

以電能儲存裝置改善船舶燃料電池電力系統動態響應

蘇俊連[†] 吳真一* 翁曉田* 李建興**

* 國立高雄海洋科技大學 輪機工程學系

** 國立成功大學 系統暨船舶機電工程學系

關鍵詞：船舶電力系統、燃料電池、動態響應、自動發電控制、電能儲存裝置

摘 要

因燃料電池具有低廢氣排放量、高發電效率、低振動、低噪音等優點，近來許多國家積極研究此種能源於船舶電源的應用。然而，燃料電池屬於電化學裝置，安裝於船舶上，動態響應為系統運轉主要問題之一。為使系統運轉更加穩定可靠，本文提出以電能儲存裝置來改善船舶燃料電池電力系統動態響應。本文考慮以質子交換膜燃料電池作為船上電源裝置，推導出以該燃料電池動態模型為基礎之系統自動發電控制模式，並模擬幾種不同的負載操作狀況下系統的動態響應，以確認改善模式之執行效能。最後，本文亦執行敏感度分析以減少輸入參數對模擬結果之影響。

前 言

國際環保公約管制及燃油成本逐漸增加，已迫使世界各大船廠須面對能源與環保議題。由於燃料電池(fuel cell, FC)具有低廢氣排放量、高發電效率、低振動、低噪音等優點，適合應用於船舶電力及推進應用。近年來，許多船廠逐漸發展以燃料電池為基礎的船舶電力系統與推進系統[1-3]，期望藉由新一代能源技術的導入，來分散船舶產業對石化能源的依賴，並有效降低廢氣排放量。

燃料電池發電運轉必須持續地向電池內部送入燃料氣體與氧化劑，才能夠維持穩定的輸出電能，對於發電過程中的反應產物，如水、熱等，必須透過適當的裝置與控制進行管理及再利用。此外，燃料電池輸出為直流電，在船舶電力應用上，必須藉由直/交流Inverter(DC/AC inverter)，將直流電轉換為交流電，以供電給船上交流電氣設備。對於直流電設備，則必須加裝直流穩壓器(DC/DC converter)。因此，對一個船舶燃料電池電力系統而言，完整的發電裝置必須包含燃料供氣裝置、燃料重整器(reformer)及控制器、燃料電池堆(stack)、Inverter、熱管理系統、電力控制器、及燃料電池控制器，以控管發電過程中的氣、水、熱、電，構成一個自動運轉的電力系統[2]。

傳統船用發電機以柴油發電機為主，其實功率調節是藉由調整柴油油門來控制原動機轉速，進而改變

發電機電角來增加或減少實功率輸出，以維持系統頻率之穩定，而虛功率則是透過勵磁系統的電壓調節來控制發電機虛功輸出，以達到電壓維持目的。但燃料電池採用電化學發電原理，並沒有原動機的調頻控制，也沒有勵磁機的穩壓控制。因此，如何自動調節船上燃料電池發電系統的實功率及虛功率輸出，即自動發電控制(automatic generation control, AGC)為船舶燃料電池發展應用重要的研究課題之一。

由於燃料電池採電化學反應發電，當被安裝於船上，發電輸出功率無法及時滿足負載需量變動，而造成動態響應不足為系統運轉常見的問題之一[3,4]。一個好的船舶燃料電池電力系統在運轉上，必須能夠隨時因應負載變動，及時調控功率。若動態響應速度夠快，系統可以穩定安全地運轉；反之，若響應速度不足，則易造成系統運轉不穩定，而危害系統運轉安全。

為了分析及改善燃料電池電力系統動態響應，許多文獻已提出不同的動態模型及改善模式 [5-16]。文獻[5]以實驗方法進行質子交換膜(proton exchange membrane, PEM)燃料電池動態性能測試，分析其在負載變動下之動態行為。[6]提出結合燃料電池與微渦輪機之複合電力系統架構，並進行電力控制動態分析。一個PEM燃料電池及燃料重整器之功率控制模式數學模型在[7]中被加以推導。文獻[8]提出電力系統動態及暫態穩定度分析用之固態氧化物燃料電池(solid oxygen

[†] 責任作者(cis@mail.nkmu.edu.tw)

fuel cell, SOFC)動態模型, 該模型將熱動態行為及輸出電壓損失考慮在電化學及熱平衡方程式建構上。一個整合燃料電池及電力轉換器之SOFC發電機組動態模型由[9]提出, 用來分析及改善含燃料電池之配電系統動態運轉效能。[10]以MATLAB/ SIMULINK及PSPICE軟體, 進行燃料電池動態模擬與驗證。文獻[11]提出PEM燃料電池之分散式電源系統控制模式, 並以重載、輕載、及系統發生故障等狀況來測試系統動態響應。一個相對簡單且精確的PEM燃料電池動態模型在[12]中提出, 該模型考慮溫度動態效應, 以實驗方法及動態負載變化分別驗證及確認該模型的正確性及有效性。[13]利用實驗方法建構PEM燃料電池動態模型, 並進行負載變化對其效能之影響, 以評估PEM燃料電池作為車輛電源裝置之可行性。[14,15]針對PEM燃料電池於船舶輔助電力及水下載具電源之電力轉換模擬技術進行分析。[16]運用電池組, 對燃料電池獨立發電系統, 提出負載動態響應改善模式。

目前燃料電池動態響應分析以陸上電力系統為主, 船舶燃料電池電力系統動態響應研究仍相當有限。為使船舶燃料電池電力系統能夠安全穩定地運轉, 本文推導船舶燃料電池電力系統自動發電控制數學模型, 並以此為基礎提出以電能儲存裝置來改善系統動態響應之分析模式。

一般而言, 確認改善模式之執行效能的方法有解析法、實驗法、及模擬法。由於燃料電池發電設備隨著使用對象及用途的不同, 裝置容量及系統組件通常會有很大的差異。以船舶電力應用而言, 隨著船隻類型及大小, 燃料電池裝置容量分佈範圍從數百千瓦至數十百萬瓦, 系統組件除燃料電池外, 還必須包含許多附屬設備來自動調節氣、水、熱、電, 以維持系統運轉效率及安全。在這種情況下, 解析法可能需要較複雜的數學處理過程, 實驗法則所需的成本可能過高, 此時模擬法提供了一種有效的方式來分析船上燃料電池之自動發電運轉及動態響應。本文以模擬方式進行船舶燃料電池自動發電運轉評估及動態響應之改善分析。以下介紹船上燃料電池發電設備之動態模型與自動控制模式, 及以電能儲存裝置改善系統動態響應之分析模式。

質子交換膜燃料電池動態模型

目前有多種燃料可作燃料電池使用, 對於船舶使用的燃料電池而言, 燃料選擇最重要的考慮因素為安全和可靠, 其他的重要因素還包括費用、燃料密度及燃料重整器之重整能力等。當船上空間且燃料容量有限時, 燃料密度則是重要的考量因素之一。基本上, 燃料電池之操作溫度影響了燃料電池電化學反應所

使用觸媒(catalyst)的種類, 也同時影響所使用的燃料種類, 不同種類燃料電池通常對燃料處理程度之要求不盡相同, 目前仍以富氫的氣體或碳氫化合物作為燃料最為常見[17]。

燃料電池種類繁多而且分類方式各有不同, 常用的分類方式是依電解質性質不同加以區分, 有鹼性燃料電池、磷酸燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)、PEM燃料電池、熔融碳酸鹽燃料電池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)、固態氧化物燃料電池等五種不同電解質的燃料電池。若依照其操作溫度範圍不同, 一般將鹼性燃料電池、質子交換膜燃料電池歸為低溫型燃料電池, 磷酸燃料電池則為中溫型燃料電池, 而熔融碳酸鹽燃料電池與固態氧化物燃料電池則屬於高溫型燃料電池[17]。這幾種燃料電池之特性差異性大, 其應用對象與範圍也有很大的不同。以船舶電力應用而言, 因考慮到能快速啟動發電, 並接近常溫操作且無電解液腐蝕溢散等特性, 目前以PEM燃料電池作為船舶電源裝置的應用最為普遍[2]。本文以PEM燃料電池為研究對象, 進行系統動態響應分析與改善研究。

PEM燃料電池以質導度佳的固態高分子膜為電解質, 電池內唯一的液體為水, 腐蝕問題低。基本上, PEM燃料電池須在水的產生速率高於其蒸發速率狀況下操作, 使薄膜保持充分含水狀態。圖1所示為PEM燃料電池的工作原理示意圖, 此燃料電池是以氫氣或淨化重整器為燃料氣體, 空氣或純氧為氧化劑, 電解質將電池分隔成為陰極(cathode)與陽極(anode)兩部分。在陽極中, 氫氣在觸媒的催化下而降低活化能, 使其解離成為氫離子與電子。

