

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 固態氧化物燃料電池起機模式策略制定 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 96-NU-7-002-004-  
執行期間：96年01月01日至96年12月31日  
執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：江茂雄

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：徐健銘、黃敬智

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年03月31日



## 摘要

燃料電池具有高效率與低污染的特性，在目前燃料電池的種類中，又以固態氧化物燃料電池(SOFC)效率最高，且燃料包容性最廣。如何在最短時間內將固態氧化物燃料電池之電池堆加熱至工作溫度，並使其輸出電壓穩定是本文的研究重點。

起機程序 (start-up) 為固態氧化物燃料電池 (SOFC) 操作之重要一環。由於目前 SOFC PEN 所使用的材料皆屬陶瓷材料，而雙極連接板 (interconnect) 與框架 (frame) 則使用不銹鋼材。高溫操作下，因熱膨脹係數差異會造成組件的洩漏或破損，降低電池的效率，甚至造成永久損壞。經由模擬結果顯示，不良的溫昇程序將可能使 PEN 產生破裂，為避免造成元件損壞，並考量長期運轉之耐久性，及建立最佳起動程序，必需建立起機程序之動態模型。

本研究就操作層面考量，採用模型基礎設計 (model-based design) 架構以進行物理與化學函式 (first principle) 推導元件模型。以熱力學、氣體動力學與熱傳學等理論，考量質量及能量守恆為基礎，並根據電化學理論建立氣體分壓、溫度、操作電壓、與電流密度、與其他相關變數間關係之基本模式，以建立平板狀固態氧化物燃料電池堆之總體數學模型。應用本模型可進行暫態或動態行為分析，並藉由模擬分析結果，增進對系統響應特性之瞭解。藉由適當調整氣體入口流量與溫度進行熱氣增溫 (heat-up) 曲線模擬，以適切之溫升率增溫至反應溫度 (約 650~750°C)，再經由迴授控制調整負載阻抗以得到適當的反應速率至操作區間 (約 70%Uf)，使 stack 在允許之溫升率 (元件設計規格) 下逐漸增溫，以進行快速且安全穩定之啟動程序模擬，據以建立快速且安全起動之操作策略

本研究藉由模糊滑動控制器制定起機策略，以控制起機時，進入電池堆的空氣和燃料的溫度和質量流率，來維持電池堆的溫度、電流和電壓在可接受的範

圍內。本文利用一個含有熱傳以及電化學的平版型電池堆之動態模型，進行起機模式的模擬。以 MATLAB/Simulink 平台建立動態模擬模組，經過設定合適之控制器可進行 SOFC start-up 之動態行為描述。

關鍵詞：固態氧化物燃料電池、起機程序、動態模擬

## ABSTRACT

The solid oxide fuel cell (SOFC) has the highest efficiency and the most compatibility among the various fuel cells. The start-up procedure plays an important role in Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) operations. The typical materials used for PEN (positive-electrolyte-negative) in SOFCs are all ceramic materials while those used for interconnects and frames are stainless materials. One of the most important issues for SOFCs is the thermal stresses caused from the thermal expansion coefficient mismatch and the temperature distribution developed inside the cells. The thermal stresses will cause low efficiency and even damage the stack permanently. For a not well-controlled temperature change during heating or starting-up, the resulting thermal stresses in a SOFC stack are likely to cause fracture in PEN according to the simulation results. To avoid any impairment and to optimize the startup of an SOFC regarding time, cell performance and long time durability, a dynamic model of the startup process is required.

This project focuses on operation strategy for warming up the stack and the initial electrical load applied to stack. A Bulk model of SOFCs with the concept of model-based design will be constructed in this project. Comprehensive thermodynamic modeling is conducted on this model supplement with some gas dynamics in cell channel and heat transfer on stack and insulation. The developed model consists of mass and energy balances, and an electrochemical model that relates partial pressure and temperature to voltage, current density, and other relevant fuel cell variables. The system response of transient and dynamic analysis can be obtained from the dynamic model. The proper stack temperature curve during heat-up and start-up can be simulated by regulating the flow rate and inlet temperature of gas and air and load resistance with feedback control. The control strategy of heat-up and start-up process will be established under the consideration of the rate of temperature permitted to ensure the safety for a rapid operation.

Computer simulations were performed via Matlab/Simulation. The simulation results are shown for illustrating the dynamic response of an SOFC stack in the start-up stage.

Keywords: Solid Oxide Fuel Cells, Start-up, Dynamic simulation

# 目 錄

中文摘要.....	1
英文摘要.....	3
目錄.....	5
第一章 緒論.....	6
第二章 SOFC 系統架構.....	17
第三章 控制理論.....	21
第四章 起機模式設計.....	38
第五章 Start-up 策略動態模擬分析與模式探討.....	40
第六章 結論.....	46
參考文獻.....	47

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

由於 SOFC 可提供潔淨及高效率的能源轉換，同時又具有低污染以及應用廣泛等優點，在高溫運作環境下也使得系統對於燃料的相容性相當高，許多碳氫化合物都可以作為 SOFC 使用的燃料。因此，不論是在固定 (stationary) 或可攜式 (mobile) 的應用，皆有許多相關機構投入研究。在許多的 SOFC 研究計畫中，多將焦點著重於設計層面，例如 Cell 內部的流場型態、溫度分布型態、Stack 的組裝方式、穩態 BOP(Balance of plant)效能估算、及熱應力分析等方面，而忽略系統層級 (system-level) 之動態響應研究。對於建立一可行性、高效率及強健性之燃料電池發電系統而言，應對整體系統特性瞭解，特別是起機策略的表現，同時要能建立在可變操作環境下之系統性能強健性，以進行有效的監督與控制。

就一跨領域之研發案例而言，必需能有效整合各單元，針對各單元模型所獲得之動態特性進行介面分析，以獲得整體系統行為及效能之估測。若能建立此估測能力，就 SOFC 系統而言，對於其起機模式(start-up)之控制策略將能有效的被建立，對於系統之穩定性及效能之提升將有所助益，同時可提供破損預防之參考。建立 SOFC start-up 策略，對於後續之電力品質改善與混成 (hybrid) 發電或與其他電力來源建構供電路網 (grid connection) 之整體性能模擬，亦有相當之助益。

在現有已開發的燃料電池中，固態氧化物燃料電池(SOFC)屬於高溫型的燃料電池，其電池工作溫度範圍在 650~1000 °C。由於平板式 SOFC 比圓管式 SOFC 具有較低的製作成本、較高的能源效率及較低工作溫度 (800 °C 以下) 等優點，目前全世界對 SOFC 的研發工作，主要是以平板式 SOFC 為主。在 SOFC 系統中最關鍵的組件為電池堆 (stack)，該元件是由多個單片電池串聯組成，其負

責系統中發電的部分。目前國內所發展之平板型 SOFC，係由一系列平行之連接板堆疊，其直通狀流道分別供應電極組合(PEN)電化學反應所需之燃料與空氣，流道之配置型態與氣流歧管等結合於連接板之整體設計中。其電極組合(PEN)主要分為三層，分別為陽極、電解質和陰極，所使用的陽極材料為 NiO-YSZ、電解質材料為 YSZ (yttria stabilized zirconia)、陰極材料為 LSM (Sr-doped LaMnO<sub>3</sub>)，皆屬陶瓷材料，而雙極連接板 (interconnect) 與框架 (frame) 則使用不銹鋼材做為雙極連接板的材料。在電池操作運轉時，由於溫度分布與各組件間材料之熱膨脹係數差異會促進陶瓷材料既存孔隙或缺陷成長為較大的裂縫，進而造成組件的洩漏或破損，降低電池的效率，甚至造成永久損壞。

K. P. Recknagle[1]分析指出平板形電池堆、以逆向流道 (counter flow) 方式供應燃料與空氣，操作溫度約 800°C 穩態運轉時，PEN 之溫度分布如圖 1.1 所示，由於溫度分布差異與材料間熱膨脹係數之差異將導致熱應力產生。對陶瓷材料所製成的電解質與電極而言，熱應力會促進陶瓷材料既存孔隙或缺陷成長為較大的裂縫，進而造成組件的洩漏或破損，降低電池的效率，因此對 SOFC 組件的熱應力分析將是設計 SOFC 系統不可或缺的步驟。電池堆上主應力大都發生在電極組合與框架黏合的四周角落或陶瓷玻璃黏膠凹槽與流道接合處，所以各材料間的熱膨脹係數不同，以及複雜幾何形狀，是造成應力產生的主要原因，而且熱膨脹係數差異越大就會產生較高的應力。

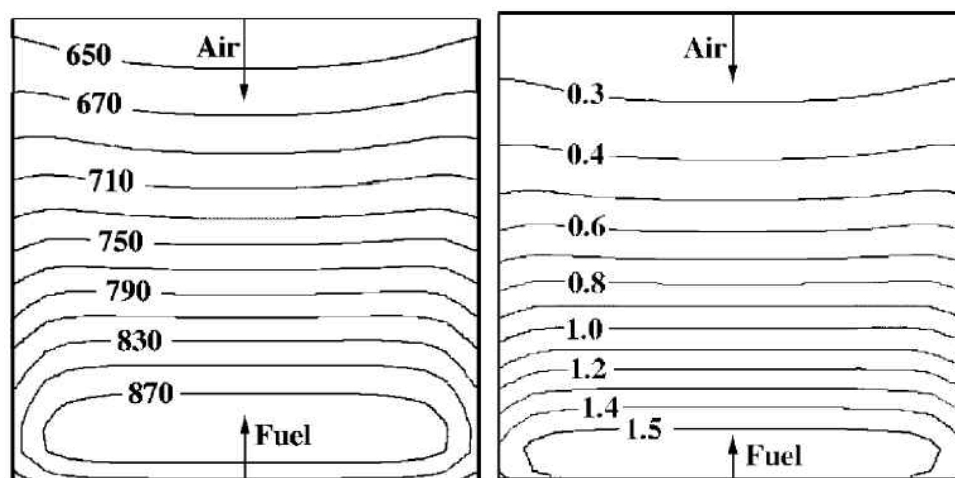


圖 1.1 逆向流道 PEN 的溫度分布和電流密度分布[1]

除了流場型態與反應濃度變化所造成在反應區之不均勻之溫度分布外，操作條件對整體之溫昇狀態之影響亦不容忽視，[2][3]指出步階負載變動對電池溫度及電壓之影響如圖 1.2 所示，此溫昇之主要成因乃係由於反應率增加所造成，其熱能部份由氣體排出，部份則由反應集中區傳導至電極組合之周圍區域、密封區、框架及連接器上，此溫昇暫態行為所造成之溫度不均勻性將大於穩態階段，產生更大的熱應力造成組件破損。

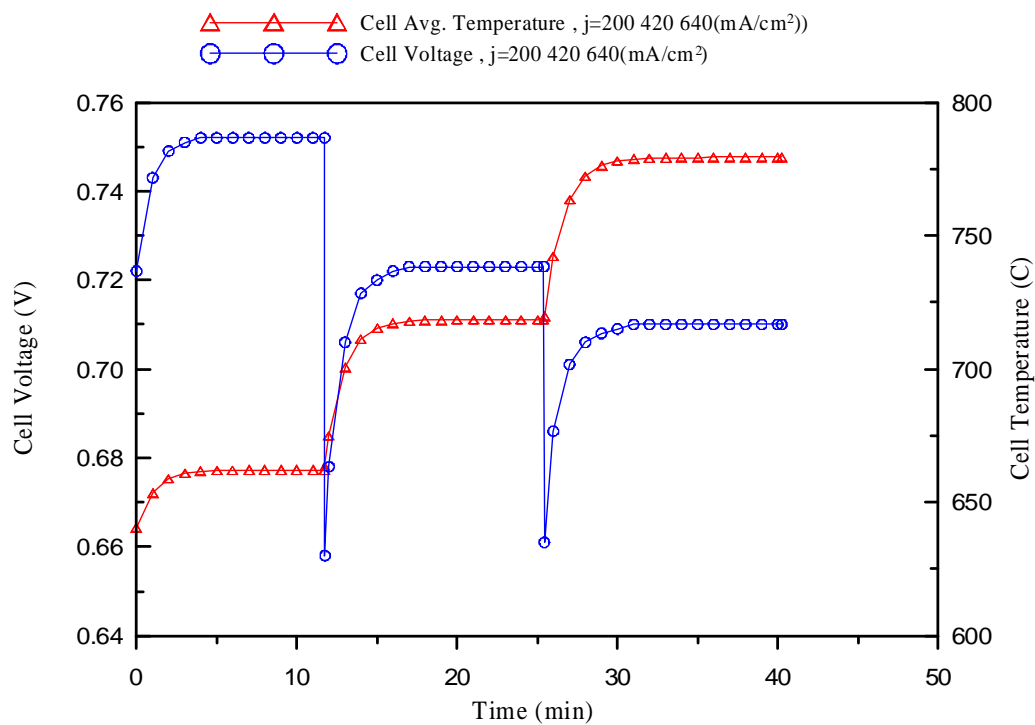


圖 1.2 步階負載變動對電池溫度及電壓之影響[3]

目前在電池堆特性之研究多以 CFD 數值分析為主，主要在於分析燃料電池內之特性量分佈，如流場型態、溫度場、濃度變化、電流密度分佈等。若考慮整體燃料電池系統，含外在迴路，負載變化等相關問題，則較不適用。在運算時間上也是相對耗時的，CFD 在暫態數值分析係將燃料電池於操作期間分成許多不同時間間隔進行數值分析，運算時間將比穩態數值分析還長，因此若要做長時間的暫態數值分析則需花費更大量的運算時間，其收斂性亦是一大考驗。

而熱應力分析結果可以解析目前的模型結構是否有熱應力過大之現象，探討是否因為流道設計不佳造成流體分佈不均勻，進而產生較大之溫度梯度，亦或是不良的幾何形狀造成結構應力集中現象，將分析結果所顯示之特性提供設計人員修改設計，待設計人員修改模型後，需再由 CFD 重新計算熱、流場，再將溫度場提供給結構分析，如此反覆運算方可求得最合適之幾何設計，此為結構數值分析主要之功用。至於整個 SOFC 系統啟動時之動態分析是屬於複雜之非線性問題(包含流、電、熱、固耦合以及回饋控制系統)，CFD 與有限元素分析軟體較不適用於此動態分析。在暫態數值分析方面，多僅利用 CFD 運算固定條件下，短時間之流體暫態行為，提供單一時間下之溫度場，以便 FEA 軟體進行準暫態熱應力分析。暫態模式之熱、固耦合運算是為一具挑戰性工作。

