

風力發電轉換器之燒機測試系統

Burn-In Testing System of Wind Power Converter

高振傑 陳建富 陳鴻文
Chen-Chieh Kao Jiann-Fuh Chen Hong-Wen Chen

國立成功大學電機工程系
台灣 台南市
Department of Electrical Engineering
National Cheng Kung University
Tainan, TAIWAN
n2697447@mail.ncku.edu.tw

摘要

本文提出一「風力發電轉換器之燒機測試系統」，其功能為模擬永磁式同步發電機之變壓變頻輸出，藉以提供風力發電轉換器進行燒機測試。此系統架構係由單相全橋式升壓型整流器與三相全橋式換流器所組成，其中整流器具有功率因數修正之功能，換流器可調整輸出的電壓振幅及頻率。控制核心為數位訊號處理器 (Digital signal processor, DSP)，藉由數位控制方式簡化硬體電路、加速系統的研製時程。最後，完成一輸入電壓 110 Vac、輸出電壓 30~120 Vac 與輸出頻率 40~120 Hz 之燒機測試系統，以實驗結果驗證其可行性。

關鍵字：風力發電轉換器、燒機測試、數位訊號處理器。

Abstract

The "Burn-In Testing System of Wind Power Converter" is proposed in this paper. The system function is to simulate the permanent magnet synchronous generator and provide wind power converter to proceed burn-in test. The system is composed of two stage. The front-stage is a single-phase full-bridge rectifier with voltage step-up function and power factor correction. The rear-stage is a three-phase full-bridge inverter used to regulate the output voltage and frequency. Digital signal processor is used as control kernel to simplify the practical circuit and speed up implementing process. Finally, a prototype of burn-in testing system with 110V input and 38-120V/40-120Hz output is implemented to verify the feasibility.

Keywords: wind power converter, burn-in test, digital signal processor.

I. 前言

隨著科技進步，太陽能、風力、水力、地熱及生質能...等各類再生能源皆已蓬勃發展。其中，風力發電不僅技術較為成熟外，也是國際上目前公認最乾淨的能源，且每千瓩(MW)的風力發電量於每年可減少約 5000 噸的二氧化碳排放量[1,2]。此外，根據世界風能協會 (World Wind Energy Association, WWEA) 於 2010 年 3 月發表的「2009 世界風能報告」(World Wind Energy Report 2009) 指出，2009 年全球風力機組總裝置容量達 159,213 千瓩，並提供 3,400 億度 (TWh) 的電力，滿足全球約 2% 的電力需求[3]。

截至 2009 年底統計，全球目前已有 82 個國家裝置風力機組，且近年來因陸域可供開發的風場位址有限，風力發電逐漸往海面上擴展市場。然而，由於風力機組的設備相當龐大，系統很難在建置之前就完成測試。常常需要等到系統建置完成後才得以進行系統參數測

試、調校，如此一來便增加了系統運作時的不穩定因素。因此，如何在系統建置前完成測試，藉以提昇系統穩定度與可靠度，便成了一項令人值得探討的課題。

II. 風力發電系統介紹

近年來，變速型風力機已成為市場主流，其風力發電機的應用技術主要分為兩種[4-6]，分別為：

- (1) 雙饋式感應發電機 (Doubly-fed induction generator, DFIG)
- (2) 直驅式永磁同步發電機 (Direct drive permanent magnet synchronous generator, PMSG)

【雙饋式感應發電機】

圖 1 所示為雙饋式風力發電系統，其感應發電機定子直接連結至電網，而轉子則經由一 AC-DC-AC 轉換器再連結至電網。

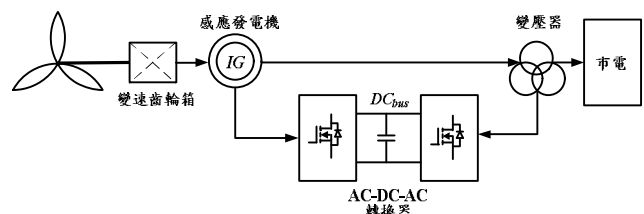


圖 1 雙饋式風力發電系統

當感應發電機轉速高於同步轉速 (Synchronous speed) 時，由定子提供大部分的電能輸出，其餘部分電能則由轉子提供；而感應發電機於同步轉速運轉時，定子將負責提供全部的電能輸出，轉子的功用僅提供激磁；感應發電機轉速低於同步轉速時，定子依然負責提供全部的電能輸出，而轉子則向系統吸收電能來提供激磁。

