

การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลด
ด้วยระบบฟuzzyอินเฟอร์เรนซ์



นายจักรชัย เซวานาธิคม

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

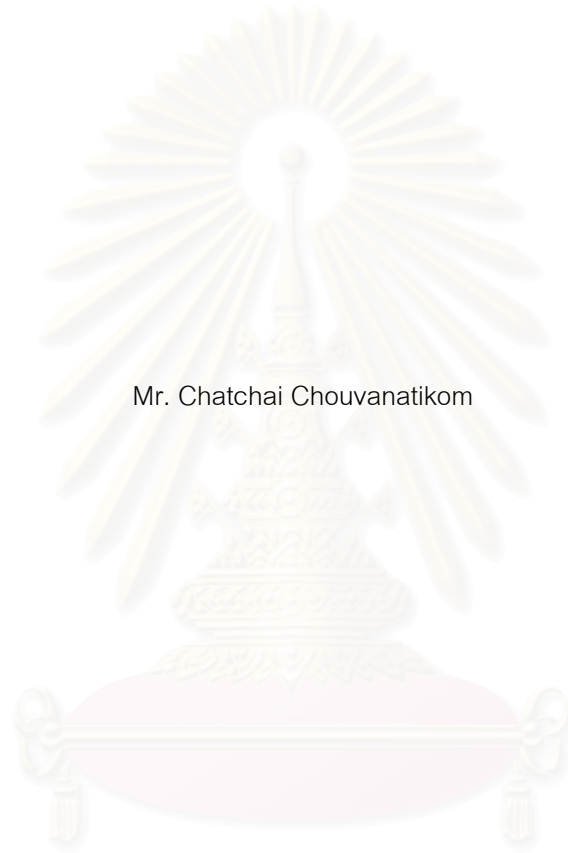
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2792-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CAPACITOR PLACEMENT WITH LOAD UNCERTAINTY CONSIDERATION
BY FUZZY INFERENCE SYSTEM



Mr. Chatchai Chouvanatikom

สถาบันวิทยบริการ
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 974-53-2792-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลด
ด้วยระบบพีซีอินเทอร์เนต

โดย

นายฉัตรชัย เขาวนาธิคม


สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

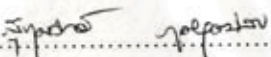
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เชื้ออาภรณ์

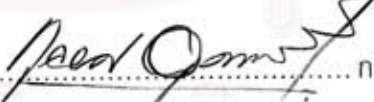
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

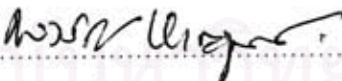

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวณิชย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เชื้ออาภรณ์)


..... กรรมการ
(ดร.กฤษศ อุตมวงศ์เสรี)


..... กรรมการ
(นายพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

ฉัตรชัย เชาวนาธิคม : การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดด้วยระบบ
ฟัซซีอินเฟอร์เรนซ์. (CAPACITOR PLACEMENT WITH LOAD UNCERTAINTY
CONSIDERATION BY FUZZY INFERENCE SYSTEM) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์
, 102 หน้า. ISBN 974-53-2792-1.

การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการติดตั้งตัวเก็บประจุจำเป็นต้องใช้ข้อมูล
หลายประการ เช่น โหลดของระบบ สายป้อน ตัวเก็บประจุ เป็นต้น โดยทั่วไปข้อมูลที่ใช้ประกอบการ
วิเคราะห์ผลเหล่านี้มักมีความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วย ทั้งนี้ตามปกติค่าโหลดใน
อนาคตอาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้มาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอหลักการวิเคราะห์
การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลด

สำหรับการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยพิจารณาความไม่
แน่นอนของโหลดนั้นได้ประยุกต์ใช้หลักการของทฤษฎีฟัซซีเซต ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี และการอนุมาน
แบบฟัซซี โดยวิธีการที่พัฒนาขึ้นได้นำมาทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 34 บัส ระบบทดสอบขนาด 70
บัส และระบบทดสอบท่าทราย สุดท้ายเปรียบเทียบผลการทดสอบกับกรณีพิจารณาโหลดแบบปกติเพื่อ
วิเคราะห์ผลกระทบจากความไม่แน่นอนของโหลดต่อปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... ฉัตรชัย เชาวนาธิคม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... A. A. A.
ปีการศึกษา2548..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม.....

4770254321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: CAPACITOR PLACEMENT / LOAD UNCERTAINTY / FUZZY INFERENCE SYSTEM

CHATCHAI CHOUVANATIKOM : CAPACITOR PLACEMENT WITH LOAD UNCERTAINTY CONSIDERATION BY FUZZY INFERENCE SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. BUNDHIT EUA-ARPORN, 102 pp. ISBN 974-53-2792-1.

It is widely known that power loss in distribution system can be improved by installing capacitors. The analysis of capacitor placement requires related information, e.g., load, feeders and capacitors. In general the future load forecast may differ from the actual values Therefore, this thesis proposes a method to analyze capacitor placement with load uncertainty consideration.

For capacitor placement with load uncertainty, fuzzy set theory, fuzzy logic and fuzzy inference system will be employed to solve the problem. The proposed method has been tested with 34-bus test system, 70-bus test system and Tasai test system. Finally, we compare the results with the case of normal load model to observe the effect of load uncertainty on capacitor placement problem.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature *Chatchai Chouvanatikom*
Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature *B. Eua-ayun*
Academic year2005.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออากรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี และ คุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ได้ให้กำลังใจตลอดมาตลอดจนเพื่อน พี่ น้อง ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขั้นตอนศึกษาและวิธีดำเนินงาน	3
1.4 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	3
2. แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า	5
2.1 แบบจำลองส่วนต่างๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	5
2.1.1 รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้า	5
2.1.2 แบบจำลองโหลด	6
2.1.3 แบบจำลองสายป้อน	7
2.1.4 แบบจำลองตัวเก็บประจุ	8
2.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า	9
2.3 ดัชนีกำหนดตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุ	13
3. ทฤษฎีฟuzzyเซต	16
3.1 แนวคิดและลักษณะเบื้องต้นของฟuzzyเซต	16
3.2 ทฤษฎีฟuzzyเซต	17
3.2.1 การนำเสนอฟuzzyเซต	18
3.2.2 λ -level cut ของฟuzzyเซต	19
3.2.3 คุณสมบัติความเป็น Convex	19
3.2.4 ฟuzzyคณิตบนช่วง	20

บทที่	หน้า
3.2.5 ตัวเลขฟัซซี่.....	21
3.2.6 ฟังก์ชันฟัซซี่.....	23
3.2.7 Defuzzification.....	24
3.3 ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี่.....	26
3.3.1 การอนุมานแบบแบบฟัซซี่.....	26
3.3.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ใช้การอนุมานแบบแบบฟัซซี่.....	28
4. การวิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	32
4.1 ความไม่แน่นอนในแบบจำลองหรือการคำนวณทางไฟฟ้ากำลัง.....	32
4.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดผลของ ความไม่แน่นอนไหลด้วยวิธีฟัซซี่.....	33
4.2.1 นิยามของฟัซซี่.....	33
4.2.2 ตัวเลขฟัซซี่.....	34
4.2.3 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี่.....	35
4.3 การอนุมานแบบฟัซซี่ (Fuzzy Inference System).....	37
4.3.1 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก.....	38
4.3.2 การวิเคราะห์ด้วย FIS.....	40
4.3.3 ตัวอย่างการคำนวณ.....	41
4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	43
5. ผลการทดสอบ.....	51
5.1 ระบบทดสอบขนาด 34 บัส.....	51
5.1.1 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณา ข้อมูลไหลแบบปกติ.....	53
5.1.2 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณา ความไม่แน่นอนของข้อมูลไหล.....	59
5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบขนาด 34 บัส.....	65
5.2 ระบบทดสอบขนาด 70 บัส.....	66
5.2.1 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณา ข้อมูลไหลแบบปกติ.....	68
5.2.2 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณา ความไม่แน่นอนของข้อมูลไหล.....	71
5.2.3 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบขนาด 34 บัส.....	74

บทที่	หน้า
5.3 ระบบทดสอบท่าทราย	75
5.3.1 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณา ข้อมูลโหลดแบบปกติ.....	77
5.3.2 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณา ความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลด.....	78
5.3.3 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบท่าทราย.....	81
6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	83
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	87
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 34 บัส	88
ภาคผนวก ข. ข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 70 บัส.....	91
ภาคผนวก ค. ข้อมูลของระบบที่ดัดแปลงจากระบบทดสอบท่าทราย.....	97
ภาคผนวก ง. ข้อมูลตัวแปรพีชชีของแต่ละจุดโหลด.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	102

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ตัวอย่างราคาของตัวเก็บประจุแต่ละขนาด	9
4.1 แสดงตัวแปรเอาต์พุตของกระบวนการ FIS เมื่อมีข้อมูลอินพุตต่างๆ.....	38
5.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบในสภาวะปกติที่ระดับโหลดสูงสุด	52
5.2 แบบจำลองของเส้นโค้งแสดงช่วงเวลาโหลดใน 1 ปี.....	54
5.3 ราคาของตัวเก็บประจุ.....	54
5.4 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.1 ก).....	55
5.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุดสำหรับกรณี 5.1.1 ก).....	56
5.6 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.1 ข).....	57
5.7 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.1 ข).....	57
5.8 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุดเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุทุกตัว... ..	58
5.9 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.2 ก).....	60
5.10 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.2 ก).....	61
5.11 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.2 ข).....	62
5.12 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.2 ข).....	62
5.13 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุดสำหรับกรณี 5.1.2 ข).....	63
5.14 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.2 ค).....	64
5.15 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบในสภาวะปกติที่ระดับโหลดสูงสุด.....	66
5.16 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.1 ก).....	68
5.17 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.1 ข).....	69
5.18 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.2.1 ข).....	70
5.19 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.2 ก).....	71
5.20 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.2.2 ก).....	72
5.21 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.2 ข).....	73
5.22 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.2.2 ข).....	73
5.23 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุด.....	76
5.24 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.3.1.....	77
5.25 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.3.1.....	77
5.26 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.3.2 ก).....	78
5.27 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.3.2 ก).....	79

ตาราง	หน้า
5.28 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.3.2 ข).....	80
5.29 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.3.2 ข).....	80



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แสดงแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล.....	6
2.2 ตัวอย่างกราฟการกระจายของโหลด.....	6
2.3 แสดงวงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น.....	7
2.4 แสดงวงจรสมมูลของสายส่งระยะปานกลาง.....	7
2.5 ฟังก์ชันราคาลงทุนของตัวเก็บประจุ.....	9
2.6 ตัวอย่างบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	11
3.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิมและฟัซซีเซต.....	18
3.2 ลักษณะความเป็น Convex ของฟัซซีเซต.....	20
3.3 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ.....	22
3.4 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ(ต่อ).....	23
3.5 กระบวนการ Mamdani max-min method.....	29
3.6 ผลสรุปของกฎเกณฑ์ทั้งหมดของกระบวนการ Mamdani max-min method.....	30
3.7 กระบวนการ Mamdani max- prod method.....	30
3.8 ผลสรุปของกฎเกณฑ์ทั้งหมดของกระบวนการ Mamdani max- prod method.....	31
4.1 แสดงช่วงของระดับ λ - level cut.....	34
4.2 แสดงแบบจำลองการวิเคราะห์โหลดไฟลัด้วยวิธีฟัซซี.....	37
4.3 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง.....	39
4.4 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแรงดัน.....	39
4.5 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสม.....	40
4.6 แสดงค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตทั้งสองตัวแปร.....	41
4.7 กรณีที่ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงที่อยู่ในช่วง High-Medium.....	42
4.8 กรณีที่ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงที่อยู่ในช่วง Medium.....	42
4.9 แสดงค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสม.....	43
4.10 แสดงแผนผังการวิเคราะห์โดยรวม.....	44
4.11 แสดงการวิเคราะห์หาค่าตำแหน่งบัส.....	45
4.12 แสดงการวิเคราะห์หาค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงของบัส i ใดๆ.....	46
4.13 แสดงการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	47
4.14 แสดงการวิเคราะห์หาขนาดตัวเก็บประจุที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ.....	49
5.1 แผนผังแสดงระบบทดสอบขนาด 34 บัส.....	51

ภาพประกอบ	หน้า
5.2 ตัวอย่างแสดงแบบจำลองโหลด.....	59
5.3 แผนผังแสดงระบบทดสอบขนาด 70 บัส	66
5.4 แผนผังแสดงระบบทดสอบท่าทราย	75



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าส่วนมากเกิดขึ้นที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า เนื่องจากเป็นระบบที่มีแรงดันต่ำและกระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่สูงเมื่อเทียบกับระบบส่งไฟฟ้า ดังนั้นจึงมักส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงกว่าในระบบส่ง วิธีการลดพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นิยมใช้มีหลายวิธี เช่น การจัดเรียงลักษณะวงจรใหม่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า(Network reconfiguration)[4] การใช้หม้อแปลงแบบปรับค่าได้ รวมทั้ง การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบ

สำหรับปัญหาทางการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นได้มีการวิจัยมาเป็นเวลานานแล้ว และมีการนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ปัญหาหลายวิธี เช่น วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method)[5] วิธีเชิงตัวเลข(Numerical method)[6] วิธีฮิวริสติก(Heuristic)[7] และวิธีปัญญาประดิษฐ์(Artificial intelligence)[8-11] โดยแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดของแต่ละวิธีดังต่อไปนี้

ในอดีตการวิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุนิยมใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) เนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ยังไม่ดีพอ การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สะดวกต่อการทำความเข้าใจและการนำไปใช้งานแม้ว่าสมมติฐานที่ใช้อาจแตกต่างจากความเป็นจริงอยู่มาก ข้อเสียส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้คือการจำลองตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุเป็นแบบต่อเนื่อง ดังนั้นขนาดของตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณอาจแตกต่างจากขนาดของตัวเก็บประจุมาตรฐานที่มีจำหน่ายทั่วไป ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าที่คำนวณได้ให้ตรงกับค่าจริงที่อยู่ใกล้ที่สุด

เมื่อประสิทธิภาพการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ดีขึ้นและหน่วยความจำมีราคาถูกลง ทำให้สามารถใช้วิธีเชิงตัวเลข(Numerical method) มาแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการออปติไมซ์ได้ วิธีนี้จะใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำเพื่อหาค่าสูงสุดและต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยผลตอบของค่าของตัวแปรนั้นต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขที่กำหนด สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จากกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงผ่านการปรับค่าต่าง ๆ เช่น ตำแหน่ง ขนาด และจำนวนตัวเก็บประจุ วิธีนี้จะพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์อย่างละเอียดโดยสนใจแรงดันทุกบัส เงื่อนไขของโหลด ขนาดของตัวเก็บประจุที่ไม่ต่อเนื่อง และตำแหน่งบัส การวิเคราะห์ผลด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีเชิงวิเคราะห์ที่มีการพิจารณาค่าตำแหน่ง

บัสและขนาดตัวเก็บประจุแบบไม่ต่อเนื่อง(Discrete) อย่างไรก็ตามต้องใช้เวลาในการจัดเตรียมข้อมูลมากกว่าการใช้วิธีเชิงวิเคราะห์ นอกจากนี้วิธีนี้ต้องพิจารณา Convexity ของฟังก์ชันด้วย

วิธีฮิวริสติก(Heuristic) เป็นเกณฑ์พื้นฐานอย่างง่าย ๆ ที่พัฒนามาจาก 3 ส่วนคือ ความรู้สึก(Intuition) ประสบการณ์(Experience) และการตัดสินใจ(Judgment) วิธีนี้อาศัยการวิเคราะห์ปัญหาอย่างรวดเร็วโดยลดความละเอียดในการคำนวณลงไป และสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้ในระดับหนึ่ง วิธีนี้จะเข้าใจง่ายและนำไปใช้ได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเชิงวิเคราะห์ วิธีเชิงตัวเลข อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้จากวิธีนี้อาจจะไม่ใช่ว่าดีที่สุดก็ได้

การวิเคราะห์แบบปัญญาประดิษฐ์(Artificial intelligence) มีหลายวิธี เช่น วิธีเจเนติก อัลกอริทึม(Genetic algorithm)[8] วิธีซิมูเลเต็ดแอนเนลิ่ง(Simulated annealing)[9] วิธีโครงข่ายประสาทเทียม(Artificial neural network)[10] และวิธีฟัซซี(Fuzzy set theory)[11] โดยวิธีเจเนติก อัลกอริทึมจะสามารถคำนวณหาคำตอบได้ดีที่สุดแต่จะใช้เวลาในการคำนวณนานมาก

จากที่กล่าวข้างต้นจะพบว่าวิธีการวิเคราะห์ปัญหาแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป การเลือกวิธีการวิเคราะห์แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะและความซับซ้อนของปัญหา ตลอดจนความแม่นยำของผลตอบที่ต้องการ สำหรับวิธีการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นตามปกติจะเป็นการพิจารณาหาขนาด ตำแหน่ง และจำนวนของตัวเก็บประจุที่จะติดตั้งเข้ากับระบบ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการวางแผนติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดหรือจากการคาดการณ์คือความถูกต้องของข้อมูลที่นำมาใช้ ในบางกรณีข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอาจมีส่วนที่คลาดเคลื่อนอยู่บ้างทำให้ต้องมีการประมาณข้อมูลให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีการนำทฤษฎีฟัซซีมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนเพื่อให้ผลการคำนวณครอบคลุมปัจจัยดังกล่าวซึ่งมักถูกละเลยจากการวิเคราะห์ปัญหาที่ผ่านมา

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อวิเคราะห์ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลโหนดด้วยวิธีฟัซซี
- 2) เพื่อศึกษาผลของความไม่แน่นอนของโหนดต่อการติดตั้งตัวเก็บประจุเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบปกติ
- 3) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบคิดผลของความไม่แน่นอนของข้อมูลโหนด

1.3 ขั้นตอนศึกษาและวิธีดำเนินงาน

- 1) ศึกษาการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีพีชชีและตรรกศาสตร์แบบพีชชี
- 3) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบที่จะนำมาทดสอบ
- 4) ทำการวิเคราะห์ระบบทดสอบด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นมา
- 5) ทำการออกแบบ ปรับปรุง และพัฒนาโปรแกรม
- 6) สรุปผลการวิจัย
- 7) เรียบเรียงผลงานวิจัย พิมพ์ผลงาน และจัดเข้ารูปเล่มเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

1.4 ขอบเขตการทำวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาระบบเป็นแบบสามเฟสสมดุล
- 2) พิจารณาระบบในสภาวะอยู่ตัว(Steady-state) เท่านั้น
- 3) ไม่คิดผลของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) สามารถนำหลักการ แนวคิด และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้งานกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของจริงได้
- 2) สามารถวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุเมื่อมีความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดได้
- 3) ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยคำนึงถึงข้อมูลที่นำมาใช้งานจริงมากขึ้น

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

สำหรับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทมีดังนี้

บทที่ 2 อธิบายหลักการพื้นฐานทั่วไปและแบบจำลองต่างๆ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน - ราฟสัน

บทที่ 3 อธิบายหลักการของทฤษฎีฟัซซีเซตตั้งแต่แนวคิด คุณสมบัติต่างๆ ของตัวแปรแบบฟัซซี ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ฟังก์ชันแบบฟัซซี Defuzzification ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี และการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference System)

บทที่ 4 อธิบายการนำทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ เช่น การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีมาวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดผลของความไม่แน่นอน โหลด การวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี

บทที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์เมื่อทดสอบกับระบบทดสอบแบบต่างๆ เช่น ระบบทดสอบขนาด 34 บัส ระบบทดสอบขนาด 70 บัส และระบบที่ดัดแปลงจากระบบทดสอบท่าทรายซึ่งเป็นระบบจำหน่ายขนาด 34 บัส

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นิยมใช้มาก คือ การใช้ตัวเก็บประจุ ต่อขนานเข้ากับระบบ[12]เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแทนการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าเสมือนจาก โรงไฟฟ้าหรือต้นสายป้อน ซึ่งการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นจะ ช่วยปรับปรุงระดับแรงดันของระบบให้สูงขึ้น ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายป้อนลดลงและ กำลังไฟฟ้าสูญเสียก็ลดลงด้วย สำหรับการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นควรพิจารณาเลือก ขนาดและตำแหน่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

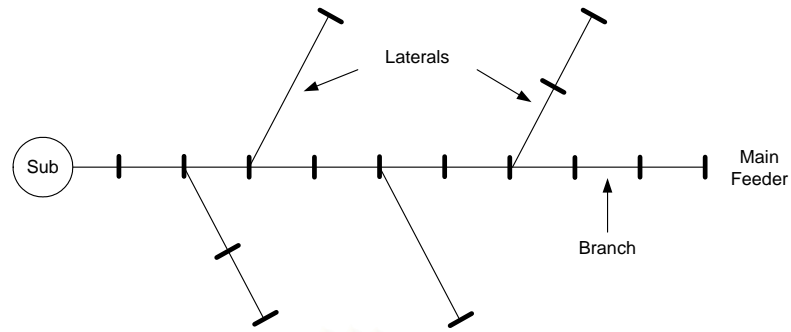
บทนี้จะอธิบายถึงแบบจำลองต่างๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า การวิเคราะห์การไหลของ กำลังไฟฟ้า ซึ่งจะนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บ ประจุ สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปที่ระบบจำหน่ายระดับ แรงดันประมาณ 12 - 33 kV ซึ่งอยู่ในความดูแลของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและมีลักษณะเป็นแบบ เรเดียล