穩態的性能分析與所造成的熱應力分析能提供在電池堆設計上與材料選用上相當的參考價值，但在 start-up 操作模式策略制定上之考量乃在於系統層級(system-level)且具需有動態響應能力，以進行閉迴路(close-loop)之操控模式策略制定，因此需建立動態模型以進行控制系統設計。控制系統首要步驟即建立受控廠(plant)之動態方程式，以進行受控系統(system)之動態模擬(dynamic simulation)，其次為進行控制性能規格(time domain / frequency domain)訂定，該規格可藉由應用 CFD+CAE 對該元件設計所歸納而得之系統參數進行訂定，接下來進行控制策略之設計，以符合系統操作需求。以 CFD 與 FEM 方式進行長時間之動態行為描述確有其困難之處，但若以該方式做為元件設計規格之評估並搭配實驗數據加以驗證，並將其元件規格提供作為系統操作運轉之依據，以進行系統動態模擬。動態系統模擬與 CFD+CAE 元件設計之整合及搭配實驗進行 benchmark，應為解決上述問題之可行之道。本計畫規劃建立一在可變操作環境之模擬系統及其性能估測能力，以進行起機模式之操作策略制定。

## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 SOFC 系統技術發展

燃料電池是一個能把化學能直接轉化為電能的同時提供一定量的熱能的裝置。雖然其基本原理早在十九世紀就已經提出，但因環境變遷與技術演進，直到上個世紀九十年代才得以高速的發展。在眾多燃料電池當中，SOFC 屬於高溫型燃料電池，挾其高能源轉換效率及高溫廢熱可回收用於 bottoming cycle 之優勢，與熔融碳酸鹽型 (MCFC) 同被列為分散式電力研發主力，由於其操作溫度在 800-1000°C 之間，使得材料的選用、電池組的封裝技術以及元件耐久性均受到極大的限制，因此國內外均積極研究中低溫的 SOFC 產品，惟因面臨可靠度提升及價格抑制不易突破之瓶頸而導致發展速度較為遲緩。美國西屋公司曾於 1992 年完成首座 25KW 燃料電池發電廠，交由日本的電力公司及瓦斯公司展開測試研究；同年 10 月，首座 25KW 汽電廠亦在日本進行測試。1997 年底，首座 100KW 汽電廠亦開始在荷蘭示範運轉。歐美日等先進國家皆由國家級研究機構主導進行上中下游整合研發，其中，美國由 DOE 主導的固態能源轉換聯盟(SECA)整合了國家實驗室、學術界、產業界及聯邦政府專家的研發能量，以期研發高可靠度與低價格的 SOFC;歐盟則由 FZJ 實驗室整合學術界、產業界、研究機構、及中小企業執行 Real-SOFC 計畫；至於日本方面則由新能源及產業技術發展組織(NEDO)主導 SOFC 商業化研究，其重點在發展能提供熱與電之家用型 SOFC 系統，目前已有 Kyocera、TOTO...等廠商參與計畫。

國外在 SOFC 方面的研究已有二、三十年的時間，相關的文獻亦相當多，在整體發電系統概念設計與分析方面包含：KAI 等人利用連續單元法(sequential modulus approach)分析簡單型固態氧化物燃料電池系統之可用能[4]，文中分析過量空氣與燃料使用率對可用能、熱力學第一定律效率和熱力學第二定律效率之影響，文中分析之系統並未包含壓縮機，分離器和 pump 等週邊設備。Ernst 等人提出 200kW SOFC 概念之設計[5]，文中分析改變電池堆操作參數如空氣溫

度、燃料使用率、操作電壓和內重組率對熱電合併(CHP)之 BOP 和電力成本(COE)之影響，惟文中並未對 SOFC 之模式作任何之說明。Ernst 等人[6]於次年針對相同之系統改變數種設計，在不同流程下分析其效率與成本。結果顯示利用升壓機(booster)輸送氣體比用風扇來得有效率，而陽極排氣之回收可提供外重組器所須之部分蒸汽並提高熱能使用率。Chan 等人亦針對簡單型之 SOFC 動力系統進行可用能分析[7]，文中分別以氫和甲烷為燃料進行模擬，分析不同操作條件、電池堆材料特性對系統效率之影響，結果顯示提高燃料使用率將提高整體系統之效率；惟在模擬電池堆之性能時皆以溫度之函數表示，即其為整體之分析(global analysis)而並未考慮單電池細部之幾何效應。Chan 等人後續將渦輪機合併至此簡單型 SOFC 動力系統作進一步之分析[8]，此系統同前為內重組之 SOFC，結果顯示此內重組混體 SOFC/GT 系統電力效率可達 60%，而系統效率(含廢熱回收和共生)可達 80%；若提高系統操作壓力可增加系統效率，而在維持燃料使用率下提高燃料流率則降低系統之效率。Douvartzides 等人提出以乙醇為燃料之 SOFC 動力系統的可用能分析[9]。Yaofan 等人提出中間冷卻式渦輪機結合固態氧化物燃料電池 SOFC/ICGT 混體系統之分析與最佳化[10]，系統包含管式 SOFC、增濕氣多段冷卻渦輪機和其他輔助元件，文中利用熱力學分析程式(APSAT)進行性能分析和主要系統參數之敏感度分析，結果顯示在過量空氣 55%時系統電力效率可達 75%以上。Fontell 等人提出 250kW 平板型 SOFC 熱電合併系統之概念研究[11]，此動力系統應用於船舶，其中包含燃料和空氣供應設備、陽極氣體回收設備、啟動時所須之蒸氣，廢熱回收設備、備用動力和動力電子控制系統。此系統之效率可達 55%以上，結果顯示，主要成本為佔 31%的電池堆和佔 32%的動力電子控制系統。

國內在 SOFC 方面的研究起步較晚，行政院原子能委員會所屬核能研究所 在 2002 年開始積極結合產業界發展 SOFC 元件的研製，並著手整合學術界進行整體發電系統之規劃、分析、設計和組裝，期望能在最短的時間內完成 1kW 的示範發電機組，並迎頭趕上先進國家在這方面的發展。另外其他學術機構的零

星研究包含台灣大學、清華大學化工系進行 SOFC 電極的研製外，其他在流道設計、熱管理方面和經濟效益分析方面仍相當少見。義守大學利用自行撰寫的程式分析電池堆的流量分布和壓力分布情形[12]，此研究成果可提供電池堆幾何形狀設計上之參考。國內在這方面初步的成果包含：SOFC 電池堆組裝設計與模型整備[13]，文中針對 SOFC 電池堆各部分材料的研製與選用、幾何形狀之設計、氣密實驗進行研究。平板型 SOFC 流道分析、量測與設計[14]，針對所設計之流道幾何形狀進行模擬分析和非接觸性之量測，以作為未來幾何形狀設計與改良之依據。平板型 SOFC 電化學與熱傳分析[15-18]，文中進行電化學分析和燃料電池之性能分析，並提出一較有效率的迭代計算方法，考慮電池堆和外界的熱傳效應，以修正電池性能分析的精確性，此方法在工程設計階段可縮短相當的時程，甲烷與水蒸汽之高溫觸媒重組研究[19]，此研究乃進行重組器之研製，以提供未來國內建置整體發電系統時所需。在整體發電系統分析方面，文獻[20]利用熱力學分析方法探討含外部重整器之 SOFC 小型氣渦輪機之複合系統之操作壓力、溫度和壓縮比對系統熱效率之影響，為了簡化分析模式，SOFC 中之反應物只考慮水，而在重組器之出口溫度設定為 1000K，由於在 SOFC 中反應的簡化，因此無法分析燃料回收和續燃所能回收之能量。清華大學機械系利用 Matlab/Simulink 進行 SOFC/GT BOP 的分析[21]，但由於缺乏相關元件的設計資料，因此在建立分析模式時作了相當的簡化。核能研究所提出 SOFC/BOP 概念設計與整體系統之效率分析[22]，文中利用 GCTool 套裝軟體對尾氣續燃型之 BOP 概念設計進行整體系統效率之分析，文中探討之系統包含外重組器，其中甲烷進入 SOFC 時預先重組 30%，燃料回收之效應與內重組反應在此文中並未加以探討。基於 SOFC 產生高溫排氣，其可利用熱能(Available Heat)遠優於低溫型燃料電池；故在能源轉換系統設計上，前述之高溫排氣之熱能應善加利用，對提昇整體能源效率將有明顯之助益。

### 1.2.2 SOFC 模擬

建立 SOFC 完整之系統動態模型實為一具挑戰性之工作，需能有效整合各

元件、各領域之專業，才能充份展現系統特性。目前國外對於 SOFC 各元件模擬分析與系統模擬控制有下面幾項成果：文獻[23]Petruzzi 等人以電化學及熱傳手法建立一個通用的 SOFC 數學模式，藉以模擬 SOFC 內部的熱傳現象如啟動、穩態與冷卻各種情形下之模擬分析，並且可直接更改各關鍵參數以進行種型態的 SOFC 模擬分析；文獻[24]Francisco 建立一固定操作區間內模擬 SOFC 動態行為，並應用系統識別演算線性模型；文獻[25]S.H. Chan 建立一完整的極化特性描述，並進行改變電極及電解質厚度之靈敏度分析；文獻[26]Yutong 以物理函式模型（physical principle）推導狀態空間（state-space）變數方法之 cell-level 模型，展示電極擴散與阻抗對電池特性之影響，針對負載步階響應、分壓及濃度、擴散層及溫度效應之影響皆有模擬結果展示。在控制與識別技術應用在效率及穩定性提升與電力品質改善等，亦有多篇文獻可供後續發展參考，文獻[27]F.Jurado 應用基因演算法來設計模糊控制器以提降低諧波（harmonics）提升供電品質；文獻[28]Francisco 應用類神經網路進行 PWM inverter 控制以提升供電品質；文獻[29]Jaime 藉由訓練方式應用類神經網路設計 SOFC 之性估測能力，應用此估測模擬器可進行各操作區間之性能分析與最佳操作點選定；文獻[30]應用模糊控制器分別在 stand-alone 與 grid-connection 操作狀態下之 power conditioning unit 控制，針對負載波動有快速響應之穩定能力。

### 1.2.3 Start-up

為避免在 Start-up 階段造成過大的溫度梯度造成熱應力破壞，除了在設計分析及選用適當匹配 TEC 的材料外，熱能管理與負載型式的整合控制是否得宜，除悠關起機模式的成敗，亦會影響長期的運轉特性。Fontell[31]將整體 SOFC power system control 分為三個部份，其中主控制器進行入口流量、溫度、回收量及電壓等控制，使用電熱方式加溫陰極空氣及重組器以進行溫度控制，但對溫升控制程序與負載型式並無說明。Chyou[32]等人於 2004 年以電化學與計算流體力學手法，並搭配有限元素法進行多次迭代求取在穩態下有熱損失之溫度分布情形，並於隔年文獻[3][33]進行步階負載變動下之溫度與電壓之暫態響

應，並嘗試進行 1~10 等不同步階數之平均溫昇現象探討，發現隨著步階數的增加可減緩溫昇量，但未進行瞬時溫昇率分析。Sven Schäfer[34]於 2003 年以 linguistic expert knowledge 方式建立一可進行動態模擬材料參數與操作程序相關聯之系統模型，以得到在操作條件改變下電池內部特性變化情形，並解釋在負載步階上昇時，電壓之 undershooting 為陰極損失所造成，及探討材料微結構（microstructures）對 start-up 特性之影響，隔年 Ellen[35]沿用該方法，進行在 start-up 及動態操作階段之電池堆性能估測。Selimovic[36]分別進行二維穩態與暫態模型，除進行應力分析與比較外，並進行動態之 heat-up 與 start-up 模擬，探討陶瓷與金屬連接板溫昇特性與所造成熱應力之差異。對於做為 APU(auxiliary power unit)應用的 SOFC，由於應用特性的差異，其起機模式與動態操作之性能比固定式(stationary)更顯得重要許多，Petruzzi[37]以 MATLAB 建立一個三維的電池模型，並建立簡化的熱交換器與重組器單元，以進行 APU 之起機與動態操作模擬分析，但不包含應力分析、電力調節、與控制系統等。另有多篇相關文獻可參閱[38]~[41]。

#### 1.2.4 控制理論

本研究之控制理論，以智慧型具線上(On-Line)學習控制器，Fuzzy Control, Self-Organizing Fuzzy Control[46-49], Self-Organizing Fuzzy Sliding Mode Control...等。

模糊集合理論最早是由 Zadeh 教授在 1965 年所提出來的，後來在 1974 年英國倫敦大學的 E.H. Mamdani 教授成功的將 Fuzzy 理論應用於控制上。然而模糊理論發展至今，在應用於上仍有相當多的缺點，最常見的問題如：(1)專家經驗不足 (2)資料庫龐大。若欲使用模糊控制器於一個高控制精度的系統，往往需要強大的資料庫，而實際硬體裝置中記憶體的大小會使資料庫有所限制。由於上述的缺點，學者致力於解決專家經驗不足的問題，於是具有自我學習的智慧型控制器興起，如具學習能力的自組織控制器(Self-organizing fuzzy controller)

[45]。為了簡化過於複雜的模糊資料庫的問題，以模糊滑動平面 $\sigma$ 取代傳統以誤差 $e$ 及誤差微分 $\dot{e}$ 為輸入規則的模糊控制，如文獻[42-45]。但除了以模糊滑動平面 $\sigma$ 作為模糊規則庫的輸入來簡化模糊資料庫之外，另外亦有學者提供以狀態距離(Signed-Distance)作為模糊規則庫的輸入，主要目的仍為縮減傳統大量且複雜的規則庫[49-50]，另一方面，由於滑動平面的邊界層的縮小可降低系統穩態誤差，提高系統精確度，卻也失去了系統強健性，也有學者在這一方面提出了解決方法[51]，即在控制輸入中多考慮一強健項來克服此一缺點。

本研究將運用模糊滑動平面控制理論作為控制器主軸，但並非以過去用滑動平面 $\sigma$ 作為模糊規則輸入變數而改為以系統狀態距離 $ds$ 來作為模糊規則輸入，另外亦為了提高系統強健性以及精確性，除了在控制輸入考慮一強健項外，並且以模糊控制器線上調整系統參數，以提升控制器的性能，而所有的控制參數皆以狀態距離 $ds$ 作為基礎。最後在系統間的結構耦合方面，本研究嘗試以解耦合模糊滑動平面控制器做適當的誤差權重分配，以解決系統間的耦合關係。

