中國造船暨輪機工程學刊第二十八卷第二期 民國九十八年五月 Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.28, No.2, pp.107-118, 2009

先進船舶電力-PEMFC電池堆操作參數對性能影響之研究

夏曉文* 吳聖儒* 趙繼舜* 李宗麟**[†] 余威龍***

* 國防大學理工學院 動力及系統工程學系

** 國防大學理工學院 造船工程研究所

*** 陸軍專科學校 車輛工程科

關鍵詞:質子交換膜燃料電池、電池堆、性能分析、功率估算模式

摘 要

本文針對日趨成熟的先進電力系統一質子交換膜燃料電池之性能進行實驗研究,其中並探討同等規格 之單電池與電池堆在不同條件下,渠等性能(功率)所受影響之差異。實驗系統主體為300W之測試機台,測 試電池為單電池、雙電池及三電池,單電池反應面積為5x5 cm²,而操作參數則包括氫、氧計量比、氫氧加 濕(飽和狀態)溫度及電池溫度等五項,且以一次一因子法進行實驗。實驗結果顯示電池溫度對三者功率之 影響皆為最大,另以工作電流為25 Amp時,分析各電池之最佳性能(功率最大)及對應之主要操作因子水準。 此外,並利用迴歸法分析基準條件下之實驗數據,能有效地建立電池堆功率之計算模式。本研究相關成果 除可為先進船舶電力技術發展奠基外,亦有助於國內未來船用電力系統之應用。

前 言

近年來,世界各國產業使用石化能源的需求日益 增加,依據總部在法國巴黎的國際能源組織(International Energy Agency, IEA)最近一期發表的石油 市場報告(oil market report)指出,全球過去從2004年每 日需82.5百萬桶原油,到2008年預估每日需87.2百萬桶 原油[1],五年之間的增加幅度為5.7%,各年份統計的 石油用量如表1。然而石油蘊藏量有限,對於未來此一 能源可能用竭之衝擊,已讓全球高度意識到這項警 訊,故如何有效地開發新能源技術,以及探討各種綠 色替代能源,已經成為先進國家積極推動之研究工 作。目前在眾多的新興能源替代方案中,以使用氫能 的燃料電池作為選項已廣被討論,而船艦動力源如採 用燃料電池,則因具有高系統效率、低維護成本、具 螺旋發展性、低紅外線(IR)與聲訊跡(signature)、分散 式電力、模組化與多元平台應用等優點[2],因此,美 國海軍工程師學會(American Society of Naval Engineers, ASNE)期刊在2007年的專文中曾提及未來船艦的設計 方面,是把燃料電池做為下下代(navy after next)的動力 源考量[3],而相關的技術發展亦成為研究關注的焦 點。

表1 全球石油用量(2004年~2008年)統計分析表[1]

年份	2004	2005	2006	2007	2008
百萬桶/日	82.5	83.9	84.9	86.0	87.2

此外,英國造船工程師學會(The Royal Institution of Naval Architects, RINA)所屬刊物於2006年亦登載與 燃料電池發展有關且正在進行的DESIRE (Diesel Fuel Processor for Fuel Cells)與FELICITAS(Fuel Cell Power-Trains and Clustering in Heavy-Duty Transport)二項專 案[4],前者由荷蘭領軍,且與德國、土耳其及英國執 行跨國之合作,並分二階段爲水面船艦尋求以NATO F76號燃油經重組(reforming)後,做爲質子交換模燃料 電池之燃料氫氣來源,預計到2010年此案概念設計機 組規模可達2.5 MW;而後者則爲歐盟(EU)出資所主導 之計畫,其目的在發展燃料電池在道路、軌道與船舶 等運輸方面之重負載應用,該案所考量的動力輸出在 200 kW以上,且能量密度要達到200 kW/t,其中質子 交換模燃料電池即爲選項之一。

有關質子交換膜燃料電池的組成結構、工作原 理、實驗性能與水熱管理等方面的研究,分別回顧 如下。 1. 質子交換膜燃料電池組成結構與工作原理[5]

在燃料電池運作中,氫與氧分別進入陽極與陰極後,在觸媒的作用下,氫分子分解爲兩個氫離子(質子) 與兩個電子,電子經由外部電路作功,質子則經由具 有高水滲透性、高質子傳導性、無氣體滲透性之質子 交換膜移動到陰極,此時,陰極的氧分子經觸媒催化, 與電子結合成氧離子,並與氫離子結合成水,這些生 成水,一部分隨著氧排出,一部分則維持質子交換膜 的濕潤。

質子交換膜燃料電池的核心元件之一為膜電極組 (Membrane-Electrode Assembly, MEA)[6],由陰、陽兩 觸媒電極層,夾質子交換膜(PEM)所構成,其構造示 意圖如圖1;觸媒電極層則包括氣體擴散層(Gas Diffusion Layer, GDL)及觸媒層(Catalyst Layer, CL)等 兩層,燃料電池的化學反應即發生在觸媒層內部。

質子交換膜燃料電池另一主要元件為極板,其位 於氣體擴散層外側,負責提供燃料及作為燃料電池運 作時反應生成水與氣體的排除[6];流道具有多種型 式,Ferng與Su[7]以三維燃料電池計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)模型,研究不同流道對 電池性能的影響,所使用的流道類型包含蛇型流道 (serpentine flow channels)、直通型流道(parallel flow channels)、單通道流道(single-path flow channels)、多 通道流道(multi-path flow channels)、均深型流道(uniform depth flow channels)及漸深型流道(step-wise depth flow channels)等六類混合搭配,結果發現,蛇型 流道的性能表現優於直通型流道,漸深型流道的性能 表現優於均深型流道。