氫離子通過質子交換膜往陰極移動, 而電子則經由外電路對外部負載作功後移往陰極(電流由陰極流向陽極)。陰極反應為氧分子、電子及氫離子在觸媒催

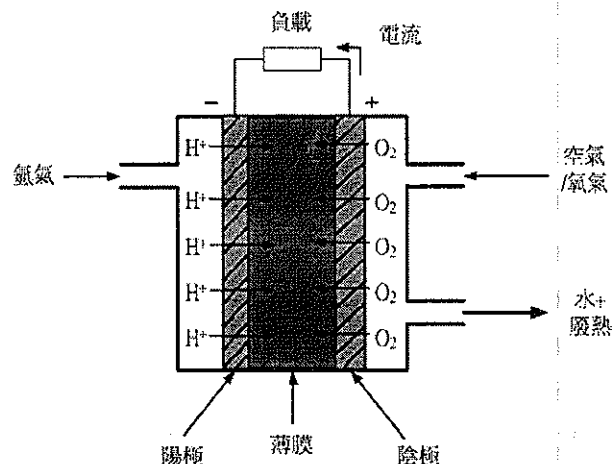


圖1 PEM燃料電池工作原理圖

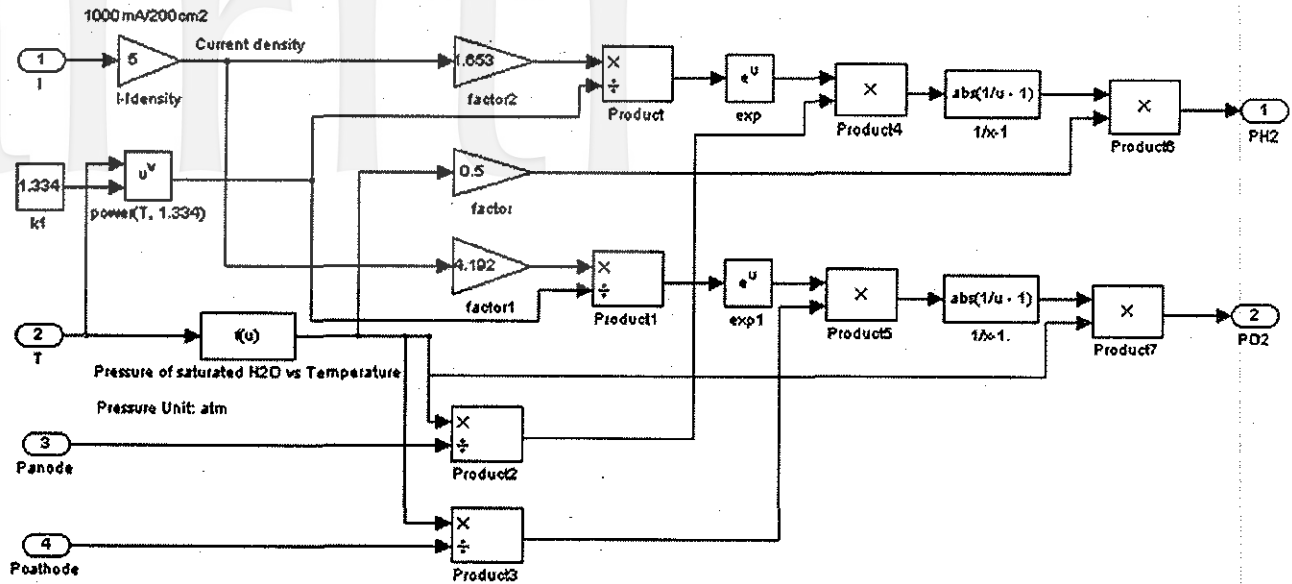


圖3 氫氧部分壓力動態模型

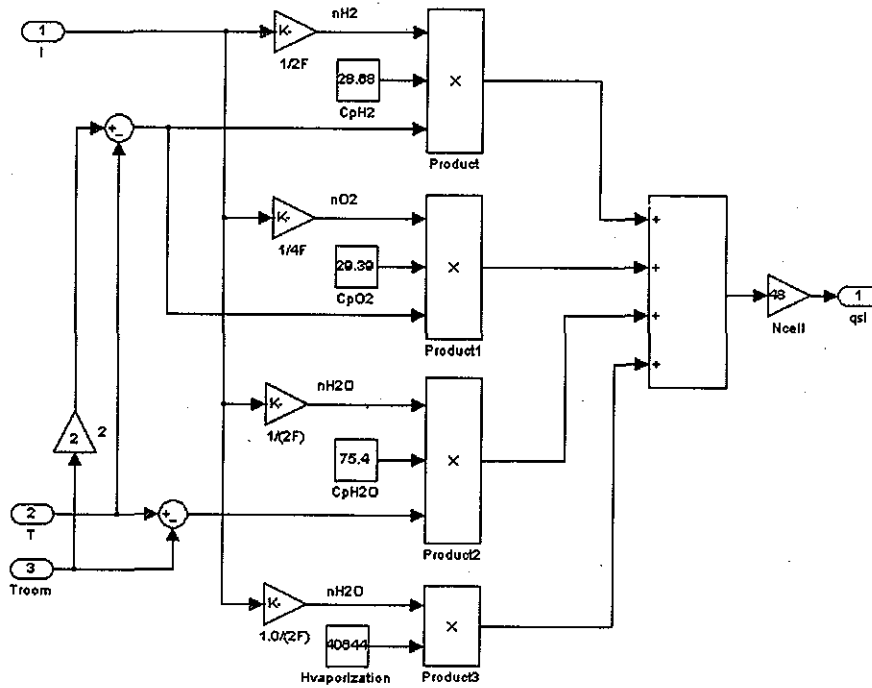


圖4 PEM燃料電池熱平衡動態模型

必須考慮溫度效應，可由以下熱系統能量平衡數學方程式來考慮溫度效應，圖4所示為其動態模型。

$$\begin{aligned} \dot{q}_{net} &= \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens+latent} - \dot{q}_{loss} \\ &= M_{FC} C_{FC} \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\dot{q}_{net}$ 為淨功率， $\dot{q}_{chem}$ 為氣體化學反應產生的功率， $\dot{q}_{elec}$ 為輸出電氣功率， $\dot{q}_{sens+latent}$ 為熱消耗功率， $\dot{q}_{loss}$ 為熱損失功率， M_{FC} 為燃料電池堆總質量， C_{FC} 為電池堆整體熱容量常數。

3. 可逆電位動態模型

由式(5)及式(6)求出的氫氧有效部分壓力可進一步求得燃料電池內部每個電池堆之可逆電位 E_{cell} (開路電壓)，數學表示式及動態模型分別如式(8)及圖5所示。

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln[p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0.5}] - E_{d,cell} \quad (8)$$

其中 $E_{0,cell}$ 為標準大氣壓下參考電位， $E_{d,cell}$ 為考慮燃料及氧化劑延遲效應之壓降， $p_{H_2}^*$ 及 $p_{O_2}^*$ 分別為氫及氧有效部分壓力。

因式(8)為燃料電池每個電池堆內部開路電壓，真正的電池輸出電壓須考慮與負載電流大小有關的活化壓降、歐姆電阻壓降及濃度過電位壓降[17]。活化壓降的產生是由於欲發生電化學反應前，需要通過一能量屏障，而受到該能障所致，電化學反應速度會變得較慢；歐姆電阻壓降的產生是由於交換膜在傳送質子，及電極板在傳送電子時材料所產生的等效阻抗，在負載電流流過後，所產生的壓降，一般燃料電池的工作壓降通常是以歐姆電阻壓降來表示；濃度過電位壓降的產生則是由於在高電流時，反應物無法快速地移動至觸媒層進行高電荷交換，而所產生的壓降。因此，燃料電池輸出電壓 V_{out} 可由下式表示：

$$V_{out} = N_{cell} V_{cell} = E_{cell} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (9)$$

其中 N_{cell} 為電池堆數目， V_{act} 為活化壓降， V_{ohm} 為歐姆電阻壓降， V_{conc} 為濃度過電位壓降，可分別由式(10)至式(12)來表示。

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha z F} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (10)$$

$$V_{ohm} = IR_{ohm} = I(R_{ohm0} + k_{RI}I - k_{RT}T) \quad (11)$$

$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{limit}} \right) \quad (12)$$

其中 α 為電子轉換係數， z 為參與反應電子數， I 為負載電流， I_0 為交換電流密度， $k_{RI}(\Omega/A)$ 及 k_{RT}

(Ω/K^0) 為電阻計算常數， I_{limit} 為限制電流值(A)。

船舶燃料電池自動發電控制

船舶電力系統運轉最重要的目的是維持系統安全可靠地運轉，以控制目標而言，系統電壓及頻率通常為其主要控制對象。例如船上常見的柴油引擎同步發電機，是藉由調整柴油輸入量來控制原動機輸出機械功率，進而改變發電機電角來增加或減少實功率輸出，並維持系統頻率一定，即所謂的調速穩頻控制；虛功率調節則是透過勵磁系統的電壓調節來控制發電機虛功輸出，達到電壓維持一定的目的，即所謂的勵磁穩壓控制。

相較於船用柴油發電機組，燃料電池是以氫氣與氧氣為燃料，利用陽極、陰極、催化板及電解膜(electrolyte)等元件，透過電化學反應產生電力，屬於非熱機旋轉發電裝置。因此，燃料電池在發電控制上，與船用傳統柴油機之原動機穩頻與勵磁機穩壓控制方式有所不同，須藉由氫燃料流量及電力轉換器的控制達成自動發電控制[7,11]。

如前所述，為維持燃料電池之船舶電力系統運轉安全與可靠，燃料電池裝置的輸出功率必須被加以調節，以電能儲存裝置來補償需量反應的不足，且以“自動”方式進行調控，才能達成系統運轉預定目標。因