### 1.3 研究動機

目前在電池堆特性之研究多以穩態或暫態之 CFD 數值分析為主，主要在於分析燃料電池內之特性量分佈，如流場型態、溫度場、濃度變化、電流密度分佈等之設計問題，至於整個 SOFC 系統啟動時之動態分析回授控制是屬於複雜之非線性問題(包含流、電、熱、固耦合以及回饋控制系統)，CFD 與有限元素分析軟體較不適用於此動態分析；穩態的性能分析與所造成的熱應力分析能提供在電池堆設計上與材料選用上相當的參考價值，但在 start-up 操作模式策略制定上之考量乃在於系統層級(system-level)且需有動態響應能力，以進行閉迴路(close-loop)之操控模式策略制定，因此需建立動態模型以進行控制系統設計。因此本研究採以整體模式 (Lump mode) 建立 SOFC 燃料電池堆數學模型，此模擬程式由電化學反應動力學、熱力學、熱傳學、空氣動力學、及電路學建立操作電壓與溫度、氣體分壓、負載、及各可變參數之關係。初步模擬結果顯示，以 MATLAB/Simulink 建立動態模擬模組，經過設定合適之參數可進行系統之動態行為描述。

如何在最短時間內將電池堆加熱至工作溫度，並使其輸出電壓穩定為本研究重點。Start-up 程序為 SOFC 操作之重要一環。由於目前 SOFC stack 包含 3 種陶瓷及一種不鏽鋼材料，PEN 熱膨脹係數差異會促進陶瓷材料既存孔隙或缺陷成長為較大的裂縫，進而造成組件的洩漏或破損，降低電池的效率，甚至造成永久損壞，因此 Start-up 之溫升程序對 SOFC 組件的熱應力影響將是設計 SOFC 系統不可或缺的步驟，其起機策略的步驟準確性悠關整體系統性能之動態表現，本研究藉由模糊控制理論控制陰陽極入口流量，並考慮到負載變化的影響，發展出能大幅縮短 start-up 時間之起機模式策略，並可應用於各種系統。

本研究利用平板型固態氧化物燃料電池 (SOFC) 電池堆 (Stack) 之總體數學模型，進行 start-up 的模擬。以 MATLAB/Simulink 建立動態模擬模組，經過設定合適之控制器可進行 SOFC start-up 之動態行為描述。

## 第二章 SOFC系統架構

### 2.1 Stack 系統架構

圖 2.1 為一燃料電池發電系統之架構圖，本體部份主要由 BOP、Stack、PCU 等單元所組成，BOP 及 PCU 藉由控制單元進行操控，以得到符合要求之性能輸出，而 Stack 本身為不可控制之元件，但可觀測。運轉過程中，控制單元依照實際負載條件需求，對 BOP 進行燃料、空氣等輸入參數進行調節及熱能回收參數等工作命令，同時控制 PWM converter、inverter 及 battery 進行電力調節，各參數間皆有互動關係存在，應綜合考量為宜。

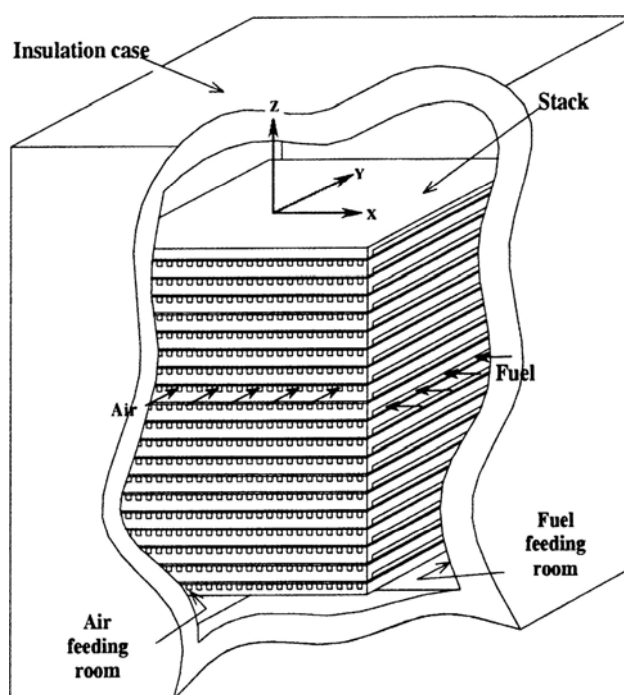
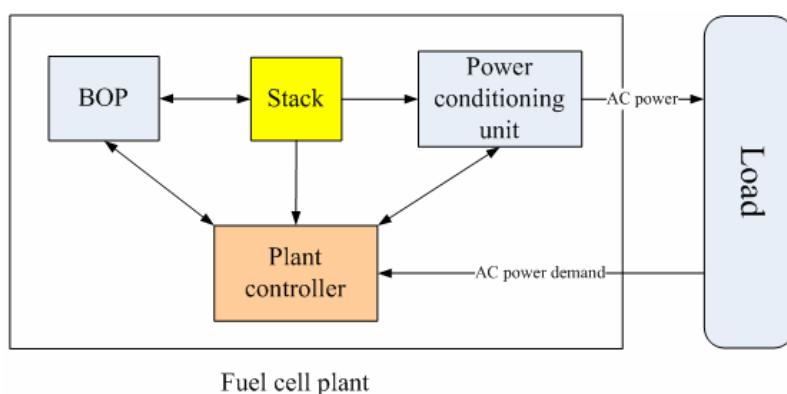


圖 2.1：燃料電池發電系統之架構圖

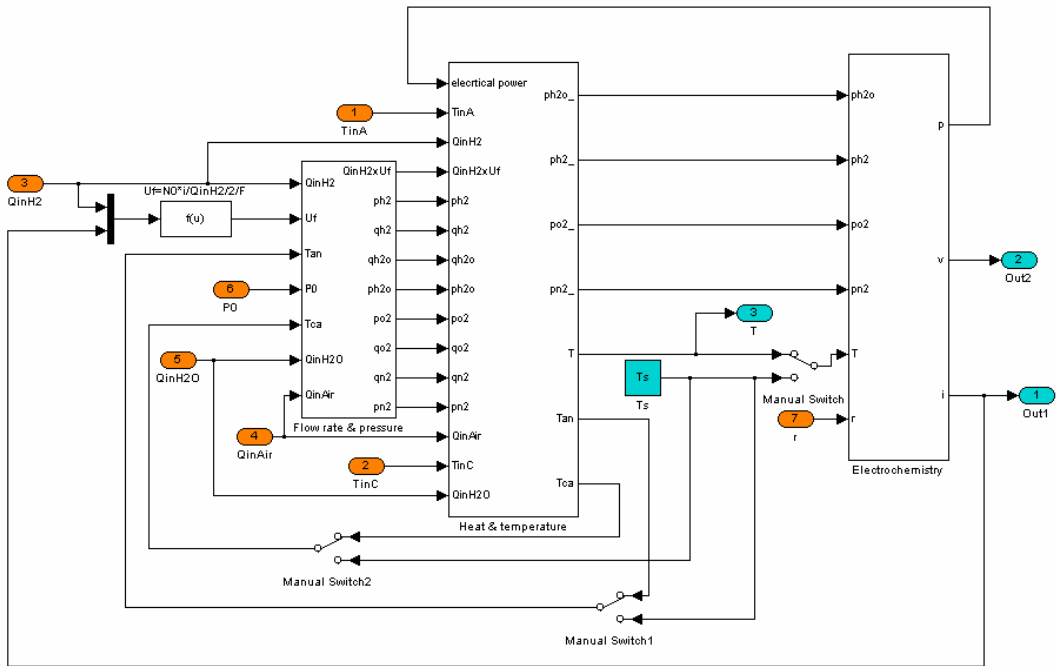


圖 2.2：SOFC Stack 模組示意圖

圖 2.2 為 Stack 的電力輸出模型，本模型可分為三大部份，即 flow rate & pressure、heat & temperature、與 electrochemical 三大模組，各模組間互相傳遞溫度、壓力、流量、電功率等參數，以進行 Stack 整體之動態行為計算。

## 2.2 Stack 系統模型

電池堆為 SOFC 系統最重要之元件，其模型之準確性悠關整體性能之動態表現。藉由熱力學與電化學推導其流道內之壓力、溫度，並考慮極化現象的影響，建構 Stack 的電力輸出模型，在 stack modeling 部份，可分為兩部份進行，分別為 A1.以氫氣為燃料之電池堆及 A2.以部份預重組為燃料之電池堆。以 A1 模式所建立之電池堆模型，由於是以氫氣為燃料，無內部重組問題，為單純之氫氧電化學反應，其特性易與多數文獻與穩態實驗進行驗證比較，進行參數修正，待驗證無誤後再進行 A2 部份。

A1 部份包含以下子項：

A1.1 建立動態質傳模型，以模擬電池堆內各氣體分壓隨入口流量、溫

度、與燃料使用率之變化情形，以作為電化學 Nernst Eq. 計算開路電位之活性指標，另由於電極之多孔性擴散行為所形成之反應物與生成物之分壓亦需詳細描述。

A1.2 建立能量平衡模型，由於氣體進出電池堆與因電極組合 (PEN) 電化學反應所產生的反應熱，藉由傳導及對流現象將熱帶至外部，因此氣體之流量、溫度、材料特性、與負載大小與型式皆會造成電池堆溫度變化，此溫度將影響電化學特性及材料耐久性與電池堆壽命。

A1.3 建立電化學模型，藉由 A1.1 與 A1.2 所得之氣體分壓與溫度進行開路電位計算，當電流通過燃料電池時，電極電位將偏離可逆電位，這種現象稱為極化 (polarization)，其偏移量為過電位，主要為以下三項：活化過電位 (activation overpotential)、歐姆過電位 (ohmic overpotential)、濃度過電位 (concentration overpotential)。燃料電池之實際輸出電壓為：開路電位-過電位。

A1.4 由上述各模組間互相傳遞溫度、壓力、流量、電功率等參數，以進行 Stack 整體之穩態行為模擬分析，並與實驗結果進行驗證，修正電極與電解質等材料參數與幾何係數等，以驗證模型之正確性。Stack 參數分析之項目包含：操作溫度、電極活化能、反應常數對活化極化之影響、材料孔隙度/扭曲率/厚度/bulk pressure 對濃度極化之影響、及操作溫度、材料阻抗對歐姆極化之影響等。

A1.5 進行動態模擬測試，修改操作條件以進行定性分析，並完成簡單閉迴路測試。如固定負載及 Air fuel ratio (AFR) 時，變動氫氣入口之流率，由於流量增加導致在 stack 內部之 H<sub>2</sub> 分壓增加，使得電壓及電流皆上升一些，但由於入口溫度低於操作溫度，有較多之熱量被帶走，因而溫度些微下降。固定入口氫氣流率及負載電阻時變動 AFR，隨著空氣流量增加，stack 內部之氧氣分壓逐步上升，同時由空氣帶走更多的熱量導致溫度逐步下降，隨著

溫度下降，由於活化能及極化現象之影響，導致電壓及電流皆些微下降。圖 2.3 為固定溫度下不同流率及燃料使用率對 IV curve 之影響。

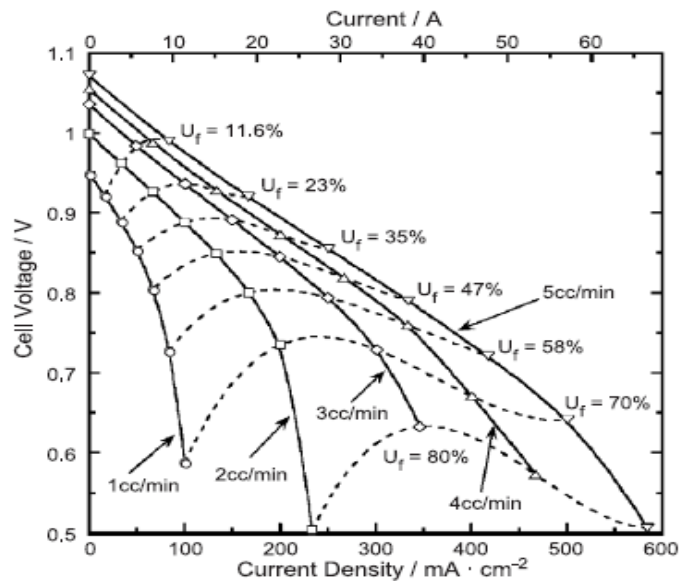
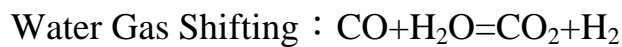
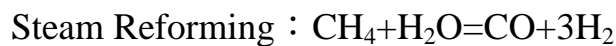


Fig. 2.  $V-I$  characteristics obtained under various fuel flow rate at 1023 K. Broken lines are iso- $U_f$  curves.