Wang等[8]針對不同形式蛇型流道的電池性能進 行分析,Scholta等[9]研究觀察,縮小蛇型流道彎角處 的截面積,可有助氣體快速通過。Li與Sabir等[10]彙 整流道型態與優缺點分析,其中,蛇型流道因會強迫 氣體流經整個流道,故有較好的性能表現,但又因路 徑過長,使水的排除困難,惟多通道之蛇型流道,則 可避免此種缺失。Su等[11]觀察流道的情形,發現蛇 行流道在下風處,因爲氣體幾乎消耗殆盡,故較易形 成水氾濫,另在彎角處,也容易造成淤積。Yan等[12] 隨著流道數量的增加,電流密度便越均勻,同時使電 池性能表現更佳。Liu等[13]以一具有透明端板之質子 交換膜燃料電池,觀察流道中的流體動力特性。

Quan等[14,15]以數值模擬觀察水的流動,發現當 水量過多時,水流經流道彎角處會因重力、壁面剪應 力等影響,產生堵塞,並阻擋反應氣體進入氣體擴散 層,影響電池效能,而水在流道中的分佈不均,將造 成不同的壓力降,導致電池性能不穩。Singh等[16]模 擬電池運作,發現水在低電流時,係由陰極傳輸至陽



極,高電流時,則由陽極傳輸至陰極。Wang等[17]量 測蛇型流道電池內MEA陽極端的溫度分佈,發現下游 的溫度高於上游,且隨著電流密度與時間的增加,電 池溫度亦會上升,並有不均勻的現象發生。

2. 實驗性能與水熱管理

宋隆裕等[18]以一次一因子法,分析水熱條件對 質子交換膜燃料電池性能的影響,結果發現:(1)電池 性能隨著反應氣體加濕溫度的增加而增加,其中,陽 極反應氣體對電池的影響,優於陰極反應氣體;(2)陰 極反應氣體的流量增加,性能將隨之增加,但陽極反 應氣體流量的增加,對性能提升無顯著影響;(3)提高 氫氣壓力對電池性能無顯著影響,但提高氧氣壓力 時,電池性能將明顯增加;(4)當電池溫度超過70℃, 性將大幅下降。

Kaytakoglu與Akyalcin[19]以田口法實驗發現,因 子影響順序分別為電池背壓、加濕溫度、流率及電池 溫度等。Wahdame等[20]以實驗設計法觀察質子交換 膜燃料電池中,陰、陽兩極氣體流率與氫氣、空氣壓 力,在電池特定功率時的影響,結果發現,氫氣與空 氣壓力在某些特定的電流密度下,其貢獻率遠低於氣 體流率,此現象與實驗前的認知並不相同,依前述文 獻[19],電池背壓爲影響電池功率最顯著的因子,然 而,經Wahdame等實驗後發現,在某些功率下並非如 此。

Liu等[13]研究發現:(1)增加電池溫度,會使流道 中因凝結(Condensation)而產生的液態水減少,而增加 電池溫度,便能使電池性能上升,原因如下:A.電池 溫度上升,會加快電化學反應,並活化、提升觸媒效 能及B.較高的電池溫度,會減少凝結,進而減少液態 水生成,提升流道內的質量傳輸性;(2)提升氧氣流 率,可以使更多的液態水排離陰極流道,並提升電池 性能,但太高的氧氣流率,卻會使電池乾化,導致性 能極速下降。 Wang等[8]研究發現,流道內氣體壓降造成的功率 損失,因遠小於電池輸出功率,故壓降損失可予忽略。 Janssen與Overvelde[21]研究發現,若質子交換膜水含 量不足,將因電阻過大,而影響質子傳導,導致電池 性能下降;另外,陰極的反應效率較陽極為慢,所以 陰極流道設計的良窳,將影響氣體能否有效利用。 Guvelioglu與Stenger[22]則發現,電池運轉期間,水將 因電滲作用影響,由陽極往陰極移動,造成陰極端的 水含量較陽極端爲高。Litster等[23]模擬氣體擴散層中 水的運動情形,發現水由觸媒層,通過氣體擴散層中 水的運動情形,發現水由觸媒層,通過氣體擴散層到 達流道,並在氣體擴散層的表面凝結成小水滴後,藉 氣體排出流道。Wood等[24]發現反應氣體於加濕處理 後(尤其陽極),可減少電壓的損失。Tuber等[25]觀察 流道中水的狀況,發現氧氣流量上升,有助流道中生 成水的排除,以及避免泛水(flooding)。

Mosdale與Srinivasan[26]提出,較小的電流密度, 較大的氣體流速,較低的氣體加濕度,較高的電池溫 度,及較低的壓力,會導致乾化,反之,則導致泛水。 Baschuck等[27,28]以一維、非等溫的模型模擬PEMFC 的性能發現:(1)陰極積水,會造成能量的損失;(2) 溫度的不均現象,在電池堆更明顯;(3)質子交換膜乾 化,將導致膜的阻抗增加,並產生局部高溫及(4)電池 溫度增加,將因質傳損失致性能降低。Hao等[29]描述 生成水的傳輸現象:水並不會均勻的分佈在整個膜的 表面,且水分子於陰、陽兩極傳輸時,其到達橫向平 衡後,會影響並拉長氣體擴散層擴散的時間;電滲 (electro-osmotic)作用會影響陽極端高電流密度區域的 膜發生乾化,因此水分將再反擴散回陽極端,此乾化、 反擴散現象,將會耗費更多的時間,才會到達平衡。

