39-7

การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว โดยอาศัยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

นาย พรประนด ดิษยบุตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539
ISBN 974-634-631-8
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17479669

STEADY STATE VOLTAGE STABILITY ANALYSIS USING CONTINUATION POWER FLOW

Mr. Pornpranod Didsayabutra

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1996

ISBN 974-634-631-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวโดยอาศัยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง
โดย	นายพรประนด ดิษยบุตร์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

( )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... กรรมการ

(นาย วุฒิชัย พึงประเสริฐ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

พรประนด ดิษยบุตร์ : การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวโดยอาศัยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (STEADY STATE VOLTAGE STABILITY ANALYSIS USING CONTINUATION POWER FLOW) (อ.ที่ปรึกษา ผศ.ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดหรือจุดที่เกิดการพังทลายของแรงดันอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลด โดยใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง การวิเคราะห์หาบัสที่อ่อนแอที่สุดของระบบ และขอบเขตปลอดภัยในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า โดยผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาวิธีการคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบขึ้นใหม่ โดยใช้การตรวจสอบค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์ และคำนวณความกว้างของช่วงในการคำนวณในแต่ละรอบโดยอัตโนมัติ

ในการวิเคราะห์ได้ทำการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นบนไมโครคอมพิวเตอร์และแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ การพังทลายของแรงดันไฟฟ้าและขอบเขตปลอดภัยของการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบปกติและระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันต่างๆโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับวิธีโหลดโฟลว์แบบนิวตัน-ราฟสัน โดยในการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE ที่สภาวะปกติ และสภาวะที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งผลของการวิเคราะห์จะได้จุดวิกฤติของการจ่ายกำลังไฟฟ้าและขอบเขตปลอดภัยในการจ่ายกำลังไฟฟ้าก่อนที่จะเกิดปัญหาการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า

ผลจากการวิจัยพบว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูงมาก อีกทั้งยังมีความสามารถคำนวณได้ในระยะเวลาที่เร็วกว่าวิธีการคำนวณโดยอาศัยโหลดโฟลว์แบบนิวตัน-ราฟสันมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา พ.ศ. 2539	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

พรประนด ดิษยบุตร์ : การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวโดยอาศัยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (STEADY STATE VOLTAGE STABILITY ANALYSIS USING CONTINUATION POWER FLOW) (อ.ที่ปรึกษา ผศ.ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดหรือจุดที่เกิดการพังทลายของแรงดันอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลด โดยใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง การวิเคราะห์หาบัสที่อ่อนแอที่สุดของระบบ และขอบเขตปลอดภัยในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า โดยผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาวิธีการคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบขึ้นใหม่ โดยใช้การตรวจสอบค่าดีเทอร์มิแนนท์ของจาร์โคเบียนเมตริกซ์ และคำนวณความกว้างของช่วงในการคำนวณในแต่ละรอบโดยอัตโนมัติ

ในการวิเคราะห์ได้ทำการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นบนไมโครคอมพิวเตอร์และแสดงตัวอย่างการวิเคราะห์ การพังทลายของแรงดันไฟฟ้าและขอบเขตปลอดภัยของการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบปกติและระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันต่างๆโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับวิธีโหลดโฟลว์แบบนิวตัน-ราฟสัน โดยในการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE ที่สภาวะปกติ และสภาวะที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งผลของการวิเคราะห์จะได้จุดวิกฤติของการจ่ายกำลังไฟฟ้าและขอบเขตปลอดภัยในการจ่ายกำลังไฟฟ้าก่อนที่จะเกิดปัญหาการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า

ผลจากการวิจัยพบว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูงมาก อีกทั้งยังมีความสามารถคำนวณได้ในระยะเวลาที่เร็วกว่าวิธีการคำนวณโดยอาศัยโหลดโฟลว์แบบนิวตัน-ราฟสันมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา พ.ศ. 2539 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ ผศ.ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่ง ประกอบด้วย รศ.ดร. สำรวย สังข์สะอาด ผศ. ประสิทธ์ พิทยพัฒน์ และคุณ วุฒิชัย พึงประเสริฐ ที่ได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนทางด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอสามารถจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่

1. บทนำทั่วไป 1

1.1 เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า 2

1.2 เสถียรภาพของแรงดัน (Voltage Stability) 4

1.3 การพังทลายของแรงดัน (Voltage Collapse) 4

1.4 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 7

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน 7

1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 7

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ 7

2. วิธีการหาค่าจุดวิกฤติในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าของระบบโดยทั่วไป 10

2.1 การคำนวณหาค่าจุดวิกฤติของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า 12

