

ระเบียบวิธีการสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเพื่อการวิเคราะห์และ
ควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

นางสาวเอฟริน เนอ วิไลชุติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3868-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12210583

STATE SPACE MODEL GENERATION ALGORITHM
FOR ANALYSIS AND CONTROL
OF POWER SYSTEMS WITH HVDC LINK

Miss Avrin Nur Widiastuti

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2005
ISBN 974-17-3868-4

481550

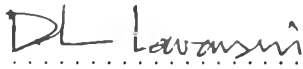
Thesis Title STATE SPACE MODEL GENERATION ALGORITHM FOR
ANALYSIS AND CONTROL OF POWER SYSTEMS WITH
HVDC LINK

By Miss Avrin Nur Widiastuti


Field of Study Electrical Engineering


Thesis Advisor Naebboon Hoonchareon, Ph.D.

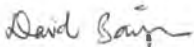
Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial
Fulfillment of Requirements for Master's Degree

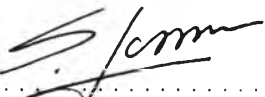
 Dean of the Faculty of Engineering
(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE

 Chairman
(Associate Professor Bundhit Eua-arporn, Ph.D.)

 Thesis Advisor
(Naebboon Hoonchareon, Ph.D.)


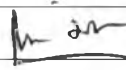
 Member
(Associate Professor David Banjerdpongchai, Ph.D.)

 Member
(Somboon Sangwongwanich, Dr. of Eng.)

นางสาวเอฟริน เเนอ วิไลชุติ: ระเบียบวิธีการสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะเพื่อการวิเคราะห์และควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (STATE SPACE MODEL GENERATION ALGORITHM FOR ANALYSIS AND CONTROL OF POWER SYSTEMS WITH HVDC LINK), อาจารย์ที่ปรึกษา: อ.ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 85 หน้า ISBN 974-17-3868-4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พัฒนาโปรแกรมสำหรับสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ทำให้เป็นเชิงเส้นของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งรวมการเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC link) พฤติกรรมทางพลวัตของหน่วยผลิตไฟฟ้าถูกแทนด้วยแบบจำลองสองแกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสและแบบจำลองตัวกระตุ้น IEEE ประเภทที่ 1 ในส่วนของแบบจำลองเอชวีดีซีนั้นใช้ตัวควบคุมกระแสสำหรับปลายทางด้านตัวเรียงกระแส และใช้ตัวควบคุมมุดับชนวนคงที่สำหรับด้านอินเวอร์เตอร์ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้กับโครงสร้างจริงของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วยหน่วยผลิตไฟฟ้า ตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง และบัสไฟฟ้ากระแสสลับจำนวนหนึ่งๆ นอกจากนี้เรายังนำเทคนิคการคำนวณแบบวนซ้ำมาใช้คำนวณการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงระหว่างด้านไฟฟ้ากระแสสลับกับด้านไฟฟ้ากระแสตรง และการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟระหว่างด้านไฟฟ้ากระแสสลับกับสถานีแปลงผันปลายทาง และโปรแกรมสามารถจัดการกรณีที่เกิดทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงกลับทิศได้ด้วย

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าเงาเงาที่คำนวณได้ของระบบที่ทำให้เป็นเชิงเส้นแล้วใช้ระบบซึ่งเป็นที่นิยมได้แก่ ระบบเครื่องจักรสามตัวเก้ายของ Western System Coordinating Council (WSCC) ในการตรวจสอบ นอกจากนั้นได้ทดสอบโปรแกรมที่พัฒนากับระบบผลิตไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้าทางตอนใต้ของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งสิ้นห้าหน่วย ตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงหนึ่งตัวที่ต่ออยู่กับประเทศมาเลเซีย และเครือข่ายระบบส่งไฟฟ้ากระแสสลับที่มี 28 บัส และสายส่ง 41 เส้น พบว่าโปรแกรมทำงานได้เป็นอย่างดี ผลที่ได้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพเชิงสัญญาณขนาดเล็กของระบบ และใช้ในการออกแบบการควบคุมตัวเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงต่อไปได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต 
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
 ปีการศึกษา 2548