Singh等[16]研究發現,電池於高電流運作時,若 無良好排水機制,將導致泛水。Paganin等[30]實驗發 現電池堆因生成水無法排除,故性能表現比單電池 差,且隨著電池堆的數量的增加,性能表現越差。Yan 等[31]以一維數學模擬分析電池水熱管理發現:(1)電 池陽極溫度如果升高,將會造成膜的乾化;(2)電流密 度增加,將因電滲作用影響,造成膜的陽極端乾化; (3)高電流密度下,溫度的分佈會有明顯不均,甚至導 致膜的損壞。

燃料電池活化極化由活化電阻(與觸媒及電解質的組成有關)引起,歐姆極化由歐姆阻抗或內電阻引起 (係電子或質子於電極、膜、碳板間傳導時所產生電 阻,及電極、膜、碳板之接觸電阻),濃度極化則因氣 體供應不足而引起[6]。Matamoros與Bruggemann[32] 建立非等溫之三維模型,以數值模擬方式分析後發 現,燃料電池在低、中電流密度時,因電化學反應而 產生極化現象,至高電流密度時,則受到歐姆損失 (ohmic losses)及濃度損失(concentration losses)影響, 而當電池過於乾燥時,將產生極大的歐姆損失,如氧 氣傳輸過慢,亦會增加集中損失,造成電池性能下降。

水熱管理為質子交換膜燃料電池作動期間,最需 注意的項目之一,良好的水熱管理,可使質子交換膜 保持濕潤,並使陰極不被泛水[6],至於如何達成良好 的水熱管理之要項如下:

保持氣體的加濕量:要保持質子交換膜在溼潤狀 態,就必須設法從外部補充水,較通常的方式,爲採 用氣體加濕,讓加濕的氣體將水帶到質子交換膜。

控制反應氣體的溫度及濕度:高溫及低濕度的反 應氣體,容易使流道中的水分蒸發,導致膜乾化,故 適度的溫度與濕度,便能保持膜的濕潤,而不泛水, 進而維持燃料電池良好的性能。

控制電池的操作溫度:電池的溫度如過高,容易 使膜的水分蒸發,故適度的溫度,可保持膜的濕潤。

綜合以上所述,質子交換膜燃料電池具有體積 小、重量輕及效率高等優勢,且先進國家已將其運用 於船舶動力或電力系統之中,並展現出其效能,因此 國內爲因應未來船舶技術之發展,則亟需及早投入此 一領域之研究與累積相關經驗。由於回顧中顯示在電 池堆性能方面的研究相當有限,故本文即以現有的實 驗系統與基礎,進一步針對質子交換膜燃料池提出探 討,並以一次一因子法進行電池堆之實驗研究,其中 包括氫、氧計量比、加濕溫度、電池溫度等五項操作 參數,對同等規格之單電池與電池堆在功率上之比 較,以及各操作參數對單電池與電池堆性能之影響分 析。此外,並在實驗之基準條件下,採用迴歸分析法 (regression analysis method)建立電池堆功率估算模 式,以供設計參考與應用。

實驗系統

本文在實驗研究過程中所採用的實驗系統為 300W燃料電池測試機台,受測件包括質子交換膜單、 雙、三燃料電池各一組(實體圖如圖2,設計圖如圖3), 關於各項組件之規格(如)與特徵分別說明如下。

1. 燃料電池測試件

燃料電池主要組件包含膜電極組、氣封墊片、(雙) 極板、集電板與端板等部分,各組件厚度與面積如表 2,其規格並說明如下:

(1) MEA膜電極組:

膜電極組為燃料電池核心元件,電池的化學 反應即在此處發生,本研究所使用之質子交換膜 (含觸媒層)為Gore公司所生產5620系列,其膜厚 為3.5μm,陽極觸媒層0.45 mg/cm²為Pt材質製成, 陰極觸媒層0.60 mg/cm² Pt材質製成,反應面積 5×5 cm²。

實驗用燃料電池組件厚度與面積表 層次別(項次) 厚度 面積 備考 端板 15 mm 10×10 cm² 鋁合金材質 10×10 cm² 集電板 3 mm 銅鍍金材質 10×10 cm² 極板(單面流道) 3 mm 複合碳板材質 氣封墊片(1) 0.5 mm $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 鐵弗巃 氣體擴散層(2) 0.4 mm $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 陽極觸媒層(3) 3.5 um $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 質子交換膜(4) 膜雷極組 陰極觸媒層(5)

氣體擴散層(6)	0.4 mm	$5 \times 5 \text{ cm}^2$	
	0.5 mm	5×5 cm ²	鐵弗龍
雙極板(雙面流道)	3 mm	10×10 cm ²	複合碳板材質
雙電池(1)~(7)			
雙極板(雙面流道)	3 mm	$10 \times 10 \text{ cm}^2$	複合碳板材質
三電池(1)~(7)			
極板(單面流道)	3 mm	10×10 cm ²	複合碳板材質
集電板	3 mm	$10 \times 10 \text{ cm}^2$	銅鍍金材質
端板	15 mm	10×10 cm ²	鋁合金材質



實驗用燃料電池實體圖 圖2



氣體擴散層(碳紙)則為SGL公司所生產10BC 系列,單面塗佈MPL(Micro Porous Layer),厚度 0.4mm(含MPL),基材疏水5wt%,MPL疏水 20wt%,面積重量0.0012g/cm²。