2.2 การกำหนดขอบเขตปลอดภัย 15

2.3 ปัญหาการส่งผ่านกำลังรีแอคทีฟจากแหล่งกำเนิดไปสู่โหลด 17

2.4 วิธีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า 21

3 วิธีการคำนวณจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลัง 27

3.1 โหลดโฟลว์แบบนิวตัน-ราฟสัน 27

3.2 โหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง 32

3.3 การคำนวณหาจุดวิกฤติของระบบโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง ที่มีการปรับความกว้างของช่วงโดยอัตโนมัติ 45

3.4 การใช้วิธีการทางด้านออปติไมเซชั่นในการหาจุดวิกฤติของระบบ 51

4 การวิเคราะห์หาจุดวิกฤติในระบบไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง 53
4.1 ข้อมูลซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบ 54
4.2 การคำนวณค่าบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ 57
4.3 การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับค่าอื่น ๆ ในระบบตลอดจนหาคำตอบ 58
5 ตัวอย่างและผล 63
5.1 ตัวอย่างระบบทดสอบซึ่งใช้ในการคำนวณ 63
5.2 ผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 65
5.3 ผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม 67
5.4 ผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน 70
5.5 ผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบที่มีการติดตั้งหม้อแปลงปรับค่าได้ 72
5.6 ผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันหลาย ๆ ชนิดเข้าในระบบทดสอบเดียวกัน 78
5.7 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติในระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างวิธีการไหลของโหลดแบบธรรมดา กับวิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง 80
5.8 ผลการวิเคราะห์หาขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการของระบบไฟฟ้ากำลัง 90
6 สรุปและข้อเสนอแนะ 97
6.1 การรวบรวมข้อมูลและนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ 97
6.2 การคำนวณหาจุดวิกฤติในระบบไฟฟ้ากำลัง 97
6.3 การพัฒนาในด้านทฤษฎีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง 98
รายการอ้างอิง 99
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการปรับความกว้างของช่วงโดยอัตโนมัติ 101
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความกว้างของช่วงที่เหมาะสมในการคำนวณหาจุดวิกฤติ 130
ประวัติผู้เขียน 132

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวคูณลดต่างๆเมื่อรอบของการคำนวณเพิ่มมากขึ้น	47
3.2	แสดงผลจากการใช้ตัวคูณลดต่างๆเพื่อคำนวณหาค่าจุดวิกฤติของระบบ	49
4.1	แสดงข้อมูลของบัสต่างๆในระบบทดสอบขนาด 5 บัส	55
4.2	แสดงข้อมูลของสายส่งในระบบทดสอบขนาด 5 บัส	56
5.1	ผลของค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้กับค่าผิดพลาดของการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติ	66
5.2	ผลของค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้กับการวิเคราะห์หาบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ	67
5.3	แสดงผลของขนาดของตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่มีต่อจุดวิกฤติ	69
5.4	แสดงผลของตำแหน่งของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่มีต่อจุดวิกฤติ	70
5.5	แสดงผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีต่อจุดวิกฤติ	71
5.6	แสดงผลของตำแหน่งของการติดตั้งตัวหม้อแปลงปรับค่าได้ที่มีต่อจุดวิกฤติของระบบ	74
5.7	แสดงผลของขนาดของหม้อแปลงปรับค่าได้ที่ทำการติดตั้ง	75
5.8	แสดงผลของขนาดของหม้อแปลงปรับค่าได้ที่ทำการติดตั้งต่อจุดวิกฤติ	76
5.9	แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบกำลังที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันกับระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันหลายตัว	79
5.10	แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยระหว่างวิธีโหลดโฟลว์แบบธรรมดากับวิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง	81

5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 82
5.12 ผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่ติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม 83
5.13 ผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน 84
5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งหม้อแปลงปรับค่าได้ 85
5.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันหลายๆชนิด 86
5.16 แสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้า 89
5.17 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการ เทียบกับ จุดวิกฤติของระบบทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 91
5.18 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการ เทียบกับ จุดวิกฤติของระบบทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 91
5.19 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับจุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม 92
5.20 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการ เทียบกับ จุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน 93
5.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับจุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งหม้อแปลงปรับค่าได้ 94
5.22 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการ เทียบกับ จุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันหลายชนิดพร้อมกัน 95