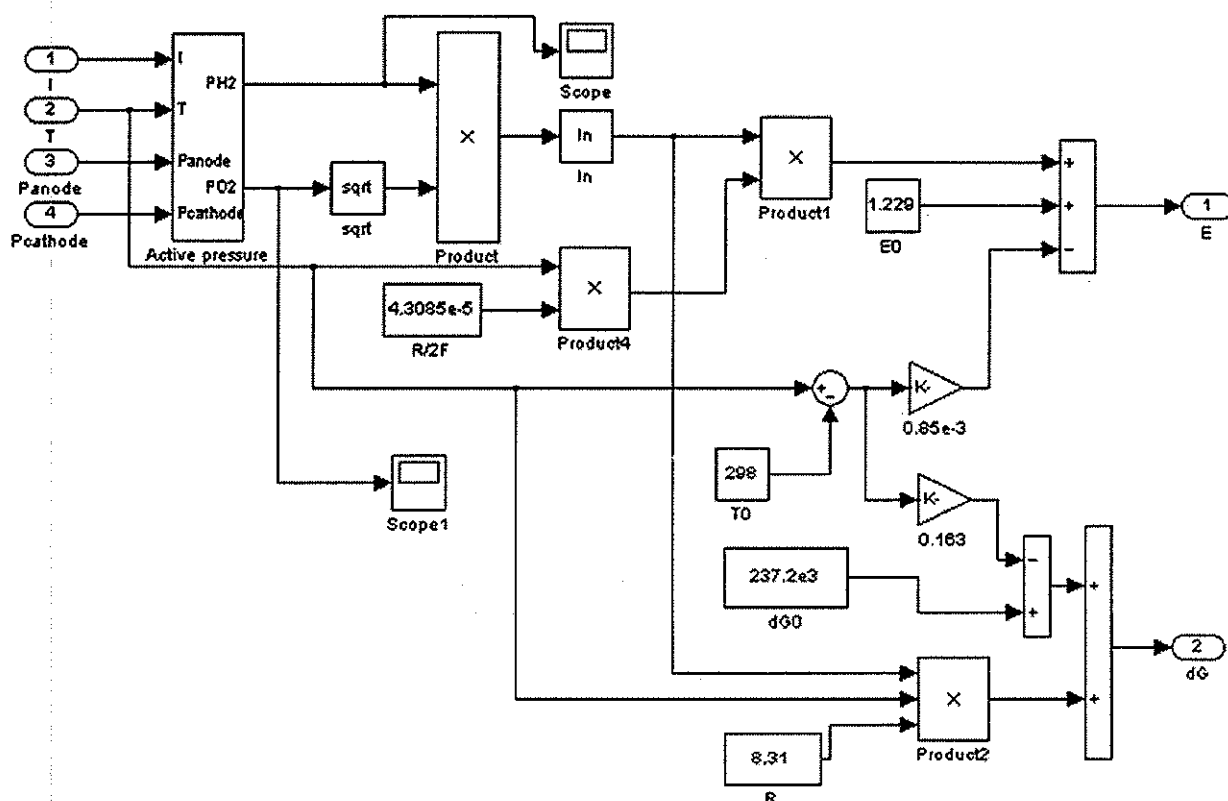


圖5 PEM燃料電池可逆電位動態模型

此，對於燃料電池之船舶電力系統而言，一個好的自動發電控制模型相當重要且必需的。本文以PEM燃料電池作為船上發電裝置，推導自動發電控制數學模型。

1. 燃料電池單獨運轉

首先考慮燃料電池單獨運轉情形，如圖6所示為一個簡單的船舶燃料電池自動發電控制架構。因燃料電池輸出為直流電，在實際船舶用電上，可透過直/直流轉換器，提高輸出電壓準位，並使用直/交流轉換器，將直流電壓轉換為交流電壓。同時，為達成可自動調節燃料電池輸出功率的目的，控制系統可根據負載電流，透過燃料(氫)控制器，調整送入燃料電池堆之氫燃料多寡，進而改變輸出功率大小。由於目前船上配電電壓多數為低壓系統，為得到精確的發電控制模式，電纜線路與變壓器之電抗及電阻應該被考慮在分析中。

根據圖6之控制架構，線路電流 I_t 可由下式求得：

$$I_t = \frac{V_{ac} - V_t}{Z_s} = \frac{mV_{FC} \angle \delta - V_t}{|Z_s| \angle \theta_z} = \frac{mV_{FC}}{|Z_s|} \angle \delta - \theta_z - \frac{V_t}{|Z_s|} \angle -\theta_z \quad (13)$$

其中 V_{ac} 為Inverter輸出電壓， V_t 為負載端電壓， $|Z_s| = \sqrt{R^2 + X^2}$ ， $\theta_z = \tan^{-1} \frac{X}{R}$ ， m 為調變指數， V_{FC} 為燃料電池輸出電壓， δ 為Inverter輸出電壓相角。

由DC/AC Inverter送出之交流複數功率為

$$\begin{aligned} S_{inv} &= V_{ac} I_t^* \\ &= mV_{FC} \angle \delta \times \left[\frac{mV_{FC}}{|Z_s|} \angle \delta - \theta_z - \frac{V_t}{|Z_s|} \angle -\theta_z \right]^* \\ &= \frac{(mV_{FC})^2}{|Z_s|} \angle \theta_z - \frac{mV_{FC}V_t}{|Z_s|} \angle \delta + \theta_z \end{aligned} \quad (14)$$

將式(14)轉換為直角座標，重新整理可得以下Inverter單相交流輸出實功率及虛功率數學表示式：

$$P_{ac} = \frac{(mV_{FC})^2}{|Z_s|} \cos \theta_z - \frac{mV_{FC}V_t}{|Z_s|} \cos(\delta + \theta_z) \quad (15)$$

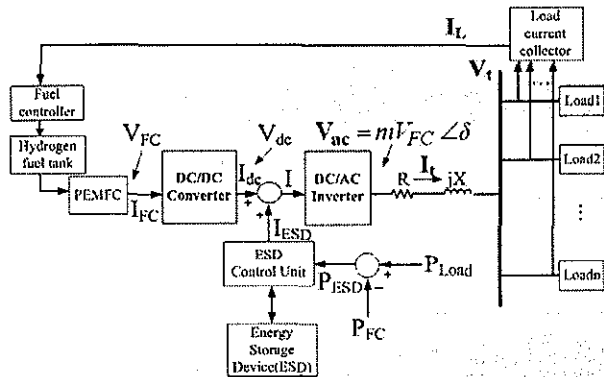


圖6 船舶燃料電池自動發電控制架構

$$Q = \frac{(mV_{FC})^2}{|Z_s|} \sin \theta_z - \frac{mV_{FC}V_t}{|Z_s|} \sin(\delta + \theta_z) \quad (16)$$

令 $\beta_z = \tan^{-1} \frac{X}{R}$ ，則 $\theta_z = 90^\circ - \beta_z$ ，Inverter交流輸出實功率可改寫為

$$P_{ac} = \frac{mV_{FC}V_t}{|Z_s|} \sin(\delta - \beta_z) + \frac{(mV_{FC})^2}{|Z_s|^2} R \quad (17)$$

假設DC/DC Converter及DC/AC Inverter功率損失為零，則

$$P_{ac} = P_{dc} = V_{dc} \times I_{dc} = V_{FC} \times I_{FC} \quad (18)$$

其中 V_{dc} 及 I_{dc} 分別為DC/DC Converter直流鏈電壓(V)及電流(A)， I_{FC} 為燃料電池輸出電流(A)，可根據氫流量關係式[17]，由下式求得：

$$I_{FC} = \frac{2FU}{N_{cell}} q_{H_2} \quad (19)$$

將式(19)代入式(18)，燃料電池經過Inverter後之交流輸出實功率可由下式來表示：

$$P_{ac} = V_{FC} \times \frac{2FU}{N_{cell}} q_{H_2} \quad (20)$$

式(17)等於式(20)，整理可得Inverter輸出電壓功率角為

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{2FU|Z_s|}{mV_t N_{cell}} q_{H_2} - \frac{mV_{FC}}{V_t |Z_s|} R \right) + \beta_z \quad (21)$$

由式(14)~式(21)可知，燃料電池交流輸出電壓的調節可透過控制Inverter的調變指數及交流側電壓相角來達成，而輸出實功率與虛功率也可以藉由這兩個參數來給加以控制。當船舶電氣負載變動時，負載電流增大或減少，將引起電池直流輸出電壓變動，造成負載端電壓產生變化，此時可藉由Inverter調變指數來控制，透過式(22)之迴授控制來調節。另一方面，為了能夠隨負載變化來自動調節實虛功率輸出量，輸入至燃料電池之氫氣量可隨負載電流 I_L 的變化來加以控制，其數學關係如式(23)所示[7]。若系統需量增加時，負載電流變大，此時可透過式(23)來增加輸入至燃料電池之氫氣量，接著利用式(21)的數學關係來控制Inverter輸出電壓相角 δ ，調節式(15)及式(16)的實功與虛功輸出量。

$$m = \frac{k_1 + k_2 s}{s} (V_r - V_{ac}) \quad (22)$$

$$q_{H_2} = (k_3 + \frac{k_4}{s}) \frac{N_{cell} I_L}{2FU} \quad (23)$$

其中 k_1 、 k_2 為Inverter PI控制器增益， k_3 、 k_4 為氫流量PI控制器增益， V_r 為參考電壓訊號大小， U 為燃料利用率， V_{ac} 為交流輸出電壓大小。

2. 燃料電池與電能儲存裝置併聯運轉

由於燃料電池為電化學裝置，功率輸出無法立即隨負載需量變化作調節，容易造成動態響應速度不

足。在這種情況下，因電能儲存裝置可事先儲存電力，在需要時，可立即提供負載電力，常被工業界用來改善系統供電品質。目前電能儲存裝置主要用於緊急電源及再生能源(renewable energy)之蓄電，部分的電能儲存裝置也被用來改善電力供應品質，其種類有電池、超電容器(ultracapacitor)、飛輪(flywheel)等。電池包含傳統電池、改良式的液流電池，一般電力系統所使用的較大型傳統電化學電池包括鉛酸(lead acid)、鎳鎘(Nickel cadmium)、鈉硫、鋰離子(lithium ion)及氯化鎳電池(sodium nickel chloride)。它們的最大優點在於響應時間快、不受地形及地理位置所影響，但缺點為擁有較低的能源及功率密度。此種電池儲能須注意放電次數的限制、放電的最大容許量、充放電速率，能源效率，以及使用壽命等；超電容器有別於傳統電容器，超電容器使用碳或其他高表面積密度材質作為導體，且電極間的距離非常小，因此可儲存較高的電能。它是介於傳統電容器與電池之間的一種儲能元件，一般應用於高功率短時間放電的儲能系統。超級電容器的優點在於充放電的速度遠快於傳統的化學電池(30秒至40秒的時間內可充電至額定容量的60%至80%)，且由於其成份沒有電解液，因此在相同儲存容量下的重量遠輕於一般電池；飛輪則為最典型的動能儲存系統，飛輪儲能系統可視為一機械型式的電池，將能量以旋轉動能的型式儲存。它包含儲存能量的飛輪、電能與機械能間轉換用的電動機、用於支撐飛輪的磁懸浮系統、以及電力電子轉換與其控制系統等[18]。由於目前電池的使用最為普遍，技術最成熟，本文以電池作為與船舶燃料電池發電系統之電能儲存裝置。

運用電池的電力補償特性可改善船舶燃料電池電力系統之動態響應，以獲得更佳之運轉效能。以下推導船上電能儲存裝置與燃料電池併聯運轉之自動發電控制數學模型。考慮圖6之電力控制架構，由於

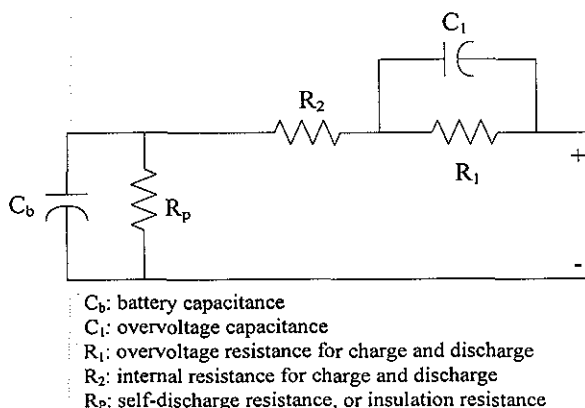


圖7 鉛酸電池之簡化電路模型[16]