【直驅式永磁同步發電機】

圖 2 所示為直驅式風力發電系統，其永磁同步發電機經由一 AC-DC-AC 轉換器直接連結至電網。此架構省略了變速齒輪箱，直接將風力機的葉輪連接至發電機轉子，因而被稱為直驅式。

相較於雙饋式發電系統，直驅式發電系統可避免齒輪箱故障與維修的問題，且永磁式同步發電機的構造簡單、不需外加激磁電源、效率與穩定度高。因此，可有效地提升系統在運轉時的可靠度與發電效率。

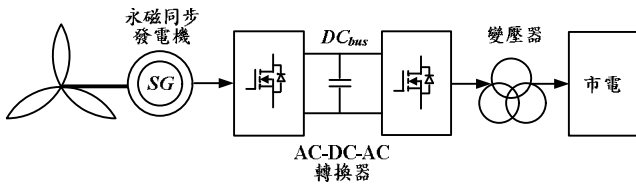


圖 2 直驅式風力發電系統

由於目前風力發電系統的主流為直驅式，因此，本文所提出之燒機測試系統，將模擬永磁同步發電機之輸出特性，提供 AD-DC-AC 轉換器進行燒機測試。以下將針對永磁式同步發電機之原理、特性作一探討。

III. 永磁式同步發電機之原理與特性

永磁式同步發電機之架構與同步發電機相似，因其轉子係採用永久磁鐵來提供激磁磁場，而被稱為永磁式。當風力機轉動時，帶動轉子使磁鐵旋轉，進而產生旋轉磁場，並與定子線圈產生相對運動，於是產生交流感應電勢。因磁場大小固定，所以輸出電壓隨風力機轉速而改變，且頻率亦會因轉速不同而有所改變[7,8]。

圖 3 所示為三相 Y 接永磁式同步發電機之等效電路，以下將利用此圖推導永磁式同步發電機在三相座標系統之電壓與電磁功率。

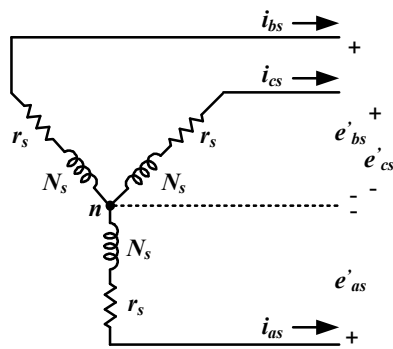


圖 3 三相 Y 接永磁式同步發電機之等效電路

由圖 3 可知，永磁同步發電機之電壓方程式為：

$$e'_{abc} = -r_s i_{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc} \quad (1)$$

其中 e'_{abc} 為三相定子相電壓， r_s 為定子側電阻， i_{abc} 為三相定子磁通鏈 (Flux linkage)， λ_{abc} 為磁通鏈方程式。

若將定子與轉子氣隙磁通諧波忽略，則磁通為弦式分佈 (Sinusoidal distribution)，磁通鏈方程式可表示為：

$$\lambda_{abc} = -L'_s i_{abc} + \lambda'_m \quad (2)$$

L'_s 為定子側自感矩陣，其矩陣如式(3)所示：

$$L'_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (3)$$

λ'_m 為轉子等效至定子側之磁通鏈向量，其大小如式(4)所示：

$$\lambda'_m = \lambda'_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\theta_r = \int \omega_r dt \quad (5)$$