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงผลของการเกิดข้อผิดพร่องขึ้นในระบบในแง่ของกระแสเทียบกับเวลา	3
2.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและมุมของโรเตอร์	10
2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดและจุดวิกฤติ	12
2.3	แสดงวิธีการหาจุดวิกฤติของระบบโดยใช้ความกว้างของช่วงก้าวแคบ	13
2.4	แสดงวิธีการหาจุดวิกฤติของระบบโดยใช้ความกว้างของช่วงก้าวกว้าง	14
2.5(ก)	แสดงวิธีการหาจุดวิกฤติในการหาขอบเขตปลอดภัยของระบบ	16
2.5(ข)	แสดงวิธีการหากำหนดขอบเขตปลอดภัยของระบบ	16
2.5(ค)	แสดงวิธีการหากำลังที่ยังสามารถจ่ายโหลดได้ในการหาขอบเขตปลอดภัยของระบบไฟฟ้ากำลัง	16
2.6(ก)	แผนภาพแสดงการต่อเชื่อมส่วนประกอบต่างๆในระบบ	18
2.6(ข)	วงจรสมมูลย์ของระบบ	19
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอคทีฟกับระดับแรงดันในรูปของเฟสเซอร์	19
2.8	รูปแสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้ากับสายส่ง	22
2.9	รูปแสดงเฟสเซอร์ของแรงดันเมื่อมีติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมเข้ากับสายส่ง	22
2.10	รูปแสดงการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้ากับบัสใดบัสหนึ่ง	23
2.11	รูปแสดงเฟสเซอร์ของกำลังเมื่อมีติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสใดบัสหนึ่ง	24
2.12	รูปแสดงผลกระทบต่อแรงดันเมื่อมีติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่บัสใดบัสหนึ่ง	24

3.1	แสดงระบบที่ใช้คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟกับแรงดัน	32
3.2	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจริงกับแรงดันที่ค่าตัวประกอบกำลังต่างๆ	33
3.3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรีแอคทีฟกับแรงดันที่ค่ากำลังจริงต่างๆ	34
3.4	แสดงจุดเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณและค่าที่ได้จากการทำนาย	40
3.5	แสดงการแก้ไขค่าจากการทำนายโดยใช้ตัวปรับค่า	41
3.6(ก)	แสดงผลการหาจุดวิกฤติโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบธรรมดา	45
3.6(ข)	แสดงผลการหาจุดวิกฤติโดยใช้วิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง	46
3.7	แสดงขั้นตอนในการหาความกว้างของช่วงก้าวที่เหมาะสม	48
4.1	แสดงวงจรสมมูลแบบ π ของหม้อแปลงปรับค่าได้	57
4.2	แสดงระบบทดสอบขนาด 5 บัส	59
4.3	แผนผังแสดงวิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง	62
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่ไม่มีการชดเชยแรงดัน	67
5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่มีการชดเชยแรงดันด้วยตัวเก็บประจุแบบอนุกรมขนาดต่างๆ ที่ตำแหน่งเดียวกัน	69
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่มีการชดเชยแรงดันโดยติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรมที่ตำแหน่งต่างๆกัน	70
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่มีการชดเชยแรงดันโดยติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานขนาดต่างๆกันที่บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ	72
5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่มีการชดเชยแรงดันโดยติดตั้งหม้อแปลงปรับค่าได้ที่ตำแหน่งต่างๆในระบบ	74
5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่มีการชดเชยแรงดันโดยติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานขนาดต่างๆกันที่บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ	75

5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่มีการชดเชยแรงดันโดยติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานขนาดต่างๆกันที่บัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ 76
5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่ระบบสามารถจ่ายได้มากขึ้นเทียบกับชนิดของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 77
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับโหลดของระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันหลายๆชนิดพร้อมๆกันเทียบกับระบบทดสอบที่ไม่มีการชดเชยแรงดัน 80
5.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 81
5.11 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 82
5.12 แสดงผลการวิเคราะห์ หาจุดวิกฤติของระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม 83
5.13 แสดงผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน 84
5.14 แสดงผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบที่มีการติดตั้งหม้อแปลงปรับค่าได้ 85
5.15 แสดงผลการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันหลายๆชนิด 86
5.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดในวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างวิธีโหลดโฟลว์แบบดั้งเดิมกับวิธีโหลดโฟลว์แบบต่อเนื่อง 88
5.17 กราฟแแสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์หาจุดวิกฤติของระบบไฟฟ้า 90
5.18 กราฟแแสดงผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับ จุดวิกฤติของระบบทดสอบที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 91
5.19 กราฟแแสดงผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับ จุดวิกฤติของระบบทดสอบที่ไม่มีอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน 92

5.20 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับ จุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบอนุกรม 93
5.21 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับจุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนาน 94
5.22 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับจุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งหม้อแปลงปรับค่าได้ 95
5.23 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์หาค่าขอบเขตปลอดภัยในการปฏิบัติการเทียบกับจุดวิกฤติของระบบทดสอบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันหลายชนิดพร้อมกัน 96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย