

ออปติคัลเพาเวอร์โฟลว์โดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลเอฟโวลูชันแบบขนาน

นาย ชัยณรงค์ ธิติธำรงชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMAL POWER FLOW WITH APPLICATION OF PARALLEL DIFFERENTIAL EVOLUTION

Mr. Chainarong Thitithamrongchai

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

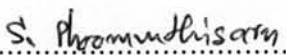
490749


Thesis Title OPTIMAL POWER FLOW WITH APPLICATION OF PARALLEL
DIFFERENTIAL EVOLUTION
By Mr. Chainarong Thitithamrongchai
Filed of study Electrical Engineering
Thesis Advisor Associate Professor Bundhit Eua-arporn, Ph.D.


Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Doctoral Degree

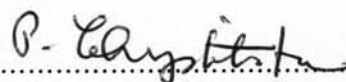

..... Dean of the Faculty of Engineering
(Professor Direk Lavansiri, Ph.D.)


THESIS COMMITTEE


..... Chairman
(Associate Professor Sukumvit Phoomvuthisarn, Ph.D.)


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


..... Member
(Naebboon Hoonchareon, Ph.D.)


..... Member
(Associate Professor Prabhas Chongstitvattana, Ph.D.)


..... Member
(Songsak Chusanapiputt, Ph.D.)

4571806821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: DIFFERENTIAL EVOLUTION / OPTIMAL POWER FLOW / PARALLEL PROCESSING / SECURITY CONSTRAINTS / SELF ADAPTATION

CHAINARONG THITITHAMRONGCHAI : OPTIMAL POWER FLOW WITH APPLICATION OF PARALLEL DIFFERENTIAL EVOLUTION. THESIS ADVISOR : Associate Professor Bundhit Eua-arporn, Ph.D. 191 pp.

Optimal power flow (OPF) is a large dimension nonlinear, nonconvex and highly constrained optimization problem that has been used widely for power system planning and operation. The solution of the OPF problem provides the optimal settings of generator active power outputs and voltages, shunt capacitors/reactors, transformer tap-settings and other control variables to minimize the fuel cost while keeping the load bus voltages, generator reactive power outputs, network power flows and all other state variables in their operational and secure limits. Conventional gradient based optimization techniques, e.g. linear programming, nonlinear programming, or interior point method have been applied to solve the OPF problems. However, the drawback of such methods usually converges to sub-optimal solution when nonconvex characteristics of fuel cost function are considered. Heuristic algorithms, e.g. genetic algorithm (GA), evolutionary programming (EP), and differential evolution (DE), have the ability to avoid the entrapment in local optima.

This dissertation proposes an enhanced version of differential evolution (DE) called self-adaptive differential evolution with augmented lagrange multiplier method (SADE_ALM) for solving the OPF problems with different nonconvex and discrete fuel cost characteristics. In addition, the parallel version of the SADE_ALM is also applied for this implementation to increase the search capability of the SADE_ALM. Numerical results show that the proposed algorithms are successfully and effectively implemented to find the best total generation fuel cost without violating any constraints.

Department...Electrical Engineering..... Student's signature..... *Chainarong T.*
Field of study...Electrical Engineering..... Advisor's signature..... *B. Eua-arporn*
Academic year ..2006..... Co-advisor's signature.....

ชัยณรงค์ ธิติธำรงชัย : ออปติมัลเพาเวอร์ฟลิวส์โดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลเอฟโวลูชันแบบขนาน (OPTIMAL POWER FLOW WITH APPLICATION OF PARALLEL DIFFERENTIAL EVOLUTION), อ. ที่ปรึกษา: ร.ศ. ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, 191 หน้า.

