ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
E42164

STABILITY ANALYSIS OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL

MISS NICHAPORN KANJANABAT

A SPECIAL RESEARCH PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING (CHEMICAL ENGINEERING)
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI
2010

600251901

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

E42164

Stability Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Ms. Nichaporn Kanjanabat B.Eng. (Chemical Engineering)

A Special Research Project Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements for

The Degree of Master of Engineering (Chemical Engineering)

Faculty of Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi

2010

THE NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THAILAND
RESEARCH LIBRARY

Special Research Project Committee

..... (Asst. Prof. Veara Loha, Ph.D.)	Chairman of Special Research Project Committee
..... (Assoc. Prof. Thongchai Srinophakun, Ph.D.)	Member and Special Research Project Advisor
..... (Asst. Prof. Asawin Meechai, Ph.D.)	Member

Copyright reserved

Special Research Project Title	Stability Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell
Special Research Project Credits	6
Candidate	Ms. Nichaporn Kanjanabat
Special Research Project Advisor	Assoc.Prof. Dr.Thongchai Srinophakun
Program	Master of Engineering
Field of Study	Chemical Engineering
Department	Chemical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2553

Abstract

E 42164

A proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) has been recognized as future automotive application due to its high power density and low greenhouse gas emissions. In the case of high current demand, this fuel cell would cause an overheating problem leading to a membrane drying out and a lower cell performance due to the cell's voltage drop. Concerning with the safety operation as well as long life time of fuel cell, an effective control manner using the passivity concept was presented to regulate the stability of the stack temperature, the relative humidity, and the cell voltage at the optimal level. In this work, the PEMFC system was equipped with three control loops for controlling the hydrogen and oxygen pressures in anode and cathode channels, and the stack temperature by manipulation of the hydrogen and oxygen flowrates, and the cooling water flowrate. Since, the hydrogen and oxygen pressures and the stack temperature directly affected the relative humidity and the cell voltage, therefore, the relative humidity can be controlled by manipulation of the cooling water flowrate, while the cell voltage can be controlled by manipulation of the hydrogen and oxygen flowrates. The passive controllers in each control loop were determined with $k'_{1,2} = \frac{20s^3 + 7.22s^2 + 0.311s}{2\times10^4 s^2(s+0.275)}$ for the hydrogen and the oxygen control loops, and $k'_3 = \frac{12s^3 + 4.74s^2 + 0.311s}{1.2\times10^4 s^2(s+0.275)}$ for the temperature control loop. It was found that, by using the passive controller, the fuel cell system can be driven to stable state under disturbance even a failure of one loop. However, unstability of this fuel cell system was observed when two loops fail.

Keywords: Proton Exchange Membrane Fuel Cell/ Stability Analysis/ Passivity Theorem/ Simulink Model

หัวข้อโครงการศึกษาวิจัย	การวิเคราะห์ความเสถียรของระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นางสาวณิชาพร กาญจนบัตร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ธงไชย ศรีนพคุณ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2553

บทคัดย่อ

E 42164

เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนได้รับการยอมรับว่าเป็นพลังงานในอนาคต เนื่องจากให้พลังงานสูงและไม่ทำอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ในกรณีที่เซลล์เชื้อเพลิงต้องจ่ายกระแสไฟในปริมาณสูง จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงร้อนเกินไปเป็นสาเหตุของเมมเบรนแห้ง และเซลล์เชื้อเพลิงจะมีประสิทธิภาพต่ำลง ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เซลล์เชื้อเพลิงมีอายุการใช้งานได้นาน งานวิจัยนี้จึงนำทฤษฎีพาสสิวิทีมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมความเสถียรของอุณหภูมิ,ความชื้น และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยนี้เซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วยสามวงการควบคุม ตัวแปรที่ต้องควบคุมคือ ความดันของแก๊สไฮโดรเจน,ความดันของแก๊สออกซิเจน และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง โดยตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมคือ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน,อัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น เนื่องจากความดันของแก๊สไฮโดรเจน,ความดันของแก๊สออกซิเจน และอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง มีผลโดยตรงต่อความชื้นและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิง ดังนั้นจึงควบคุมความชื้นของเซลล์เชื้อเพลิงได้ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการไหลของแก๊สออกซิเจน ขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิของเซลล์เชื้อเพลิง สมการของตัวควบคุม คือ $k'_{1,2} = \frac{20s^3 + 7.22s^2 + 0.311s}{2\times10^4 s^2(s+0.275)}$ สำหรับวงการควบคุมของไฮโดรเจนและออกซิเจน และ $k'_3 = \frac{20s^3 + 7.22s^2 + 0.311s}{2\times10^4 s^2(s+0.275)}$ สำหรับวงการควบคุมของอุณหภูมิ จากผลแสดงให้เห็นว่าระบบมีความเสถียรต่อตัวแปรรบกวนถึงแม้ว่าวงการควบคุมหนึ่งวงจะเสียไป แต่อย่างไรก็ตามระบบจะไม่เสถียรเมื่อวงการควบคุมสองวงเสียไป

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน / การวิเคราะห์ความเสถียร / ทฤษฎีพาสสิวิที / แบบจำลองซีมูลิงค์

ACKNOWLEDGEMENTS

This thesis would never be able to complete without helps and supports from these people, who belong to my memory. I felt appreciative of everything they gave during the time I worked on this thesis. Firstly, I would like to thank my advisor, Assoc.Prof. Dr.Thongchai Srinophakun, for his greatly supports and valuable advice and that he paid regard to me. Secondly, my committee, Asst.Prof. Dr. Veara Loha and Asst.Prof. Dr. Asawin Meechai, are whom I would like to thanks for their recommendations, their concentrations on my topic and the way they guided me to understand and accomplish this work.