氣封墊片主要功能係用來密合(雙)極板與膜 電極組間的接合,以避免氣體外洩,為Gore公司 所生產SG05XL-J系列,材質為鐵弗龍,厚度0.5 mm,密度0.6g/cm³。

(3) (雙)板板:

(2) 氣封墊片:

(雙)極板內含(雙)流道,可分配反應氣體至 反應區域進行反應,同時分隔氣氣與氧氣,並傳 導電能與熱能:本實驗所使用之(雙)極板面積10 ×10 cm²,厚度3 mm,為Schunk複合碳板材質, 流道加工面積5×5 cm²,流道寬度與深度皆為0.9 mm,肋條寬度1mm。

(4) 集電板:

集電板主要功能在於收集傳導電流,爲銅鍍 金材質,厚度3mm。

(5) 端板:

端板用以組裝電池,並固定所有組件,其面 積10×10 cm²,厚度15 mm,鋁合金材質,並於表 面實施陽極硬膜封孔處理。

2. 實驗測試設備

本研究所使用之實驗平台,爲國內開發之燃料電 池測試機台,內含氣體供應、流量控制、溫度控制、 增濕及電子負載控制等五大系統,測試功率上限 300W,電流上限60A,電壓上限50V,測試溫度範圍 25~95°C,使用氣體為陽極氫氣及陰極氧氣(或空氣)兩 種,可應用於單電池及電池堆之測試,其分析項目包 含電流對時間、電壓對時間、功率對時間與Tafel資料 等,實驗量測所得各項數據可由電腦自動記錄,並繪 製其性能曲線。

窗 驗 設計

目前,產、學界所運用的實驗方法種類繁多,如 「試誤法」、「一次一因子法」、「全因子實驗法」與「田 口法」等,其中,「一次一因子法」因於實驗中,僅變 動一個因子,可分別獨立探討每一個因子對實驗的影 響,故本研究初步選定「一次一因子法」以執行實驗, 期能個別分析各因子對單電池及電池堆性能之影響, 及其影響差異。實驗設計如下:

1. 參數設定

本文所考量之操作參數,計氫氣計量比(1.0X~3.0 X)、氧氣計量比(1.0X~3.0X)、電池溫度(50℃~80℃)、

表2

氫氣加濕溫度(50°C~80°C)、氧氣加濕溫度(50°C~80°C) 等五項,其中流量參數X之單位為cc/min-A,係依理想 氣體公式計算;在1atm、0°C及單電池時,1安培電流 量相對應之氫氣及氧氣之體積消耗率為6.9及3.5cc/ cell-min-A,故X為在理想化學反應下,每一單電池每 分鐘每安培需要之反應氣體體積流量,將隨著壓力及 溫度之不同而有所改變;如為N個電池及I電流量,則 須再乘以NI,以滿足不同電池數目電池堆所需的基本 流量。

2. 實驗程序

- (1) 實驗前,固定電池的操作參數:氫氧計量比1.5X:
 2.5X、電池溫度60℃、氫氧加濕溫度70℃,並以 其做為基準條件。
- (2) 實驗期間,每執行一次實驗,僅變動一項參數, 如氫氣計量比自1.0X逐項變為3.0X,餘參數則維 持項次(1)的標準不予變動。

- (3) 實驗數據(功率)之量測,以實驗機台Tafel資料方式,於電流0、0.1、0.2、0.4、0.6、1、1.4、2.2、3、4.6、6.2、8、10、15、20與25安培時記錄。
- (4) 相關實驗數據以MATLAB軟體繪製圖表,以利觀 察性能狀況。

結果與討論

各操作參數計氫氣計量比、氧氣計量比、電池溫 度、氫氣加濕溫度及氧氣加濕溫度等五項,以實驗所 得之功率値(工作電流25Amp時,實驗結果彙整表如表 3)進行比較分析。

- 1. 實驗結果分析
- (l) 氫氣計量比

改變氫氣計量比:1.0X、1.5X、2.0X、2.5X、 3.0X(其餘參數:氧氣計量比為2.5X、電池溫度為 60℃、氫、氧加濕溫度為70℃、背壓為0),對各電

西か	計量	比(X)	電池溫度	氫氣溫度	氧氣溫度		25 Amp 功率值(W)	
	氫氣	氧氣	(°C)	(°C)	(°C)	單電池	雙電池	三電池
	1					17.021	27.905	42.831
1.5				16.960	28.132	42.494		
1	2	2.5	60	70	70	16.954	27.734	42.103
	2.5					16.709	27.557	41.895
	3				_	16.843	27.569	41.858
		1				16.898	25.944	39.047
		1.5				16.935	25.418	41.791
2	1.5	2	60	70	70	16.941	26.420	42.035
		2.5				16.996	26.005	40.636
		3				17.033	26.866	42.219
			50			16.831	25.724	40.043
2	60	70	70 70	16.996	26.848	41.253		
5	1.5	4.5	70	70	70	16.941	29.953	42.934
			80			16.532	30.833	37.791
				50		16.801	26.115	40.801
4	15	25	60	60	70	16.495	25.828	41.003
4	1.5	2,5	00	70	70	16.801	25.870	41.106
				80		16.947	26.255	41.577
······································			50	16.972	27.722	42.158		
5	5 1.5	5 2.5	1:5 2.5 60	70	60	16.874	27.001	41.931
. د.				2.3 00 70	70	16.917	26.506	41.559
			80	16.911	26.072	40.954		