ออปติมัลเพาเวอร์ฟลิวส์เป็นปัญหาเกี่ยวกับการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยมีเงื่อนไขบังคับแบบไม่เชิงเส้น และแบบนอนคอนเวกซ์ที่มีความสำคัญต่อการวางแผนและการควบคุมการปฏิบัติงานในระบบไฟฟ้ากำลัง คำตอบของปัญหาออปติมัลเพาเวอร์ฟลิวส์ซึ่งทำให้อัตนทุนการผลิตรวมของระบบมีค่าต่ำสุดนั้น ประกอบด้วยค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรควบคุมต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น กำลังไฟฟ้าจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบขนาน หรือ ระดับแทปของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น โดยที่ระบบยังคงสามารถปฏิบัติงานภายใต้สภาวะขอบเขตและเงื่อนไขที่กำหนด เช่น กำลังไฟฟ้านี้อาจมีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดแรงดันของโวลต์บัส หรือกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านแต่ละสายส่ง เป็นต้น ที่ผ่านมามีเทคนิคในการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบดั้งเดิม เช่น โปรแกรมแบบเชิงเส้น โปรแกรมแบบไม่เชิงเส้น หรือ วิธีการจุดภายใน มาใช้ในการแก้ปัญหา เทคนิคดังกล่าวมักให้คำตอบที่เข้าสู่ค่าเหมาะสมย่อย โดยเฉพาะกรณีฟังก์ชันเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันแบบนอนคอนเวกซ์ ปัจจุบันเทคนิคการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบเฟ้นสุ่ม เช่น เจเนติกอัลกอริทึม, การโปรแกรมแบบวิวัฒนาการ, และการวิวัฒนาการผลต่าง เริ่มมีบทบาทมากขึ้นในการแก้ปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาทางด้านออปติมัลเพาเวอร์ฟลิวส์ เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดได้โดยไม่ต้องอาศัยค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาวิธีการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบเฟ้นสุ่มวิธีใหม่ที่เรียกว่า self-adaptive differential evolution with augmented lagrange multiplier method (SADE_ALM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาจากวิธีการวิวัฒนาการผลต่างแบบดั้งเดิม โดยนำมาใช้ในการแก้ปัญหาออปติมัลเพาเวอร์ฟลิวส์ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนอนคอนเวกซ์ และมีความไม่ต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังนำเสนอวิธีการประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลแบบขนานเพื่อเพิ่มขีดความสามารถของ SADE_ALM ในการหาผลตอบที่เหมาะสมที่สุดของระบบให้ดีขึ้น ผลการทดลองพบว่าวิธีการใหม่ที่น่าสนใจสามารถหาค่าใช้จ่ายของระบบได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นที่ผ่านมา โดยที่ระบบยังคงสามารถปฏิบัติงานภายใต้สภาวะขอบเขตและเงื่อนไขที่กำหนด

ภาควิชา...วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....*Jurany T.*
 สาขาวิชา...วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*Atoll*
 ปีการศึกษา...2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

ACKNOWLEDGMENTS

Firstly, the author would like to express his greatest gratitude and profound appreciation to his advisor, Assoc. Prof. Dr. Bundhit Eua-arporn for his intensive attention, guidance, and considerable supports throughout this dissertation study. The author also wishes to express his sincere gratefulness to the chairman of the dissertation committees, Assoc. Prof. Dr. Sukumvit Phoomvuthisarn, and Dr. Naebboon Hoonchareon, members of the dissertation committees, for their useful suggestions and constructive comments.

The author is deeply grateful and honored Assoc. Prof. Dr. Prabhas Chongstitvattana, Department of Computer Engineering, Chulalongkorn University, and Dr. Songsak Chusanapiputt, Department of Electrical Engineering, Mahanakorn University of Technology, for their kindly agreed to serve as the external committees and evaluated this dissertation.

The author would like to express the gratefulness to the Thailand Research Fund (TRF) for granting the Royal Golden Jubilee Scholarship to him under contract PHD/0046/2547 throughout this dissertation study.

Last but not least, the author would like to express his foremost gratitude to his beloved father and mother for their incessant love, caring, and supports throughout his life. This dissertation is dedicated to them.

CONTENTS

	page
ABSTRACT (THAI)	iv
ABSTRACT (ENGLISH)	v
ACKNOWLEDGEMENTS	vi
CONTENTS	vii
LIST OF FIGURES	xi
LIST OF TABLES	xiii
CHAPTER I INTRODUCTION	1
1.1 Research Motivation	1
1.2 Objectives	3
1.3 Scope and Limitation	3
1.4 Organization of the Dissertation	4
CHAPTER II FUNDAMENTAL OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS	6
2.1 Introduction	6
2.2 Basic Structure of Evolutionary Algorithms	7
2.3 Differential Evolution	8
2.4 Differential Evolution – Example	13
2.5 Constraints Handling	15
2.6 The Self-adaptive Differential Evolution with Augmented Lagrange Multiplier Method ..	18
2.6.1 Inner loop iteration	19
2.6.2 Outer loop iteration	22
CHAPTER III OPTIMAL ECONOMIC OPERATION OF POWER SYSTEMS	24
3.1 Introduction	24
3.2 General Variations of Fuel-Cost Characteristics	25
3.2.1 Valve-Point Effects	26
3.2.2 Multiple Fuels	27