其中 L_{ms} 為定子的磁化電感， L_{ls} 為定子繞組的漏電感， θ_r 為轉子與參考軸所夾之角度， ω_r 為轉子角速度。

將式(2)~式(4)代入式(1)，經過整理化簡之後，可得出式(6)：

$$e_{abc} = r_s i_{abc} + L_{ss} \frac{d}{dt} i_{abc} + e'_{abc} \quad (6)$$

e_{abc} 定義為發電機之內電勢，與轉速 ω_r 成正比，其大小如式(7)所示：

$$\begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} = \omega_r \lambda'_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 L_{ss} 為 L_s 的對角矩陣， L_s 為定子側等效電感，大小為 $L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ms}$ 。

永磁同步發電機之電磁功率方程式為：

$$P_e = e_{as} i_{as} + e_{bs} i_{bs} + e_{cs} i_{cs} \quad (8)$$

將式(7)代入式(8)，可得出式(9)：

$$P_e = \omega_r \lambda'_m \left[i_{as} \cos \theta_r + i_{bs} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{cs} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (9)$$

由式(9)可知，若永磁式同步發電機之三相電壓、電流同步，則三相電流 i_{as} 、 i_{bs} 、 i_{cs} 大小如式(10)~式(12)所示：

$$i_{as} = I_m \cos \theta_r \quad (10)$$

$$i_{bs} = I_m \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (11)$$

$$i_{cs} = I_m \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (12)$$

則電磁功率可簡化成式(13)：

$$P_e = \omega_r \lambda'_m I_m \quad (13)$$

其中 I_m 為相電流峰值。

由式(13)可知，永磁式同步發電機之功率與轉速、相電流峰值成正比。

IV. 燒機測試方式

傳統上，風力發電轉換器的測試方式如圖4所示，輸入端直接與風力機、永磁同步發電機連接，輸出端則連接至負載或與市電併聯。此測試方式不僅會因風力機與發電機的體積龐大造成測試不易，若將輸出連接至負載進行燒機測試，則會造成能量的浪費。

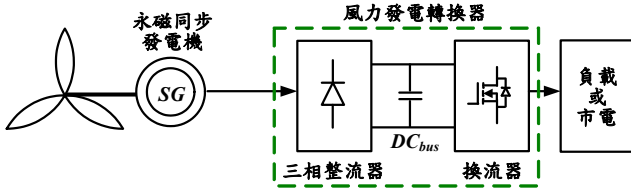


圖 4 傳統燒機測試方式

因此，本文提出一「風力發電轉換器之燒機測試系統」，如圖 5 所示。利用電力電子技術[9-14]完成一模擬同步發電機之變壓變頻輸出的系統，藉以提供風力發電轉換器進行燒機測試，此測試系統可有效降低體積且具有能量回收之功用。