圖 2.3 為不同流率及燃料使用率對 IV curve 之影響

A2. 加入內重組反應，改採  $\text{CH}_4$  為燃料，由於重組反應為吸熱反應，將使電池堆之溫度降低，同時造成內部之成份改變。內重組反應包含下列反應式：



並進行動態模擬測試，修改操作條件以進行定性分析，及完成簡單閉迴路測試。

## 第三章 控制理論

本研究所利用之控制理論為模糊滑動平面控制理論，故本章將分別對控制理論做以下介紹：3.1 節介紹模糊控制系統；3.2 節介紹滑動模態控制理論的特性及優點；3.3 節介紹模糊滑動模態控制理論。

### 3.1 模糊控制理論

模糊理論是為了解決真實世界中普遍存在的模糊現象而發展出來的一門學問。最初，是由美國自動控制學者 Lotfi.A.Zadeh 於 1965 年提出模糊集合論的見解後，在 1974 年英國倫敦大學 E.H. Mamdani 教授則成功的將模糊理論應用於控制上。現今模糊理論已經成功地被應用於各種不同的領域，例如控制工程 (Control engineering)、人工智慧 (Artificial Intelligence)、圖形辨識 (Pattern recognition)、決策分析 (Decision analysis)、信號及資訊處理 (Signal and Information processing) 等。

#### 3.1.1 模糊系統

傳統的控制器設計上，必須先對整個系統進行瞭解與分析後，才能根據系統的特性推導出精確的數學模型，來描述此受控系統。然而在實際複雜系統上，控制過程的非線性 (nonlinear)、時變性 (time-vary)，往往很難以系統鑑定 (System identification) 的方式對受控系統建立數學模型 (Modeling)，再加上受控系統及控制過程中的不確定因素頗多，如干擾、溫度等，使得傳統的控制器設計方式無法達到較佳的性能要求。

模糊控制是一種將人類決策模式植入控制器的過程，使得設計一個控制器不需依賴數學模型的推導。簡而言之，模糊控制是以類似於人類經驗法則的 if-then 形式，來表達模糊性的思考及決策過程，且著重於人類的經驗及對問題的掌握程度，不主張用繁雜的數學分析及數學模型來解決問題。因此，對於複

雜的系統或是難以用明確的數學模式來表達的系統，以直覺及經驗為基礎的模糊控制，同樣可獲得極佳的控制效果。而應用模糊控制理論所設計的控制器具有下列特點：

- (1)不需要精密的數學模型，特別適用於非線性時變系統的設計。
- (2)以語意式的模糊規則庫來描述受控的行為。
- (3)將人類的專家知識結合至控制器的設計流程上。
- (4)增加對受控系統的強健性(Robustness)及適應性。

### 3.1.2 模糊控制器架構

一般模糊控制系統主要包括下列四個部分：(1)模糊化機構(Fuzzifier)、(2)模糊規則庫(Fuzzy rule base)、(3)模糊推論引擎(Fuzzy inference engine)、(4)解模糊化機構(Defuzzifier)。圖 3.1.1 所示為模糊控制系統的基本架構。在模糊控制系統中，我們通常藉由感測元件(Sensor)及擷取電路收集一明確(Crisp)的觀測資料，然後藉由模糊化機構將資料轉化為適當的模糊資訊；模糊推論引擎則是整個模糊控制系統的核心，它可根據所得到的模糊資訊以及在模糊規則庫中預先存放解決問題所需的知識及規則，以模擬人類思考決策的模式解決問題，最後解模糊化機構所推論出的模糊資訊轉化為外界所能接受的明確資訊做輸出。以下數節將對模糊控制系統之四部分作簡介。

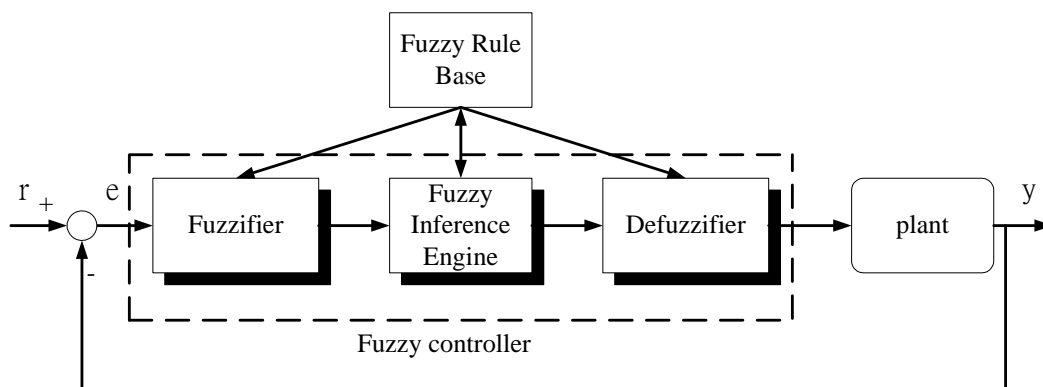


圖 3.1.1：模糊控制系統的基本架構

### 3.1.3 模糊化機構(Fuzzifier)

模糊化機構是將明確的外界輸入資訊轉換為適當的語意式模糊資訊。通常，由感測元件及擷取電路收集的是一個明確的數值，所以須經模糊化機構將之轉換為適當的語意式模糊資訊，模糊化的程序可以將之視為一種映射，由一明確的空間映射到另一模糊的空間。由於模糊控制理論的基礎在於模糊理論，所以需要使用模糊化機構將輸入資料作前置處理。

### 3.1.4 模糊規則庫(Fuzzy rule base)

模糊資料庫是用來描述控制系統的領域知識，主要由資料庫及規則庫所組成。

- 資料庫(Data base)

存放著所有輸入、輸出之模糊語言變數及歸屬函數等資料。

- 規則庫(Rule base)

模糊規則庫適用來建立與存放模糊控制規則，以 If-Then 的形式表達系統輸入與輸出的關係。

而模糊規則庫中所建立的控制規則主要來自於以下方式：

(a)依據系統的響應推導出控制規則：

最簡單的方法便是輸入一個最基本的步階 (Unit Step) 響應，將其輸出訊號的響應與輸入的誤差、誤差變化量訊號作討論、比較，觀察其特性，再以 If-Then 形式表示其控制規則。

(b)參考專家的知識或操作者的經驗：

依據專家經驗或知識經由歸納整理，將之整編成 If-Then 此種語意式的型態，得到規則庫。

(c)根據推導出的系統模型作研究所得：

將實際系統的數學模型推導出，可幫助設計者更瞭解系統參數。一般將推導出的模型於相關模擬軟體下（如：Simulink）模擬，將可以加速對實際系統的掌握，增快效率。

(d)自我學習修正：

單靠經驗、直覺所歸納出的控制規則庫，在實際運用時常常會出現規則庫不合需求或是不足的情況。於是近年來，已發展出相當多在規則庫的自我學習、改良方面的新技術，如類神經網路學習、基因演算法等。在本論文中，便是以自組織模糊控制器對規則庫作修正。

### **3.1.5 模糊推論引擎(Fuzzy inference engine)**

模糊推論引擎是整個模糊控制系統的核心，根據規則庫中設定的控制條件，將前件部、後件部所構成的模糊關係與輸入變數的集合作運算，得到所需的輸出變數，藉以模擬人類思考解決控制問題。

### **3.1.6 解模糊化機構(Defuzzifier)**

因為經由模糊推論所得到的輸出，仍是模糊集合，所以必須經過解模糊化機構運算後，轉換為明確的數值。

在本論文中採用的解模糊化法為重心法（COA，center of area method，如圖 3.1.2 所示）。

重心法：

$$Y^* = \frac{\int_Y \mu_C(Y) \cdot Y dY}{\int_Y \mu_C(Y) dY} \quad (3.1.1)$$

其中： $\mu_c(Y)$  為  $Y$  之歸屬函數， $Y^*$  則代表解模糊化後之明確輸出值。

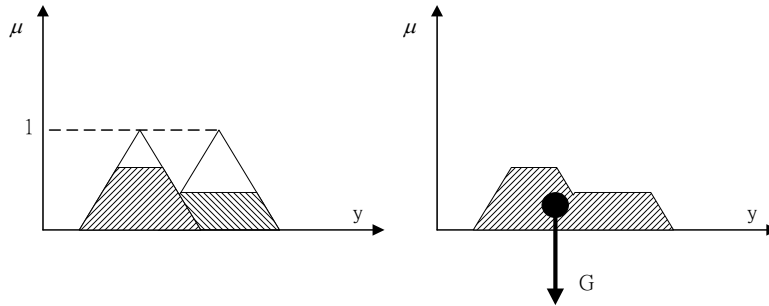


圖 3.1.2：重心法

## 3.2 滑動模態控制理論

滑動模態(sliding mode)是可變結構系統(Variable structure system,VSS)中一個特殊的行為，其原理是利用不連續控制法則使受控系統產生兩個以上的子系統，並加入一切換條件(Switching condition)使系統產生滑動模態，藉以達成控制目標。在本節中，將先介紹滑動模態控制理論的特性及優點，並分別就其基本概念及理論加以探討。

### 3.2.1 可變結構控制

可變結構控制(Variable structure control)簡稱為 VSC，是在 1960 年代由蘇俄學者所發展出來的一種不連續控制理論，早期的模型多為二階線性系統，後來陸續發展出高階系統，可變結構是先使受控系統產生兩個以上的子系統，再利用刻意加入的切換條件，來達成控制目標的一種方法[54]。所以在可變結構控制中，輸入控制便是藉由一組切換條件來決定切換的時機，使其具有兩種以上模式的型態，以使系統軌跡慢慢趨近控制目標，這樣的狀態稱之為『滑動模態』。

近年來，可變結構控制的運用幾乎架構在滑動模態的行為下。滑動模態控

制便是要設計一個滑動平面(Sliding surface)，再經由控制的手段迫使系統軌跡進入滑動平面上運動，並朝著控制目標點前進。

### 3.2.2 滑動模態控制

前節已概述滑動模態的產生方式，本節將探討實現滑動模態的條件。滑動模態的產生，必須要滿足下列二個條件，參照圖 3.2.1 所示，並分別說明如下：

(1) 必須迫使逼近條件 (Approaching condition) 成立，使其產生滑動模態 (Sliding condition)：當  $t=0$  時，系統狀態  $X(0)$  被推向  $S(X)=0$ ，必須確保所有軌跡在有限時間  $t_h$  內接觸此超空間，此即為逼近模態 (approaching mode)。

(2) 使得滑動模態的軌跡逼近穩定點：再來是系統進入超空間  $S(X)=0$  後，也就是  $t > t_h$ ，必須保證進入後不會再離開此超空間，且朝著平衡點  $X=0$  逼近，最後到達  $X(\infty) \rightarrow 0$  的目標，在此超空間中的行為即為滑動模態。

對於單一切換條件系統而言，滑動模態在滑動平面上產生，但對一個多切換條件的系統而言，其具有多個滑動平面，而滑動模態則發生在每個滑動模態的交集空間處。

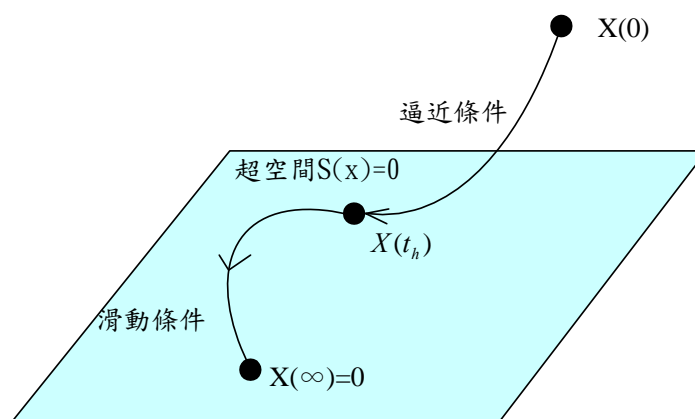


圖 3.2.1：滑動模態之產生

### 3.2.2.1 滑動條件

由於滑動平面是一個將原空間分隔成兩個子空間的連續交界面，當系統狀態變數的軌跡接近滑動平面  $S(x)=0$  時，軌跡會在滑動平面上滑動，欲達成這樣的效果，在  $S(x) \rightarrow 0$  時，必須有下列的條件：

(1) 當  $S(x) > 0$  時， $S(x)$  的值必須隨時間的遞減，亦即  $\dot{S}(x) < 0$

(2) 當  $S(x) < 0$  時， $S(x)$  的值必須隨時間的遞增，亦即  $\dot{S}(x) > 0$

以數學式表示則為：

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \dot{s} < 0 \quad (3.2.1)$$

此即所謂的滑動條件，如圖 3.2.2。式(3.2.1)為一充要條件，即當滑動模態存在時式(3.2.1)成立，而式(3.2.1)成立則滑動模態必然存在。

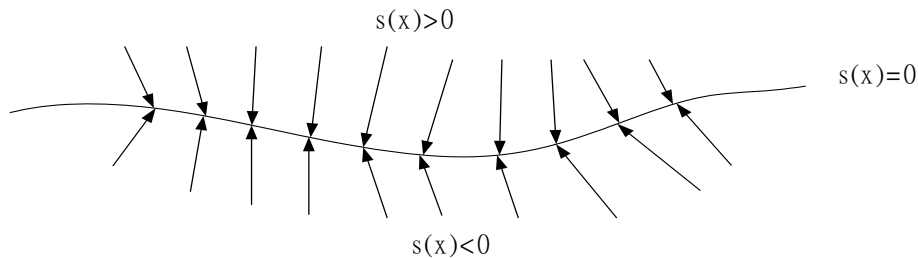


圖 3.2.2：滑動條件示意圖

### 3.2.2.2 逼近條件

逼近條件簡單的說就是讓系統在有限的時間內抵達滑動模態。一般最常使用的逼近條件為[9]：

$$S \cdot \dot{S} < -\sigma |S| \quad \text{當 } S \neq 0 \quad (3.2.2)$$

其中  $\sigma > 0$

選取 Lyapunov 函數：

$$V = S^2 \quad (3.2.3)$$

因為滑動函數  $S$  對時間  $t$  是可微的，因此

$$\dot{V} = 2 \cdot S \cdot \dot{S} \quad (3.2.4)$$

由逼近條件式(3.2.2)可知：

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} < -2\sigma \cdot |S| = -2\sigma\sqrt{V} < 0 \quad (3.2.5)$$

所以當 Lyapunov 函數  $V = S^2 > 0$  且  $\dot{V} < 0$ ，根據 Lyapunov 原理可得知， $V(t)$  必在時間  $t = \sqrt{V(0)}/\sigma$  之內收斂至 0，接觸到滑動平面  $S(x) = 0$ 。

### 3.2.2.3 等效控制

當系統由連續的逼近條件到達滑動模態時，變成了不斷高速切換的不連續軌跡；為了將此時的軌跡視為連續，Filippov 提出等效控制 (equivalent control) 的概念，則滿足此連續滑動模態軌跡的控制輸入稱為“等效輸入”。

考慮一個以狀態變數表示的單輸入系統：

$$\dot{x} = f(x, u(x)) \quad (3.2.6)$$

假設  $x$  及  $u(x)$  為連續函數，在逼近條件下， $u(x)$  不作切換且  $f(x, u(x))$  為連續的函數。當其抵達滑動條件時， $u(x)$  會不斷切換且  $f(x, u(x))$  為不連續，令控制輸入為：

$$u = \begin{cases} u^+ & s(x) > 0 \\ u^- & s(x) < 0 \end{cases} \quad (3.2.7)$$

根據 Filippov 提出之等效控制觀念，若滑動模態存在時，則在滑動平面

$S(x)=0$  中的  $u(x)$  可視為連續的等效控制輸入  $u_{eq}(x)$ ，即：

$$f(x, u_{eq}) = \mu \cdot f(x, u^+) + (1 - \mu) \cdot f(x, u^-) \quad (3.2.8)$$

其中  $0 < \mu \leq 1$

因此，滑動模態的系統可以表示為

$$\dot{x} = f(x, u_{eq}) \quad (3.2.9)$$

對整個控制輸入  $u(x)$  來說， $u(x)$  包含低頻及超高頻兩種控制量，真實的系統只能允許有限頻寬範圍時，等效輸入可以說是為其中低頻部分，所以  $u(x)$  可表為： $u(x) = u_{eq} + \Delta u$ ，其中  $\Delta u$  為控制輸入中不斷高頻切換的部分。

