

# Simulation and Design for Hardware-in-the-Loop of Fuzzy Controller of Fuel Cell Motorcycle

陳宏林、張一屏

E-mail: 9419901@mail.dyu.edu.tw

## ABSTRACT

This research explored the Proton Exchange Membrane, (PEM) Hydrogen fuel cell motorcycle control system dynamic simulation and analysis methodologies. Hardware-in-the-Loop (HIL) and Model to Chip technology were applied to simulate and analyze the dynamic system response of the fuzzy power distribution controller of the fuel cell motorcycle. Proper design of the fuel cell motorcycle controller can integrate the electric energy storage power control system, motor and alternator control system, and the electronic transmission control system. With the data from sensors of each individual subsystem collected, fuel cell motorcycle controller has to achieve the performance specifications under the motorcycle driving design requirements. Controller design parameters can then be evaluated and analyzed according to different motorcycle operating conditions driving performance. The dynamic performance model of the fuel cell motorcycle was developed and used to revise the parameter of fuzzy power distribution controller to reach the necessarily performance under the model-based control environment. After the optimized parameters were found, the fuzzy controller was then separated from the simulation of the model-based simulation of the fuel cell motorcycle system. Fuzzy controller parameters were embedded into a microprocessor by Model to Chip technology based on the Motorola MC68376 chip platform, and tested under HIL with fuel cell motorcycle dynamic simulation model. The fuel cell model development in this study had been tested and verified, which was proved to be effectively simulating the fuel cell output voltage and transient characteristic of the single cell and stacks. The optimized model parameters were searched by using fractional factorial analysis of Experimental Design Method (DOE). This study also compared the performance of pure PEM and Hybrid PEM motorcycle performance, the energy consumption of different fuel cell motorcycle were estimated, from the simulation result, the hybrid energy system which has the small power fuel cell and an auxiliary battery get better performance. From the HIL simulation of the dynamic response under different driver handlebar electric switches opening conditions, simulation was observed to have reasonable result thus validated the real-time control ability and feasibility of HIL technology. Result showed reasonable trend for HIL simulation in the forward fuel cell motorcycle powertrain simulation and can be referenced for future rapid prototyping development. The methodologies development can thus reduce the trial and error development schedule and expanses for fuel cell motorcycle controller.

Keywords : Fuel Cell Motorcycle、Fuzzy Controller、Hardware-in-the-Loop

## Table of Contents

目錄	封面	內頁	簽名頁	博碩士論文電子檔案上網授權書	iii	博碩士論文授權書	iv	中文摘要	v	ABSTRACT	vii	誌謝	ix	目錄	x	圖目錄	xii	表目錄	xvii	符號說明	xviii	第一章 緒論	1	1.1 前言	1	1.2 文獻回顧	3	1.2.1 燃料電池機車研究發展相關文獻	3	1.2.2 燃料電池建模與暫態模擬相關文獻	6	1.2.3 硬體迴路模擬應用相關文獻	11	1.3 研究動機	14	1.4 研究目的與本文架構	15	第二章 研究方法	16	2.1 燃料電池機車相關動態模組	17	2.1.1 燃料電池模組	17	2.1.2 氫氣壓力電磁閥模組	26	2.2 機車環境參數模組	28	2.3 傳動系統模組	31	2.4 馬達動態模組	34	2.5 電瓶儲能充電電源控制系統模組	35	2.6 模糊邏輯控制動力分配器模組	35	第三章 硬體迴路設計	45	3.1 硬體迴路模擬技術(Hardware-in-the-Loop)	46	3.2 模型晶片成型(Model to Chip)	52	第四章 模擬結果與討論	62	4.1 燃料電池參數最佳化與模組驗證	62	4.2 改變不同燃料電池功率對於機車之動態模擬	82	4.3 正向並聯式燃料電池混合動力機車模擬結果	88	4.4 燃料電池機車Model-Based模擬結果	94	4.5 Model-Based模擬與電腦模擬相互比較	99	4.6 模糊控制器與3-D儲值表相互比較	105	4.7 利用Model-Based架構測試D/A電路	108	4.8 燃料電池機車硬體迴路模擬結果	110	第五章 結論與建議	114	5.1 結論	114	5.2 建議事項與未來研究項目	116	參考文獻	117	圖目錄	圖 1. 1 燃料電池機車	6	圖 1. 2 燃料電池與風力發電系統[11]	7	圖 1. 3 燃料電池外部架構[12]	8	圖 1. 4 燃料電池極化曲線圖[12]	8	圖 1. 5 質子交換膜燃料電池非線性數學模組[15]	9	圖 1. 6 整個系統的硬體控制架構[26]	12	圖 1. 7 硬體架構的控制迴路示意圖[27]	13	圖 2. 1 燃料電池機車模型	16	圖 2. 2 質子交換膜式燃料電池示意圖	17	圖 2. 3 燃料電池工作電壓、功率與電流關係	18	圖 2. 4 燃料電池熱力學標準電壓模型	21	圖 2. 5 燃料電池活化過電位模組	22	圖 2. 6 燃料電池歐姆過電位模組	22	圖 2. 7 燃料電池歐姆過電位內部模組	23	圖 2. 8 燃料電池濃度過電位模組	23	圖 2. 9 燃料電池電荷雙層模組	24	圖 2. 10 燃料電池溫度模組	24	圖 2. 11 燃料電池輸出電壓模組	25	圖 2. 12 燃料電池模組	26	圖 2. 13 燃料電池氫氣管路示意圖	27	圖 2. 14 燃料電池氫氧氣電磁閥模組	27	圖 2. 15 機車環境參數模組	30	圖 2. 16 傳動系統模組	31	圖 2. 17 馬達動態模組	34	圖 2. 18 模糊控制器模組	36	圖 2. 19 駕駛者把手開度輸入條件下定義之歸屬函數	36	圖 2. 20 車速輸入條件下定義之歸屬函數	37	圖 2. 21 電瓶殘電量輸入條件定義之歸屬函數	37	圖 2. 22 馬達電門輸	
----	----	----	-----	----------------	-----	----------	----	------	---	----------	-----	----	----	----	---	-----	-----	-----	------	------	-------	--------	---	--------	---	----------	---	----------------------	---	-----------------------	---	--------------------	----	----------	----	---------------	----	----------	----	------------------	----	--------------	----	-----------------	----	--------------	----	------------	----	------------	----	--------------------	----	-------------------	----	------------	----	------------------------------------	----	---------------------------	----	-------------	----	--------------------	----	-------------------------	----	-------------------------	----	---------------------------	----	----------------------------	----	----------------------	-----	----------------------------	-----	--------------------	-----	-----------	-----	--------	-----	-----------------	-----	------	-----	-----	---------------	---	------------------------	---	---------------------	---	----------------------	---	-----------------------------	---	------------------------	----	-------------------------	----	-----------------	----	----------------------	----	-------------------------	----	----------------------	----	--------------------	----	--------------------	----	----------------------	----	--------------------	----	-------------------	----	------------------	----	--------------------	----	----------------	----	---------------------	----	----------------------	----	------------------	----	----------------	----	----------------	----	-----------------	----	-----------------------------	----	------------------------	----	--------------------------	----	---------------	--

出開度之歸屬函數 38 圖 2. 23燃料電池氫氣壓力之歸屬函數 38 圖 2. 24車速與駕駛者把手開度對於馬達電門開度之3D圖 42 圖 2. 25車速與駕駛者把手開度對於氫氣壓力之3D圖 42 圖 2. 26 SOC與駕駛者把手開度對於馬達電門開度之3D圖 43 圖 2. 27 SOC與駕駛者把手開度對於氫氣壓力之3D圖 43 圖 2. 28車速與SOC對於氫氣壓力之3D圖 44 圖 3. 1 Model-Based 設計循環 46 圖 3. 2 Model-Based 模型建立流程 48 圖 3. 3 Model-Based 控制器架構示意圖 48 圖 3. 4 Model-Based 控制系統架構圖 49 圖 3. 5燃料電池機車模糊控制器模型 50 圖 3. 6燃料電池機車受控體模型 50 圖 3. 7 NI-DAQ 6062E資料擷取卡 51 圖 3. 8 MC68376發展平台與晶片腳位分布 53 圖 3. 9模型晶片成型(Model to Chip)軟體執行過程示意圖 54 圖 3. 10模糊控制器執行不同輸入條件製成2-D儲值表 55 圖 3. 11 Scope所建立的2-D儲值表 56 圖 3. 12 MATLAB的3-D儲值表架構圖 56 圖 3. 13 Simulink的Direct Look-Up Table (n-D)模塊 57 圖 3. 14 MC68376中儲值表模組 57 圖 3. 15類比轉數位模塊 58 圖 3. 16 MC68376的類比轉數位模塊輸出 59 圖 3. 17數位轉類比電路與 晶片介紹 60 圖 3. 18硬體迴路整體架構示意圖 61 圖 4. 1燃料電池模組 63 圖 4. 2 8W燃料電池實驗組件說明 64 圖 4. 3 燃料電池活化過電位模組 65 圖 4. 4燃料電池參數未最佳化模擬結果 65 圖 4. 5 STATISTICA參數最佳化 67 圖 4. 6 STATISTICA參數最佳化 68 圖 4. 7穩態參數最佳化與實驗結果比較 69 圖 4. 8 燃料電池輸出電壓模組 70 圖 4. 9 燃料電池模形暫態參數最佳化 72 圖 4. 10 燃料電池模形暫態參數響應曲面 72 圖 4. 11 加入二階系統與實驗數據比較 73 圖 4. 12 燃料電池模擬結果與實驗數據比較(1A-5A-1A) 74 圖 4. 13 燃料電池模擬結果與實驗數據比較(1A15A-1A) 74 圖 4. 14 300W燃料電池實體 75 圖 4. 15 STATISTICA參數最佳化 76 圖 4. 16 STATISTICA參數最佳化 77 圖 4. 17 燃料電池模形暫態參數最佳化 78 圖 4. 18 燃料電池負載電流變化 79 圖 4. 19 燃料電池功率實驗數據與模型模擬功率驗證 80 圖 4. 20 燃料電池電壓實驗數據與模型模擬電壓驗證 80 圖 4. 21駕駛者把手開度之輸入條件 84 圖 4. 22不同燃料電池功率下之車速輸出響應 85 圖 4. 23不同燃料電池功率下之馬達電門開度輸出響應 85 圖 4. 24不同燃料電池功率下之燃料電池功率輸出響應 86 圖 4. 25不同燃料電池功率下之氫氣壓力輸出響應 86 圖 4. 26不同燃料電池功率下之氫氣消耗量輸出響應 87 圖 4. 27駕駛者不同把手開度之輸入條件 90 圖 4. 28駕駛者不同把手開度之燃料電池機車行駛速度 90 圖 4. 29駕駛者不同把手開度之馬達電門開度 91 圖 4. 30駕駛者不同把手開度之燃料電池氫氣壓力 91 圖 4. 31駕駛者不同把手開度之燃料電池功率輸出 92 圖 4. 32駕駛者不同把手開度之燃料電池氫氣消耗量 92 圖 4. 33駕駛者不同把手開度之電瓶殘電量(SOC) 93 圖 4. 34駕駛者不同把手開度之輸入條件 96 圖 4. 35駕駛者不同把手開度之燃料電池機車行駛速度 96 圖 4. 36駕駛者不同把手開度之馬達電門開度 97 圖 4. 37駕駛者不同把手開度之燃料電池氫氣壓力 97 圖 4. 38駕駛者不同把手開度之燃料電池功率輸出 98 圖 4. 39駕駛者不同把手開度之輸入條件 100 圖 4. 40駕駛者把手開度(Case 1)之燃料電池機車行駛速度比較 100 圖 4. 41駕駛者把手開度(Case 2)之燃料電池機車行駛速度比較 101 圖 4. 42駕駛者把手開度(Case 3)之燃料電池機車行駛速度比較 101 圖 4. 43駕駛者不同把手開度之燃料電池機車行駛速度誤差量 102 圖 4. 44駕駛者把手開度(Case 1)之馬達電門開度比較 102 圖 4. 45駕駛者把手開度(Case 2)之馬達電門開度比較 103 圖 4. 46駕駛者把手開度(Case 3)之馬達電門開度比較 103 圖 4. 47駕駛者不同把手開度之馬達電門開度誤差量 104 圖 4. 48 模糊邏輯控制器模塊與3-D儲值表比較 105 圖 4. 49駕駛者把手開度固定為30% 106 圖 4. 50駕駛者把手開度固定為50% 106 圖 4. 51駕駛者把手開度固定為100% 107 圖 4. 52測試D/A電路模型 108 圖 4. 53 Model-Based平台測試D/A電路示意圖 109 圖 4. 54駕駛者把手開度之輸入條件 111 圖 4. 55燃料電池機車行駛速度比較圖 112 圖 4. 56 燃料電池馬達電門開度比較圖 112 圖 4. 57燃料電池氫氣管路壓力比較圖 113 圖 4. 58 燃料電池輸出功率比較圖 113 表目錄 表 1. 1燃料電池與電瓶系統比較[1] 3 表 1. 2燃料電池機車與電動機車的效率比較[2] 4 表 1. 3內燃機機車、電動機車與燃料電池機車性能比較[3] 4 表 4. 1 穩態參數變化三階層 66 表 4. 2 STATISTICA九種排列組合 66 表 4. 3 穩態誤差比較 67 表 4. 4 穩態誤差比較 69 表 4. 5 二階方程參數三階層分布 71 表 4. 6 暫態參數比較 71 表 4. 7 穩態參數變化三階層 75 表 4. 8 穩態誤差比較 76 表 4. 9 穩態誤差比較 77 表 4. 10 二階方程參數三階層分布 78 表 4. 11 燃料電池輸出電壓ITAE比較 79 表 4. 12 測試結果 109 1