考慮電能儲存裝置的功率補償，DC/AC Inverter 輸入電流 I 為DC/DC Converter輸出電流 I_{dc} 及電能儲存裝置輸出電流 I_{ESD} 之和。假設忽略電能轉換器功率損失，則Inverter輸出功率為

$$\begin{aligned}
 P_{ac} &= V_{dc} \times I = V_{dc} \times I_{dc} + V_{dc} \times I_{ESD} \\
 &= V_{FC} \times I_{FC} + V_{dc} \times I_{ESD} \\
 &= V_{FC} \times \frac{2FU}{N_{cell}} q_{H_2} + V_{dc} \times I_{ESD} \quad (24)
 \end{aligned}$$

式(17)等於式(24)，進一步整理可得Inverter輸出電壓功率角為

$$\delta = \sin^{-1} \left[\left(\frac{2FUq_{H_2}}{mV_l N_{cell}} + \frac{V_{dc} I_{ESD}}{mV_{FC} V_l} \right) |Z_s| - \frac{mV_{cell}}{V_l |Z_s|} R \right] + \beta_z \quad (26)$$

為正確的評估電池對上述的燃料電池發電系統之動態響應之影響，電池之模擬模型的建立是很重要的。在一般的電池模型中，電容及電阻為電池電流函數，其大小隨著電池溫度及充電狀態(state-of-charge)的改變而有所不同。當電池電路模型中的所有電路元件之電壓變動在 $\pm 5\%$ 範圍內，則在整個分析過程中，電池內部之電容及電阻可假設為常數，以簡化分析過程。一個已驗證過的鉛酸電池之簡化電路模型[16]被使用在本文中，以進行含電池之系統動態響應改善分析。圖7所示為本文使用的電池電路模型。

上述以電池為基礎之燃料電池發電控制模式考慮船上配電線路及變壓器的電阻成份，藉由氫燃料控制器及電力轉換器的控制，搭配電能儲存裝置，進行船上燃料電池之自動發電控制，同時增進電氣負載之暫態響應。相較於傳統的陸電功率控制方式，本文提出的以電能儲存裝置為基礎之燃料電池自動發電控制模型考慮船上電氣特性，因此具有較佳的功率輸出及動態響應之優勢，但需要額外的電能儲存裝置，增加電力設備重量及成本為主要的缺點。

模擬結果與討論

本文以一艘渡輪電力系統為研究對象，進行燃料電池之船舶電網連接動態模擬實例分析[19]，圖8所示為簡化後的電力系統單線圖。船上電氣負載被歸類為靜態及動態負載，靜態負載包括住艙、機艙、甲板機械、駕駛台負載，而動態負載則為旋轉電機設備，主要有船舶側推進器，總負載量為2100kW。發電裝置方面，船上配置四部相同規格之PEM燃料電池發電機，每個PEM燃料電池cell發電容量假設為500W，無載DC電壓為39.5V，額定輸出DC電壓為27V。考慮單一燃料電池發電機由8(串聯)*105(並聯)的燃料電池cell組成，額定發電量為420kW，額定輸出DC電壓為216V，經由DC/DC Boost Converter升壓至DC 480V後，透過具脈衝寬度調變(Pulse Width Modulation, PWM)切換

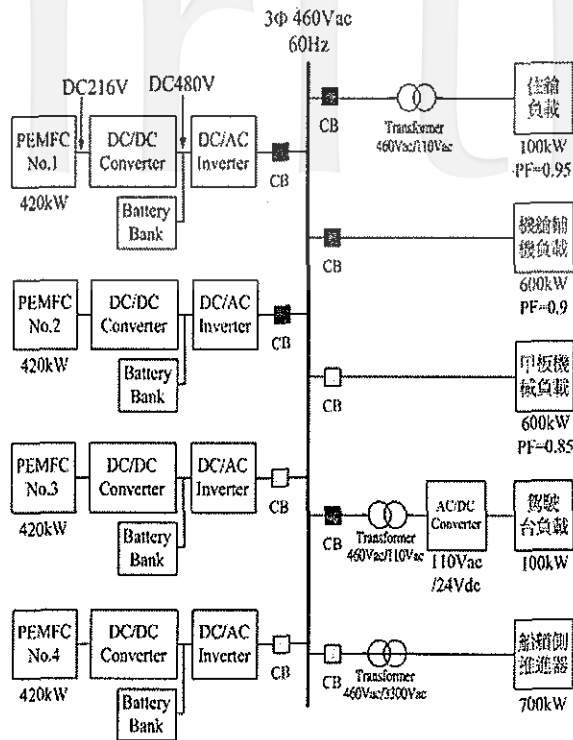


圖8 船舶燃料電池電力系統模擬架構

之電壓源電壓控制(Voltage-Fed Voltage-Controlled) DC/AC Inverter轉換成AC三相460V主匯流排電壓。

考慮系統最佳供電穩定度，每部燃料電池均併聯一組相同容量之電池組(battery bank)，該電池組電壓為DC 480V，由單顆DC 240V/0.5kWh之鉛酸電池(如圖7所示)所組成，其作用如同短時間的電源，提供電力給無法被燃料電池發電系統所滿足的負載需求，特別是在暫態或尖峰負載期間。在本文中，電池組被設計成提供負載與燃料電池發電系統之間的功率輸出差，作為暫態功率的緩衝器。為安全地操作電池組，直流鏈額定電壓(480V)應該在可接受範圍內變化，本文以 $\pm 5\%$ 的電壓變動為基準。為能符合此要求，必須設計一套電池充放電控制策略，來維持電池組電壓。本文假設當直流鏈額定電壓降至95%以下，電池組將被充電；若超過額定電壓的105%，將進行放電。若電池組電壓在額定電壓的0.5%範圍內，充放電過程將停止。利用上述各節所介紹的PEM燃料電池、自動發電控制、及電池控制之數學及電路模型，透過SimPowerSystem Blockset模擬模組[20]的建構，可在MATLAB/Simulink[21]環境中發展船上燃料電池與電能儲存裝置併聯運轉之自動發電系統。之所以選用MATLAB/Simulink及SimPowerSystem套裝軟體作為電力控制系統設計及執行效能驗證工具的主要原因為[21]：

- (1) Simulink物件可以被直接插入至虛擬測試基礎(virtual test bed, VTB)模擬上，可允許使用者使用很完整的系統模式來測試所發展的控制演算法；

表1 模擬使用的參數

設備種類	參數名稱(單位)	數 值
燃料電池	T (°K)	307.7
	F (C/mol)	96487
	R (J/mol K)	8.3143
	E _{cell} (V)	1.229
	N _{cell}	48
	X (Ω)	0.05
	K ₁ , K ₂ , K ₃ , K ₄	10
	V _r (V)	460
	I _{limit} (A)	25
	U	0.8
電池	C _b (F)	300
	C _i (F)	500
	R ₁ (Ω)	0.1
	R ₂ (Ω)	0.075
	R _p (MΩ)	25

- (2) SimPowerSystem Blockset提供許多內建驗證過的電力設備模擬模組，可節省使用者發展系統模擬模組的時間；

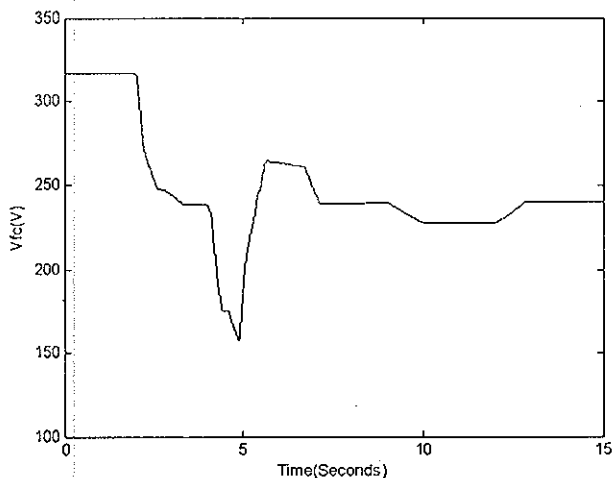
- (3) Simulink提供互動式的操作介面，可以讓使用者更容易地測試控制演算法。

以Matlab/Simulink模擬軟體進行船舶燃料電池與電池併聯運轉之自動發電動態響應分析之前，必須先建構電力系統元件之動態模式，再利用模擬軟體進行模擬模組連結及系統模擬分析。整個問題分析最基本的目的是瞭解電氣負載變動時，系統功率及電壓控制情形，必須能掌握造成電壓發生變動及系統功率動態響應不足的起因，最好能精確地建構出船上實際電力設備的動態模型，完整的分析船舶在不同負載變動狀況下之動態行為，使模擬結果盡量接近實際系統。表1所示為單一500W之PEM燃料電池及單一DC 240V/0.5kWh之鉛酸電池模擬模組中使用的主要參數。

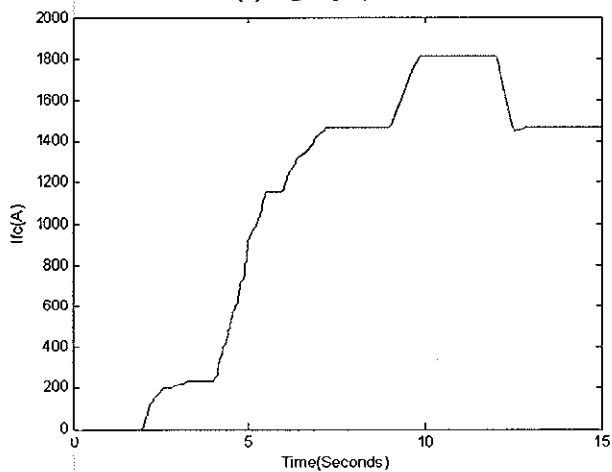
在進行模擬分析之前，燃料電池模擬模組的正確性必須先加以確認。由於本文的主要目的是利用電池來改善燃料電池發電系統之動態響應，為考慮分析結果的正確性及簡化分析問題，模擬使用的單一500W之PEM燃料電池是引用於文獻[10]中已經由實驗量測及電路模擬驗證過的動態模型(如圖2)進行分析。針對圖8所示之船舶電網作模擬，評估船上靜態負載變動及動態負載操作對燃料電池輸出特性、主匯流排電壓、系統實功率與虛功率變化情形之影響，模擬時間共15秒。首先不考慮電池組，僅燃料電池裝置單獨運轉，對靜態負載操作進行模擬。分析狀況為渡輪準備啟動航行，假設一號及二號兩部PEM燃料電池發電機已運轉，在第2秒時，啟動機艙負載，在第6秒，投入駕駛台負載，接著在9秒再投入住艙負載，並在12秒