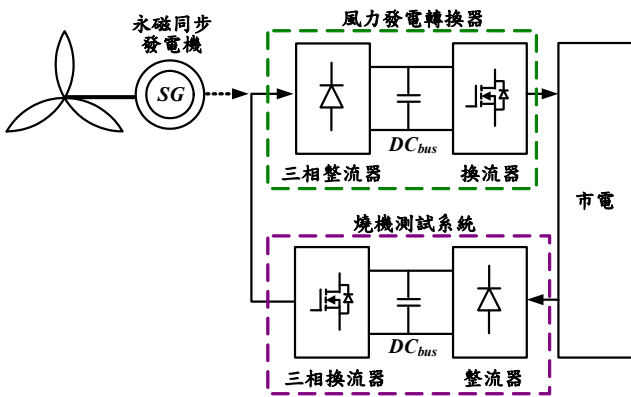


圖 5 風力發電轉換器之燒機測試系統

V. 燒機測試系統架構

【系統架構】

本文提出之「風力發電轉換器之燒機測試系統」是由一單相 AC-DC 轉換器與一三相 DC-AC 轉換器所結合而成，其系統架構方塊圖如圖 6 所示。

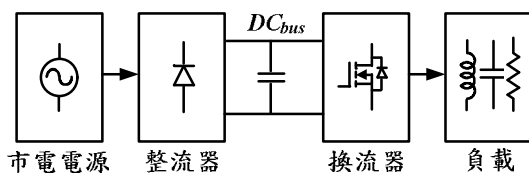


圖 6 風力發電轉換器之燒機測試系統

其中單相 AC-DC 轉換器負責將輸入之市電電源轉換為直流電壓；接著利用三相 DC-AC 轉換器將前級 AC-DC 轉換器輸出之直流電壓轉換為一交流電壓。最後，藉由控制方式使輸出交流電壓達到模擬永磁同步發電機之變壓變頻功能，以進行風力發電轉換器之燒機測試。而本文在控制器方面，採用德州儀器公司 (Texas Instruments, TI) 所生產的 TMS320LF2407A 數位訊號處理器。

【硬體製作】

硬體電路可分為：功率級電路、開關驅動電路、回授電路及數位訊號處理器。圖 7 為風力發電轉換器之燒機測試系統的實體電路架構圖，其由單相全橋式升壓型整流器與三相全橋式換流器所組成，並應用 TMS320LF2407A 數位訊號處理器做為控制核心 [15,16]。

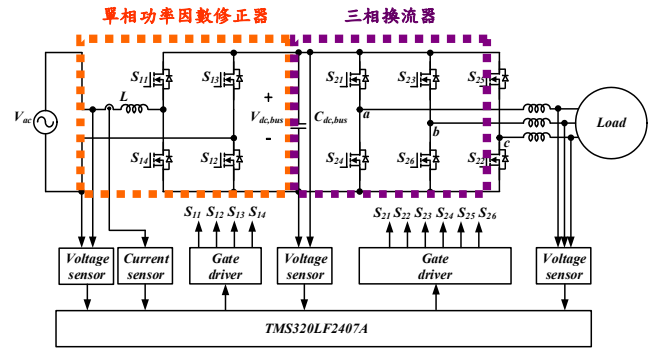


圖 7 實體電路架構圖

【軟體規劃】

本系統之軟體程式係採用組合語言撰寫而成，所撰寫之原始碼 (Source code) 經由組譯器 (Assembler) 編譯成機械語言的目的檔，再經由連結器 (Linker) 結合各目的檔，產生可執行之目的模組.out 檔，接著透過 JTAG 介面載入 TMS320LF2407A 程式記憶體內執行。

圖 7 為系統之主程式流程圖，可分為主程式與中斷服務程式 (Interrupt sever routine, ISR) 兩個部份。

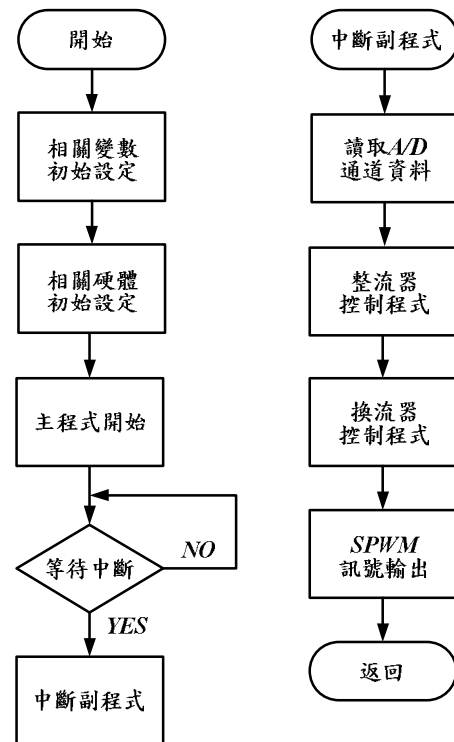


圖 7 系統主程式流程圖

首先將所使用之變數做記憶體配置與初始值設定，接著對週邊相關硬體做設定，而後開始等待中斷。中斷發生後，則進入中斷副程式內；首先讀取回授電

壓、電流值，接著進入整流器與換流器控制程式，經過判斷與運算後，產生兩組的 SPWM 訊號，分別控制單相全橋式升壓型整流器與三相全橋式換流器之功率開關。

VI. 實驗結果

本系統模擬之永磁式同步發電機參數係採用日本天空電子公司的 SKY-350 小型風力發電機做為依據，其參數如表 1 所示。將其參數做換算，即可得出系統電壓與頻率變動範圍，系統規格如表 2 所示。