## REFERENCES

- [1]W. G. Colella, "Market Prospects, Design Features, and Performance of A Fuel Cell-Powered Scooter," Journal of Power Sources, pp.255-260, 2000.
- [2]C. Tso, and S. Y. Chang, "A Viable Niche Market-Fuel Cell Scooters in Taiwan," International Journal of Hydrogen, pp. 757-762, 2003.
- [3]J. H. Wang, W. L. Chiang, and J. P.H. Shu, "The Prospects-Fuel Cell Motorcycle in Taiwan," Journal of Power Sources, Vol. 86, pp.151-157, 2000.
- [4]李國霖, "燃料電池系統之技術現況與瓶頸", 臺電工程月刊第555期, 八十三年十一月。
- [5]鄭耀宗, 楊正光, 蘇華宗, "燃料電池發電技術的發展與推廣", 能源季刊第25卷第三期, 八十四年七月。
- [6]鄭耀宗, 林錦燦, 萬瑞英, "PEMFC做為車輛動力系統的先期研究", 能源季刊第27卷第3期, 八十六年。
- [7]鄭耀宗, "燃料電池電動車的發展分析", 電力電子技術, 第44期, 八十七年四月。
- [8]蔣依吾, 董正忠, 徐作聖, "電動車輛結合燃料電池之綜合分析", 能源季刊第28卷第四期, 八十七年十月。
- [9]李秋煌, 黃瓊輝, "汽車燃料電池研究發展簡介", 觸媒與製程, 第7卷第1期, 八十八年。
- [10]張慕荊, "燃料電池車輛的概念", 車輛工會會訊第71期, 八十八年一月。
- [11]M. T. Iqbal, "Simulation of A Small Wind Fuel Cell Hybrid Energy System," Renewable Energy, pp.511-522, April, 2003.
- [12]J.M. Correa, F.A. Farret, and L.N. Canha, and M.G. Simoes, "Simulation of Fuel-Cell Stacks Using A Computer-Controlled Power Rectifier