2.1 แบบจำลองส่วนต่างๆ ในระบบจำหน่าย

แบบจำลองของระบบจำหน่ายที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของตัว เก็บประจุ ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

2.1.1 รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

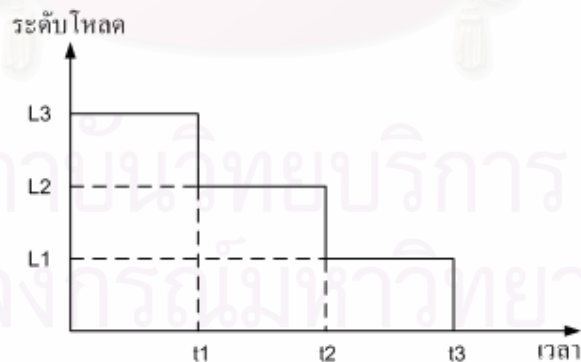
แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามปกติจะมีลักษณะเป็นสาย ป้อนแบบเรเดียล ประกอบด้วยสายป้อนหลัก(Main feeder) และสายป้อนย่อยที่แยกออกจากสาย ป้อนหลัก (Laterals) ซึ่งแต่ละส่วนจะประกอบด้วยกิ่งเป็นจำนวนมาก (Branch) ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

2.1.2 แบบจำลองโหลด

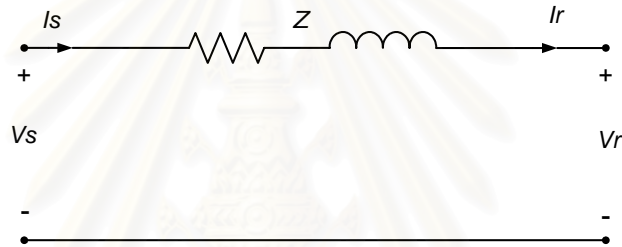
ลักษณะโหลดที่ใช้โดยทั่วไปนั้นจะเป็นแบบเส้นโค้งโหลดรายชั่วโมง(Hourly load curve) หรือเส้นโค้งโหลดรายวัน(Daily load curve) แต่ในการปฏิบัติงานในระบบไฟฟ้ากำลังโดยเฉพาะในด้านการวางแผนนั้นไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะโหลดเป็นรายชั่วโมง เพียงแต่ต้องการทราบค่าโดยประมาณของปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเป็นหลัก กรณีนี้เราจะอาศัยเส้นโค้งช่วงเวลาโหลด(Load duration curve) สำหรับการวางแผนการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นจะตัดแปลงเส้นโค้งช่วงเวลาโหลดให้ง่ายขึ้น โดยพิจารณาโหลดเพียงสามระดับโหลดเท่านั้น เพื่อใช้เป็นแบบจำลองโหลดดังรูปที่ 2.2



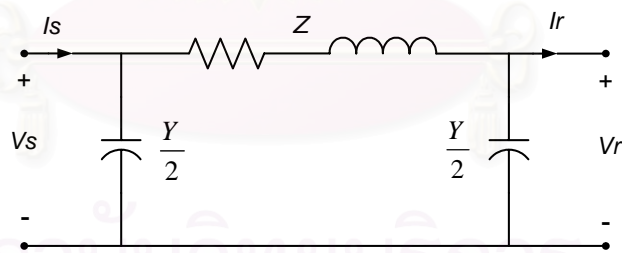
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างกราฟการกระจายของโหลด

2.1.3 แบบจำลองสายป้อน

เนื่องจากสายป้อนของระบบจำหน่ายมักมีความยาวไม่เกิน 80–100 กิโลเมตร ดังนั้นแบบจำลองของสายป้อนจึงจัดอยู่ในประเภทของสายส่งระยะสั้นและในบางกรณีถ้าสายส่งมีความยาวมากก็อาจจัดอยู่ในประเภทสายส่งระยะปานกลางได้ คุณสมบัติของสายส่งระยะสั้นคือ ไม่มีการนำเอาค่าความจุไฟฟ้า ที่มีอยู่ในสายส่งมาคิดเนื่องจากมีค่าน้อยมาก จะนำเอาค่าอิมพีแดนซ์มาคิดเท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.3 สำหรับสายส่งระยะปานกลางจะมีการคำนึงถึงผลของความจุไฟฟ้าต่อขนานด้วยเพื่อความถูกต้อง โดยจะทำการแบ่งครึ่งความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมดของสายส่งจากนั้นคิดเสมือนต่อความจุไฟฟ้าไว้ที่ปลายแต่ละด้านของสายส่ง วงจรลักษณะนี้เรียกว่า วงจรแบบ π ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลของสายส่งระยะสั้น



รูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลของสายส่งระยะปานกลาง

โดยที่	$Z = R + j\omega L$	หมายถึง	อิมพีแดนซ์อนุกรมทั้งหมด
	$Y = G + j\omega C$	หมายถึง	แอดมิตแตนซ์ต่อขนานทั้งหมด
	V_s	หมายถึง	แรงดันไฟฟ้าด้านต้นสาย
	I_s	หมายถึง	กระแสไฟฟ้าด้านต้นสาย
	V_r	หมายถึง	แรงดันไฟฟ้าด้านปลายสาย
	I_r	หมายถึง	กระแสไฟฟ้าด้านปลายสาย

2.1.4 แบบจำลองของตัวเก็บประจุ

ในการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นผลที่ได้จากการคำนวณจะมีความแม่นยำมากขึ้นเพียงใดขึ้นอยู่กับแบบจำลองของตัวเก็บประจุที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากจะส่งผลต่อขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ทั้งนี้ค่าต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขของระบบ

สำหรับงานวิจัยในอดีต[12]ได้ทำการจำลองตัวเก็บประจุเป็นแบบค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ คือเมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปที่บัสใดแล้ว ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดที่บัสนั้นจะลดลงในปริมาณเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตัวเก็บประจุทำการชดเชยให้ ข้อดีของวิธีนี้คือ การวิเคราะห์หาคำตอบทำได้ง่าย แต่ข้อเสียที่สำคัญคือผลที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงไปบ้าง เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าระบบของตัวเก็บประจุจะแปรผันตามขนาดแรงดันของบัสที่ติดตั้งยกกำลังสอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของตัวเก็บประจุเป็นแบบค่าแอดมิตแตนซ์คงที่ ซึ่งเมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบแล้ว จะคิดผลของตัวเก็บประจุโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าแอดมิตแตนซ์บัสของระบบ

$$Y_{ii}^{new} = Y_{ii}^{old} + Y_{shunt} \quad (2.1)$$

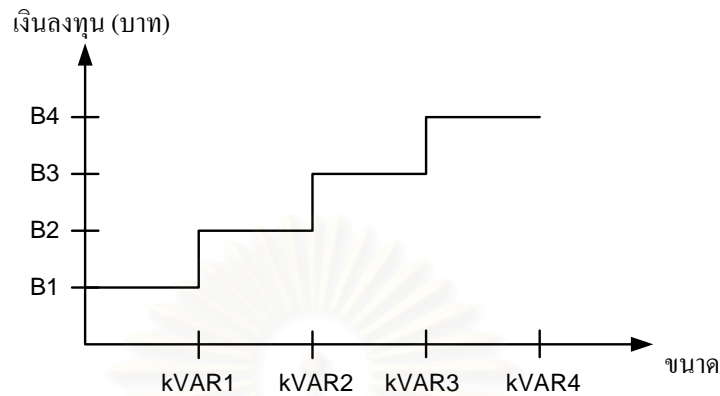
ซึ่งค่า Y_{shunt} สามารถหาได้จาก

$$Y_{shunt} = (Q_C / S_{Base}) \times j \quad (2.2)$$

โดยที่

$Y_{ii}^{new}, Y_{ii}^{old}$	คือสมาชิกของบัสแอดมิตแตนซ์บัส i ที่ติดตั้งตัวเก็บประจุก่อนและหลังทำการติดตั้ง
Y_{shunt}	คือแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ
Q_C	คือกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ
S_{Base}	คือกำลังไฟฟ้าฐานของระบบ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและราคาของตัวเก็บประจุ จะพบว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันราคาลงทุนของตัวเก็บประจุ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างราคาของตัวเก็บประจุแต่ละขนาด

ขนาดตัวเก็บประจุ (kVAR)	ราคา (บาท)
5	1,327
10	1,572
20	1,818
45	3,796
75	6,060

จากแบบจำลองทั้งหมดข้างต้นเราสามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะนำไปพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้วิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าต่อไป

2.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นเป็นหัวใจของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าไฟฟ้ากำลัง การคำนวณหาค่าตัวแปรจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นประกอบด้วย การหาผลตอบของขนาดและมุมเฟสของ แรงดันประจำบัสต่าง ๆ และ กำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสาย ในการเริ่มต้น

วิเคราะห์ปัญหานั้นเราจะพิจารณาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อมูลประจำสายส่งแต่ละเส้น ค่าอิมพีแดนซ์ และ ค่าพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ค่าพิกัดของตัวเก็บประจุต่อขนาน และการตั้งค่าแทบของหม้อแปลง เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะนำมาคำนวณค่าสมาชิกต่าง ๆ ของ Bus admittance matrix ซึ่งสามารถเขียนค่าสมาชิกเหล่านี้ในรูปทั่วไปได้นี้

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} \quad (2.3)$$

และสามารถเขียนค่าแรงดันที่บัส i ใด ๆ ในรูปพิกัดเชิงขั้วได้ดังนี้

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (2.4)$$

สมการในรูปพิกัดเชิงขั้วนี้จะใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นสำหรับบัสที่ i ใด ๆ เราจะให้ความสนใจกับตัวแปรที่สำคัญ 4 ค่า คือ กำลังไฟฟ้าจริง (P_i) กำลังไฟฟ้าเสมือน (Q_i) มุมของแรงดันไฟฟ้า (δ_i) และขนาดของแรงดันไฟฟ้า ($|V_i|$) ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้านั้นจะจำแนกบัสออกเป็น 3 ประเภท คือ

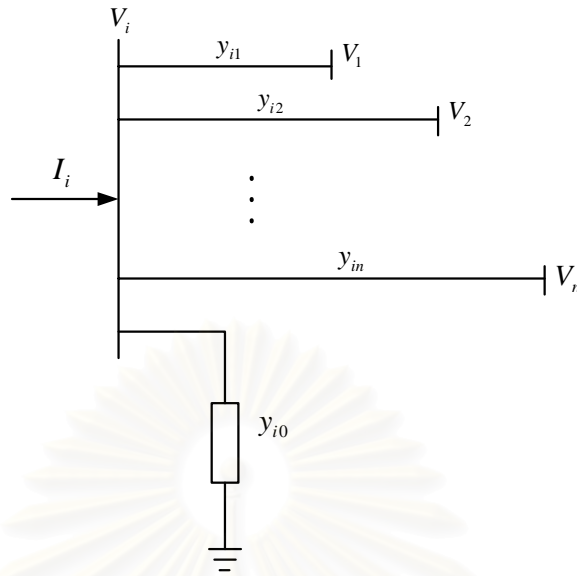
- Slack bus หรือบัสอ้างอิง ถูกนำมาใช้เป็นบัสอ้างอิงโดยต้องมีการกำหนดค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดัน

- Load bus มักเป็นบัสที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ บัสเหล่านี้จะกำหนดค่า P และ Q ทำให้บางครั้งอาจเรียกเป็น $P-Q$ บัส

- Voltage control bus บัสประเภทนี้มักมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่และทำการควบคุมแรงดันบัสให้คงที่ บัสเหล่านี้จะบอกค่าขนาดของแรงดันและค่ากำลังจริงที่จะจ่ายเข้าสู่ระบบ

ลองพิจารณาบัสต่าง ๆ ของระบบดังรูปที่ 2.6 โดยแทนสายส่งด้วยวงจรแบบ π ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายได้ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปค่าแอดมินแดนซ์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

สำหรับลักษณะบัสทั่วไปในระบบไฟฟ้ากำลังดังแสดงในรูปที่ 2.6 นั้นสามารถจัดได้ในรูปของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ได้ดังนี้

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.5)$$

หากเขียนสมการดังกล่าวในพิกัดเชิงขั้วจะได้

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.6)$$

กำลังเชิงซ้อนที่บัส i คือ

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.7)$$

เมื่อแทน (2.6) ใน (2.7) จะได้ว่า

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.8)$$

เมื่อทำการแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพจะได้ว่า

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.9)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.10)$$

หากทำการเขียนสมการ (2.9) และ (2.10) ใหม่โดยอาศัยอนุกรมเทย์เลอร์รอบๆ ค่าเริ่มต้น และละเลยพจน์ที่อันดับสูงกว่าสองจะได้ชุดสมการเชิงเส้นใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ทั้งนี้ชุดสมการข้างต้นสมมติให้บัส 1 เป็นบัสอ้างอิง ค่าสมาชิกต่าง ๆ ในเมตริกซ์จาร์โคเขียนต่างเป็นค่าอนุพันธ์บางส่วนของ (2.9) และ (2.10) ที่ประมาณ ค่า ณ $\Delta \delta_i^{(k)}$ และ $\Delta |V_i^{(k)}|$ ตามลำดับ สำหรับบัสควบคุมแรงดันนั้นเราทราบค่าขนาดของแรงดัน ดังนั้น หากมีบัสควบคุมแรงดันอยู่จำนวน m บัส จะพบว่ามีสมการที่เกี่ยวข้องกับ ΔQ_i และ $\Delta |V_i|$ จำนวน Ng สมการประจำแถวและคอลัมน์ที่สัมพันธ์กันในเมตริกซ์จาร์โคเขียนจะถูกตัดออกจากการพิจารณา ดังนั้นจึงมีสมการทั้งหมดที่ประกอบด้วย สมการกำลังจริง N-1 และ สมการกำลังรีแอกทีฟจำนวน N-1-Ng ดังนั้นจาโคเบียนเมตริกซ์จึงมีขนาด $(2N-2-Ng) \times (2N-2-Ng)$

พจน์ $\Delta P_i^{(k)}$ และ $\Delta Q_i^{(k)}$ ในเมตริกซ์นั้น คือค่าผลต่างระหว่างค่ากำหนด(Scheduled) และค่าที่คำนวณ (Calculate) ได้จากสมการที่ (2.12) และ (2.13)

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{Sch} - P_i^{(k)} \quad (2.12)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{Sch} - Q_i^{(k)} \quad (2.13)$$

โดยที่ P_i^{Sch} และ Q_i^{Sch} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัสโหลด i ใด ๆ ในตอนเริ่มต้น ส่วนค่ามุมและขนาดแรงดันใหม่ในการคำนวณแต่ละรอบคือ

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2.14)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2.15)$$

2.3 ดัชนีกำหนดตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุ

สำหรับการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบสามารถใช้ค่าดัชนีกำหนดตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุวิเคราะห์ได้ โดยจะอาศัยหลักการที่ว่าตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นควรมีผลต่อการลดกำลังสูญเสียรวมในระบบมากที่สุด หลักการดังกล่าวคือค่าดัชนีความไว (Sensitivity index) [8] ซึ่งเป็นอนุพันธ์ย่อยของกำลังจริงสูญเสียรวมของระบบเทียบกับกำลังเสมือนที่จ่ายเข้าที่บัส i หรือ $\partial P_L / \partial Q_i$ ทั้งนี้ค่าดังกล่าว สามารถคำนวณได้โดยเริ่มพิจารณาจากสมการกำลังปรากฏสูญเสียทั้งระบบคือ

$$S_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \quad (2.16)$$

สมการกำลังจริงที่สูญเสียทั้งระบบคือ

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j + \delta_{ij}) \quad (2.17)$$

โดยที่ P_L คือ กำลังจริงที่สูญเสียทั้งหมดในระบบ

θ_i, θ_j คือ มุมของแรงดันที่สูญเสียที่บัส i และบัส j ตามลำดับ

δ_{ij} คือ มุมของสมาชิกแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว i หลัก j

อนุพันธ์ย่อยของกำลังจริงสูญเสียเทียบกับขนาดของแรงดันที่บัส i ($\partial P_L / \partial V_i$) คือ

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_i} = 2 \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos \delta_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \quad (2.18)$$

ส่วนอนุพันธ์ย่อยของกำลังจริงสูญเสียเทียบกับขนาดของมุมของแรงดันที่บัส i ($\partial P_L / \partial \theta_i$) คือ

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_i} = -2 |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos \delta_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.18) (2.19) และจาโคเบียนเมตริกซ์ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นทำให้สามารถคำนวณค่าได้จากสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} = [J^T] \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ซึ่ง $[J^T]$ คือจาโคเบียนเมตริกซ์ของโหนดโวลต์ทรานสโพส

$$[J^T] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

โดยที่ $\frac{\partial P}{\partial \theta}$	คือเมตริกซ์อนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้า
$\frac{\partial P}{\partial V}$	คือเมตริกซ์อนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าจริงสุทธิเทียบกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า
$\frac{\partial Q}{\partial \theta}$	คือเมตริกซ์อนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าเสมือนสุทธิที่บัสเทียบกับมุมของแรงดันไฟฟ้า
$\frac{\partial Q}{\partial V}$	คือเมตริกซ์อนุพันธ์ย่อยของกำลังไฟฟ้าเสมือนสุทธิเทียบกับขนาดของแรงดันไฟฟ้า

ความหมายของกำลังจริงสุทธิ คือ กำลังจริงที่จ่ายเข้าสู่ระบบที่ลบออกด้วยกำลังจริงของโหนดที่บัสนั้น ส่วนความหมายของกำลังไฟฟ้าเสมือนสุทธิ คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าสู่ระบบที่บัสนั้นลบออกด้วยกำลังไฟฟ้าเสมือนของโหนดที่บัสนั้น

จากสมการที่ (2.20) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial P} \\ \frac{\partial P_L}{\partial Q} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_L}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

โดยที่

$$\left[J^T \right]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial P} \\ \frac{\partial \theta}{\partial Q} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

ทำให้สามารถหาค่าแวกเตอร์ของอนุพันธ์ย่อยของกำลังจริงสูญเสียรวมของระบบเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าระบบที่บัสใด ๆ $[\partial P_L / \partial Q]$ ได้ดังสมการ

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q} = \frac{\partial P_L}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial Q} + \frac{\partial P_L}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Q} \quad (2.24)$$

โดยที่ $\partial \theta / \partial Q$ คืออนุพันธ์ย่อยของมุมของแรงดันบัสเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าระบบ
 $\partial V / \partial Q$ คืออนุพันธ์ย่อยของแรงดันบัสเทียบกับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายเข้าระบบ

บัสที่มีค่าดัชนีดังกล่าวที่ค่าคิดลบมากที่สุดจะแสดงถึงตำแหน่งที่ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าระบบแล้วทำให้กำลังจริงสูญเสียลดลงได้สูงสุด บัสดังกล่าวจะถือว่าเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมอันดับแรกในการติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้า

บทที่ 2 นี้ได้นำเสนอรูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้วิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบจำลองโหลด แบบจำลองสายป้อน การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นกำหนดตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุ ทั้งหมดนี้จะนำไปพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีฟัซซีเซต

3.1 แนวคิดและลักษณะเบื้องต้นของฟัซซีเซต

แนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซีเซตได้รับการนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1965 โดย 'Zadeh' คุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นของทฤษฎีฟัซซีเซต คือใช้เป็นแนวทางในการอธิบายถึงความคลุมเครือ คำอธิบายในเชิงภาษา หรือความไม่ชัดเจนของข้อมูล โดยแสดงออกมาในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้

หลักการพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซตแตกต่างจากทฤษฎีความน่าจะเป็น โดยที่ความเป็นฟัซซีนั้นเกี่ยวข้องกับความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ที่หาค่าได้หรือกำหนดได้ (Deterministic plausibility) ความเป็นฟัซซีเป็นรูปแบบหนึ่งของความไม่แน่นอน เป็นความคลุมเครือที่พบในคำจำกัดความของแนวคิดหรือความหมายของค่าในขณะที่มีความน่าจะเป็นเกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็นเกิดขึ้น (Likelihood) ของเหตุการณ์ที่ไม่สามารถคาดเดาหรือกำหนดได้ (Non-deterministic) และเป็นแบบ Stochastic ความไม่แน่นอนตามแนวคิดของความน่าจะเป็นนั้นจะเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ซึ่งมีลักษณะแบบสุ่ม

ความแตกต่างระหว่างความเป็นฟัซซีและความน่าจะเป็นนั้น หากพิจารณาจากการสร้างแบบจำลองแล้วจะพบว่าแบบจำลองฟัซซีและแบบจำลองทางสถิติ มีชนิดของข้อมูลที่แตกต่างกันในเชิงปรัชญา คือ แบบจำลองฟัซซีจะแสดงในรูปของค่าความเป็นสมาชิก (Membership) ที่แสดงถึงความคล้ายกันของวัตถุต่างๆ ที่ไม่สามารถระบุคุณสมบัติได้อย่างชัดเจน โดยค่าความเป็นสมาชิกนั้นจะได้อาจมาจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ที่กำหนดขึ้น ส่วนแบบจำลองทางสถิติจะแสดงถึงการเกิดขึ้นของข้อมูลในเชิงความถี่สัมพัทธ์

สำหรับความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) และฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function) มีดังต่อไปนี้

- ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแสดงถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นของ x ใดๆ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะแสดงถึงความเป็นสมาชิกของ x ใดๆ ในเซต
- ค่ามากที่สุดของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจะเป็นเลขจำนวนจริงบวกค่าหนึ่ง โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า 1 ส่วนค่ามากที่สุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1

- การอินทิเกรตฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นจะได้ค่าความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative probability) ส่วนการอินทิเกรตฟังก์ชันความเป็นสมาชิกไม่มีนิยาม
- รอยตัดในแต่ละระดับตามแนวนอนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเรียกว่า λ -cut จะแสดงถึงความเป็นสมาชิกในเซตที่ระดับความเชื่อหนึ่งๆ

3.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory)

เซตตามความหมายดั้งเดิม (Classical crisp set) คือ การจัดกลุ่มของวัตถุที่มีลักษณะเหมือนกันหรือสอดคล้องกันตามนิยามของเซตนั้นมารวมไว้เป็นกลุ่มเดียวกัน การกำหนดนิยามของเซตจะเป็นไปในแนวทางเพื่อแยกกลุ่มวัตถุต่างๆ ในขอบเขตทั้งหมดที่เราสนใจหรือเอกภพสัมพัทธ์ (Universe of discourse) ออกเป็นสองกลุ่ม คือ เป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิก ลักษณะของขอบเขตในการแบ่งแยกการเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกของเซตจะถูกกำหนดอย่างแน่นอน และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันทีตรงเส้นแบ่งขอบเขตนั้น

นิยามของเซตตามความหมายดั้งเดิมมีรายละเอียดดังนี้ กำหนดฟังก์ชันที่จะระบุถึงคุณสมบัติหรือลักษณะเฉพาะของเซตนั้น ถ้ากำหนดให้ U คือ ขอบเขตทั้งหมดที่เราสนใจหรือเอกภพสัมพัทธ์ ฟังก์ชันคุณสมบัติของเซต A ใน U จะมีค่าเป็น 0 หรือ 1

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

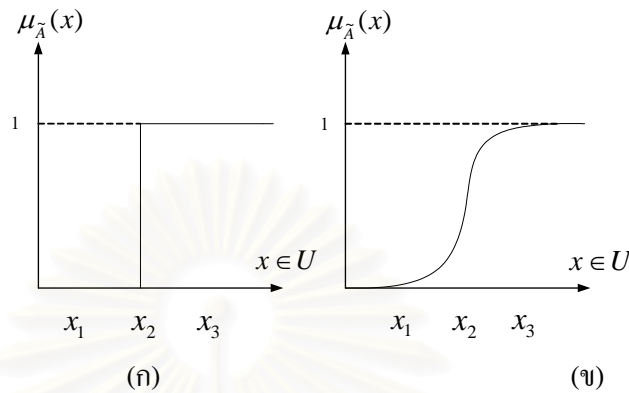
สังเกตว่าตรงจุดขอบของเซต A จะมีลักษณะแบ่งแยกกลุ่มของ x ออกเป็นสองกลุ่มอย่างชัดเจน

ฟัซซีเซตมีลักษณะที่แตกต่างจากเซตดั้งเดิมตรงที่ได้ขยายหลักการพื้นฐานของเซตดั้งเดิมออกไป และแสดงออกในรูปที่เป็นรูปแบบทั่วไปมากยิ่งขึ้น โดยฟัซซีเซตจะแสดงลักษณะของความคลุมเครือ ความไม่ชัดเจน โดยการเปลี่ยนแปลงขอบเขตในการแบ่งความเป็นสมาชิกและความไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจนตามหลักการของเซตดั้งเดิม และกำหนดให้ค่าความเป็นสมาชิกค่อยๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจากความไม่เป็นสมาชิกเลยไปถึงระดับที่มีความเป็นสมาชิกสมบูรณ์ หรือในทางตรงกันข้ามค่าความเป็นสมาชิกค่อยๆ มีค่าลดลงจากที่มีความเป็นสมาชิกเต็มตัวไปจนถึงระดับที่ไม่มีความเป็นสมาชิกอยู่เลย

ฟัซซีเซต \tilde{A} (สัญลักษณ์ \sim แสดงถึงฟัซซีเซต) ในเอกภพสัมพัทธ์ U สามารถแสดงได้ในรูปของคู่อันดับคือ

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in U\} \quad (3.2)$$

โดย $\mu_{\tilde{A}}(x)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ \tilde{A} และ $\mu_{\tilde{A}}(x)$ จะแสดงถึงระดับความเป็นสมาชิกของ x ใน \tilde{A}



รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set) และฟัซซีเซต

3.2.1 การนำเสนอฟัซซีเซต

กำหนดให้ “Support” ของฟัซซีเซต คือ เซต (Crisp set) ของ x ทุกตัวที่เป็นสมาชิกในเอกภพสัมพัทธ์ U โดยที่ $\mu(x) > 0$ ดังแสดงไว้ในสมการ (3.3)

$$\text{supp}(\tilde{A}) = \{x \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(\cdot) > 0\} \quad (3.3)$$

ฟัซซีเซตที่เป็นเซตว่างจะมี $\text{supp}(\tilde{A})$ ที่เป็นเซตว่างด้วย นั่นคือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับทุกค่า x ใน U ในกรณีทั่วไปถ้ากำหนดให้เอกภพสัมพัทธ์ $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ นั่นคือ U มีค่าไม่ต่อเนื่อง (Discrete) เราสามารถแสดง \tilde{A} ในรูปของคู่อันดับได้ดังนี้

$$\tilde{A} = \{(x_1, \mu_{\tilde{A}}(x_1)), (x_2, \mu_{\tilde{A}}(x_2)), \dots, (x_n, \mu_{\tilde{A}}(x_n))\} \quad (3.4)$$

การนำเสนอของฟัซซีเซตสามารถแสดงได้ในรูปของ Support ของฟัซซีเซต ดังนี้

$$\tilde{A} = \frac{\mu_1}{x_1} + \frac{\mu_2}{x_2} + \frac{\mu_3}{x_3} + \dots + \frac{\mu_n}{x_n} = \sum_i \left(\frac{\mu_i}{x_i} \right) \quad (3.5)$$

โดยสัญลักษณ์ \sum หมายถึงการ Union และ $\mu_i = \mu_{\tilde{A}}(x_i) > 0$ นั่นคือเราสนใจเฉพาะค่า x_i

ที่มีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าศูนย์ ส่วนเครื่องหมาย – ระหว่าง μ_i และ x_i แสดงถึงการแบ่งแยกระหว่าง μ_i และ x_i ที่สอดคล้องกัน ซึ่งไม่ใช่การหาร ในกรณีที่ U มีค่าต่อเนื่องจะได้ว่า

$$\tilde{A} = \int_U \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} \quad (3.6)$$

โดยเครื่องหมาย \int หมายถึงการ Union ขององค์ประกอบต่างๆใน \tilde{A} ซึ่งมีค่าที่ต่อเนื่อง

3.2.2 λ -level cut ของฟัซซีเซต

λ -level cut ของฟัซซีเซต \tilde{A} คือ เซต A (Crisp set) ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์ U ที่มีค่าความเป็นสมาชิกใน \tilde{A} มากกว่าหรือเท่ากับ λ ดังนี้

$$A_\lambda = \{x \in U \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \lambda, \lambda \in (0,1]\} \quad (3.7)$$

นอกจากนี้เซตของทุกระดับ $\lambda \in (0,1]$ ที่แสดง λ -level cut ที่แตกต่างกันของฟัซซีเซต \tilde{A} จะเรียกว่า Level set ของ \tilde{A} นั่นคือ

$$\Lambda_{\tilde{A}} = \{\lambda \mid \mu_{\tilde{A}}(x) = \lambda, \exists x \in U\} \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.7) จะเห็นได้ว่าถ้า $\lambda < \beta$ แล้ว $A_\beta \subseteq A_\lambda$

3.2.3 คุณสมบัติความเป็น Convex

ฟัซซีเซตจะมีคุณสมบัติ Convex ก็ต่อเมื่อแต่ละ λ -level cut ของฟัซซีเซตเป็นเซตที่ Convex กล่าวคือ

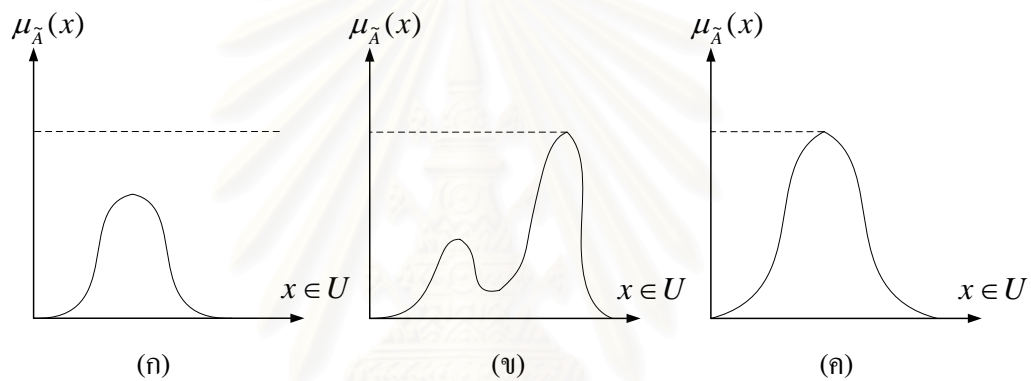
$$\mu_{\tilde{A}}(\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2) \geq \min(\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2)) \quad (3.9)$$

โดย $x_1, x_2 \in U$ และ $\alpha \in (0,1]$ จากสมการที่ (3.9) กล่าวได้ว่า เมื่อพิจารณาจุด 2 จุดใดๆ คือ x_1, x_2 ในฟัซซีเซต \tilde{A} เมื่อลากเส้นตรงเชื่อมจุดสองจุดดังกล่าวแล้ว ค่าความเป็นสมาชิกของทุกๆ

จุด (x) บนเส้นตรงจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความเป็นสมาชิกของ x_1 หรือ x_2 แล้วแต่ค่าใดต่ำกว่ากัน นอกจากนี้ พิจารณานิยามความสูงของฟัซซีเซต (Height of fuzzy set) ดังนี้

$$\text{Height}(\tilde{A}) \equiv \sup \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (3.10)$$

จากนิยามความสูงของฟัซซีเซตตามสมการที่ (3.10) กล่าวได้ว่า ฟัซซีเซตที่ถูก Normalize แล้วจะมีค่า $\text{Height}(\tilde{A}) = 1$ รูปที่ 3.3(ก) แสดงตัวอย่างฟัซซีเซตที่ Convex แต่ไม่ Normalized รูปที่ 3.3(ข) แสดงตัวอย่างฟัซซีเซตที่ Normalized แต่ไม่ Convex และรูปที่ 3.3(ค) แสดงตัวอย่างฟัซซีเซตที่ Convex และ Normalized ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ลักษณะความเป็น Convex ของฟัซซีเซต และลักษณะฟัซซีเซตที่ Normalized

3.2.4 พีชคณิตบนช่วง (Interval Arithmetic)