##4770564921: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: HVDC / LINEARIZATION / STATE SPACE / MODELLING / SMALL SIGNAL STABILITY

AVRIN NUR WIDIASTUTI: STATE SPACE MODEL GENERATION ALGORITHM FOR ANALYSIS AND CONTROL OF POWER SYSTEMS WITH HVDC LINK. THESIS ADVISOR: NAEBBOON HOONCHAREON. Ph.D. 85 pp. ISBN: 974-17-3868-4

This thesis develops a program to generate linearized state space representation of the power systems including HVDC links. The two-axis model of synchronous generator and the IEEE type I model of exciter are used to represent dynamic behaviors of the generating units. For a HVDC model, a constant current controller for rectifier terminal, and a constant-extinction angle controller for inverter are employed. The developed program can accommodate an actual structure of the power systems with some numbers of generating units, HVDC links and the AC buses. In addition, the interchanges of real power between AC and DC sides, and of reactive power between AC side and the converter terminal, are computed using iterative technique. Reverse of the direction of the DC power flow can also be handled.

The popular Western System Coordinating Council (WSCC) 3-machine, 9-bus is used for validation of the obtained eigenvalues of the linearized system. Furthermore, the developed program is tested using the Southern Thailand generation and transmission systems with 5 generating units, 1 HVDC link, of which it is connected to Malaysia, and the 28-bus and 41-branch AC transmission network. It is found that the program can function well. The results can then be used for analyzing small signal stability of the system, and for HVDC control design, thereafter.

Department Electrical Engineering
 Field of Study Electrical Engineering
 Academic year 2005

Student's Signature 
 Advisor's signature 

ACKNOWLEDGMENTS

First, I would like to express my gratitude to the JICA Project for AUN/SEED-Net (ASEAN University Network / Southeast Asia Engineering Education Development Network), the sponsor of my scholarship. I would like to send my gratefulness to the International School of Engineering (ISE), Chulalongkorn University, for offering me the chance to pursue my Master degree.

I would like to show my great thanks to Dr. Naebboon Hoonchareon, my principal advisor, for his kind help during my study and his constant advice and support to conduct my research. I consider it really my great opportunity to work with him and to have excellent research environment to work. I learn many things from him.

Also, I would like to send my great gratitude to all professors of the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, for their guides and helps during the time I have studied at Chulalongkorn University. My special thanks to Assoc. Prof. Dr. Bundhit Eua-arporn, Assoc. Prof. Dr. David Banjerdpongchai, and Dr. Somboon Sangwongwanich, for their valuable comments and academic suggestions on my research work.

My appreciation goes to my friends for their enthusiasm and all what they have done for me during my study in Thailand. My thanks go to my friends in Power System Research Laboratory, Control System Research Laboratory, also in Suksitnives International House, my lovely home in Thailand. In particular, I would like to thanks to Hakim, Boy and Chai for numerous discussions related to the programming. Also pi Sun, Tu Anh and Addy Wahyudie. I really enjoy discuss control theory with them. Special thanks for M.A. PAI for generous information about small-signal stability analysis.

Last but not least, my thanks go to all members of my family: to name a few, my beloved mother Tri Cahyaningsih, my beloved father Maryubi, my brother Nur Wakhid Septi Nugroho, my sister in law Dewi Kartikasari, my niece Nadya Nur Haniyaa, my nephew Muhammad Naufal Akbar for their love, supports, encouragement, and caring. My deeply thanks also to Choerul Anam, who always there for me. It is to them that I dedicate this thesis.

Lastly, I am foremost grateful to ALLAH: for giving me the Islam as the light of my life.