### 3.2.3 滑動模態控制器設計

在介紹過滑動模態成立的條件及簡單的原理後，本節將簡單的說明滑動模態控制器的設計法則。一般滑動模態控制的設計主要分為下面幾步驟：

(1) 規劃滑動平面：選擇一個適當的滑動平面，使得系統軌跡到達滑動平面時能往規劃的目標點移動。所以滑動平面的選擇會直接影響系統響應的快慢。

(2) 選擇控制輸入：控制輸入的目的是使得系統的軌跡在有限時間到達滑動模態。一般常用的方法是將控制輸入  $u(x)$  視為  $u(x) = u_{eq} + \Delta u$ ，先找出理想的等效輸入，在根據逼近條件與滑動條件原則找出適當的  $\Delta u$ 。

(3) 修正控制輸入：一般根據理想條件設計出的滑動模態控制器，在滑動模態時是需要無限高頻切換的，但無限高頻的切換在現實中是不可能達到而且相當危險的，所以必須對步驟二所設計出的控制輸入作修正。

### 3.3 模糊滑動平面控制理論

由於傳統的模糊控制器應用於對控制性能要求較高的控制系統時，常常需要建立一龐大的資料庫，需要有足夠的記憶體。然而在實際應用的即時控制(Real time control)系統中，記憶體往往不足以支援一個過大的資料庫，為了能有效簡化模糊資料庫且不犧牲控制性能，本文提出了模糊滑動平面控制器。

#### 3.3.1 模糊滑動平面控制器

本節將說明如何對於滑動平面設計一個模糊控制器。由於模糊滑動平面控制器主要分為滑動平面估測器與基本模糊控制器兩部分，故分別針對此兩部分之設計作一說明。

一般傳統模糊控制系統，如圖 3.3.1 所示，是以誤差  $e$  與誤差變化量  $\dot{e}$  兩個輸入變數來決定控制器的輸出，因此需建立一個以誤差  $e$  與誤差變化量  $\dot{e}$  為輸入之二維規則庫。而模糊滑動平面系統方塊，如圖 3.3.2 是將傳統模糊系統的輸入變數誤差  $e$  與誤差變量  $\dot{e}$  組合成一個滑動平面  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$ ，將此滑動平面取代誤差  $e$  與誤差變量  $\dot{e}$ ，成為新的輸入變數，亦即將原本二維的模糊規則庫改為一維的模糊滑動平面規則庫，而且此一維的模糊滑動平面規則庫仍可達到一般二維模糊規則庫的效果。圖 3.3.3 為模糊滑動平面示意圖。

模糊滑動平面控制器包括兩個主要部分：滑動平面估測器(Sliding surface estimator)與模糊控制器兩部分。

(1)滑動平面估測器：

將迴授回來的輸出訊號，轉換成誤差  $e$  以及誤差變量  $\dot{e}$ ，然後將誤差  $e$  與誤差變量  $\dot{e}$  組合成所預先規劃的滑動平面方程式  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$ 。

(2)模糊控制器：

此部分是一個基本的模糊控制器，以滑動平面 $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e}$ 取代原先傳統模糊控制器輸入變數誤差 $e$ 與誤差變數 $\dot{e}$ 。控制的目標也不再是 $e \rightarrow 0$ 與 $\dot{e} \rightarrow 0$ ，而是滑動平面參數 $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e} \rightarrow 0$ 。也就是說，使輸出狀態在滑動平面上滑動，最終輸出將可逼近所預設的參考目標點。

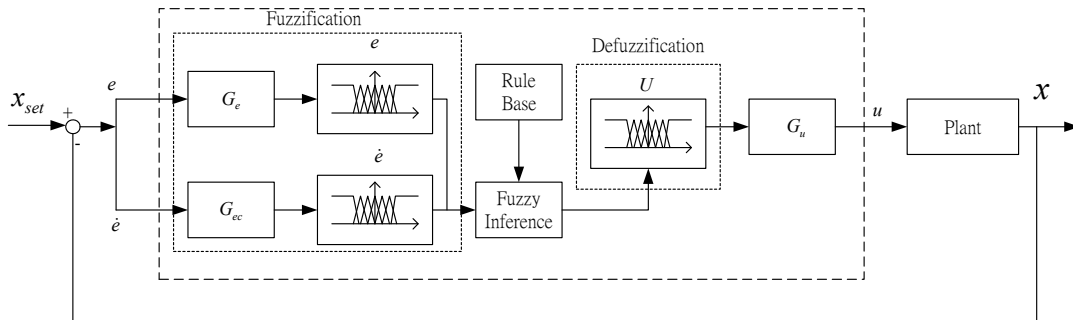


圖 3.3.1：傳統模糊控制器方塊圖

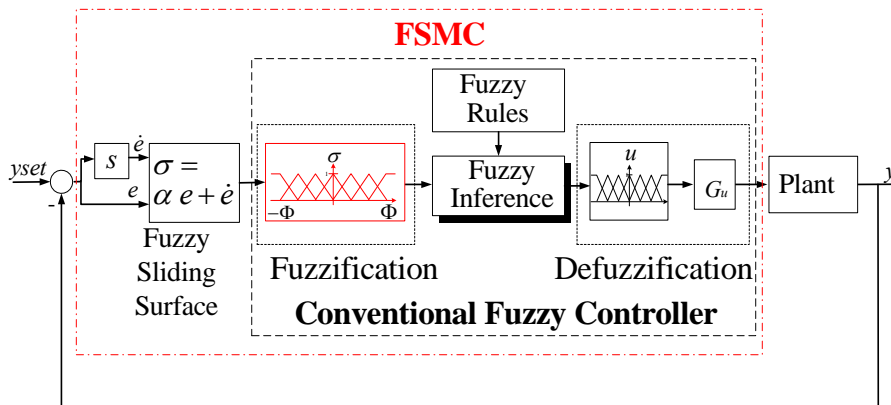


圖 3.3.2：模糊滑動平面控制器方塊圖

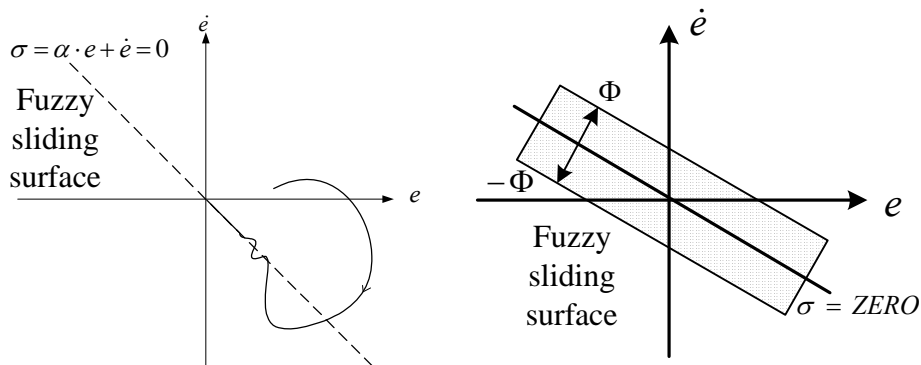


圖 3.3.3：模糊滑動平面示意圖

綜合以上所述我們可以知道，在模糊滑動平面規則庫中將原來的判斷輸入由  $e=0$  與  $\dot{e}=0$  變成  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e} = 0$ ，大幅降低了規則庫建立時的複雜度，且只要將系統的狀態維持在滑動平面  $\sigma = \alpha \cdot e + \dot{e} = 0$ ，則系統最終輸出狀態將會收斂到所設定的理想目標值。

### 3.3.2 滑動平面選取

一個適當的模糊滑動平面規劃的關鍵在於  $\alpha$  值的選取，此  $\alpha$  值乃為模糊滑動平面  $\sigma$  的斜率(slope)，而其  $\alpha$  值的選取是否適當，將直接影響整個控制系統的收斂速度及其性能之優劣，甚至決定了系統的穩定與否，故  $\alpha$  值的選取對模糊滑動平面控制器是非常重要的。然而，此  $\alpha$  值的選定必須先對其所欲控制的系統特性作充分的瞭解，然後，針對實際系統的輸出性能響應與穩定性作適當的評估，才能決定此  $\alpha$  值的大小。

### 3.3.3 歸屬函數建立

根據文獻[20]，首先設定輸入變數  $\sigma$  的歸屬函數如式(3.3.1)與輸出變數  $u$  的歸屬函數如式(3.3.2)，然後根據建立的模糊集合作討論，最後再代入滑動模態控制理論作運算，可以得到一組模糊滑動平面  $\sigma$  與控制輸入  $u$  的關係圖。

$$\begin{aligned} T(\tilde{\sigma}) &= \{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\} \\ &= \{\tilde{F}_{\sigma}^1, \tilde{F}_{\sigma}^2, \tilde{F}_{\sigma}^3, \tilde{F}_{\sigma}^4, \tilde{F}_{\sigma}^5, \tilde{F}_{\sigma}^6, \tilde{F}_{\sigma}^7\} \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

$$\begin{aligned} T(\tilde{u}) &= \{NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB\} \\ &= \{\tilde{F}_u^1, \tilde{F}_u^2, \tilde{F}_u^3, \tilde{F}_u^4, \tilde{F}_u^5, \tilde{F}_u^6, \tilde{F}_u^7\} \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

根據上述的模糊集合，可以訂立下列模糊規則：

$R^1$  : If  $\sigma$  is NB, then  $u$  is NB

$R^2$  : If  $\sigma$  is NM, then  $u$  is NM

$R^3$  : If  $\sigma$  is NS, then  $u$  is NS

$R^4$  : If  $\sigma$  is ZR, then  $u$  is ZR

- $R^5$  : If  $\sigma$  is PS , then  $u$  is PS
- $R^6$  : If  $\sigma$  is PM , then  $u$  is PM
- $R^7$  : If  $\sigma$  is PB , then  $u$  is PB

或

$$R^j : \text{If } \sigma \text{ is } \tilde{F}_\sigma^j \text{ then } u \text{ is } \tilde{F}_u^{8-j} \quad j=1, \dots, 7$$

其中 NB 表示大的負數(Negative Big)，NM 表示中的負數(Negative Medium)，NS 表示小的負數(Negative Small)，ZR 表示零(Zero)，PB 表示大的正數(Positive Big)，PM 中的正數(Positive Medium)，PS 表示小的正數(Positive Small)。NB，NM，NS，ZR，PB，PM，PS 皆為模糊集合(Fuzzy set)的標籤(label)，模糊滑動平面的輸入變數 $\sigma$ 歸屬函數，如圖 3.3.4 所示，輸出變數 $u$ 歸屬函數，如圖 3.3.5 所示。

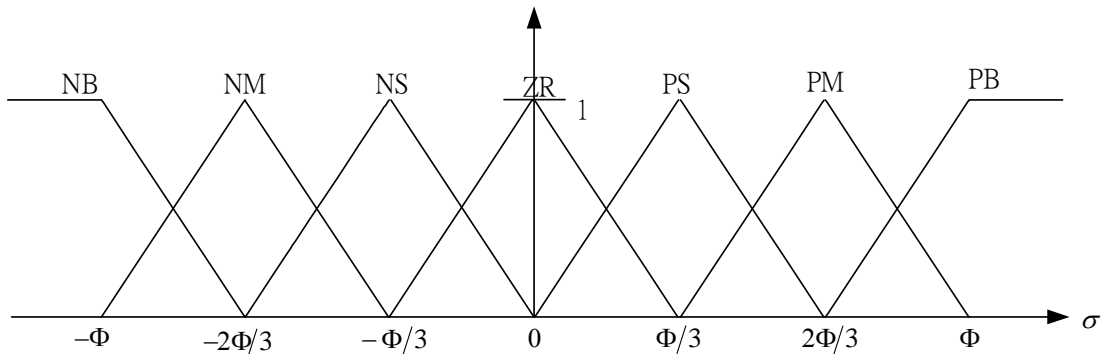


圖 3.3.4：模糊滑動平面的輸入變數 $\sigma$ 歸屬函數

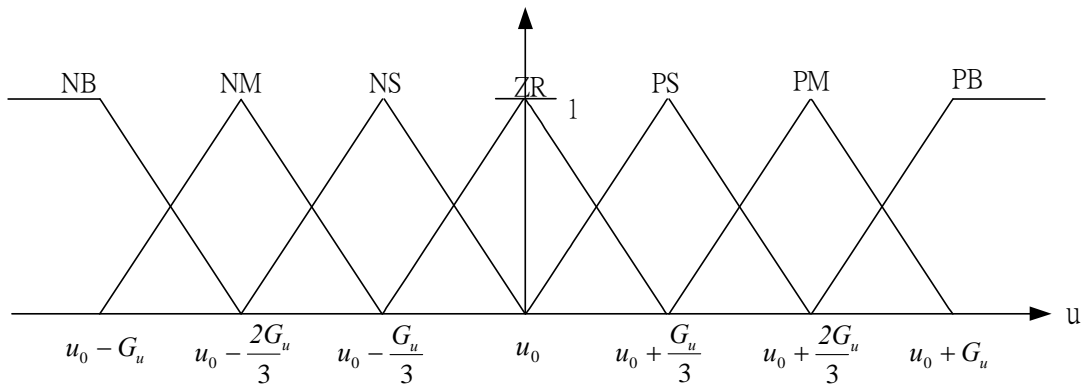


圖 3.3.5：模糊滑動平面的輸出變數 $u$ 歸屬函數

令  $X$  及  $Y$  為模糊規則的輸入及輸出，相對於任一在輸入  $X$  中的模糊集合  $\tilde{A}_\sigma$ ，每一條規則都可以決定一個在  $Y$  中的模糊集合  $\tilde{A}_\sigma \circ R^j$ ，使用最小-最大複合推論規則 (Sup-min compositional of inference) 可得：

$$u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^j}(u) = \sup_{\sigma \in X} \min[u_{\tilde{A}_\sigma}(\sigma), \min[u_{\tilde{F}_\sigma^j}(\sigma), u_{\tilde{F}_u^{s-j}}(u)]] \quad (3.3.3)$$

假如  $\tilde{A}_\sigma$  為模糊單值 (singleton)，也就是說，只有在  $s = \alpha$  時，輸出  $u_{\tilde{A}_\sigma}(\sigma) = 1$ ，其餘部分  $u_{\tilde{A}_\sigma}(\sigma) = 0$ ，我們可以將式 (3.3.10) 簡化如下：

$$u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^j}(u) = \min[u_{\tilde{F}_\sigma^j}(\sigma), u_{\tilde{F}_u^{s-j}}(u)] \quad (3.3.4)$$

輸出歸屬函數

$$u_{\tilde{F}_u}(u) = \max[u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^1}(u), \dots, u_{\tilde{A}_\sigma \circ R^7}(u)] \quad (3.3.5)$$

利用重心解模糊化法 (center-of-area defuzzifier) 來解模糊可以得到一明確輸出  $u_d$

$$u_d = G_u(x, t) \cdot \frac{\int u \cdot u_{\tilde{F}_u}(u) du}{\int u_{\tilde{F}_u}(u) du} \quad (3.3.6)$$

所以模糊滑動平面  $\sigma$  與控制輸入  $u_f$  的數學關係如下：

$$u_f = u_0 - u_d, \text{ 其中 } u_d = G_u(x, t) \cdot \text{sig}(w), \quad w = \frac{\sigma}{\Phi} \quad (3.3.7)$$

而  $u_0$ 、 $G_u$ 、 $\Phi$  等參數意義及如何選定將在 3.3.5 節中作說明。

其中 *sigmoid* 函數  $\text{sig}(w)$  為

$$sig(w) = \begin{cases} -1 & \text{if } w < -1 \\ \frac{-(21w^2 + 27w + 10)}{2(9w^2 + 12w + 5)} & \text{if } -1 \leq w < \frac{-2}{3} \\ \frac{-(15w^2 + 9w + 2)}{2(9w^2 + 6w + 2)} & \text{if } \frac{-2}{3} \leq w < \frac{-1}{3} \\ \frac{-(9w^2 - w)}{2(9w^2 + 1)} & \text{if } \frac{-1}{3} \leq w < 0 \\ \frac{9w^2 + w}{2(9w^2 + 1)} & \text{if } 0 \leq w < \frac{1}{3} \\ \frac{15w^2 - 9w + 2}{2(9w^2 - 6w + 2)} & \text{if } \frac{1}{3} \leq w < \frac{2}{3} \\ \frac{21w^2 - 27w + 10}{2(9w^2 - 12w + 5)} & \text{if } \frac{2}{3} \leq w < 1 \\ 1 & \text{if } w \geq 1 \end{cases} \quad (3.3.8)$$

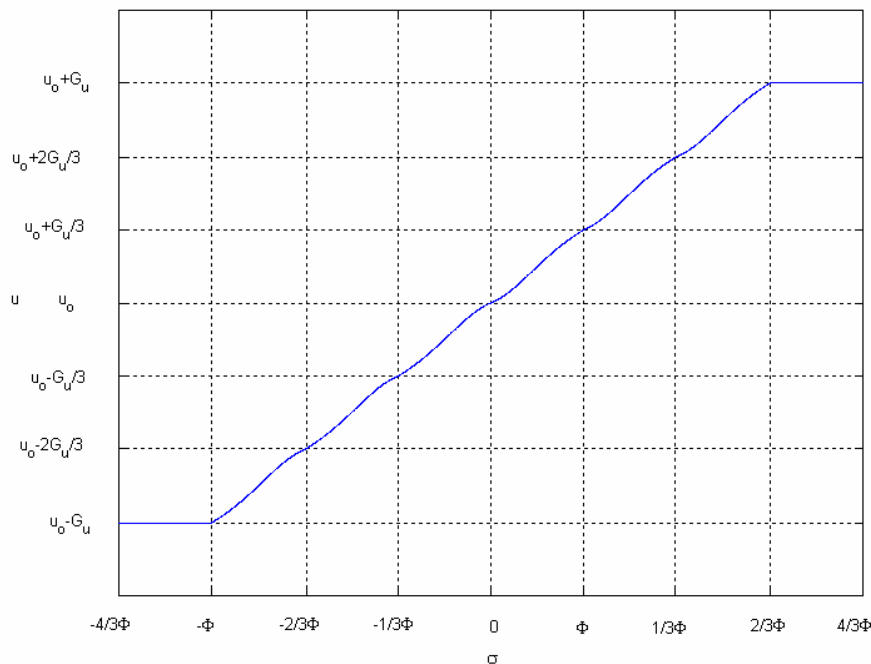


圖 3.3.6：模糊滑動平面與控制輸入的關係圖

觀察圖 3.3.6 可以發現，可以將輸入變數與輸出變數的關係視為一近似於直線的線性關係。也就是說，建立歸屬函數時，可以將之切成數個等份，如此便可省略複雜的算數運算過程。當然，將圖 3.3.6 視為一條直線時，與理想狀況會

有出入，在對於控制性能要求較高或干擾較多的系統中，可能會有誤差，所以本文使用自組織法修正此誤差。

### 3.3.4 解模糊化法則

本控制器選擇 Mamdani method 為模糊推論的法則，以重心法 (The centroid method) 為解模糊化的法則其數學方程式如下：

$$y_c = \frac{\int \mu(y) \cdot y \cdot dy}{\int \mu(y) \cdot dy} \quad (3.3.9)$$

在此  $u(y)$  為輸出變數  $y$  的歸屬函數

當選擇了適當的模糊控制器後，只要再將設計出的模糊控制器配合適當的滑動平面，便可運用在不同控制系統上。表 3.3.1 為傳統模糊控制之  $7 \times 7$  模糊規則庫，共需 49 條規則；表 3.3.2 則為模糊滑動平面之規則庫，只需 7 條規則，相較於傳統模糊控制而言，使用模糊滑動平面控制之規則明顯簡單多了。

表 3.3.1：傳統模糊規則庫

$u$		$e$						
		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
$\dot{e}$	PB	ZR	PS	PM	PB	PB	PB	PB
	PM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB	PB
	PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PB	PB
	ZR	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
	NS	NB	NB	NM	NS	ZR	PS	PM
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZR	PS
	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZR

表 3.3.2：模糊滑動平面規則庫

	$\sigma = \alpha e + \dot{e}$						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
$u$	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB

### 3.3.5 參數 $\Phi$ 、 $u_0$ 、 $G_u$ 設定

$\Phi$  為模糊滑動平面  $\sigma = \alpha e + \dot{e} = 0$  收斂區域的邊界，如圖 3.3.3 所示。此  $\Phi$  值的選定需根據模糊滑動平面  $\sigma$  的控制輸入與實際系統的操作情況作調整。

$u_0$  為控制輸入的偏移量，此值的選定可依實際系統的應用情況作增減，例如：若系統的某一作動元件，其控制訊號僅為正值，但為了避免增加建立不對稱的模糊規則庫之複雜度，便可偏移一個控制量  $u_0$ 。本實驗之節能控制的部分即加入一適當之偏移量。

$G_u$  為比例因子，即是將模糊控制器之解模糊化控制量  $u_d$  依系統實際需求所乘之比例值。而此  $G_u$  值可由下式來決定[20]：

$$G_u(x, t) \geq F(x, t) + D(t) + \eta \quad , \quad \eta > 0$$

(3.3.10)

其中  $F(x, t)$ ：系統模式的非線性邊界(項)

$D(t)$ ：干擾(外界干擾或系統耦合影響)

但因為模糊滑動平面控制器的設計不需要系統的數學模型，故只能利用實驗估測的方法，找到其最適合的值。綜合上面所述， $\Phi$ 、 $u_0$  及  $G_u$  等參數的選擇均會影響控制系統的輸出響應，而其參數的選定均需根據實際系統的特性作參數之估測。

## 第四章 起機模式設計

利用本程式進行 72 cell 之 stack，分別控制入口溫度、入口流率以及負載變動來閉迴路模擬。如圖 4.1 所示：

### (一) 入口溫度控制( $T_{in}$ )

入口溫度( $T_{in}$ )控制係以 stack 即時之溫度  $T$  作為回授，再加上 stack 可容忍的瞬間溫度變化量  $\Delta T$  ( $=15\text{K}$ ) 為入口溫度  $T_{in}$ 。空氣及燃料由其加熱系統加熱至  $T_{in}$  之溫度。

$$T_{in} = T + \Delta T \quad (4.1)$$

### (二) 入口質量流率控制( $\dot{m}$ )

考慮到電池堆溫升率不能過大，故設定溫升率  $\dot{T}_{set} = 0.1 \text{ K/sec}$  為電池堆可接受溫升率；以電池堆即時之溫升率  $\dot{T}$  作為回授，與  $\dot{T}_{set}$  的差值為誤差量，以模糊滑動平面控制器計算控制訊號，控制燃料及空氣之比例式流量閥，以控制 stack 入口質量流率( $\dot{m}$ )，比例式流量閥數學模型設為二階模型。

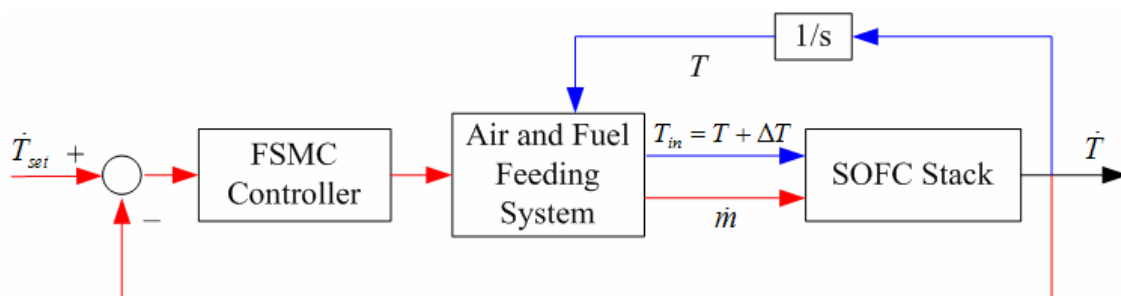


圖 4.1：SOFC 閉迴路 Start-up 控制系統架構

### (三) 負載變動

設定當電池堆溫度上升到 640°C 時，電池堆反應較明顯，由於電流會和電阻下降的幅度呈反方向的上昇，必須開始調降電阻，使電流增大，而為求輸出電壓穩定，所以設定電阻變動時所造成的電流變化量不得大於 3mA/sec。

## 第五章 Start-up 策略動態模擬分析與模式探討

利用所建立之動態模型可構成一完整之 SOFC 動態模擬系統，在可變操作環境下模擬系統及其性能估測能力，如不同燃料入口流率之 I-V curve、負載變動時之電壓、電流、與溫度之響應情形、並可透過回授方式控制其溫升率。利用此模型進行動態模擬，可快速進行參數零敏度測試，針對起機程序中熱氣加熱條件、熱源轉移型式、氣源切換方式、及負載型式等進行模擬，再以選定之最大溫昇率為設計條件，進行起機模式之操作策略制定。在控制理論部份，本研究採用滑動模糊控制器，基本模糊控制器於控制規則設計完成來後，控制性能未必滿足要求，此時就需要做微調的工作，此為基本模糊控制器設計時相當不便之處。滑動模糊控制器具較簡易之規則庫，這也就是其設計的方便所在。

### 5.1 模擬結果

圖 5.1 為設定溫升率  $\dot{T}_{set}=0.1$  K/sec，溫度變化量  $\Delta T=15$ K，之閉迴路 Start-up 控制系統輸出溫度的模擬結果，而溫度變化率可以由 5.2 得知，故電池堆溫度可被控制依設定之溫升變化曲線變化。

圖 5.3 及圖 5.4 為電流及電流變化量，分別為固定負載電阻(25 ohm)和變動負載電阻(36~25 ohm)的電流及其變化量比較，有此可見當負載變動時並不會造成太大的電流變化量。