	page
3.2.3 Prohibited Operating Zones	28
3.3 Formulation of the ED Problems	29
3.3.1 ED Problem Considering Prohibited Operating Zones	29
3.3.2 ED Problem Considering Valve-Point Effects	31
3.3.3 ED Problem Considering Multiple Fuels	31
3.3.4 ED Problem Considering Multiple Fuels with Valve-Point Effects	31
3.3.5 ED Problem Considering Multiple Fuels with Valve-Point Effects, and Prohibited Operating Zones	32
3.4 Numerical Results	32
3.4.1 Case 3.1: Valve-Point Effects	33
3.4.2 Case 3.2: Prohibited Operating Zones (POZ)	36
3.4.3 Case 3.3: Multiple Fuels	37
3.4.4 Case 3.4: Multiple Fuels with Valve-Point Effects	39
3.4.5 Case 3.5: Multiple Fuels Options with Valve-Point Effects and Prohibited Operating Zones	40
3.5 Conclusion	42
CHAPTER IV SOLUTION PROCEDURE OF OPTIMAL POWER FLOW	43
4.1 Introduction	43
4.2 Optimal Power Flow (OPF) Problem Formulation	43
4.3 SADE_ALM Based Optimal Power Flow (SADE_ALM-OPF)	48
4.3.1 The inner loop iteration	48
4.3.2 The outer loop iteration	49
4.4 Parallel SADE_ALM Based Optimal Power Flow (pSADE_ALM-OPF)	50
4.4.1 The inner loop iteration	52
4.4.2 The outer loop iteration	54
4.5 Numerical Results	56
4.5.1 Case 4.1: The OPF with Quadratic Fuel Cost Function for the IEEE 30 Bus System.	56
4.5.2 Case 4.2: The OPF with multiple fuels for the IEEE 30 Bus System	58
4.5.3 Case 4.3: The OPF problem with valve-point effects for the IEEE 30 Bus System...	59

	page
4.5.4 Case 4.4: The OPF with Combined Quadratic, Multiple Fuels, Valve-Point Effects, and Combined Cycle Cogeneration Plant (CCCP) Model for the IEEE 30 Bus System.....	60
4.5.5 Case 4.5: The OPF with Quadratic Fuel Cost Function Based on the IEEE 57 and 118 Bus System.	61
4.6 Conclusion	65
 CHAPTER V SOLUTION PROCEDURE OF SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW	
5.1 Introduction	66
5.2 Security Constrained Optimal Power Flow (SCOPF) Problem Formulation	66
5.3 SADE_ALM based security constrained optimal power flow (SADE_ALM-SCOPF)...	69
5.3.1 The inner loop iteration	70
5.3.2 The outer loop iteration	71
5.4 Parallel SADE_ALM Based Security Constrained Optimal Power Flow (pSADE_ALM-SCOPF)	72
5.4.1 The inner loop iteration	72
5.4.2 The outer loop iteration	73
5.5 Numerical Results	74
5.5.1 Case 5.1: The SCOPF with nine single-line outages for the IEEE 30 Bus System ..	74
5.5.2 Case 5.2: The SCOPF with five single-line outages for the IEEE 30 Bus System ...	76
5.5.3 Case 5.3: The SCOPF for the IEEE 57 and 118 Bus System.....	76
5.6 Conclusion	80
 CHAPTER VI Mixed-integer Self-adaptive Differential Evolution with Augmented Lagrange Multiplier Method	
6.1 Introduction	81
6.2 Mixed-integer SADE_ALM based optimal power flow (MISADE_ALM-OPF)	81
6.2.1 The inner loop iteration	81
6.2.2 The outer loop iteration	83

	page
6.3 Numerical Results	83
6.3.1 Case 6.1: The OPF with Quadratic Fuel Cost Function	84
6.3.2 Case 6.2: The OPF with Multiple Fuels	85
6.3.3 Case 6.3: The OPF with Valve-Point Effects	86
6.4 Conclusion	88
CHAPTER VII CONCLUSIONS	89
7.1 Conclusions	89
7.2 Recommendations for Future Works	91
REFERENCES	92
APPENDIX	98
BIOGRAPHY	191