切離住艙負載，模擬結果如圖9、圖10、圖11所示。由於四部燃料電池均相同，故以一號PEM燃料電池為例來說明。

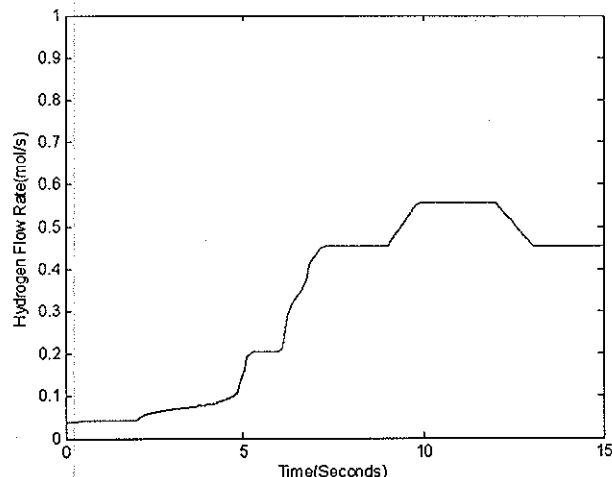
圖9(a)、9(b)、9(c)所示分別為靜態負載變動下之燃料電池電壓、電流、及氫流量變化情形。由圖9(a)



(a) 電壓變化



(b) 電流變化



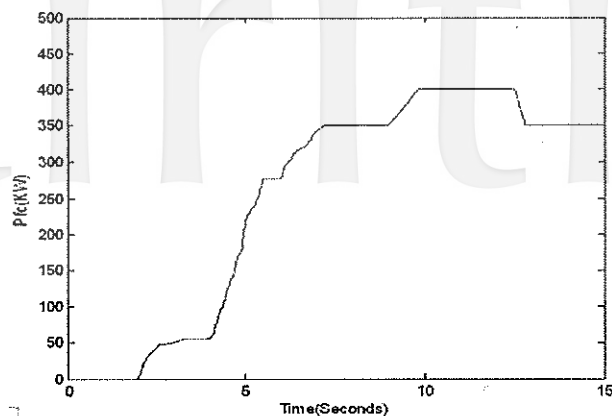
(c) 氫流量變化

圖9 靜態負載變動下之燃料電池運轉變化

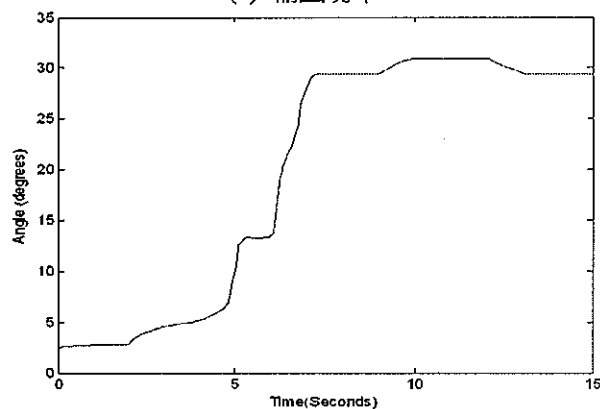
可看出燃料電池無載電壓約為319V，當2秒時，因投入機艙負載，負載電流增加，造成電池輸出電壓下降（內部電阻損失），直到6秒，再投入駕駛台負載，接著在9秒投入住艙負載，並在12秒切離住艙負載，燃料電池電流增至1462.4A後呈現穩定（如圖9(b)），因電化學反應較慢，燃料電池電壓最後約在13.3秒，穩定至240V。由於燃料控制器利用負載電流迴授量，控制燃料（氫）進入電池的量大小，增加輸出電壓，因此由圖9(a)可看出，在負載變動狀況下，電池輸出電壓約在4.9秒，因為進入電池之燃料量的增加使得輸出電壓逐漸上升，但在6秒投入第二個負載，使得電壓的增加減緩，並再度下降，但在7.1秒左右，因燃料量繼續增加，輸出電壓約穩定於240V，接著在9秒時，再切入住艙負載因此電壓又因此下降變動，直到12秒時切離住艙負載使得電壓上升至240V後穩定。由圖9(c)可以看出，由於自動發電控制系統利用負載電流變化來調節進入燃料電池的氫氣量，為滿足負載需要，氫流量會隨負載變化而自動調節，當負載量增加，氫流量會加大，若負載減少，則氫流量會變小。總負載量由0kW增至700kW時，氫流量則由原本的0.04 mol/s最後增至0.455 mol/s。

圖10(a)、10(b)、10(c)、10(d)所示分別為靜態負載變動對燃料電池輸出功率、Inverter交流側電壓相角變化、輸出實功及虛功變化情形。當負載依序增加，由於負載電流對燃料控制器作迴授控制，自動調節增加氫燃料量，Inverter交流側電壓相角因而增大，造成燃料電池輸出功率增加。由圖10(a)可看出每部燃料電池輸出功率由原本的0kW增加至350.96kW；由圖10(b)可看出Inverter交流側電壓相角由原本的2.45度加大至29.47度。系統實功率與虛功率變動情形分別如圖10(c)及10(d)所示，實功率由原本的0kW增至350.96kW，虛功率從原本的0kVAR增至145.77kVAR。比較上述模擬結果可以發現，燃料電池總輸出功率為701.92kW，總負載量為700kW，兩者之間的差即為線路損失量，共為1.92kW。

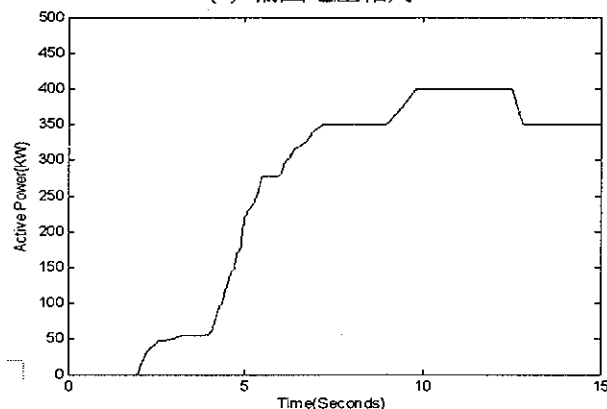
船舶燃料電池發電系統之實功率調節可藉由氫燃料控制，再透過控制電壓相角方式，來增減燃料電池發電機組輸出實功率。虛功率調節則可使用Inverter調變指數(m)的控制，來提供負載所需之虛功，以維持系統電壓。圖11(a)及11(b)所示分別為Inverter調變指數及輸出電壓（主匯流排電壓）變化情形。由圖11(a)可以看出由於Inverter為電力電子控制設備，電壓控制反應速度相當快速，在2.2秒時，m從0.45上升至0.71，控制系統電壓回復至460Vrms，後來因第二個負載的加入，電壓再度下降，此時m由0.71再上升至0.74，第三個負載再加入後，m由0.74上升至0.77，接著切離第三



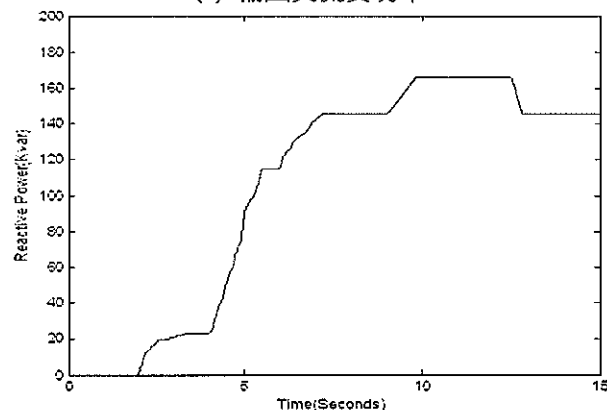
(a) 輸出功率



(b) 輸出電壓相角

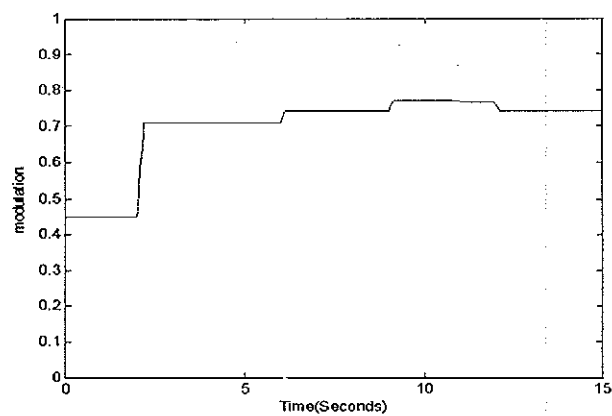


(c) 輸出交流實功率

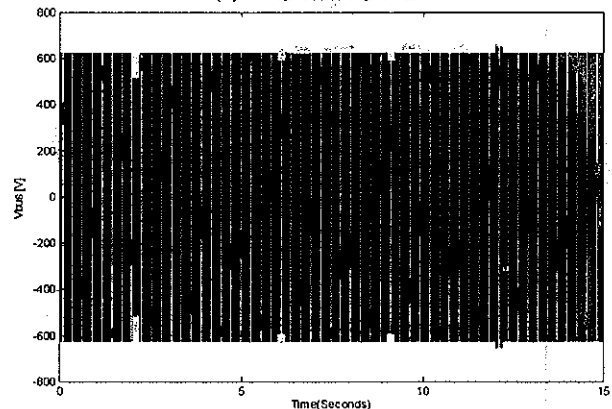


(d) 輸出交流虛功率

圖10 靜態負載變動對燃料電池輸出特性之影響



(a) 調變指數變化

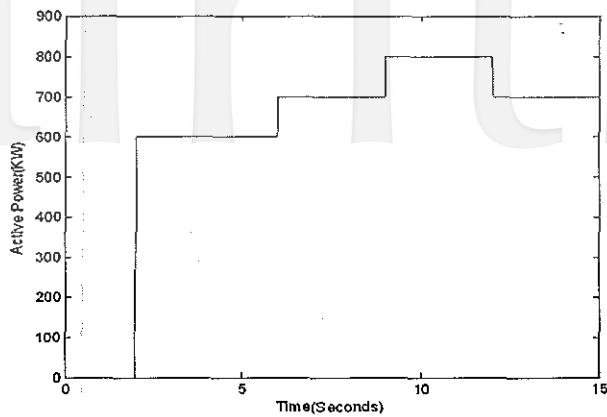


(b) 輸出電壓變化

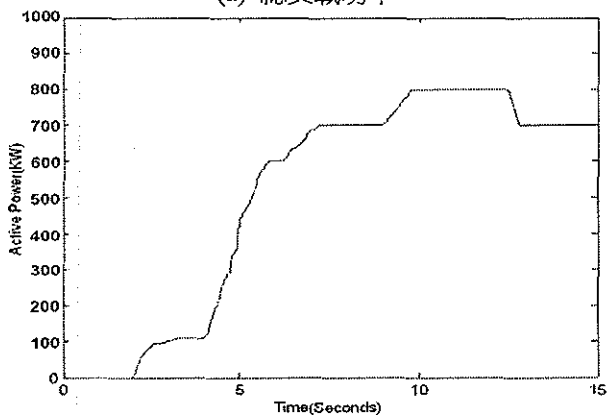
圖11 Inverter輸出電壓控制變化情形

個負載使得 m 由0.77降至0.74，以維持系統電壓為460Vrms，因負載變動及Inverter調變指數控制造成系統電壓變化情形可由圖11(b)來觀察。

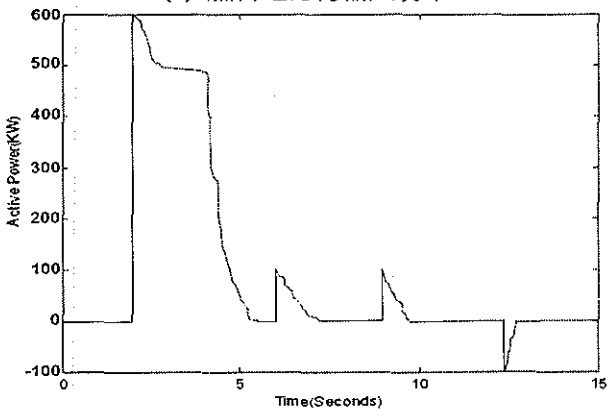
為瞭解電池組對船舶燃料電池電力系統動態響應之影響，本文模擬燃料電池與電池組併聯運轉模式在靜態負載變動下之輸出特性變化情形。圖12(a)、12(b)、12(c)所示分別為總負載功率、燃料電池總輸出功率、及電池組總輸出功率變化情形。由圖12(a)及圖12(b)可看出在第2、6、9、12秒負載產生變動，此時，燃料電池輸出功率也隨之變化，但由於燃料電池輸出功率的反應速度無法立即隨負載而變化，在需量及功率供應量之間會有所差距，而影響系統動態響應，若兩者之間的差距超過系統忍受標準，則可能造成系統運轉上的不穩定，燃料電池輸出動態響應速度不足的現象可以透過電能儲存裝置的控制加以改善。圖12(c)所示為電池組輸出功率變化情形，由圖12(c)中可以看出由於電池組輸出功率為根據燃料電池及負載需量間的功率差量進行自動調控，當負載增加，導致功率供應量低於負載需求，而產生功率不平衡時，電池組進行放電，送出功率，補償功率差量；當負載量減少，燃料電池輸出還未及反應時，功率供應量會高於負載



(a) 總負載功率



(b) 燃料電池總輸出功率

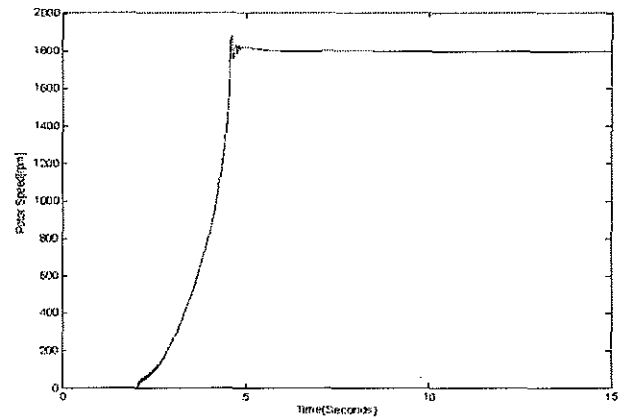


(c) 電池組總輸出功率

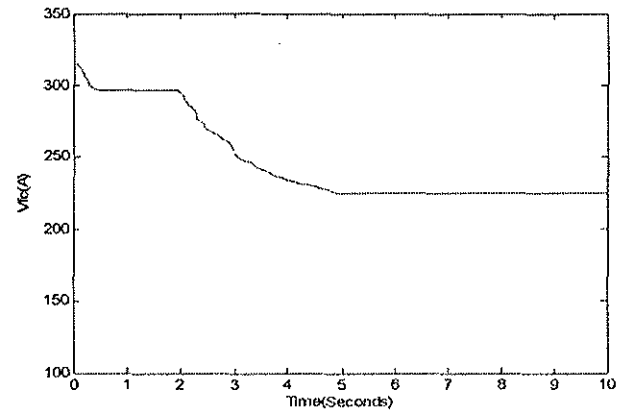
圖12 燃料電池與電池組併聯運轉之系統功率變化

需量，此時過多的燃料電池輸出功率會被電池組吸收，進行充電，如圖中電池組輸出功率為負值。

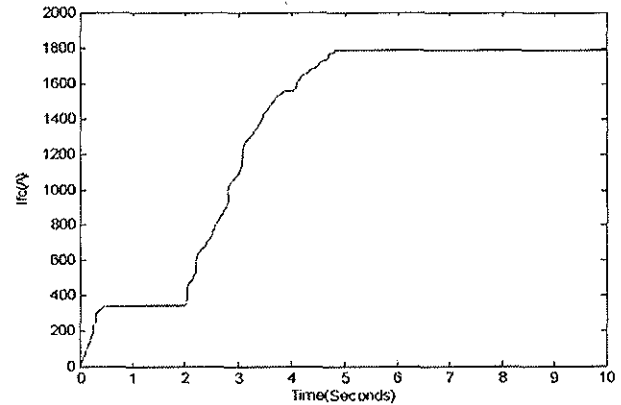
除靜態負載變動外，本文也模擬動態負載(馬達)操作對燃料電池電力系統動態響應之影響。模擬狀況是假設一號及二號PEM燃料電池發電機已運轉，初始(0秒)即切入駕駛台負載，接著在2秒時切入船舶側推進器，觀察船舶側推進器轉速、燃料電池輸出電壓與電流、氫流量、Inverter輸出電壓相角、燃料電池輸出功率、Inverter交流輸出功率及調變指數變化情形，模擬結果分別如圖13(a)~13(h)所示。由圖13(a)可看出當



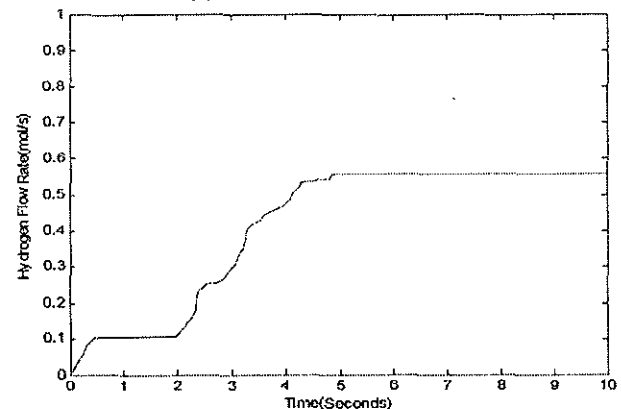
(a) 船舶側推進器轉速



(b) 燃料電池輸出電壓

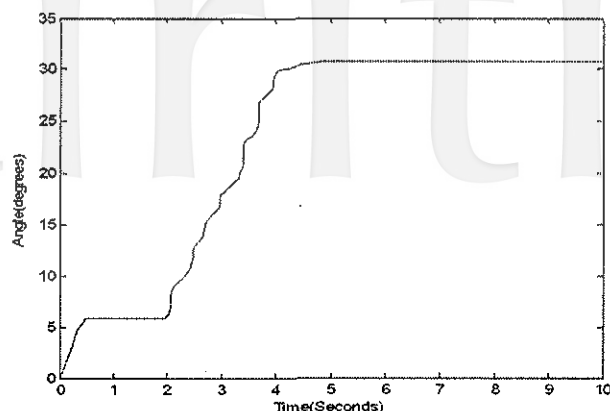


(c) 燃料電池輸出電流

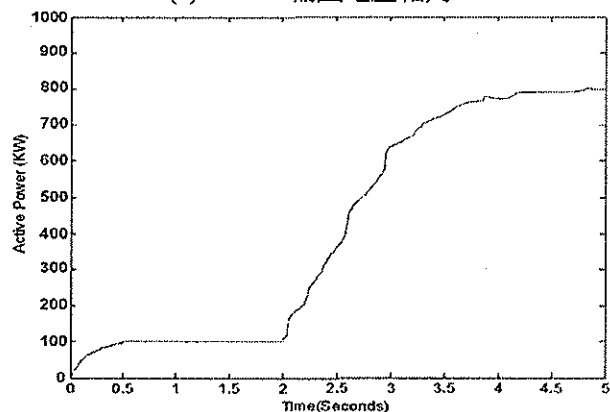


(d) 燃料電池氫流量

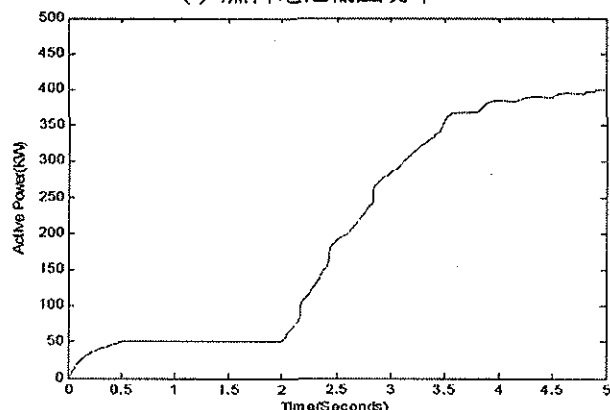
圖13 動態負載對船舶燃料電池電力系統之影響



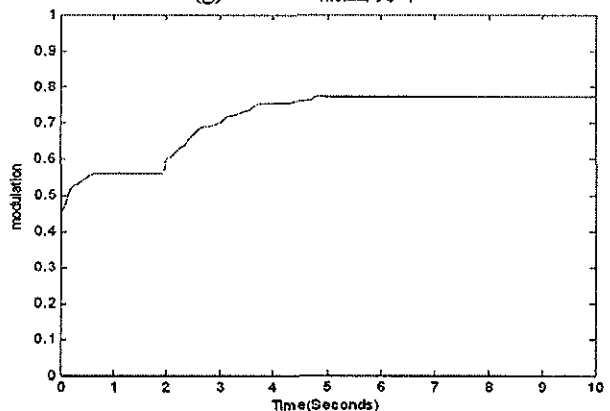
(e) Inverter輸出電壓相角



(f) 燃料電池輸出功率



(g) Inverter輸出功率

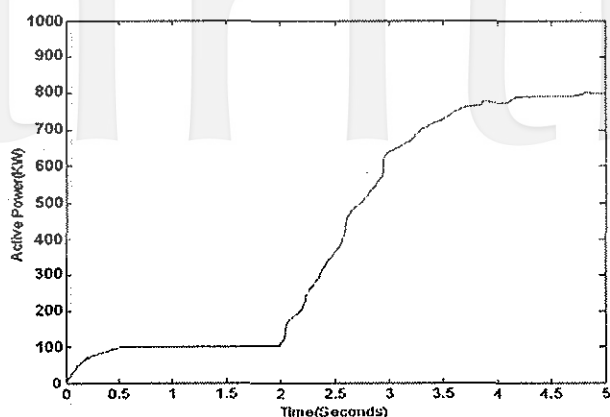


(h) 變流器調變指數

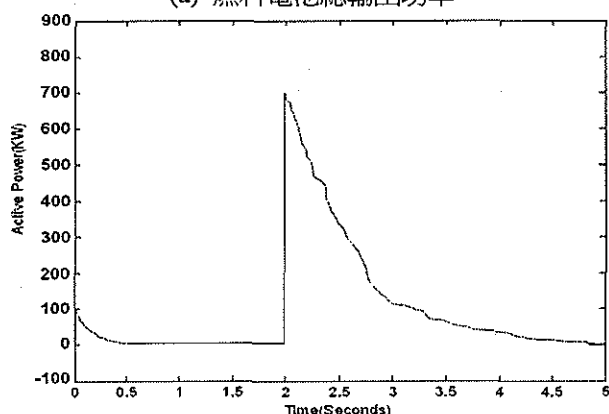
船舶側推進器於2秒啟動後，轉速約在4.9秒時達到1780rpm(額定轉速為1800rpm)。由圖13(b)可看出初始燃料電池無載電壓約為319V，在切入駕駛台負載後，2秒接著切入船舶側推進器，電池輸出電流增至1786.5A後穩定(參考圖13(c))，使得輸出電壓再度下降，因電化學反應較慢，電池輸出電壓約在4.9秒左右，降至225V，而氫流量被控制調節，由原本的0mol/s增至0.556mol/s(參考圖13(d))。接著由圖13(e)及13(f)可看出由於負載量的增加，Inverter輸出電壓相角會隨之加大，燃料電池輸出功率也隨之增加，Inverter輸出電壓相角由原本的0度加大至30.76度，此時燃料電池輸出功率由原本的0kW增至401.96kW，相對應的Inverter輸出功率變化如圖13(g)所示。另外，當馬達啟動後，由於啟動電流較大，啟動時會造成系統電壓瞬間下降，透過Inverter調變指數的控制可以維持電壓大小，圖13(h)所示為Inverter調變指數隨電壓變化進行調整的變化過程。由圖13(h)可看出在0秒投入駕駛台負載，Inverter調變指數即由0.46上升至0.56，於2秒再投入船舶側推進器後，約在4.9秒，再由0.56上升至0.772，使系統電壓回復至460V。比較圖9、10、11及圖13之模擬結果可以發現，動態負載由啟動操作至穩定狀態需要較長的時間，其對燃料電池輸出反應較靜態負載來得明顯，燃料電池輸出反應速度較慢。由於船上存在許多不同種類及用途的馬達設備，當燃料電池作為實際船舶電源供應時，這些設備的操作對系統動態響應之影響必須考慮在系統設計與運轉分析中。

為改善燃料電池電力系統在動態負載操作下之動態響應，本文也模擬燃料電池與電池組於船舶側推進器啟動之併聯運轉響應，主要模擬結果如圖14所示。圖14(a)及14(b)所示分別為燃料電池總輸出功率及電池組總輸出功率變化情形。由圖14(a)可看出由於船舶側推進器(700kW)於2秒啟動，加上原本的駕駛台負載(100kW)，燃料電池總輸出功率最後增至800kW。由於燃料電池輸出過程中，會產生功率不平衡現象，電池組可以補償整個動態負載啟動操作過程所產生的功率差量，進而改善系統動態響應，電池組總輸出功率變化情形如圖14(b)所示。

由上述模擬結果可以看出，由於馬達啟動時間較長，啟動電流較大，燃料電池輸出電壓降現象較明顯，輸出功率反應速度也較慢，藉由負載電流迴授及氫燃料量控制，配合Inverter電壓控制，可以及時滿足負載需量變化，同時維持系統電壓。模擬結果已顯示為能有最佳的動態響應，船舶燃料電池電力系統可以搭配電能儲存裝置及電能轉換器，以自動發電控制方式及時控制燃料電池輸出功率，以符合系統需量變化，並維持系統電壓穩定。



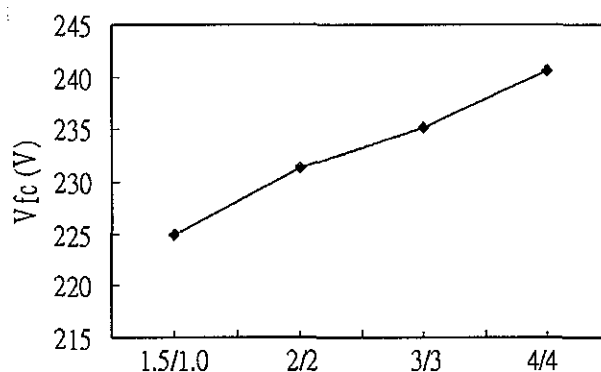
(a) 燃料電池總輸出功率



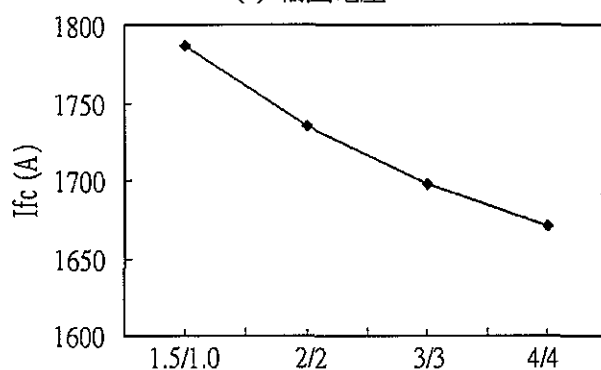
(b) 電池組總輸出功率

圖14 燃料電池與電池組併聯運轉之動態負載操作模擬結果

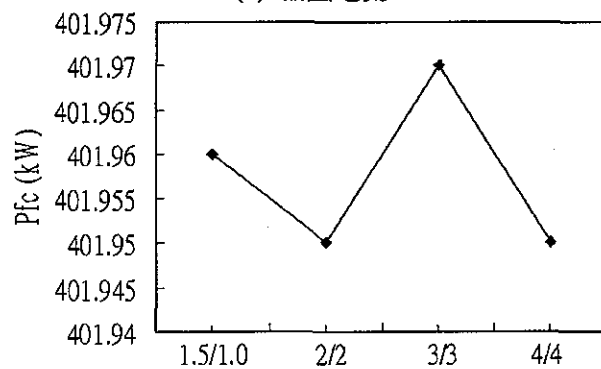
為減少輸入參數對模擬結果之影響，本文也執行敏感度分析，將主要燃料電池操作參數，包括壓力及溫度，進行變化，觀察主要輸出特性之變化情形。由於是以觀察壓力及溫度變化對燃料電池輸出特性之影響為主要重點，因此模擬時，將負載固定，即燃料電池輸出功率不變下，燃料電池氫/氧操作壓力由 1.5/1.0atms、2/2atms、3/3atms、4/4atms 進行變化，操作溫度則分別改變為 35°C、60°C、80°C、100°C，觀察 PEM 燃料電池之輸出電壓、電流、及氫流量之變化情形。操作壓力變化模擬結果如圖 15 所示。圖 15(a)、15(b)、15(c)、15(d) 所示分別為燃料電池輸出電壓、電流、功率、及輸入氫流量變化情形。由圖 15(a) 可看出，當氫/氧壓力由 1.5/1.0atms 增加到 2/2atms，燃料電池輸出電壓從 225V 增加到 231.4V，這是因為增加反應氣體壓力，可以改變氫/氧氣體的質傳能力，因此可以提高可逆電位及降低活化極化與濃度極化所造成的過電位，增加輸出電壓大小。當氫/氧操作壓力分別增至為 3/3atms，燃料電池輸出電壓則增加到 235.3V，操作壓力為 4/4atms 時，則電壓增為 240.6V。在維持輸出功率不變下，當壓力由 1.5/1.0atms 提高至