表 3 一次一因子法實驗結果彙整表

S.W. Shiah, S.J. Wu, C.C. Chao, T.L. Lee and W.L. Yu: Advanced Shipboard Electric Power-Study on the Effect of Performance for the PEMFC Stack under Different Operational Parameters



池性能影響如圖4及圖5,單電池、雙電池與三電 池性能分別説明如下:

- A. 單電池:最高功率發生在1.0X(功率值:17.021
 W),較最低功率(2.5X,功率值:16.709W)增加1.87%。
- B. 雙電池:最高功率發生在1.5X(功率值:28.132
 W),較最低功率(2.5X,功率值:27.557W)增加2.09%。
- C. 三電池:最高功率發生在1.0X(功率值:42.831
 W),較最低功率(3.0X,功率值:41.858W)增加2.33%。
- (2) 氧氣計量比
 改變氧氣計量比:1.0X、1.5X、2.0X、2.5X、3.0X(其
 餘參數: 氫氣計量比1.5X、電池溫度60℃、氫、氧加



圖7 同等規格單、雙、三電池改變氧氣計量比之I-P 性能曲線圖

濕溫度70℃、背壓0),對各電池性能影響如圖6及圖7, 單電池、雙電池與三電池性能説明如下:

- A. 單電池:最高功率發生在3.0X(功率值:17.033
 W),較最低功率(1.0X,功率值:16.898W)增加
 0.80%。
- B. 雙電池:最高功率發生在3.0X(功率值:26.866
 W),較最低功率(1.5X,功率值:25.418W)增加
 5.70%。
- C. 三電池:最高功率發生在3.0X(功率值:42.219
 W),較最低功率(1.0X,功率值:39.047W)增加
 8.12%。
- (3) 電池溫度

改變電池溫度:50℃、60℃、70℃、80℃(其餘參數:氫氣計量比1.5X、氧氣計量比2.5X、氫、氧加濕

112





圖, 向寺祝俗里、受、二电心以爱电心温度之中的 能曲線圖

溫度70℃、背壓0),對各電池性能影響如圖8及圖9, 單電池、雙電池與三電池性能説明如下:

- A. 單電池:最高功率發生在60℃(功率値:16.996
 W),較最低功率(80℃,功率値:16.532)增加
 2.81%。
- B. 雙電池:最高功率發生在80℃(功率值:30.833
 W),較最低功率(50℃,功率值:25.724W)增加
 19.86%。
- C. 三電池:最高功率發生在70℃(功率値:42.934
 W),較最低功率(80℃,功率値:37.791W)增加
 13.61%。
- (4) 氫氣加濕溫度

改變氫氣加濕溫度:50℃、60℃、70℃、80℃(其 餘參數:氫氣計量比1.5X、氧氣計量比2.5X、氧氣加



圖10 同等規格單、雙、二電池改變氫氣加濕溫度乙 I-V性能曲線圖



圖11 同等規格單、雙、三電池改變氫氣加濕溫度之 I-P性能曲線圖

濕溫度70℃、背壓0),對各電池性能影響如圖10及圖11,單電池、雙電池與三電池性能説明如下:

- A. 單電池:最高功率發生在80℃(功率値:16.947
 W),較最低功率(60℃,功率値:16.495W)增加
 2.74%。
- B. 雙電池:最高功率發生在80°C(功率值:26.255
 W),較最低功率(60°C,功率值:25.828W)增加
 1.65%。
- C. 三電池:最高功率發生在80°C(功率值:41.577
 W),較最低功率(50°C,功率值:40.801W)增加
 1.90%。
- (5) 氧氣加濕溫度

改變氧氣加濕溫度:50℃、60℃、70℃、80℃(其 餘參數:氫氣計量比1.5X、氧氣計量比2.5X、氫氣



圖12 同等規格單、雙、三電池改變氧氣加濕溫度之 I-V性能曲線圖



圖13 同等規格單、雙、三電池改變氧氣加濕溫度之 I-P性能曲線圖

加濕溫度70℃、背壓0),對各電池性能影響如圖12及 圖13,單電池、雙電池與三電池性能説明如下:

- A. 單電池:最高功率發生在50℃(功率值:16.972
 W),較最低功率(60℃,功率值:16.874W)增加
 0.58%。
- B. 雙電池:最高功率發生在50℃(功率值:27.722
 W),較最低功率(80℃,功率值:26.072W)增加
 6.33%。
- C. 三電池:最高功率發生在50℃(功率值:42.158
 W),較最低功率(80℃,功率值:40.954W)增加
 2.94%。
- 2. 參數影響之探討
- (1) 各操作參數對電池性能的影響分析如下:
- A. 單電池:以電池溫度影響最大,其次為氫氣加濕 溫度、氫氣計量比、氧氣計量比及氧氣溫度。

表4	一次一	·因子	法實驗	結果分	·析表

項次	單電池		雙電池		三電池	
	IP(%)	EP	IP(%)	EP	IP(%)	EP
1	1.87	3	2.09	4	2.33	.4
2	0.80	4	5.70	3	8.12	2
3	2.81	1	19.86	1	13.61	1
4	2.74	2	1.65	5	1.90	5
5	0.58	5	6.33	2	2.94	3