- With The Purposes of Actual High-Power Injection Applications," IEEE transactions on industry applications, vol. 39, pp. 1136-1142, 2003.
- [13]J.M. Correa, F.A. Farret, and L.N. Canha, "An Analysis of The Dynamic Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells Using An Electrochemical Model," Industrial Electronics Society. The 27th Annual Conference of the IEEE, vol. 1, pp.141-146, 2001.
- [14]J.M. Correa, F.A. Farret, and L.N. Canha, and M.G. Simoes, "An Electrochemical-Based Fuel-Cell Model Suitable for Electrical Engineering Automation Approach," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 51, pp. 1103-1112, 2004.
- [15]S.Yerramalla, A. Davari, and A. Feliachi, "Dynamic Modeling and Analysis of Polymer Electrolyte Fuel Cell," Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, vol. 1, pp. 82-86, 2002.
- [16]A. Rowe, and X. Li, "Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," Journal of Power Sources, pp. 82-96, 2001.
- [17]黃逸群, "燃料電池與直噴式引擎作為混成電動機車動力源分析", 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文, 2000。
- [18]張一屏, "串聯式燃料電池機車動態模擬與分析", 2003燃料電池研討會, 九十二年。
- [19]張佳祺, "超高電容器在蓄電池及燃料電池電動機車混成能源系統上的應用", 輔仁大學電子工程學系碩士論文, 九十二年。
- [20]Y. H. Kim, and S. S. Kim, "An Electrical Modeling and Fuzzy Logic Control of A Fuel Cell Generation System," Energy Conversion, IEEE Transactions on, pp. 239-244, 1999.
- [21]陳世龍, "混成機車動力系統省能動態規劃與硬體嵌入式即時模擬", 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文, 九十二年。
- [22]林博煦, "燃料電池電動機車即時模擬與控制", 國立清華大學動力機械工程學系碩士論文, 九十一年。
- [23]林俊宏, "電動輔助方向盤控制器模擬分析與設計", 國立台北科技大學車輛工程系碩士論文, 九十一年。
- [24]J. Schaffnit, S. Sinsel, R. Isermann, "Hardware-in-the-Loop Simulation for The Investigation of Truck Diesel Injection Systems," American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998, pp.21-26, 1998.
- [25]S. Alles, C. Swick, S. Mahmud, F. Lin, "Real Time Hardware-in-the-Loop Vehicle Simulation," Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 159-164, 1999.
- [26]B.K. Powell, N. Sureshababu, K.E. Bailey, M.T. Dunn, "Hardware-in-the-Loop Vehicle and Powertrain Analysis and Control Design Issues," American Control Conference, Proceedings of the 1998, pp. 21-26, 1998.
- [27]S. Brennan, A. Alleyne, M. DePoorter, "The Illinois Roadway Simulator - A Hardware-in-the-Loop Testbed for Vehicle Dynamics and Control," American Control Conference, Proceedings of the 1998, pp. 493-497, 1998.
- [28]H. Hanselmann, "Hardware-in-the-Loop Simulation Testing and Its Integration Into A CACSD Toolset," Computer-Aided Control System Design, 1996. Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium , pp.152-156, 1996.
- [29]M. J. Blomen, and M. N. Mugerwa, "Fuel Cell Systems," Plenumpress, New York, 1993.
- [30]R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, "Development and Application of A Generalised Steady-State Electrochemical Model for A PEM Fuel Cell," Journal of Power Sources, vol. 86, Issue 1-2, March, 2000.
- [31]J. E. Larminie, and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained," Chichester, U.K.Wiley, pp.308, 2000.