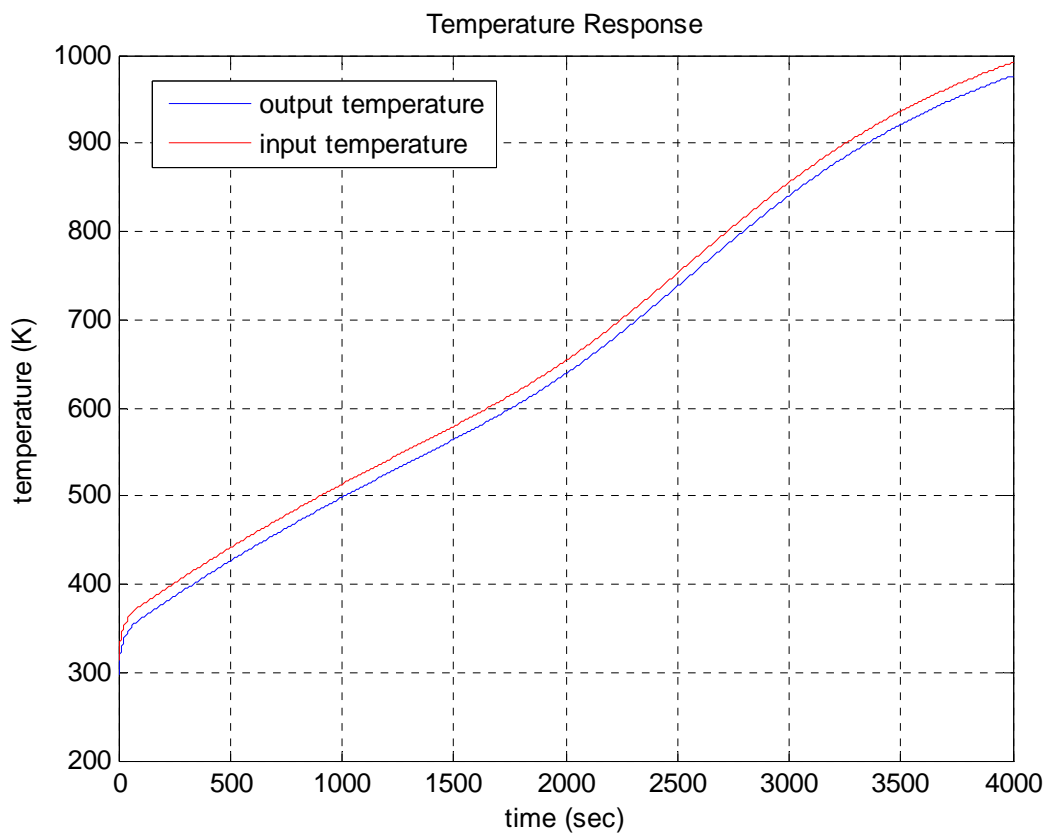


圖 5.1 輸出溫度模擬結果

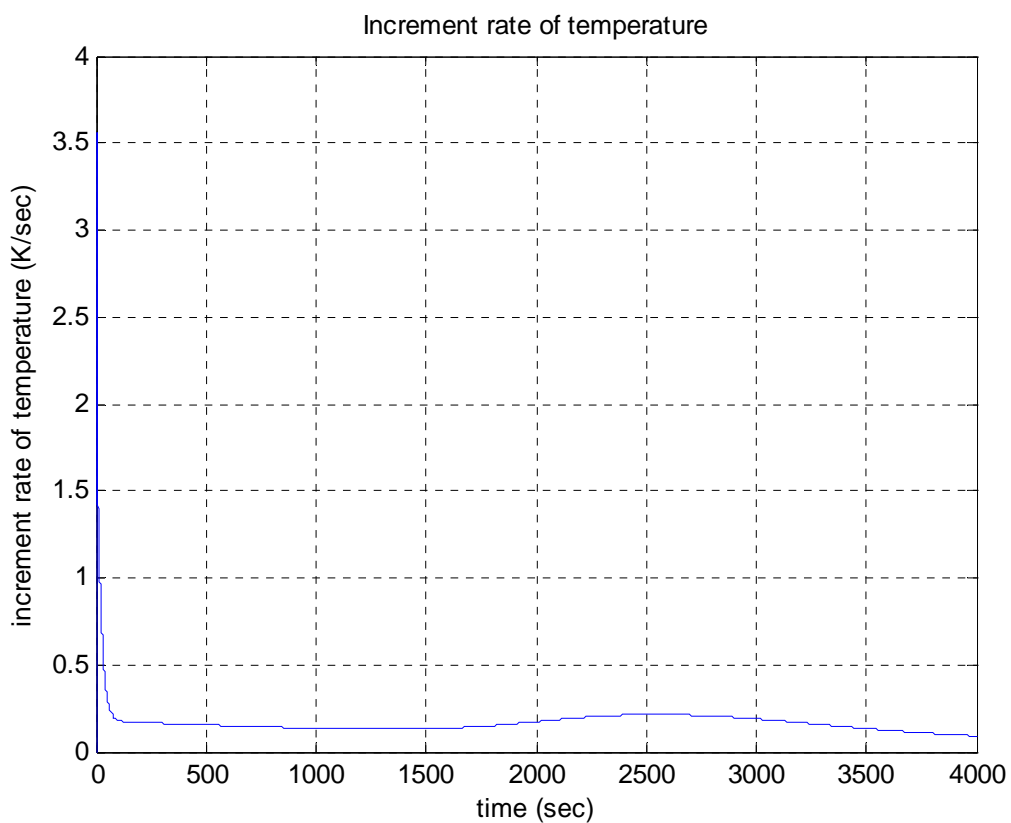


圖 5.2 溫度變化率模擬結果

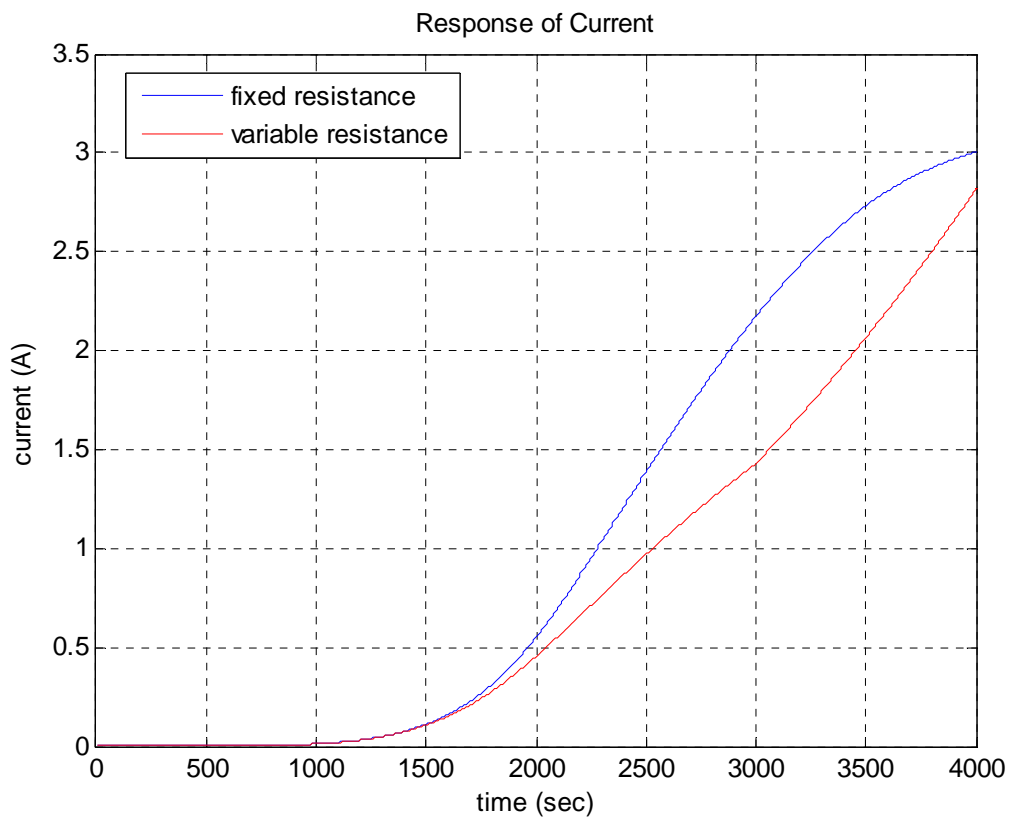


圖 5.3 電流模擬結果

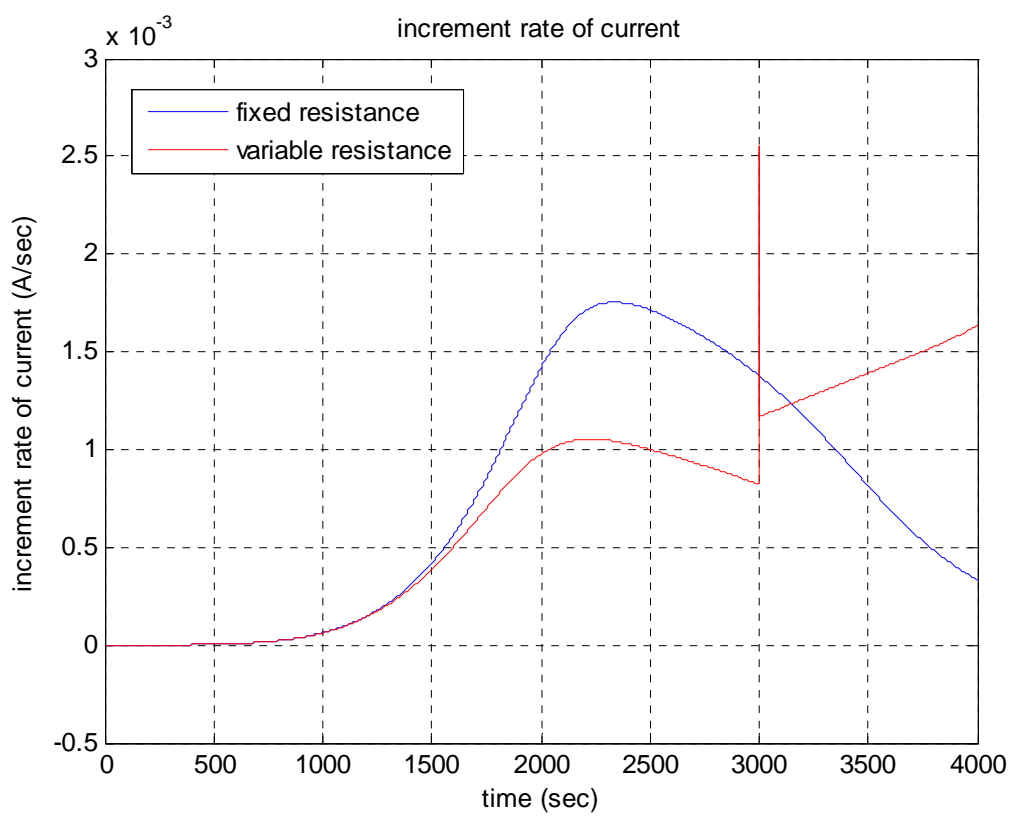


圖 5.4 電流變化量模擬結果

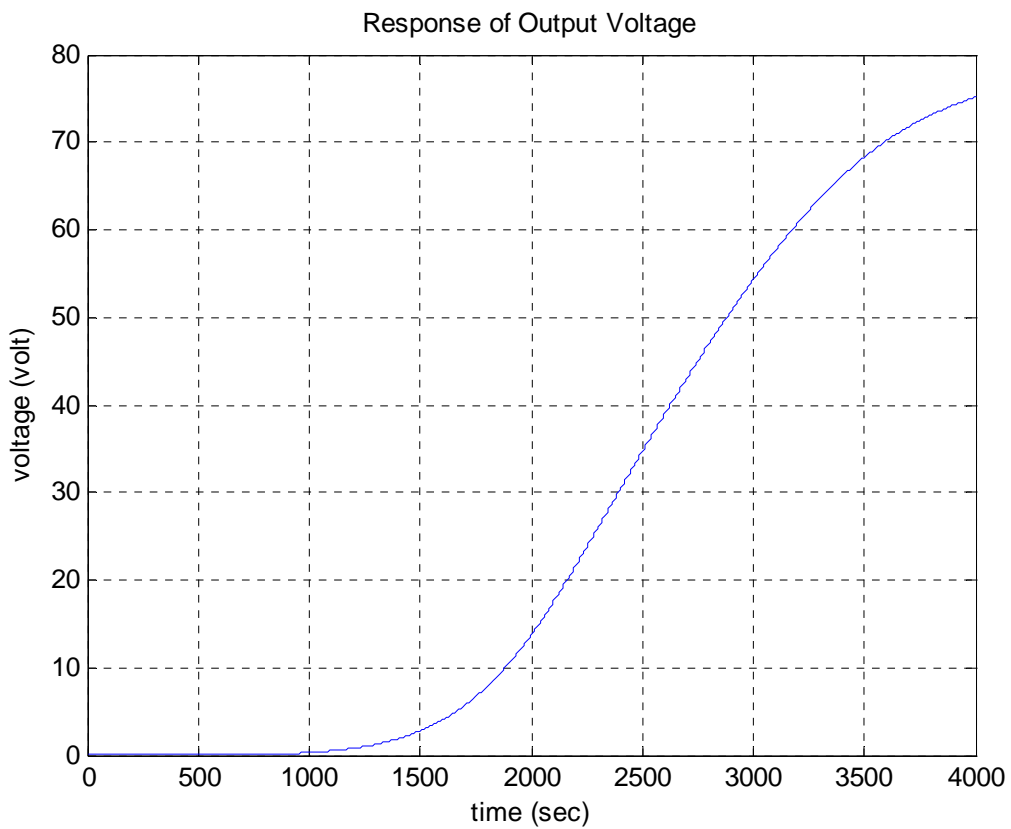


圖 5.5 輸出電壓

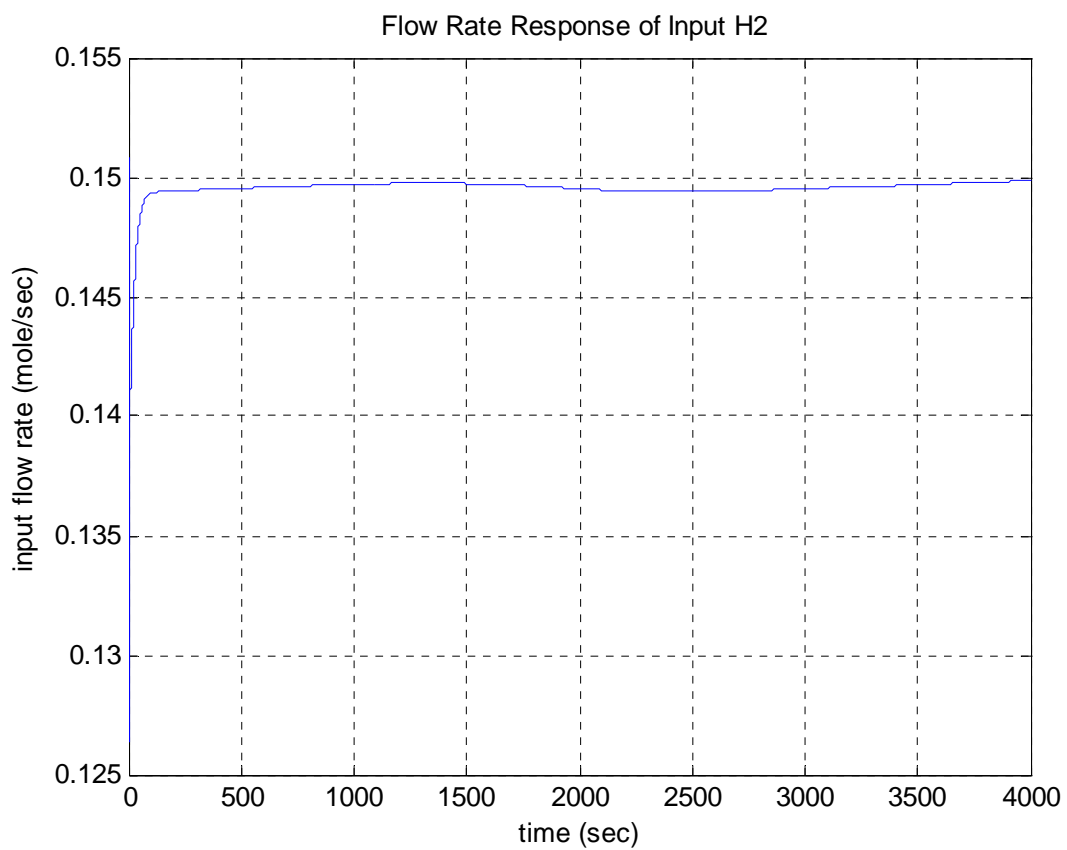


圖 5.6 入口質量流率響應圖

圖 5.5 為輸出電壓，72 cells 的飽和輸出電壓約等於 76 伏特。圖 5.6 為入口質量流率響應圖，當溫度梯度變大時，質量流率就會升高使電池堆在限定的範圍內，反之則降低。