ส่วนมากงานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมจะเกี่ยวข้องกับค่าที่ไม่แน่นอนหรือข้อมูลที่ไม่เที่ยงตรง อันเป็นผลจากผู้วัดหรือเครื่องมือวัด ซึ่งค่าเหล่านี้มักถูกระบุในลักษณะเป็นช่วงของค่า (Interval) เราจึงใช้การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical operation) ในการกระทำบนช่วงเหล่านี้ เพื่อที่จะได้ค่าประมาณของการวัดที่เชื่อถือได้แสดงอยู่ในรูปของช่วง ดังนั้นการวิเคราะห์ช่วงของค่า (Interval analysis) หรือ พีชคณิตบนช่วง (Interval Arithmetic) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณประเภทนี้

พิจารณาค่าหรือข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ที่มีค่าไม่แน่นอน เราสามารถระบุตำแหน่งค่าที่ไม่แน่นอนนี้บนเส้นจำนวนจริงได้ภายในช่วงปิด (Closed interval) ช่วงหนึ่ง นั่นคือ ค่าที่ไม่แน่นอนจะอยู่ภายในช่วงของความเชื่อมั่นหนึ่ง (Interval of confidence) ของ $R, x \in [a_1, a_2]$ โดย $a_1 \leq a_2$ การกระทำเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าเราแน่ใจว่าค่า x นั้นมากกว่าหรือ

เท่ากับ a_1 และน้อยกว่าหรือเท่ากับ a_2 หรือกล่าวได้ว่าเราจำกัดความไม่แน่นอนของข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่ถูกกำหนดโดย ขอบบนและขอบล่าง (a_1 และ a_2)

กำหนดให้สัญลักษณ์ $A = [a_1, a_2]$ ในการแสดงถึงช่วงของค่าช่วงหนึ่ง และถ้าค่าที่ไม่แน่นอน (x) อยู่ภายในช่วงปิดนี้ จะเขียนได้ว่า

$$A = [a_1, a_2] = \{x \mid a_1 \leq x \leq a_2\} \quad (3.11)$$

โดยทั่วไปตัวเลข a_1 และ a_2 จะมีค่าจำกัด (Finite) ในกรณีที่ค่า x เป็นค่าที่แน่นอนใน R เรายังสามารถแสดงได้ในรูปของช่วงคือ $x = [x, x]$ การดำเนินการทางคณิตศาสตร์บนช่วงของความเชื่อมั่นได้แก่ การบวก (+) การลบ (-) การคูณ (\cdot) การหาร ($/$) การหาค่ามากที่สุด (\vee) และการหาค่าน้อยที่สุด (\wedge) สามารถแสดงได้ดังนี้

กำหนดให้ $A = [a_1, a_2]$ และ $B = [b_1, b_2]$ เป็นช่วงความเชื่อมั่นใน R จะได้ว่า

$$A + B = [a_1 + b_1, a_2 + b_2] \quad (3.12)$$

$$A - B = [a_1 - b_2, a_2 - b_1] \quad (3.13)$$

$$A \cdot B = [\min(a_1 b_1, a_1 b_2, a_2 b_1, a_2 b_2), \max(a_1 b_1, a_1 b_2, a_2 b_1, a_2 b_2)] \quad (3.14)$$

$$A / B = \left[\min\left(\frac{a_1}{b_1}, \frac{a_1}{b_2}, \frac{a_2}{b_1}, \frac{a_2}{b_2}\right), \max\left(\frac{a_1}{b_1}, \frac{a_1}{b_2}, \frac{a_2}{b_1}, \frac{a_2}{b_2}\right) \right] \text{ เมื่อ } 0 \notin B \quad (3.15)$$

$$A \vee B = [a_1 \vee b_1, a_2 \vee b_2] \quad (3.16)$$

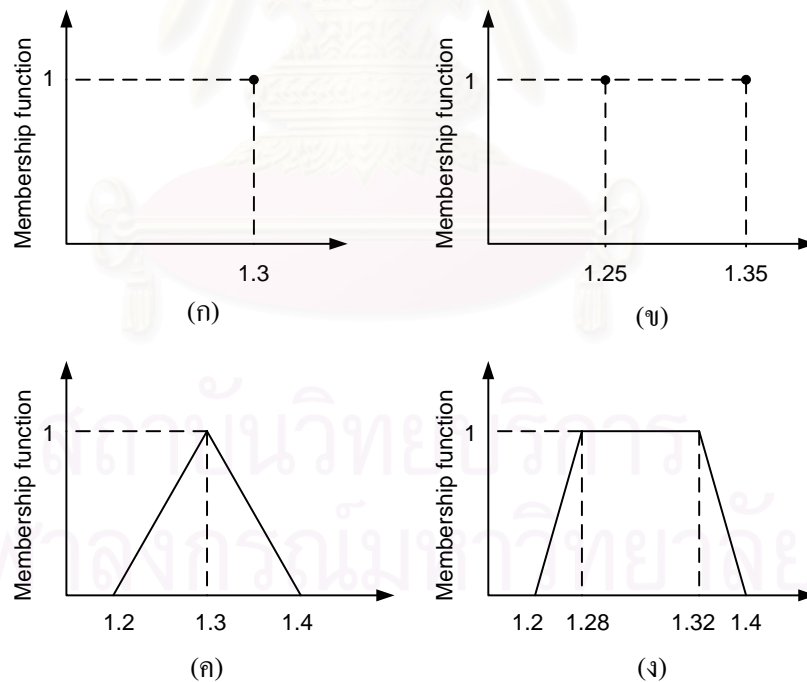
$$A \wedge B = [a_1 \wedge b_1, a_2 \wedge b_2] \quad (3.17)$$

3.2.5 ตัวเลขฟัซซี (Fuzzy number)

ตัวเลขฟัซซี คือ ฟัซซีเซตที่ Convex และ Normalized และถูกนิยามบนเส้นจำนวนจริง R ซึ่งมีลักษณะฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ที่ต่อเนื่องเชิงท่อน (Piecewise continuous) หรือแต่ละ λ -level cut เป็นช่วงปิด (Closed interval) $\mu_A(\cdot) : R \rightarrow [0,1]$

จากคำนิยามของตัวเลขฟัซซี จะพบว่าตัวเลขฟัซซีจะแสดงถึง “ตัวเลข” จากแนวคิดของการประมาณตัวเลขนั้นๆ โดยอาศัยลักษณะการแสดงในเชิงคณิตศาสตร์ในรูปของช่วง (Interval) ตัวเลขฟัซซีจะแสดงค่าของข้อความที่แสดงความไม่แน่นอนของตัวเลข เช่น “มีค่าประมาณ 5” หรือ “มีค่าใกล้เคียงกับ 5” โดยอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในกระบวนค่าความเป็นสมาชิกให้กับตัวเลขใดๆ บนเส้นจำนวนจริงว่ามีคุณสมบัติสอดคล้องหรือใกล้เคียงกับคำนิยามของข้อความนั้นๆ มากน้อยเพียงใด ตัวเลขฟัซซีที่เป็นบวก คือตัวเลขฟัซซีที่ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับศูนย์สำหรับทุกค่าของ x ที่เป็นลบ นั่นคือ $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \forall x < 0$ ในทางตรงกันข้าม ตัวเลขฟัซซีที่เป็นลบมีลักษณะคือ $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \forall x > 0$

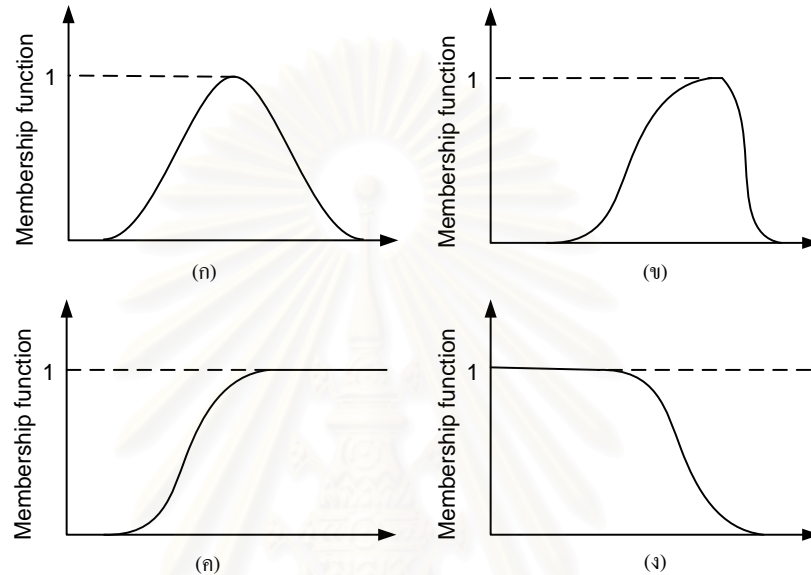
นอกจากนี้ ตัวเลขธรรมดาหรือช่วงของตัวเลขจำนวนจริงสามารถถูกพิจารณาได้ว่าเป็นกรณีพิเศษของตัวเลขฟัซซี รูปที่ 3.4(ก) แสดงตัวเลขปกติที่มีค่า 1.3 รูปที่ 3.4(ข) แสดงช่วงของจำนวนจริงที่มีค่าระหว่าง 1.25 ถึง 1.35 คือ $[1.25, 1.35]$ รูปที่ 3.4(ค) แสดงตัวเลขฟัซซีรูปสามเหลี่ยม (Triangular fuzzy number) ที่แสดงถึงข้อความที่ว่า “มีค่าประมาณ 1.3” และรูปที่ 3.4(ง) แสดงตัวเลขฟัซซีรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal fuzzy number) ที่แสดงถึงข้อความที่ว่า “มีค่าอยู่ในช่วง 1.28 ถึง 1.32 และไม่เกิน 1.2 และ 1.4” ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ

ตัวเลขฟัซซีรูปสามเหลี่ยม และตัวเลขฟัซซีรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งก็คือตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมูตามลำดับ จะเป็นตัวเลขฟัซซีที่

นิยมใช้กันมากที่สุด นอกจากนี้ก็ยังมีตัวเลขฟัซซีรูปแบบอื่นๆ เช่นตัวเลขฟัซซีที่เป็นรูปประฆัง (Bell-shaped) ซึ่งมีทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5(ก) และ (ข) ตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เพิ่มขึ้นอย่างเดียว หรือลดลงอย่างเดียว ซึ่งสื่อถึงข้อความที่ว่า “ตัวเลขค่ามาก” (Large number) และ “ตัวเลขค่าน้อย” (Small number) ดังแสดงในรูปที่ 3.5(ค) และ (ง)



รูปที่ 3.4 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ (ต่อ)

3.2.6 พีชคณิตฟัซซี (Fuzzy arithmetic)

เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเลขฟัซซี คือ Normalized และ Convex บนเส้นจำนวนจริงซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ต่อเนื่องเชิงท่อน (Piecewise continuous) นั่นคือ ทุกๆ ค่า λ -level cut (A_λ) ของตัวเลขฟัซซี \tilde{A} เป็นช่วงปิดบน R และค่าสูงที่สุดของ $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$ เท่ากับ 1 ดังนั้นถ้ากำหนดตัวเลขฟัซซี \tilde{A} และ \tilde{B} ใน R สำหรับค่า λ ค่าหนึ่ง โดยที่ $\lambda_i \in [0,1]$ เราจะได้ช่วงปิดสองช่วง คือ $A_{\lambda_i} \equiv [a_1^{\lambda_i}, a_2^{\lambda_i}]$ จากตัวเลขฟัซซี \tilde{A} และ $B_{\lambda_i} \equiv [b_1^{\lambda_i}, b_2^{\lambda_i}]$ จากตัวเลขฟัซซี \tilde{B} ซึ่งเราสามารถนำหลักการของพีชคณิตบนช่วงมาประยุกต์ใช้ได้

ดังนั้นเราสามารถมองว่าตัวเลขฟัซซีเป็นการขยายแนวความคิดของช่วงตัวเลข (Interval) คือแทนที่จะพิจารณาช่วงตัวเลขเพียงแค่อันดับเดียว ตัวเลขฟัซซีจะพิจารณาช่วงตัวเลขหลายๆ ระดับ ซึ่งแต่ละช่วงเหล่านี้จะสอดคล้องกับแต่ละ λ -level cut ของตัวเลขฟัซซี เพื่อแสดงว่าเรากำลังพิจารณาการดำเนินการทางพีชคณิต (Arithmetic operation) บนทุกระดับช่วงปิดของตัวเลขฟัซซี เราจะใช้สัญลักษณ์ $A_\lambda \equiv [a_1^\lambda, a_2^\lambda]$ เพื่อแสดงช่วงปิดของตัวเลขฟัซซี \tilde{A} ที่ทุกระดับ $\lambda, \lambda \in [0,1]$

จากที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถสรุปการดำเนินการบนตัวเลขฟัซซี เช่น การบวก (+) การลบ (-) การคูณ (\cdot) การหาร ($/$) ได้ดังนี้

$$A_\lambda + B_\lambda = [a_1^\lambda + b_1^\lambda, a_2^\lambda + b_2^\lambda] \quad (3.18)$$

$$A_\lambda - B_\lambda = [a_1^\lambda - b_2^\lambda, a_2^\lambda - b_1^\lambda] \quad (3.19)$$

$$A_\lambda \cdot B_\lambda = [\min(a_i^\lambda \cdot b_j^\lambda), \max(a_i^\lambda \cdot b_j^\lambda)] \quad (3.20)$$

$$A_\lambda / B_\lambda = [\min(a_i^\lambda / b_j^\lambda), \max(a_i^\lambda / b_j^\lambda)] \text{ เมื่อ } 0 \notin B_\lambda \quad (3.21)$$

โดยในสมการที่ 3.20 และ 3.21 i, j มีค่าเท่ากับ 1 และ 2

3.2.7 Defuzzification

Defuzzification คือ การเปลี่ยนตัวเลขฟัซซีให้เป็นตัวเลขธรรมดาที่มีค่าหนึ่ง วิธีการ Defuzzification มีด้วยกันหลายวิธี ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเพียง 2 วิธี คือ

1) วิธีจุดศูนย์กลางของพื้นที่ (Center of area method)

วิธีนี้อาจเรียกว่า Center of gravity method หรือ Centroid method พื้นที่ใต้กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จะถูกแบ่งเป็นพื้นที่ ที่มีขนาดเท่ากันสองพื้นที่ ค่าที่ได้จากการ Defuzzification คำนวณได้จากสมการ 3.22

$$d_{CA}(C) = \frac{\int_{-c}^c C(z)zdz}{\int_{-c}^c C(z)dz} \quad (3.22)$$

ในกรณีที่เป็น Discrete จะคำนวณได้จากสมการ 3.24 โดยที่ C ถูกนิยามบนเซตเอกภพสัมพัทธ์จำกัด (Finite universal set) $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$

$$d_{CA} = \frac{\sum_{k=1}^n C(z_k) z_k}{\sum_{k=1}^n C(z_k)} \quad (3.23)$$

2) วิธีศูนย์กลางของค่ามากที่สุด (Center of maximum method)

ในวิธีนี้ ค่าที่ได้จากการ Defuzzification จะถูกนิยามเหมือนกับค่าเฉลี่ยของค่าที่น้อยที่สุด และ ค่าที่มากที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d_{CM}(C) = \frac{\inf M + \sup M}{2} \quad (3.24)$$

โดยที่

$$M = \{z \in [-c, c] \mid C(z) = \text{Height}(C)\} \quad (3.25)$$

ในกรณีที่เป็น Discrete จะคำนวณได้จากสมการ

$$d_{CM} = \frac{\min\{z_k \mid z_k \in M\} + \max\{z_k \mid z_k \in M\}}{2} \quad (3.26)$$

โดยที่

$$M = \{z \in C \mid C(z) = \text{Height}(C)\} \quad (3.27)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี (Fuzzy Logic)

ตรรกศาสตร์เป็นการศึกษากระบวนการและหลักการโดยใช้เหตุผล โดยตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมนั้นจะแบ่งนิพจน์ออกเป็นสองลักษณะ คือ จริง จะมีค่าความจริงเป็น 1 หรือ เท็จ จะมีค่าความจริงเป็น 0 เท่านั้น แต่ตรรกศาสตร์แบบฟัซซีนั้นจะมีการพิจารณาค่าความจริงระหว่าง 0 หรือ 1 ด้วย ดังนั้นการพิจารณาค่าความจริงแบบฟัซซีนั้นจะมีความซับซ้อนกว่าตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมจึงต้องอาศัยการประมาณหรือการอนุมานด้วยเหตุผลแบบฟัซซี (Fuzzy Inference System) ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

3.3.1 การอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference systems)

ในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ทางด้านไฟฟ้ากำลังนั้น มีหลายวิธีที่แสดงกระบวนการใช้เหตุผลของมนุษย์ วิธีที่ง่ายที่สุดคือแสดงให้อยู่ในรูปของตัวแปรทางภาษา(Linguistic variables) เช่น

IF premise (antecedent), THEN conclusion (consequent)

ข้อความที่แสดงนั้นคือรูปแบบของกระบวนการ ถ้า...แล้ว... (IF-THEN) คือ ถ้ารู้ข้อมูลหรือข้อเท็จจริงบางอย่างแล้วจะสามารถสรุปผลได้ เป็นการพิจารณาเหตุผลโดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี

การอนุมานฟัซซีจะมีประโยชน์อย่างมากในการจำลองระบบที่เกี่ยวข้องกับการสังเกตของมนุษย์ เนื่องจากว่าความรู้พื้นฐานจากการสังเกตของมนุษย์นั้นจะอยู่ในรูปของสัญลักษณ์ทางภาษา และตัวแปรทางภาษาเหล่านี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของฟัซซีเซตและตรรกศาสตร์แบบฟัซซีได้

- กรณีที่มีการเชื่อมต่อกันของหลายเหตุการณ์(antecedent) โดยใช้ 'AND'

IF x is A^1 and A^2 ... and A^L THEN y is B^s

สมมติให้ฟัซซีเซต A^s คือ $A^s = A^1 \cap A^2 \cap \dots \cap A^L$

ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นดังนี้

$$\mu_{A^s}(x) = \min[\mu_{A^1}(x), \mu_{A^2}(x), \dots, \mu_{A^L}(x)]$$

โดยการใช้นิยามของ Intersection operation พื้นฐานสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

IF A^s THEN B^s

- กรณีที่มีการเชื่อมต่อกันของหลายเหตุการณ์(antecedent)โดยใช้ 'OR'

IF x is A^1 or x is A^2 ... or x is A^L THEN y is B^s

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

IF A^s THEN B^s

โดยการใช้นิยามของ union operation

และ $A^s = A^1 \cup A^2 \cup \dots \cup A^L$

$$\mu_{A^s}(x) = \max[\mu_{A^1}(x), \mu_{A^2}(x), \dots, \mu_{A^L}(x)]$$

การรวมผลสรุปของแต่ละกฎเกณฑ์(Aggregate of Fuzzy rules)

โดยส่วนใหญ่การอนุมานพีชชี่จะมีกฎเกณฑ์(Rule) มากกว่าหนึ่งกฎเกณฑ์ทำให้อาจต้องมีการรวมแต่ละกฎเกณฑ์เข้าด้วยกัน ดังนั้นกระบวนการพิจารณาหาผลสรุปโดยรวมจะพิจารณาจากผลสรุป(consequent) จากแต่ละกฎที่สร้างขึ้น

1). กฎเกณฑ์แต่ละส่วนจะถูกเชื่อมกันด้วยสัญลักษณ์ 'AND'

ในกรณีนี้ตัวแปรโดยสรุป y สามารถหาได้จาก Intersection ของผลที่เกิดขึ้นของแต่ละกฎเกณฑ์ y^i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, r$ ได้ผลดังนี้

$$y = y^1 \cap y^2 \cap \dots \cap y^r$$

และค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_y(y) = \min(\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^r}(y)) \text{ for } y \in Y$$

โดยที่ r คือ จำนวนกฎเกณฑ์ทั้งหมด

2). กฎเกณฑ์แต่ละส่วนจะถูกเชื่อมกันด้วยสัญลักษณ์ 'OR'

กฎเกณฑ์แต่ละส่วนจะถูกเชื่อมกันด้วยสัญลักษณ์ 'OR' ในกรณีนี้ตัวแปรโดยสรุป y สามารถหาได้จาก Union ของผลที่เกิดขึ้นของแต่ละกฎเกณฑ์ y^i โดยที่ $i = 1, 2, \dots, r$

$$y = y^1 \cup y^2 \cup \dots \cup y^r$$

และค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

$$\mu_y(y) = \max(\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^r}(y)) \text{ for } y \in Y$$

3.3.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี

สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี(Fuzzy Inference System) ที่นิยมมีอยู่สามวิธี คือ 1.Mamdani systems 2.Sugeno models 3.Tsukamoto models

หัวข้อนี้จะอธิบายวิธีการของ Mamdani systems ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด โดยวิธี Mamdani systems จะมีอยู่ 2 แบบ

แบบที่ 1-Mamdani (max-min) method

สมมติให้มีตัวแปรป้อนเข้า(Input variables)อยู่สองตัวแปร คือ x_1 และ x_2 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลสรุป(y) ของกฎเกณฑ์ทั้งหมด r กฎเกณฑ์จะได้ว่า

$$\mu_{B^k}(y) = \max_k [\min[\mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2)]] \quad k = 1, 2, \dots, r$$

โดยที่ A_1^k และ A_2^k เป็นตัวแปรฟัซซีของ x_1 และ x_2 สำหรับกฎที่ k

แบบที่ 2-Mamdani (max-prod) method

สมมติให้มีตัวแปรป้อนเข้า(Input variables)อยู่สองตัวแปร คือ x_1 และ x_2 ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลสรุป(y) ของกฎเกณฑ์ทั้งหมด r กฎเกณฑ์จะได้ว่า

$$\mu_{B^k}(y) = \max_k [\mu_{A_1^k}(x_1) \cdot \mu_{A_2^k}(x_2)] \quad k = 1, 2, \dots, r$$