表 1 SKY-350 小型風力發電機參數

構造	永磁式同步發電機		
極數	48 極		
轉速	100 r.p.m	200 r.p.m	300 r.p.m
電壓	30.9 V	62.0 V	91.6
電流	3.7 A	7.5 A	11.2 A
功率	115.5 W	467.1 W	1020.8 W

表 2 系統規格表

項目	符號	數值
輸入電壓	V_{in}	110 V _{ac} / 60 Hz
輸出電壓	V_o	30~120 V _{ac}
輸出頻率	f_o	40~120 Hz
輸出功率	P_o	1 kW

系統之實驗波形可分為單相全橋式升壓型整流器、三相全橋式換流器、燒機測試系統，以下將對實驗波形作一簡述及分析。

【單相全橋式升壓型整流器】

圖 8 為輸入市電電壓 110 V_{ac}/60 Hz、直流匯流排電壓 200 V，在輸出功率由四分之一負載 (250W) 上升至滿載 (1 kW) 之輸入電壓電流與輸出電壓波形。由圖可知，其輸入電壓與輸入電流皆為正弦波且同相位，經量測後功率因數皆可達 0.99。

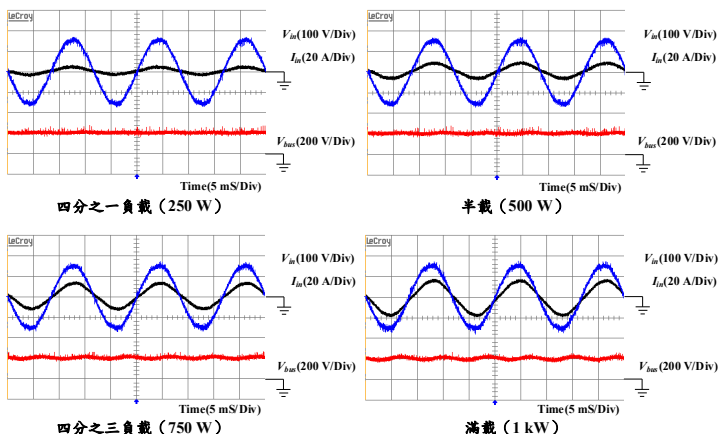


圖 8 單相全橋式升壓型整流器相關量測波形

【三相換流器之變頻功能】

圖 9 為輸入電壓 200 V_{dc}、輸出電壓 120 V_{ac}，在輸出功率 1 kW 下，頻率由 40 Hz 變動至 120 Hz 之電壓電流波形。由圖可看出，在任何頻率下，其輸出電壓皆能穩壓在 120 V_{ac}。

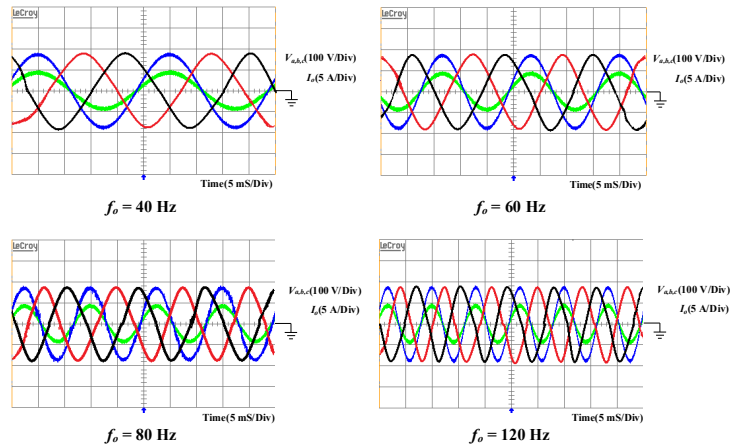


圖 9 三相換流器之變頻功能相關量測波形

【三相換流器之變壓功能】

圖 10 為輸入電壓 200 V_{dc}、輸出電壓頻率 60 Hz，在輸出功率 1 kW 下，輸出電壓由 30 V_{ac} 變動至 120 V_{ac} 之電壓電流波形。由圖可看出，其具有調變輸出電壓之功能。