經由本模擬程式可藉由調整氣體入口流量與溫度進行熱氣適切增溫 (heat-up) 曲線擬合，並控制負載以得到適當的反應速率，在允許之熱應力下逐漸增溫，在穩定且安全的狀態下操作 SOFC 之啟動程序，以維持正常運轉壽命

## 5.2 起機模式探討

使用普通空氣來加熱陰極，使用稀釋氣體來加熱陽極，稀釋氣體成分為 95% 氮氣+5% 氫氣+水蒸氣，以 PC-Based 控制器控制尾氣續燃氣的加熱裝置，直接以入口燃料氣體加熱電池堆本體，入口溫度控制為電池堆溫度加上 15K，流量則由控制器控制，從室溫加熱至 800°C SOFC 的起機模式制定與控制，整個起機過程分為 3 個階段：

第一階段：從室溫開始加熱至 640°C

第二階段：當溫度大於 600°C 之後，繼續加熱，同時調整陽極入口燃料，將陽極側的稀釋氣體轉為 100% H<sub>2</sub>，並以每 3 分鐘調整 5 安培為原則的方式調整外部負載電阻，使電組從 36 ohm 調整到 25 ohm。

第三階段：當溫度達到 800°C，入口溫度以 800°C 定值輸入，等待電壓穩定。

## 第六章 結論

Start-up 程序為 SOFC 操作之重要一環。其起機策略的步驟準確性悠關整體系統性能之動態表現，本研究藉由滑動模糊控制理論控制陰陽極入口流量，並考慮到負載變化的影響，發展出能大幅縮短 start-up 時間之起機模式策略，並可應用於各種系統。對於後續進行整體系統效能分析，以瞭解尾氣續燃與回收之實際效益；對於電力調節（power conditioning）與系統監控、供電路網並聯或與其他再生能源發電系統並聯運轉整體操作性能分析、最佳系統效率分析、在 APU（auxiliary power unit）及 residential 應用之運轉監控、或與 gas turbine 進行 hybrid generation 等、亦可應用於結合太陽能與風力等再生能源，以建構完整之替代能源應用整合。

後續可進行擴充至整體發電系統，以瞭解尾氣續燃與回收之實際效益，針對國內 SOFC 發展需求，本模型可提供進行 10kW 住宅用尾氣續燃式熱電共生系統運轉模擬與 10kW 住宅用燃料回收式熱電共生系統運轉模擬；另對於電力調節（power conditioning）與系統監控皆亦可連貫使用，後續之供電路網並聯或與其他再生能源發電系統並聯運轉，皆為可行之開發流程。對於後續 SOFC 操作應用上，可依其負載特性，推導其在最大電能效率下之負載追蹤策略，並兼顧其安全與穩定性。

## 參考文獻

- [1] K. P. Recknagle, R. E. Williford, L. A. Chick, D. R. Rector, and M. A. Khaleel, "Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks," *Journal of Power Sources*, 113, pp. 109-114 (2003).
- [2] E. Achenbach, "Three Dimensional and Tie Dependent Simulation of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack," *Journal of Power Sources* 49, 333 (1994).
- [3] Yau-Pin Chyou, "Commissioning of An Integrated SOFC System from Thermal Engineering Aspects," 2005 Taiwan SOFC Symposium May 30 – June 2, Lungtan, Taoyuan County
- [4] Kai W., Bedringgas, Ivar S., Ertesvag, Stale Byggstoyl, Bjorn F. Magnussen, "Exergy Analysis of Solid-Oxide Fuel-Cell (SOFC) Systems," *Energy* Vol.22, No. 4, pp. 403-412, 1997.
- [5] Ernst Riensche, Josefin Meusinger, Ulrich Stimming, Guido Unverzagt, "Optimization of a 200kW SOFC cogeneration power plant. Part I: variation of process parameters," *J. of Power Sources*, Vol.73, pp.251-256, 1998.
- [6] Ernst Riensche, Josefin Meusinger, Guido Unverzagt, "Optimization of a 200 kW SOFC cogeneration power plant. Part II: variation of the flowsheet," *J. of Power Sources*, Vol.71, pp.306-314, 1998.
- [7] S.H. Chan, C.F. Low, O.L. Ding, "Energy and Exergy analysis of Simple Solid-Oxide Fuel-Cell Power Systems," *J. of Power Sources*, Vol.103, pp.188-200, 2002.
- [8] S.H. Chan, H.K. Ho, Y. Tian, "Modeling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant," *J. of Power Sources*, Vol.109, pp.111-120, 2002.
- [9] S.L. Douvartzides, F.A. Coutelieiris, P.E. Tsiakaras, "On the Systematic Optimization of Ethanol Fed SOFC-Based Electricity Generating Systems in terms of Energy and Exergy," *J. of Power Sources*, Vol.114, pp.203-212, 2003.

- [10] Yaofan Yi, Ashok D., Rao, Jacob Brouwer, G. Scott Samuelsen, "Analysis and Optimization of a Solid Oxide Fuel Cell and Intercooled Gas Turbine (SOFC-ICGT) Hybrid Cycle," J. of Power Sources, Vol.132, pp.77-85, 2004.
- [11] E. Fontell, T. Kivisaari, N. Christiansen, J. -B. Hansen, J. Palsson, "Conceptual Study of a 250kW Planar SOFC System for CHP Application," J. of Power Sources, Vol.131, pp.49-56, 2004.
- [12] 王曉剛, "燃料電池熱流模型分析與系統整合研究," 核能研究所委外計畫結案報告, 計畫編號: 922002INER002, 2004。
- [13] 程永能、李瑞益、連榮凱, "SOFC電池堆組裝設計與模型整備", 技術報告(核研所研究), Oct. 2003.
- [14] 余冬帝、邱耀平、鍾藏棟、胡鴻才, "平板型SOFC的流道設計研究規劃及現況," 核研所研究, INER-2509, Oct. 2003.
- [15] Yau-Pin Chyou, Tsang-Dong Chung, Jong-Sheng Chen, and Ri-Fong Shie, "An Efficient Computational Methodology for Electrochemical and Heat Transfer Analyses of a Planar Solid Oxide Fuel Cell", 6th European SOFC Forum, June 28-July 2, 2004.
- [16] Yau-Pin Chyou, Tsang-Dong Chung, Chung-Shen Chen, Jan-Chung Chen, "Electrochemical and Heat Transfer Analysis of a Planar Solid Oxide Fuel Cell," 27th National Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Dec. 2003.
- [17] Yau-Pin Chyou, Tsang-Dong Chung, Jong-Sheng Chen, and Ri-Fong Shie, "Integrated Thermal Engineering Analyses with Heat Transfer at the Periphery of a Planar Solid Oxide Fuel Cell", J. of Power Sources, Jan. 2005, (SCI).
- [18] 陳中生、邱耀平、曾錦清、周世同、陳孝輝, 「平板狀SOFC電池元件模式之建立及模擬」, 技術報告(核研所研究), INER-2495, 中華民國九十年。

- [19]李財興、黃慶村，「甲烷與水蒸汽之高溫觸媒重組研究」，技術報告(核研所研究)，INER-OM-0602，中華民國九十二年。
- [20]黃玉枝、陳君豪、洪振益，“外部重整固態氧化物燃料電池/小型氣渦輪機複合系統之熱力學分析，”第二十屆機械工程研討會，台北，pp.65-72，中華民國九十二年十二月。
- [21]洪哲文、林博熙、宋朝凱，“固態氧化物燃料電池渦輪混成發電系統設計及熱效率分析，”國科會/原能會學術合作研究計劃結案報告，計畫編號：NSC92-2623-7-007-012-NU，2004。
- [22]洪文堂、李堅雄、劉泰健、邱耀平，「GCTool程式分析固態氧化物燃料電池(SOFC)的整體系統效率」，技術報告(核研所)，INER-2501R，中華民國九十二年。
- [23]Petruzzi, L., Cocchi, S. and Fineschi, F., “A Global Thermo-Electrochemical Model for SOFC System Design and Engineering,”*Journal of Power Sources*, Vol.118, pp.96-107,2003.
- [24]Francisco Jurado, “Modeling SOFC plants on the distribution system using identification algorithms,” *Journal of Power Sources*, Vol.129, pp.205-215,2004.
- [25]S.H. Chan, K.A. Khor, and Z.T. Xia, “A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness,” *Journal of Power Sources*, Vol.93, pp.130-140,2001.
- [26]Yutong Qi, Biao Huang, and Karl T.Chuang, “Dynamic modeling of solid oxide fuel cell: The effect of diffusion and inherent impedance,” *Journal of Power Sources*, Vol.150, pp.32-47,2005.
- [27]F. Jurado, M. Valverde, “Enhancing the electrical performance of a solid oxide fuel cell using multiobjective genetic algorithms,” *renewable energy*, Vol.30, pp.881-902,2005.
- [28]Francisco Jurado, “Power supply quality improvement with a SOFC plant by

neural-network-based control,” *Journal of Power Sources*, Vol.117, pp.75-83,2003.

[29]Jaime Arriagada, Pernilla Olausson, and Azra Selimovic, “Artificial neural network simulator for SOFC performance prediction,” *Journal of Power Sources*, Vol.112, pp.54-60,2002.

[30]Abhishek Sakhare, Asad Davari, and Ali Feliachi, “Fuzzy logic control of fuel cell for atand-alone and grid connection,” *Journal of Power Sources*, Vol.135, pp.165-176,2004.

[31]E.Fontell, T.Kivisaari, N.Christiansen, J.-B.Hansen, J.Palsson, “Conceptual study of a 250kW planar SOFC system for CHP application,” *Journal of Power Sources*, Vol.131, pp.49–56, 2004.

[32]Yau-Pin Chyou, Tsang-Dong Chung, Jong-Sheng Chen, Ri-Fong Shie, “An Efficient Computational Methodology for Electrochemical and Heat Transfer Analyses of a Planar Solid Oxide Fuel Cell,” *Proceedings of the Sixth European Solid Oxide Fuel Cell Forum, 2004, Lucerne Switzerland, vol. 2, p.646-655, 2004.*

[33]Yau-Pin Chyou, Tsang-Dong Chung, and Jong-Sheng Chen, “START-UP STRATEGY FOR OPERATING A SOLID OXIDE FUEL CELL BASED ON TRANSIENT ANALYSES,” *Proc. of the 9th International Symposium on SOFC (SOFC IX), Paper #1232, Quebec City, Canada, , 2005.*

[34]Sven Schäfer, Klaus Schmid, Albert Krügel, Andre Weber, Ellen Ivers-Tiffée, “Verification of Control Theory Based Models for Dynamic SOFC Operation,” *Eighth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC VIII), Paris, France, May 2003.*

[35]Ellen Ivers-Tiffée, Andr´e Weber, Klaus Schmid, Volker Krebs, “Macroscale modeling of cathode formation in SOFC,” *Solid State Ionics*, Vol.174, pp.223–232, 2004.

[36]Azra Selimovic, Miriam Kemm, Tord Torisson, Mohsen Assadi, “Steady state

and transient thermal stress analysis in planar solid oxide fuel cells,” *Journal of Power Sources*, Vol.145, pp.463–469, 2005.

- [37]L. Petruzzi, S. Cocchi, F. Fineschi, “A global thermo-electrochemical model for SOFC systems design and engineering,” *Journal of Power Sources*, Vol.118, pp. 96–107, 2003.
- [38]H. Apfel, M. Rzepka, H. Tu, U. Stimming, “Thermal start-up behaviour and thermal management of SOFC’s,” *Journal of Power Sources*, Vol.154, pp.370–378, 2006.
- [39]I.P. Kilbride, “Preparation and properties of small diameter tubular solid oxide fuel cellsfor rapid start-up,” *Journal of Power Sources*, Vol.61, pp. 167-171, 1996.
- [40]陳中生等, “平板狀SOFC電池元件模式之建立與模擬,”核能研究所, INER-2495。
- [41]余冬帝、邱耀平、林金福, “SOFC Stack動態模擬,”核能研究所, INER - 3730H。
- [42]Kim, S. W., Lee, J. J., Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface, *Fuzzy Sets & Systems*, vol.71, no.3, 359-67, 1995.
- [43]Tzafestas, S.G., Rigatos, G.G., A simple robust sliding-mode fuzzy-logic controller of the diagonal type, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.26, no.3-4, 353-388, 1999.
- [44]Wu, J. C. and Liu, T. S., A sliding-mode approach to fuzzy control design, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 4, no. 2, 141-151, 1996.
- [45]T. J. Procky, and E. H. Mamdani, “Alinguistic Self-Organizing Process Controller”, *Automatica*, Vol.5,pp.15-30,1979.
- [46]Lu Yusheng., ” A self-organizing fuzzy sliding-mode controller design for a class of nonlinear servo systems,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 141. No. 5. pp. 492-495, 1994.

- [47]L. X. Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis ", Englewood Cliffs, NJ : Prentic-Hall, 1994.
- [48]Slotine, J. J. E. and Coetsee, J. A., "Adaptive sliding controller synthesis for nonlinear systems " ,Int. J. Control, Vol. 43. No. 6. pp. 1631-1651, 1986.
- [49]Byung-Jae Choi, Seong-Woo Kwak, and Byung Kook Kim "Design of a single-input fuzzy logic controller and its properites" Fuzzy Sets and Systems pp.299-308 1999.
- [50]Shi-Yuan Chen, Fang-Ming Yu, and Hung-Yuan Chung "Decoupled fuzzy controller design with dingle input fuzzy logic", Department of Electrical Engineering, National Central University,Fuzzy Set and Systems 129 pp.335-342, 2002.
- [51]D.Q.Zhang and S.K.Panda "Chattering-free and fast-response sliding mode controller" IEE Proc,-Control Theory Appl., Vol. 146, No. 2, pp.171-177 March 1999.
- [52]余冬帝、江茂雄、邱耀平、李瑞益、李堅雄，固態氧化物燃料電池動態模擬，第一屆台灣氫能與燃料電池學術研討會，南投，Taiwan，2006.