IP(%):表3中各電池該項次實驗數據組最低與最高功率提高之百分比 EP:對應IP之影響排序

- B. 雙電池:以電池溫度影響最大,其次為氧氣加濕
 溫度、氧氣計量比、氫氣加濕溫度及氫氣計量比。
- C. 三電池:以電池溫度影響最大,其次為氧氣計量 比、氧氣加濕溫度、氫氣計量比及氫氣加濕溫度。
- (2)依實驗結果分析表(如表4)所述影響排序,對各電 池影響最為顯著項目皆為電池溫度,其餘因子影 響排序則全然不同,顯見即使以單電池的架構完 成電池堆的設計組裝,其操作參數對電池堆的效 能影響,與對單電池之效能影響仍然有著極大的 差異性;再觀察氧氣計量比及氧氣加濕溫度部份 亦可發現,上述兩因子於單電池的影響偏低,至 雙電池及三電池後,其影響程度加重,此兩項因 子因與水、熱管理有關,故可推論,隨著電池數 量的增加,水、熱管理的影響將隨之加重,同時 間接影響到操作參數對電池性能表現的差異。
- (3) 當氧氣計量比固定為2.5X時,各電池氫氣計量比於1.0X~1.5X時功率最佳,如再持續加大氫氣計量比,則發現各電池的功率,有逐漸下降的趨勢, 顯現氧氣計量比於2.5X時,搭配氫氣計量比 1.0X~1.5X,將使電池功率有最佳的表現,故當氧 氣計量比固定於2.5X,而氫氣計量比持續增加時,因無更多的氧氣與氫氣反應,反而造成氫氣 的浪費,影響燃料電池性能表現。
- (4) 當氫氣計量比固定為1.5X時,各電池氧氣計量比 自1.0X起至2.0X時,功率即有明顯上升現象,於 2.0X後,上升幅度趨緩,以3.0X功率最高,呼應 前述,足夠濃度的氧氣計量比,可與氫氣充分反 應,進而使得性能提升;但當氧氣濃度到某一程 度後,性能已維持在高檔,再繼續增加氧氣計量 比,雖有可能使性能再提升,但提升之幅度小, 反而造成氧氣的浪費。
- (5) 電池溫度於一次一因子法中,係影響電池性能之 首要因素;單電池於60°C時,功率最大,當溫度 再提昇,則性能下降,三電池於70°C時功率最大,

表5 在基準條件下,不同電池之功率與電流函數式 係數值

係數值 電池數 Co	<i>C</i> 1	C_2	$C_2^* = -C_2 \times 10^2$
單電池(N _c =1) 0.078	0.822	-0.596×10 ⁻²	0.596
雙電池(N _c =2) 0.166	1.618	-2.244×10 ⁻²	2.244
三電池(N _c =3) 0.232	2.426	3.128×10 ⁻²	3.128

表6 C₀、C₁及C,*與電池個數Nc之線性迴歸係數

項次	A ₀	<i>A</i> ₁	RSS	R ²
C₀	4.667×10 ⁻³	7.7×10 ⁻²	8.07×10 ⁻⁵	0.993
Cı	1.8×10 ⁻²	0.802	2.40×10 ⁻⁵	0.999
C ₂ *	-0.543	1.266	9.73×10 ⁻²	0.971

當溫度再上升,則性能下降;雙電池於80℃時功 率最大,惟觀察60~70℃時,發現性能提升幅度最 大,70℃之後,性能增加幅度減緩,如再增加溫 度,亦應將造成功率下降;故當電池溫度增加時, 有助於電化學反應的產生,可提升性能,惟當電 池溫度提升至某一程度後,原燃料端用來濕潤 MEA的飽和水分,將因電池溫度偏高形成蒸汽, 使濕潤MEA之水分不足,導致乾化後造成性能下 降。

- (6) 當氫氧計量比1.5X:2.5X、電池溫度60℃、氧氣加濕溫度70℃時,各電池亦皆在氫氣加濕溫度80℃時功率最大,顯見當氫氣加濕溫度越高時,所攜帶的飽和水分越多,自然可提升MEA的濕潤,進而提升功率。另當氫氧計量比1.5X:2.5X、電池溫度60℃、氫氣加濕溫度70℃時,各電池皆在氧氣加濕溫度50℃時功率最大,而此亦說明在陰極端,電池在反應期間,本身即會產生水,如氧氣加濕溫度升高,所攜帶的水分也隨之增加, 便將造成泛水現象,致使性能降低。
- (7)上述以一次一因子法實驗,得到各電池於最佳性能時,各主要操作因子水準(單電池:氫氧計量比1.0X:3.0X、電池溫度60℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度80℃、氫氣加濕溫度50℃)皆不相同,顯見,單電池設計完成,並發









展為電池堆後,其因水、熱管理,或組裝等因素, 將導致性能發生變化,而原始單電池之操作參 數,並無法類比運用至電池堆使用。

電池溫度60℃、氫氧加濕溫度70℃等,並取各電 流對應之平均功率値予以分析,則不同電池功率Pc與 電流I之關係如圖14所示,該圖中曲線並可適當以二次 多項式表示之,其函數式為:

$$P_{c}(N_{c},I) = C_{0} + C_{1}I + C_{2}I^{2}$$
(1)

其中Nc為電池之個數,C₀、C₁及C₂為二次多項式 之係數,且與電池個數有關,其值如表5所列。從圖 14中可知,雖然雙電池與三電池反應面積較單電池 大,但當電流愈大時,前二者功率之增加則較單電池 為平緩,此也說明電池堆的性能在電流愈大時,其內 部水熱管理的影響愈趨明顯,而導致較多的毆姆損 失。