CONTENTS

	page
ABSTRACT (THAI)	iv
ABSTRACT (ENGLISH)	v
ACKNOWLEDGMENTS	vi
CONTENTS	vii
LIST OF FIGURES	x
LIST OF TABLES	xi
CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 Motivation	1
1.2 Objectives	2
1.3 Scope of Work	2
1.4 Research Methodology	2
1.5 Expected Contribution	3
CHAPTER 2 HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT	4
2.1 Basic HVDC System Configurations	4
2.2 HVDC Components	5
2.3 The AC-DC Converter Model	6
2.4 Relationship between AC and DC Quantities	8
2.5 Modeling of HVDC Link	8
2.6 HVDC Control Model	9
2.7 HVDC Installed in Thailand	10
CHAPTER 3 POWER SYSTEM DYNAMIC MODEL	12
3.1 Structure of the Power System Model	12
3.2 Synchronous Generator Model	13
3.3 Excitation System	14
3.4 Network Characteristic Equations	15
3.4.1 Generator Buses	16
3.4.2 HVDC Buses	16
3.4.3 Load Buses	17
3.5 Load Flow Analysis	17
3.5.1 AC Load Flow	17
3.5.2 DC Load Flow	18
3.6 Initial Conditions Calculations	19
3.6.1 Initial Conditions of HVDC	19
3.6.2 Initial Conditions of Generating Unit	20

	page
CHAPTER 4 LINEARIZED STATE SPACE MODEL OF POWER SYSTEMS WITH HVDC LINKS	22
4.1 Introduction to State Space Analysis	22
4.1.1 Linearization	23
4.1.2 Advantages of State Space Analysis.....	24
4.1.3 Eigenvalue and Stability	24
4.1.4 Participation Factor	25
4.1.5 Controllability and Observability Analysis	26
4.1.6 PBH Test	26
4.2 Characteristics of Small Signal Stability Problems	26
4.2.1 Local Problems	27
4.2.2 Global Problems	27
4.3 Linearized State Space Model of Power Systems with HVDC Links	27
4.3.1 Collections of the Equations	28
4.3.2 Linearized Model of Generating Units	29
4.3.3 Linearized Model of HVDC	32
4.3.4 Linearized Model of Transmission Network	36
4.3.5 Eliminations of Non States and Non Input Variables	41
CHAPTER 5 STATE SPACE MODEL GENERATION ALGORITHM	45
5.1 Problem Formulation	45
5.2 Input Data Preparation	45
5.2.1 Network Data	46
5.2.2 Generator and Exciter Data	47
5.2.3 HVDC Data	48
5.3 Programming Flows	48
5.3.1 Main Program	48
5.3.2 Subroutine to Incorporate HVDC Links	50
5.3.3 Subroutine to Compute Initial Conditions of HVDC	51
5.4 Outputs of the Program	52
CHAPTER 6 TEST RESULTS	53
6.1 Program Validation Using WSCC Test System	53
6.1.1 Steady State Operating Conditions	55
6.1.2 Initial Conditions	56
6.1.3 Eigenvalue Comparison	56
6.1.4 Participation Factor Analysis	58
6.1.5 Controllability and Observability Analysis	60
6.2 Test Result of the Southern Thailand Generation and Transmission System	61
6.2.1 Input Data	62
6.2.2 Case Studies	64
6.2.2.1 Test Results without HVDC	65
6.2.2.2 Test Results with HVDC	68
CHAPTER 7 CONCLUSIONS	78
7.1 Summary of the Results	78

	page
7.2 Recommendations for Future Works	79
REFERENCES	80
APPENDIX	82
BIOGRAPHY	85