LIST OF FIGURES

	page
Figure 2.1 Basic structure of a typical evolutionary algorithm	8
Figure 2.2 General flowchart for the DE algorithm	12
Figure 2.3 Illustration of a simple example of DE where the objective function is $\min f(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4$, subject to $0 \leq x_k \leq 1, k=1, \dots, 4$	16
Figure 2.4 Chromosome structure of SADE	19
Figure 2.5 Flow chart of SADE_ALM (N_o : maximum number of iterations of outer loop, N_i : maximum number of iterations of inner loop)	20
Figure 3.1 Fuel-cost curve of a thermal generating unit	26
Figure 3.2 Fuel-cost curve of a thermal generating unit with four-steam admission valves	27
Figure 3.3 Fuel-cost curve of a thermal generating unit supplied with three fuels	28
Figure 3.4 Fuel-cost curve of a thermal generating unit with two prohibited operating zones ..	28
Figure 3.5 Convergence characteristic of DE_ALM and SADE_ALM for NP = 5	35
Figure 3.6 Illustration of inner loop convergence characteristic for the first outer loop of DE_ALM and SADE_ALM for NP = 5	36
Figure 4.1 Fuel-cost characteristic of CCCP with two gas turbines and one steam turbine	45
Figure 4.2 Flowchart of SADE_ALM-OPF	49
Figure 4.3 Structure of PC cluster	51
Figure 4.4 Flowchart of pSADE_ALM-OPF	55
Figure 4.5 Convergence characteristic of SADE_ALM and pSADE_ALM for case 4.1	57
Figure 4.6 Convergence characteristic of SADE_ALM for case 4.2	59
Figure 4.7 Convergence characteristic of SADE_ALM and pSADE_ALM for case 4.3	60
Figure 4.8 Convergence characteristic of SADE_ALM and pSADE_ALM for case 4.4	61
Figure 4.9 Convergence characteristic of SADE_ALM and pSADE_ALM for case 4.5 (the IEEE 57 bus system)	62
Figure 4.10 Convergence characteristic of SADE_ALM and pSADE_ALM for case 4.5 (the IEEE 118 bus system)	62
Figure 5.1 Flowchart of SADE_ALM-SCOPF	70
Figure 5.2 Flowchart of pSADE_ALM-SCOPF	73
Figure 5.3 Convergence characteristic of pSADE_ALM and SADE_ALM in case 5.1	75

	page
Figure 5.4 Convergence characteristic of pSADE_ALM and SADE_ALM in case 5.2	76
Figure 5.5 Convergence characteristic of SADE_ALM and pSADE_ALM for case 5.3 (the IEEE 57 bus system)	77
Figure 5.6 Convergence characteristic of SADE_ALM and pSADE_ALM for case 5.3 (IEEE 118 bus system).....	77
Figure 6.1 Flowchart of MISADE_ALM-OPF	82
Figure 6.2 Convergence characteristic of SADE_ALM and MISADE_ALM for case 6.1	84
Figure 6.3 Convergence characteristic of SADE_ALM and MISADE_ALM for case 6.2	85
Figure 6.4 Convergence characteristic of SADE_ALM and MISADE_ALM for case 6.3	86
Figure A.1 Pseudo code of DE/rand/1/bin	100
Figure C.1 The general structure of globally parallel model	107
Figure C.2 The general structure of coarse-grained model.....	107
Figure C.3 The general structure of the fine-grained model.....	108

LIST OF TABLES

	page
Table 3.1 Result comparison for case 3.1	33
Table 3.2 The best result comparison for case 3.1	34
Table 3.3 Relative frequency of the solution convergence for case 3.1	35
Table 3.4 The best results comparison for case 3.2	37
Table 3.5 The best results comparison for case 3.3	38
Table 3.6 Results comparison for case 3.3	39
Table 3.7 Relative frequency of the solution convergence for case 3.3	39
Table 3.8 The best results comparison for case 3.4	40
Table 3.9 Results comparison for case 3.4	40
Table 3.10 Relative frequency of the solution convergence for case 3.4	40
Table 3.11 Proposed prohibited operating zones for case 3.5	41
Table 3.12 The best results comparison for case 3.5	41
Table 3.13 Results comparison for case 3.5	41
Table 3.14 Relative frequency of the solution convergence for case 3.5	42
Table 4.1 Generator cost coefficients in case 4.1	57
Table 4.2 Comparison of the total generator fuel costs for case 4.1	57
Table 4.3 Generator cost coefficients in case 4.2	58
Table 4.4 Comparison of the total generator fuel costs for case 4.2	58
Table 4.5 Generator cost coefficients in case 4.3	59
Table 4.6 Comparison of the total generator fuel costs for case 4.3	59
Table 4.7 Generator cost coefficients in case 4.4	60
Table 4.8 Comparison of the total generator fuel costs for case 4.4	61
Table 4.9 Comparison of the total generator fuel costs for case 4.5	61
Table 4.10 The best optimal solutions given by SADE_ALM and pSADE_ALM in case 4.1-4.4	64
Table 4.11 Optimal results for the IEEE 57 and 118 bus system given by SADE_ALM and pSADE_ALM for each trial run in case 4.5.....	64
Table 5.1 Comparison of the total generator fuel costs for case 5.1	74
Table 5.2 Comparison of the total generator fuel costs for case 5.2	76

	page
Table 5.3 Comparison of the total generator fuel costs for case 5.3	77
Table 5.4 The best secure optimal solutions given by SADE_ALM and pSADE_ALM in case 5.1 and 5.2	79
Table 5.5 Secure optimal results for the IEEE 57 and 118 bus system given by SADE_ALM and pSADE_ALM for each trial run in case 5.3	79
Table 6.1 Comparison of the total generator fuel costs for case 6.1	84
Table 6.2 Comparison of the total generator fuel costs for case 6.2	85
Table 6.3 Comparison of the total generator fuel costs for case 6.3	86
Table 6.4 Optimal solutions given by SADE_ALM and MISADE_ALM in each case	87
Table 6.5 New Tap settings of SADE_ALM after being modified to the nearest discrete taps..	88
Table B.1 System data of case 3.1 for generating units considering valve-point effects	102
Table B.2 System Data of case 3.2 for generating units considering prohibited operating zones	103
Table B.3 Prohibited zones data of case 3.2 for generating units considering prohibited operating zones	103
Table B.4 System data of case 3.3 for generating units considering multiple fuels.....	104
Table B.5 System data of case 3.4 for generating units considering both multiple fuels and valve-point effects	105
Table D.1 Bus data for the IEEE-30 bus test system	109
Table D.2 Branch data for the IEEE-30 bus test system	110
Table D.3 Generator data for the IEEE-30 bus test system	110
Table D.4 Power flow results of SADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.1	111
Table D.5 Power flow results of pSADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.1	113
Table D.6 Power flow results of SADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.2	115
Table D.7 Power flow results of pSADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.2	117

	page
Table D.8 Power flow results of SADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.3	119
Table D.9 Power flow results of pSADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.3	121
Table D.10 Power flow results of SADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.4	123
Table D.11 Power flow results of pSADE_ALM based on the best optimal solution for case 4.4	125
Table E.1 Bus data for the IEEE-57 bus test system	127
Table E.2 Branch data for the IEEE-57 bus test system	128
Table E.3 Generator data for the IEEE-57 bus test system	129
Table E.4 Generator cost data for the IEEE-57 bus test system	129
Table E.5 The best optimal solutions given by SADE_ALM and pSADE_ALM for case 4.5 (the IEEE 57 bus system)	130
Table E.6 Power flow results of SADE_ALM based on the best optimal solution of the IEEE 57 bus system for case 4.5	131
Table E.7 Power flow results of pSADE_ALM based on the best optimal solution of the IEEE 57 bus system for case 4.5	134
Table F.1 Bus data for the IEEE-118 bus test system	137
Table F.2 Branch data for the IEEE-118 bus test system	139
Table F.3 Generator data for the IEEE-118 bus test system	142
Table F.4 Generator cost data for the IEEE-118 bus test system	143
Table F.5 The best optimal solutions given by SADE_ALM and pSADE_ALM for case 4.5 (the IEEE 118 bus system)	144
Table F.6 Power flow results of SADE_ALM based on the best optimal solution of the IEEE 118 bus system for case 4.5	147
Table F.7 Power flow results of pSADE_ALM based on the best optimal solution of the IEEE 118 bus system for case 4.5	152
Table G.1 Power flow results of SADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 30 bus system for case 5.1	157

	page
Table G.2 Power flow results of pSADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 30 bus system for case 5.1	159
Table G.3 Power flow results of SADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 30 bus system for case 5.2	161
Table G.4 Power flow results of pSADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 30 bus system for case 5.2	163
Table H.1 The best secure optimal solutions given by SADE_ALM and pSADE_ALM for the IEEE 57 bus system for case 5.3	165
Table H.2 Power flow results of SADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 57 bus system for case 5.3	166
Table H.3 Power flow results of pSADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 57 bus system for case 5.3	169
Table I.1 The best secure optimal solutions given by SADE_ALM and pSADE_ALM for the IEEE 118 bus system for case 5.3	172
Table I.2 Power flow results of SADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 118 bus system for case 5.3	175
Table I.3 Power flow results of pSADE_ALM based on the best secure optimal solution of the IEEE 118 bus system for case 5.3	180
Table J.1 Power flow results of MISADE_ALM based on the best optimal solution of the IEEE 30 bus system for case 6.1	185
Table J.2 Power flow results of MISADE_ALM based on the best optimal solution of the IEEE 30 bus system for case 6.2	187
Table J.3 Power flow results of MISADE_ALM based on the best optimal solution of the IEEE 30 bus system for case 5.3	189