為進一步暸解公式(1)中之係數 $C_i(C_0 \cdot C_1 \bigcup C_2^*)$ 與 電池個數 N_c 之關係,則可藉圖15之線性迴歸分析求 出,並可表示成: $C_i(N_c) = A_0 + A_1 N_c$

 A_0 與 A_1 爲線性迴歸係數,其結果如表6。該表中之 RSS為殘差平方和(residual sum of squares),而 R^2 則爲 判定係數(coefficient of determination)。殘差平方和愈 小或決定係數愈趨近1,則代表迴歸方程式的預測模 式愈準確。從表6與圖15之比較中可得知, C_0 及 C_1 二者 與其線性迴歸結果非常吻合,至於 C_2^* ,雖然線性迴歸 之殘差平方和較大,但其決定係數顯示仍具有相當的 **進確性**。

綜合公式(1)與公式(2)以及表5與表6,則可有效地 建立電池堆功率之計算模式,此一模式雖在基準條件 下推導出,但其方法亦將可提供其他條件之應用。

3. 電池堆功率計算模式

為深入探討電池堆功率之計算,今以前述電池操 作參數之基準條件為考量,即氫氧計量比1.5X:2.5X、

結論與建議

本文針對質子交換膜燃料電池之單電池與電池 堆進行性能影響研究,以供國內先進船舶電力技術於 發展設計時之奠基,經相關實驗結果與分析,可獲致 以下結論與建議:

- 影響質子交換膜燃料電池性能之操作因子,於單 電池及電池堆之影響效應皆不相同,其中電池溫 度對三者功率之影響皆爲最大,而部分因子於單 電池操作期間,影響性能效應較低,惟隨著電池 數量的增加,其影響效能將隨之增大,如氧氣計 量比等與水、熱管理相關之因子,將隨著電池數 的增加,其對性能的影響亦將增加。
- 電池堆的設計,係根據單電池性能表現及系統使 用需求而定,惟經實驗發現,單電池與電池堆的 最佳性能表現之條件,卻不盡相同,其將因水、 熱管理,或組裝技術等因素,產生因子水準的差 異性,故其操作期間的因子設定,無法完全參照 單電池之操作狀況訂定,應再以實驗或學理檢視 之。
- 從本研究之實驗數據中,可利用迴歸分析方法, 有效地建立電池堆功率之計算模式,且其可表示 成工作電流與電池數之函數關係,此一模式雖在 基準條件下推導出,但該方法亦將可提供其他條 件之應用。
- 在本研究中,以一次一因子實驗法進行分析操作 參數對單電池與電池堆性能的影響差異,該方法 雖可分別獨立探討每一個因子對實驗的影響,但 對於因子與因子間之交互作用尙無法評估,故未 來如能結合田口法或其它實驗設計法,則將更具 有研究成果。

謝

本文承國科會(NSC 95-2221-E-606-039)研究經費 補助及工研院能環所燃料電池研究室之實驗協助與 指導,特此致謝。

誌

參 考 文 獻

- IEA, Oil Market Report, p.51. (adopted from http://omrpublic.iea.org/currentissues/full.pdf) (2008).
- Lukas, M., R. Sanderson, G. Steinfeld, S. Abens, A. Nickens, D. Hoffman, and M. Cervi, "Ship Service Fuel Cell First Generation Prototype Demonstration," ASNE Advanced Naval Propulsion Symposium, October 30-31 2006, Arlington, VA, USA (2006).
- Webster, J. S., H. Fireman, D. A. Allen, A. J. Mackenna, and J. C. Hootman, "US Navy Studies on Alternative Fuel Sources and Power and Propulsion Methods for Surface Combatants and Amphibious Warfare Ships," *Naval Engineers Journal*, Vol. 119, No.2, pp.35-48 (2007).
- RINA, "Navies Focus on Onboard Fuel Processing," Warship Technology, May 2006, pp.12-13 (2006).
- 蔡克群,"氫能經濟趨勢下定置型燃料電池發電系統發 展",機械月刊,第31卷,第10期,pp.102-113 (2005)。
- 曲新生,"質子交換膜燃料電池技術探討",化工技術, 第12卷,第8期,pp.109-123 (2004)。
- Ferng, Y.M. and A. Su, "A Three-Dimensional Full-Cell CFD Model Used to Investigate the Effects of Different Flow Channel Designs on PEMFC Performance," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.32, pp.4466-4476 (2007).
- Wang, X.D., Y.Y. Duan, W.M. Yan, and X.F. Peng, "Local Transport Phenomena and Cell Performance of PEM Fuel Cells with Various Serpentine Flow Field Designs," *Journal of Power Sources*, Vol.175, pp.397-407 (2008).
- Scholta, J., G. Escher, W. Zhang, L. Kuppers, L. Jorissen, and W. Lehnert, "Investigation on the Influence of Channel Geometries on PEMFC Performance," *Journal* of Power Sources, Vol.155, pp.66-71 (2006).
- Li, X. and I. Sabir, "Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-Field Designs," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.30, pp.359-371 (2005).
- Su, A., F.B. Weng, C.Y. Hsu, and Y.M. Chen, "Studies on Flooding in PEM Fuel Cell Cathode Channels," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.31, pp.1031-1039 (2006).
- 12. Yan, W.M., C.Y. Soong, F. Chen, and H.S. Chu, "Effects of Flow Distributor Geometry and Diffusion Layer

Porosity on Reactant Gas Transport and Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.125, pp.27-39 (2004).