LIST OF FIGURES

		page
Figure 2.1	Back-to-back interconnection	4
Figure 2.2	The monopolar link	4
Figure 2.3	The bipolar link	5
Figure 2.4	A schematic diagram of a bipolar HVDC system	5
Figure 2.5	An individual AC-DC connection model	6
Figure 2.6	Constant current (CC) control at rectifier	9
Figure 2.7	Auxiliary input from AC system for rectifier current controller	9
Figure 2.8	HVDC link between Thailand and Malaysia	10
Figure 3.1	AC-DC power systems	12
Figure 3.2	Two-axis synchronous machine model	13
Figure 3.3	Block diagram of the IEEE type I excitation control	15
Figure 4.1	Main algorithm to generate linearized state space model	28
Figure 4.2	System configuration with exporting power	33
Figure 4.3	System configuration with importing power	33
Figure 5.1	A simplified single machine and infinite bus system with HVDC link [5]..	45
Figure 5.2	Main program to generate a linearized state space model	49
Figure 5.3	Subroutine to incorporate HVDC links	50
Figure 5.4	Subroutine to compute initial conditions of HVDC	51
Figure 6.1	A single line diagram of Western System Coordinating Council (WSCC) [14]	53
Figure 6.2	Comparison of eigenvalues obtained from the developed program and from literature [14]	58
Figure 6.3	A single line diagram of the Southern Thailand generation and transmission systems (Reduced model) [21]	61
Figure 6.4	Graphical structure of the Southern Thailand transmission network [21] ...	62
Figure 6.5	Plot of eigenvalues of the Southern Thailand system without HVDC	67
Figure 6.6	Plot of eigenvalues of the Southern Thailand system with no power flow in HVDC link whereby the Klong Ngae bus operating as rectifier	68
Figure 6.7	Plot of eigenvalues of the Southern Thailand system with no power flow in HVDC link whereby the Klong Ngae bus operating as inverter	71
Figure 6.8	Comparison of plot of eigenvalues obtained in the cases before and after HVDC is installed in the system with no power flow through HVDC	71
Figure 6.9	Plot of eigenvalues of the Southern Thailand system with 300 MW power import from Malaysia through HVDC link	74
Figure 6.10	Comparison of plot of eigenvalues with 300 MW power import through HVDC link and without HVDC in the Southern Thailand system	75
Figure 6.11	Comparison of voltage profile at each bus with 300 MW power import through HVDC link and without HVDC in the Southern Thailand system..	75

LIST OF TABLES

	page
Table 5.1	Bus data format 46
Table 5.2	Generator data format 46
Table 5.3	HVDC data format 46
Table 5.4	Branch data format 46
Table 5.5	Generator data 47
Table 5.6	Exciter data 47
Table 5.7	Parameter of HVDC link 48
Table 6.1	Bus data of the WSCC 54
Table 6.2	Generator data of the WSCC 54
Table 6.3	Branch data of the WSCC 54
Table 6.4	Generator parameters of the WSCC 55
Table 6.5	Exciter parameters (IEEE type I) of the WSCC 55
Table 6.6	Load flow solutions of the WSCC 55
Table 6.7	Computed initial conditions 56
Table 6.8	Comparioson of eigenvalues obtained from developed program and from literature [14] for the WSCC system 57
Table 6.9	Participation factors for the WSCC (mode 1-11) 59
Table 6.10	Participation factors for the WSCC (mode 12-21) 59
Table 6.11	List of buses name 61
Table 6.12	Generator capacity data 63
Table 6.13	Parameters of the generators 63
Table 6.14	Parameters of the generator excitation systems 63
Table 6.15	Parameters of the HVDC link 64
Table 6.16	Load flow solutions of the Southern Thailand system without HVDC 65
Table 6.17	The obtained eigenvalues of the Southern Thailand system without HVDC 66
Table 6.18	Local oscillation problem of the system without HVDC 67
Table 6.19	Eigenvalues of the Southern Thailand system with no power flow in HVDC link whereby the Klong Ngae bus operating as rectifier 69
Table 6.20	Eigenvalues of the Southern Thailand system with no power flow in HVDC link whereby the Klong Ngae bus operating as inverter 70
Table 6.21	Load flow solutions of the Southern Thailand system with 300 MW import from Malaysia through HVDC link 72
Table 6.22	Eigenvalues of the Southern Thailand system with 300 MW import from Malaysia 73
Table 6.23	Local oscillation problem of the system with HVDC 74
Table 6.24	Global oscillation problem of the system with HVDC 74
Table 6.25	Comparison of real power transmitted at each branch with 300 MW power import through HVDC link and without HVDC in the Southern Thailand systems 76
Table 6.26	The uncontrollabe modes and their biggest participation factor 77