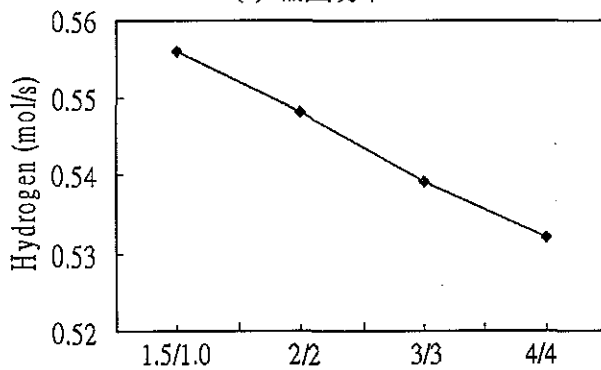
(a) 輸出電壓



(b) 輸出電流



(c) 輸出功率



(d) 氫流量

圖15 燃料電池在不同氣體操作壓力之模擬結果

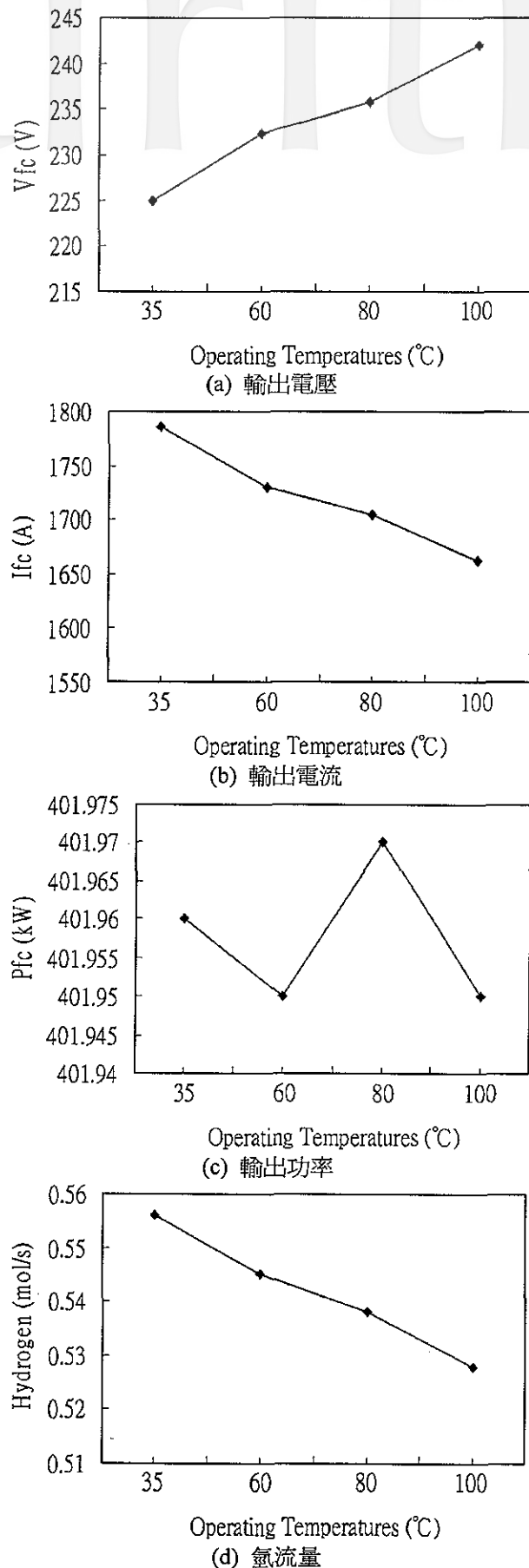


圖16 操作溫度變化對燃料電池之影響

4/4atms時，輸出電流由1786.5A降至1670.65A(參考圖14(b))，此時燃料電池所需的氫流量由0.556 mol/s降至0.532 mol/s，如圖14(d)所示。不同氣體操作壓力下之輸出功率變化情形如圖14(c)所示，由該圖可看出由於負載需量不變，功率輸出幾乎是不變。由以上模擬結果可發現當提高氣體操作壓力大小時，對相同的輸出功率而言，所需的氫流量可以比較小。但增加反應氣體操作壓力往往必須消耗較高的壓力泵功率而降低系統效率，因此如何進入燃料電池內的反應氣體壓力大小要如何選用，必須同時考量系統整體效率及氫燃料使用。

除操作壓力外，操作溫度變化也會對燃料電池輸出造成影響，不同操作溫度之燃料電池輸出電壓、電流、功率、氫流量變化模擬結果分別如圖16(a)、16(b)、16(c)、16(d)所示。由圖16(a)可看出，當燃料電池操作溫度由35°C增加到60°C，電池電壓從225V增加到232.3V，溫度為80°C時，電池電壓上升到235.8V，增加至100°C，電壓變為241.9V，這是因為升高操作溫度有利於提高電化學反應速度和質子在電解質膜內的傳遞速度，進而使輸出電壓增加。相同的在圖16(b)、16(c)、16(d)中的模擬結果可以看出，在相同的輸出功率下，因操作溫度增加而增加的輸出電壓，會使燃料電池電流及氫流量有減少的效果。當溫度由35°C增至100°C，所需之氫流量由0.556 mol/s減少至0.528 mol/s。雖然提高操作溫度有利於提高燃料電池輸出效能，但PEM燃料電池通常採用的電解質膜是一種有機模，其耐溫程度有限，且考量電解質膜的含水問題，PEM燃料電池的操作溫度通常會限制在100°C之內。

結 論

未來燃料電池於船舶電源的實際應用將愈來愈多，系統動態響應分析與改善對系統設計及運轉將是重要且必要的工作之一。本文利用質子交換膜燃料電池動態模型及電能儲存裝置，提出一套適用於船上燃料電池發電裝置之自動發電控制模式。模擬結果已顯示本文提出的自動發電控制模式可依據負載量變化自動調節進入燃料電池的氫燃料，使燃料電池輸出功率隨負載操作而變化，且透過電能轉換器的控制，可維持不同負載操作狀況下之系統電壓。模擬結果也顯示動態負載操作對燃料電池輸出效能之影響較靜態負載明顯，為得到更佳的系統運轉效能，船舶燃料電池電力系統可透過電能儲存裝置的功率補償，及時滿足負載需量變化，以系統動態運轉安全。

參考文獻

1. Lawton, R., J.F. Bash and S.M. Barnett, "Marine Applications of Fuel Cells," *Proceedings of the International*

- Conference on Oceans MTS/IEEE, 29-31, pp.1784- 1790, (2002).
2. Krcum, M., A. Gudelj and Z. Juric, "Fuel Cells for Marine Application," *Proceedings of the 46th International Symposium on Electronics in Marine*, pp.491-495, 16-18 June (2004).
3. Privette, R.M., T.J. Flynn, M.A. Perna, R. Holland, R. Rahmani, C. Woodburn, S.W. Scoles, and R.C. Watson, "PEM Fuel Cell System Evaluation for Navy Surface Ship Applications," *Proceedings of the 34th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, Vancouver, B. C., Canada, 1-5 August (1999).
4. Kim, S., S. Shimpalee and J.W. Van Zee, "The Effect of Stoichiometry on Dynamic Behavior of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) During Load Changes," *Journal of Power Sources*, Vol.135, No.1-2, pp.110-121, September (2004).
5. Hamelin, J., K. Agbossou, A. Laperriere, F. Laurencelle and T.K. Bose, "Dynamic Behavior of a PEM Fuel Cell Stack for Stationary Applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.26, pp.625-629, June (2001).
6. Jurado, F. and J.R. Saenz "Adaptive Control of a Fuel Cell-Microturbine Hybrid Power Plant," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.18, No.2, pp.342-347, June (2003).
7. El-Sharkh, M.Y., A. Rahman, M.S. Alam, A.A. Sakla, P. C. Byrne and T. Thomas, "Analysis of Active and Reactive Power Control of a Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.19, No.4, pp. 2022-2028, November (2004).
8. Sedghisigarchi, K. and A. Feliachi, "Dynamic and Transient Analysis Of Power Distribution Systems with Fuel Cells-Part I : Fuel Cell Dynamic Model," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.19, No.2, pp.423-428 June (2004).
9. Miao, Z., M.A. Choudhry, R.L. Klein and L. Fan, "Study of a Fuel Cell Power Plant in Power Distribution System-Part I: Dynamic Model," *Proceedings of the IEEE PES General Meeting*, Denver, CO, U.S.A., pp.2220-2225, 6-10 June (2004).
10. Wang, C., M.H. Nehrir and S.R. Shaw, "Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.20, No. 2, pp.442-451, June (2005).
11. Wang, C., M.H. Nehrir and H. Gao, "Control of PEM Fuel Cell Distributed Generation Systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.21, No.2, pp.586-595, June (2006).
12. Pasricha, S. and S.R. Shaw, "A Dynamic PEM Fuel Cell Model," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.21, No. 2, pp.484-490, June (2006).
13. Bucci, G., F. Ciancetta, E. Fiorucci, E. Rotondale and F. Veglio, "Experimental Validation of a PEM Fuel Cell Dynamic Model," *Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp.546-551, 23-26 May (2006).
14. Lee, C.H., Y.M. Lee, M.C. Fang and C.L. Su, "Simulation of PEM Fuel Cells Based DC Power Conversion for Applications in AUVs," *Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.26, No.2, pp. 79-89, May (2007).
15. Lee, C.H., W.T. Lee, C.C. Huang and C.L. Su, "Simulation of PEM Fuel Cells for Applications in Auxiliary Power in Ships," *Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol.26, No.2, pp.91-98, May (2007).
16. Wang, C. and M.H. Nehrir, "Load Transient Mitigation for Stand-Alone Fuel Cell Power Generation Systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.22, No.4, pp. 864-872, December (2007).
17. Larminie, J. and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained 2nd*, John Wiley, Inc. (2003).
18. D. Linden, *Handbook of Batteries (2/e)*, New York: McGraw-Hill (1995).
19. *Graphic References: Electric Ship Propulsion Systems*, SIEMENS, December (2002).
20. *Power System Blockset User's Guide*, The Math Works Inc. (2001).
21. *Matlab/Simulink User's Guide*, The Math Works Inc. (2005).

DYNAMIC RESPONSE IMPROVEMENT IN FUEL CELL BASED SHIP ELECTRIC POWER SYSTEMS USING ENERGY STORAGE DEVICE

C.L. Su* C.I. Wu* X.T. Weng* and C.H. Lee**

* Department of Marine Engineering, National Kaohsiung Marine University, Kaohsiung, Taiwan

** Department of Systems and Naval Mechatronic Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan

*Keywords: Shipboard Electric Power System, Fuel Cell, Dynamic Response,
Automatic Generation Control, Energy Storage Device*

ABSTRACT

Applications of fuel cells (FCs) to shipboards have been investigated by many countries worldwide in recent years due to their characteristics of low exhaust emission, high power generation efficiency, low vibration and low noise. Dynamic response is a problem when FCs are installed in ships as power sources because of their electro-chemistry characteristics. To make system operation more reliably and stably, a hybrid FCs/energy storage devices ship electric power system is proposed in this paper. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) are considered as the power source and a PEMFCs' dynamic behavior based automatic generation control (AGC) model of the ship electric power system is derived. Dynamic responses of the system under different load operating situations are simulated to ensure the performance of the proposed model. Sensitivity analysis is also performed to reduce the effect of input parameter on analysis results.

(Manuscript received Sep. 4, 2008,
Accepted for publication Apr. 22, 2009)