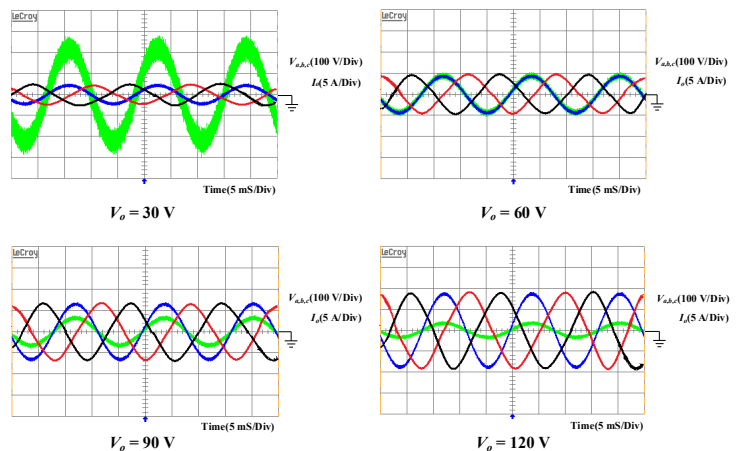


圖 10 三相換流器之變壓功能相關量測波形

【燒機測試系統】

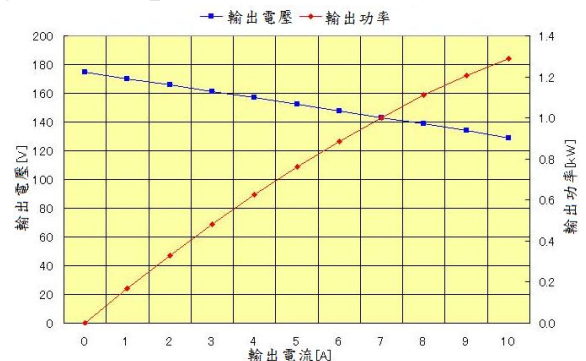


圖 11 SKY-350 風力發電機於轉速 300r.p.m 之特性曲線

圖 11 為 SKY-350 小型風力發電機在轉速 300 r.p.m 的情況下，由無載至滿載特性曲線。以下將利用此一特性曲線來進行系統量測，藉此達到模擬永磁式同步發電機之功能。

圖 12 為輸入系統之直流匯流排電壓 200 V_{dc}、輸出電壓 120 V_{ac}/120 Hz，在輸出功率由四分之一負載 (250W) 上升至滿載 (1 kW) 之輸出電壓電流波形。由圖可知，本文所提出之燒機測試系統確實具有模擬永磁式同步發電機之功能。圖 13 所示為燒機測試系統輸出功率與轉換效率關係，系統整體轉換效率從輕載變化至重載時，由 76.8% 上升至 90.2%。