Also, the author would like to particularly express special thanks to Mr.Nitipat Chaiwattanapong, who helped the author with technical suggestions and comments.

Last but not least, the author would like to special thanks to a staff of Chemical Engineering Practice School (ChEPS), Ms. Chadaporn, who helped the author with communication and any important information used to finish the master degree. Also, this thesis will be never fulfilled without referring to my friends at ChEPS. I would like to thanks them for a cordial support, care and help.

CONTENTS

	PAGE
ENGLISH ABSTRACT	ii
THAI ABSTRACT	iii
ACKNOWLEDGEMENTS	iv
CONTENTS	v
LIST OF TABLES	vii
LIST OF FIGURES	viii
NOMENCLATURES	ix
CHAPTER	
1. INTRODUCTION	**1**
1.1 Background	1
1.2 Objectives	2
1.3 Scope of work	2
1.4 Expected result	2
2. THEORIES AND LITERATURE REVIEWS	**3**
2.1 Theories	3
2.1.1 The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)	3
2.1.2 Passivity and its relation properties	8
2.2 Literature reviews	12
3. METHODOLOGY	**15**
4. RESULTS AND DISCUSSION	**19**
4.1 PEM fuel cell dynamic model	19
4.2 PEM fuel cell passive model	19
4.3 PEM fuel cell passive controller	22
4.4 PEM fuel cell model verification	24
4.5 Multi-loop control system	27
4.5.1 Temperature-Voltage control	27
4.5.2 Temperature-Voltage-Humidity control	31
4.5.3 Temperature-Voltage-Humidity control with PI-controller	35
4.5.4 Fault-tolerant control system	37
5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	**47**
5.1 Conclusions	47
5.2 Recommendations	47
REFERENCES	**48**

APPENDIX **50**
A Numerical value 51
B Source code 52

CURRICULUM VITAE **61**

LIST OF TABLES

TABLE		PAGE
3.1	The paring of the controlled and the manipulated variables	17
4.1	The results of the $k_{c,i}^{+}$ and $\tau_{I,i}$ for each loop control	23
4.2	The comparing result between two close-loop control	34
4.3	The comparing result between open-loop and close-loop control	34

LIST OF FIGURES

FIGURE		PAGE
1.1	A simple model of PEMFC	1
2.1	Schematic illustration of proton exchange membrane (PEMFC)	3
2.2	Polarization V-I curve (Ballard Mark V PEMFC)	5
2.3	The simple thermal circuit of PEMFC system	6
2.4	Multi-loop control system	9
2.5	Passivity index and controller gain	11
2.6	Passive system	12
3.1	The methodology	15
3.2	The proton exchange membrane fuel cell including the auxiliary equipments	16
4.1	The passivity index of non-passive PEMFC system	21
4.2	The passivity index of passive PEMFC system	22
4.3	The PEMFC model without controller	25
4.4	The transient response of V_{stack}, T_s, P_{H_2} *and* P_{O_2} after step change I from 100A to 250A without controller	26
4.5	The PEMFC model with controllers (T_s *and* V_{stack} control)	28
4.6	The transient response after step change I with T_s *and* V_{stack} controllers	30
4.7	The PEMFC model with controller (T_s, V_{stack} *and* RH control)	32
4.8	The transient response after step change I with T_s, V_{stack} *and* RH controllers	33
4.9	The comparing responses between PEMFC system with passive controller and PI-controller	36
4.10	The PEMFC system with temperature loop failed	38
4.11	The transient response after step change I with temperature loop failed	39
4.12	The PEMFC system with oxygen loop failed	40
4.13	The transient response after step change I with oxygen loop failed	41
4.14	The PEMFC system with hydrogen loop failed	42
4.15	The transient response after step change I with hydrogen loop failed	43
4.16	The PEMFC system with hydrogen and oxygen loop failed	44
4.17	The transient response after step change I with hydrogen and oxygen loop failed	45

NOMENCLATURES

C_{O_2}	Effective concentration of oxygen in mol/cm^3
C_t	Thermal capacitance in J/°C
$C_{p,cw}$	Specific heat coefficient of water in J/kg K
hA_{stack}	Stack heat transfer coefficient in W/K
$\dot{m}_{H_2,used}$	Hydrogen consumption rate in mol/s
$\dot{m}_{cw}$	Cooling water flowrate in mol/s
P_{H_2}	Partial pressure of hydrogen in atm
P_{O_2}	Partial pressure of oxygen in atm
P_{H_2O}	Partial pressure of water in atm
$\dot{Q}_{stack}$	Rate of heat absorption in J/s
R	Gas constant in m^3 atm/mol K
T_s	Stack temperature in K
T_c	Cooling water temperature in K
T_{amb}	Ambient temperature temperature in K
V_{an}	Anode volume in m^3
V_{cat}	Cathode volume in m^3
u	Manipulated vector
x	State vector
x_0	Disturbance vector
y	Controlled vector
ΔH	Enthalpy change for hydrogen in kJ mol/s
ξ_i	Benchmark parameter