- Liu, X., H. Guo, F. Ye, and C.F. Ma, "Flow Dynamic Characteristics in Flow Field of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.33, pp.1040-1051 (2008).
- Quan, P., B. Zhou, A. Sobiesiak, and Z. Liu, "Water Behavior in Serpentine Micro-Channel for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cathode," *Journal of Power Sources*, Vol.152, pp.131-145 (2005).
- Jiao, K., B. Zhou, and P. Quan, "Liquid Water Transport in Parallel Serpentine Channels with Manifolds on Cathode Side of a PEM Fuel Cell Stack," *Journal of Power Sources*, Vol.154, pp.124-137 (2006).
- Singh, D., D.M. Lu and N. Djilali, "A Two-Dimensional Analysis of Mass Transport in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 37, pp.431-452 (1999).
- Wang, M., H. Guo and C. Ma, "Temperature Distribution on the MEA Surface of a PEMFC with Werpentine Channel Flow Bed," *Journal of Power Sources*, Vol.157, pp.181-187 (2006).
- 宋隆裕、顏貽乙、何淑梅、曹芳海,"水熱條件對質子 交換膜燃料電池性能的影響",*科儀新知期刊*,第25 卷,第6期,pp.92-101 (2004)。
- Kaytakoglu, S. and L. Akyalcin, "Optimization of Parametric Performance of a PEMFC," *International Journal* of Hydrogen Energy, Vol.32, pp.4418-4423 (2007).
- Wahdame, B., D. Candusso and J. Kauffmann, "Study of Gas Pressure and Flow Rate Influences on a 500W PEM Fuel Cell, Thanks to the Experimental Design Methodology," *Journal of Power Sources*, Vol.156, pp.92-99 (2006).
- Janssen, GJ.M. and M.L.J. Overvelde, "Water Transport in the Proton-Exchange Membrane Fuel Cell: Measurements of the Effective Drag Coefficient," *Journal of Power Sources*, Vol.101, pp.117-125 (2001).
- 22. Guvelioglu, GH. and H.G. Stenger, "Computational Fluid Dynamics Modeling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.147, pp.95-

106 (2005).

- Litster, S., D. Sinton and N. Djilali, "Ex Situ Visualization of Liquid Water Transport in PEM Fuel Cell Gas Diffusion Layers," *Journal of Power Sources*, Vol.154, pp.95-105 (2006).
- Wood, III D.L., J.S. Yi and T.V. Nguyen, "Effect of Direct Liquid Water Injection and Interdigitated Flow Field on the Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Electrochimica Acta*, Vol.43, No.24, pp.3795-3809 (1998).
- Tuber, K., D. Pocza and C. Hebling, "Visualization of Water Buildup in the Cathode of a Transparent PEM Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol.124, pp.403-414 (2003).
- Mosdale, R. and S. Srinivasan, "Analysis of Performance and of Water and Thermal Management in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Electrochimica Acta*, Vol. 40, No.4, pp.413-421 (1995).
- Baschuk, J.J. and X. Li, "Modelling of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with Variable Degrees of Water Flooding," *Journal of Power Sources*, Vol.86, pp.181-196 (2000).
- Rowe, A. and X. Li, "Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.102, pp.82-96 (2001).
- Hao, L., H. Yu, J. Hou, W. Song, Z. Shao and B. Yi, "Transient Behavior of Water Generation in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol.177, pp.404-411 (2008).
- Paganin, V.A., E.A. Ticianelli and E.R. Gonzalez, "Development of Small Polymer Electrolyte Fuel Cell Stacks," *Journal of Power Sources*, Vol.70, pp.55-58 (1998).
- 31. Yan, W. M., F. Chen, H.Y. Wu, C.Y. Soong and H.S. Chu, "Analysis of Thermal and Water Management with Temperature-Dependent Diffusion Effects in Membrane of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.129, pp.127-137 (2004).
- Matamoros, L. and D. Bruggemann, "Concentration and Ohmic Losses in Free-Breathing PEMFC," *Journal of Power Sources*, Vol.173, pp.367-374 (2007).

ADVANCED SHIPBOARD ELECTRIC POWER-STUDY ON THE EFFECT OF PERFORMANCE FOR THE PEMFC STACK UNDER DIFFERENT OPERATIONAL PARAMETERS

S.W. Shiah* S.J. Wu* C.C. Chao* T.L. Lee** and W.L. Yu***

* Department of Power Vehicle and Systems Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University, Tao-Yuan, Taiwan

** Graduate School of Naval Architecture and Marine Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University, Tao-Yuan, Taiwan

*** Department of Vehicle Engineering, Army Academy ROC, Taiwan

Keywords: proton exchange membrane fuel cell, stack, performance analysis, power estimating model

ABSTRACT

The performance of a developing advanced electrical power system- proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is studied experimentally in this paper. The effects on working power for single cell and stacks with same specifications are investigated under different conditions. The major part of this experimental system is 300 W testing bench, and the measured items are single cell, two cells, and three cells. The reaction area for single cell is 5×5 cm². The operational parameters include hydrogen and oxygen stoichiometric ratios, hydrogen and oxygen humidification (saturated status) temperatures, and cell temperature. All experiments execute by the method of one factor at a time. The results indicate that the cell temperature is the most important factor on working power for three type cells. Meanwhile, the best performance (maximum power) and corresponding factor level for each cell are analyzed at working current of 25 Amp. In addition, the regression analysis method is applied to establish the power estimating model for the baseline condition. The above study not only lay a foundation for the technology development of advanced shipboard electric power, but also benefits to the application of future marine power system in domestic.

(Manuscript received Sep. 16, 2008, Accepted for publication Jun. 30, 2009)