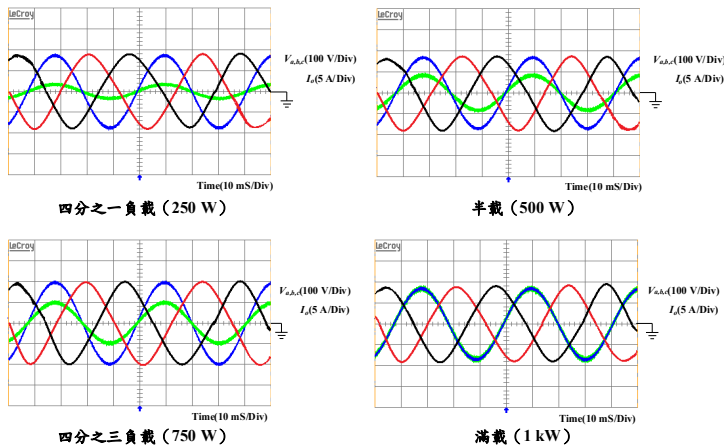


圖 12 燒機測試系統相關量測波形

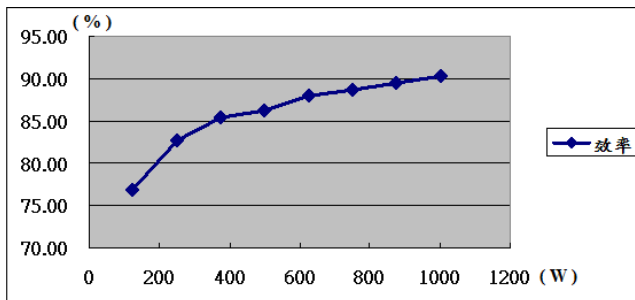


圖 13 燒機測試系統輸出功率與轉換效率關係

VII. 結論

本文提出一「風力發電轉換器之燒機測試系統」，其系統由單相全橋式升壓型整流器與三相全橋式換流器所組成。其中整流器係以平均電流模式控制，達成高輸入功率因數；而換流器採用比例控制，獲致一穩定之變壓變頻輸出。本系統係採用德州儀器公司所生產的 TMS320LF2407A 數位訊號處理器作為控制核心，藉此簡化硬體電路、降低系統成本。

最後，實作一輸出電壓 30~120 V_{ac} 與輸出頻率 40~120 Hz 之 1 kW 離型系統，並以實驗結果驗證其可行性。由實驗結果可知，此燒機測試系統確實具有模擬永磁式同步發電機之變壓變頻輸出的功能。

VIII. 誌謝

本研究承蒙國科會工程處「科學工業園區固本精進研究計畫」(計畫編號: 98C19)，謹此誌謝。

參考文獻

- [1] 蔡信行, 「替代燃料與再生能源」, 科學發展月刊, 第 365 期, 民國 92 年 5 月。
- [2] 施顏祥, 中華民國九十九年度再生能源電能躉購費率及其計算公式, 再生能源發展條例, 第 9 條第 1 項, 民國 99 年。
- [3] World Wind Energy Report 2009, World Wind Energy Association, WWEA, Mar. 2010.
- [4] 牛山泉, 「小型風車設計及製造」, 復漢出版社, 民國 71 年。
- [5] I. Paraschivoiu, Wind Turbine Design: with Emphasis on Darrieus Concept, Polytechnic, 2002.
- [6] 游振和、洪寶亮、蘇育辰、簡弘奇, 「風力發電的種類及控制模式概述」, 台電工程月刊, 第 75 期, 民國 96 年 5 月。
- [7] 子敬, 「電機機械精釋」, 超級科技圖書公司, 民國 90 年 2 月。
- [8] 林法正、魏榮宗, 「電機控制」, 東華書局股份有限公司, 民國 90 年。
- [9] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, Power Electronics, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [10] 溫榮弘譯, 「Power MOSFET 應用技術」, 初版, 全華科技圖書, 民國 93 年。
- [11] 溫坤禮、陳德超譯, 「最新交換式電源技術」, 初版, 全華科技圖書, 民國 87 年。
- [12] 梁適安著, 「交換式電源供給器之理論與實務設計」, 初版, 全華科技圖書, 民國 86 年。
- [13] 梁適安譯, 「高頻交換式電源供應器原理與設計」, 第二版, 全華科技圖書, 民國 84 年。
- [14] EPARC 著, 「電力電子學綜論」, 初版, 全華科技圖書, 民國 97 年。
- [15] TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide, Texas Instruments, 2002.
- [16] 林容益, 「TMS320F240X 組合語言及 C 語言多功能控制應用」, 全華科技圖書股份有限公司, 民國 94 年。