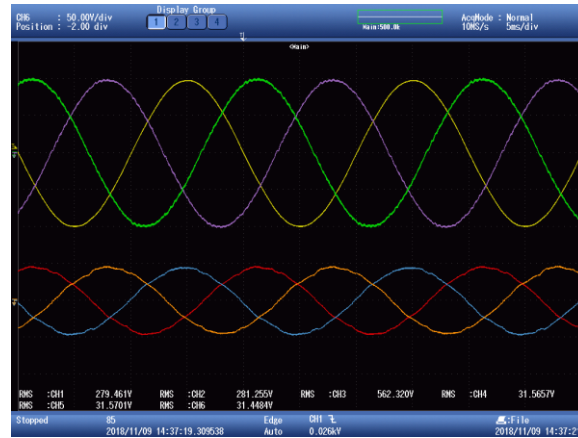
圖 9 發電功率變動之市電電壓電流波形圖

3.4 實驗測試

為了檢測本文所使用的換流模組利用 Modbus 運作之功能，圖 12 為利用 Modbus 通訊協定和換流模組點位連線之實測記錄圖，其中該圖所示之指令為在 300V 的狀態下送出總發電量百分比 50%之功率給換流模組 Salve 端當成其發電目標值，而 Salve 端進行運轉後亦可以得知 50%下得到的輸出功率數、電壓與電流，因此由本測試可證實透過 Modbus 通訊協定之協助，本文所提系統之換流模組確可執行中央控制器之調度命令。



(a) 直流輸入電壓 (上) 與電流 (下) 波形

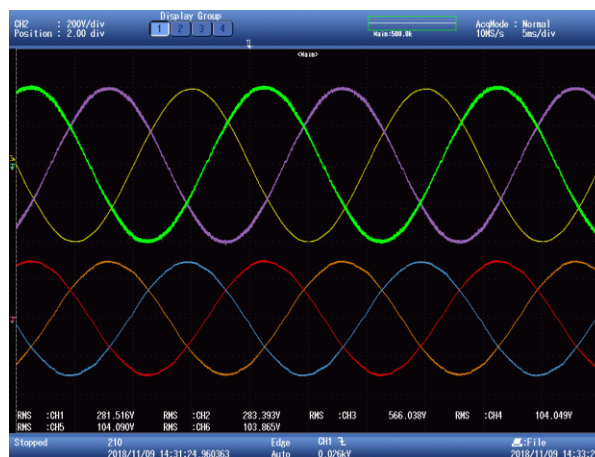


(b) 交流輸出電壓（上）與電流（下）波形

圖 10 200V 輸入變流器模組電路實測波形圖

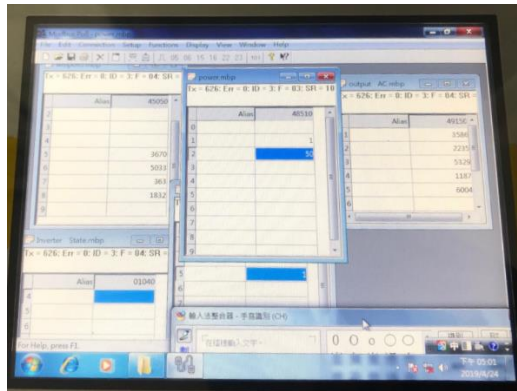


(a) 直流輸入電壓（上）與電流（下）波形



(b) 交流輸出電壓（上）與電流（下）波形

圖 11 800V 輸入變流器模組電路實測波形圖



(左端: DC Input 中端: 控制百分比值 右端: AC Output)

圖 12 電壓 300V，百分比 50%

4. 結論與未來展望

本文研究提出一具多模組並聯運轉能力的微型氣渦輪機組，即利用電能轉換器之模組化設計，融入電源冗餘並聯運轉特性，以提高系統運行之可靠性，並利用模組化併聯設計的高擴充性特點，增加用戶在發電機容量設計之彈性，使氣渦輪機設置更具經濟參考價值，相關研究成果應可供國內能源工業相關從業研究人員應用及參考。

5. 誌謝

本文特別感謝科技部南科管理局之綠能旗艦領航產學研聯盟研發推動計畫經費補助（計畫合約編號 106GF02），相關經費挹注對本文之研究發展助益頗大，特此致謝。

6. 參考文獻

- [1] W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, M. M. A. Salama, "An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 1158-1165.
- [2] W. Wongsachua, W. J. Lee, S. Orintara, C. Kwan, F. Zhang, "Integrated High-speed Intelligent Utility Tie Unit for Disbursed/renewable Generation Facilities," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 2, March-April 2005, pp. 507-513.
- [3] R. Laseter, "Dynamic Models for Micro-Turbines and Fuel Cells," IEEE Power Engineering Society, Summer Meeting, Vancouver, Canada, July 2001, pp. 761-766.
- [4] Model TA-80R 80kW Turbo Alternator, Elliott Energy System Inc. Press, 2001.
- [5] E. Mollerstedt and A. Stothert, "A Model of a Micro-Turbine Line Side Converter," IEEE Proceedings of PowerCon 2000, Perth, Australia, December 2000, pp. 909-914.
- [6] R. Tirumala, N. Mohan, and C. Henze, "Seamless Transfer of Grid-Connected PWM Inverters between Utility-Interactive and Stand-Alone Models," IEEE Applied Power Electronics Conference, Dallas, USA, June 2002, pp. 1081-1086.
- [7] P. G. Barbosa, L. G. B. Rolim, E. H. Watanabe and R. H. Antitsch, "Control Strategy for Grid-connected DC-AC Converter with Load Power Factor Correction", IEE Proceedings: Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 145, No. 5, September 1998, pp. 487-491.