โดยที่ A_1^k และ A_2^k เป็นตัวแปรฟัซซีของ x_1 และ x_2 สำหรับกฎที่ k

ตัวอย่าง 3.1 ในทางกลศาสตร์พลังงานของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่เรียกว่าพลังงานจลน์ เช่น วัตถุมีมวล m (kg) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v (m/s) จะมีพลังงานจลน์ k (Joules) ซึ่งมีสมการเป็น $k = \frac{1}{2}mv^2$ ถ้านำมาวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซีและตัวแปรป้อนเข้า คือ มวล และ ความเร็ว

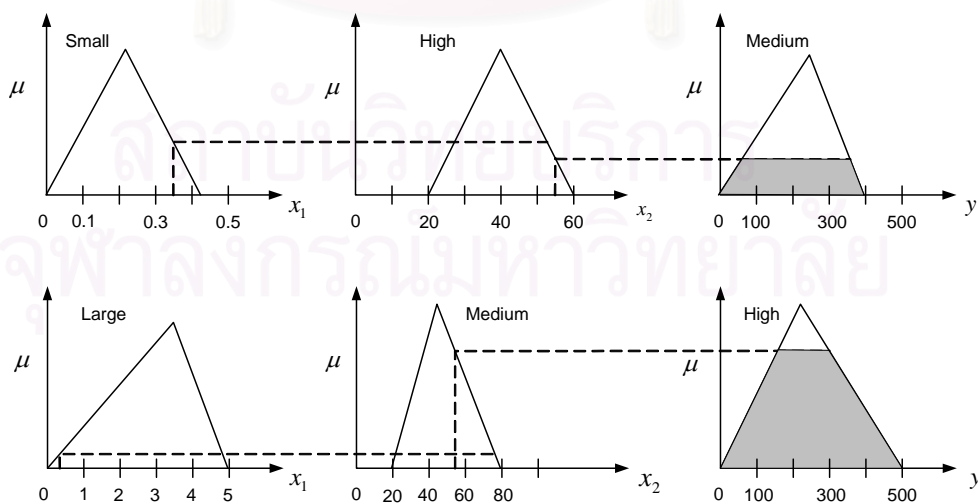
Rule1 : IF x_1 is A_1^1 (small mass) and x_2 is A_2^1 (high velocity),
THEN y is B^1 (medium energy).

Rule2 : IF x_1 is A_1^2 (large mass) and x_2 is A_2^2 (medium velocity),
THEN y is B^2 (high energy).

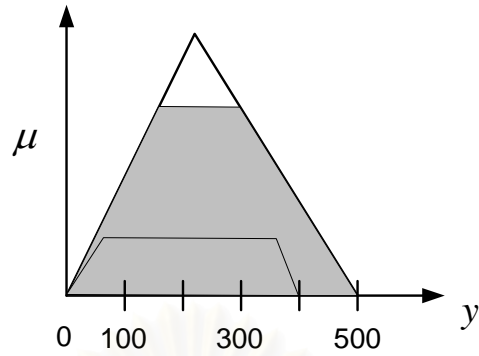
สมมติ $m = 0.35$ kg และ $v = 55$ m/s

- วิธี Mamdani (max-min) method

ได้ผลดังรูปที่ 3.5 โดยที่รูปบนจะเป็น Rule1 รูปล่างจะเป็น Rule2 ตัวแปร x_1 คือ มวล x_2 คือ ความเร็ว สำหรับ Rule1 นั้นจะแสดงการใช้ตัวดำเนินการ 'AND' ส่วน Rule2 นั้นจะใช้ตัวดำเนินการ 'OR' และผลสรุปของกฎเกณฑ์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 กระบวนการ Mamdani max-min method

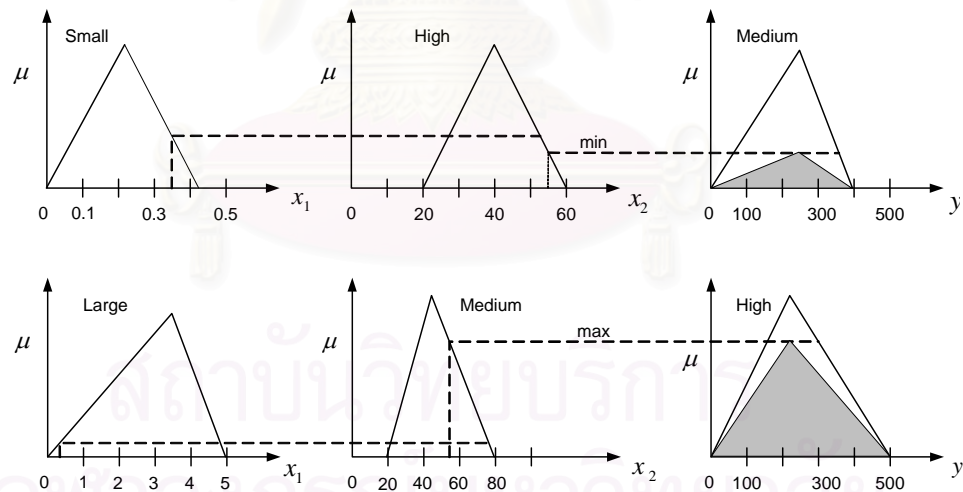


รูปที่ 3.6 ผลสรุปของกฎเกณฑ์ทั้งหมดของกระบวนการ Mamdani max-min method

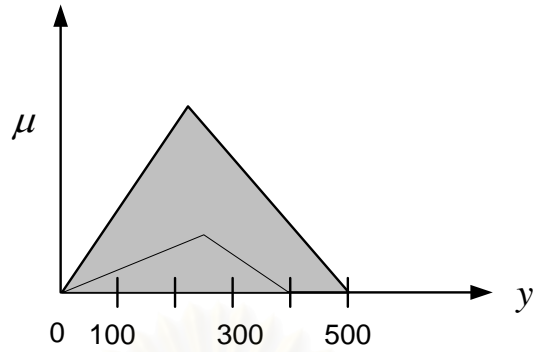
เมื่อ Defuzzified รูปที่ 3.6 ออกมาจะได้ค่า y เท่ากับ 244 joules

- วิธี Mamdani (max-prod) method

ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรป้อนเข้าจะเหมือนกันกรณี max-min method แต่ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปร y จะแตกต่างกัน



รูปที่ 3.7 กระบวนการ Mamdani max-prod method



รูปที่ 3.8 ผลสรุปของกฎเกณฑ์ทั้งหมดของกระบวนการ Mamdani max-prod method

เมื่อ Defuzzyfied รูปที่ 3.8 ออกมาจะได้ค่า y เท่ากับ 260 joules

สรุปบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีฟัซซีเซต ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี การวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในบทที่ 4 โดยหลักการของฟัซซีเซตจะนำไปใช้วิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาผลของความไม่แน่นอนของโหลด สำหรับการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซีจะนำไปใช้แก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การวิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ

โดยทั่วไปการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสามารถกระทำได้เมื่อทราบข้อมูลโหลดและข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อมูลสายป้อน ข้อมูลตัวเก็บประจุ เป็นต้น สำหรับผลการคำนวณจะมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ใส่ป้อนเข้า ถ้าข้อมูลที่ใส่มีความแม่นยำมากผลการคำนวณก็จะใกล้เคียงความเป็นจริงมาก แต่ในความเป็นจริงข้อมูลที่นำมาใช้มีความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วยสูง เช่น ข้อมูลโหลดที่มีความไม่แน่นอน ข้อมูลจากการวัดหรือการบันทึกที่คลาดเคลื่อนไปจากของจริง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้คำตอบมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นจึงได้นำผลของความไม่แน่นอนของข้อมูลต่างๆ เหล่านี้มาพิจารณาด้วย แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเน้นไปที่ความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดเป็นสำคัญเนื่องจากข้อมูลโหลดที่ใช้ในการวางแผนการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นส่วนใหญ่จะมีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโหลด โดยในส่วนของข้อมูลโหลดที่มีความไม่แน่นอนนั้นจะประยุกต์ใช้หลักการของทฤษฎีฟิชเชอร์มาวิเคราะห์ สำหรับการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบจะใช้หลักการของการอนุมานแบบฟิชเชอร์มาคำนวณหาตำแหน่งบัสที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไป จากนั้นจึงจะพิจารณาหาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมต่อไป

4.1 ความไม่แน่นอนในแบบจำลองหรือการคำนวณทางไฟฟ้ากำลัง [13]

ความไม่แน่นอนนั้นส่วนใหญ่จะมีผลต่อกระบวนการตัดสินใจ โดยในแบบจำลองหรือการคำนวณทางด้านวิศวกรรมนั้นส่วนใหญ่จะมีความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วย ซึ่งอาจมีที่มาจากส่วนต่างๆ ดังนี้

- การสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้วิเคราะห์ปัญหา
- ลักษณะโครงสร้างของแบบจำลอง ถึงแม้ว่าจะรู้แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าทุกตัวแต่แบบจำลองนั้นก็อาจคลาดเคลื่อนไปจากที่ตั้งสมมติฐานไว้ได้
- ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ อาจมีความคลาดเคลื่อน
- ข้อมูลป้อนเข้า (Input data) อาจมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย
- นอกจากนี้สภาวะแวดล้อมของระบบก็อาจทำให้เกิดความไม่แน่นอนขึ้นได้

โดยทั่วไปจะจำแนกความไม่แน่นอนออกเป็น 2 ชนิด คือ

4.1.1 Quantitative Uncertainty ความไม่แน่นอนชนิดนี้สามารถแสดงปริมาณให้อยู่ในรูปตัวเลขได้ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ทราบค่าพารามิเตอร์ เช่น

- Probabilistic variables ความไม่แน่นอนของตัวแปรชนิดนี้สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น

- Interval variables ตัวแปรแบบช่วงที่เป็นเซตปิดของจำนวนจริง

4.1.2 Qualitative Uncertainty ความไม่แน่นอนชนิดนี้จะแสดงอยู่ในรูปของความไม่ชัดเจนที่ไม่ใช่ตัวเลข โดยใช้หลักการของระดับความเป็นสมาชิก เช่น ฟัซซีเซต

จุดประสงค์หลักในการศึกษาลักษณะของความไม่แน่นอนในส่วนต่างๆ นั้นคือ เพื่อให้เข้าใจระบบหรือกระบวนการตามความเป็นจริงมากขึ้น เนื่องจากในระบบของจริงนั้นจะมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น เช่น ความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดในอนาคต สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์ปัญหา เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาที่พิจารณาผลของความไม่แน่นอนเหล่านี้ด้วยวิธีการตัดสินใจ(Deterministic method) แบบดั้งเดิมจึงอาจผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้น การวิเคราะห์ปัญหาที่พิจารณาผลของตัวแปรที่มีความไม่แน่นอนโดยตรงจึงอาจเป็นทางเลือกที่ดีขึ้น

4.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเกิดผลของความไม่แน่นอนโหลดด้วยวิธีฟัซซี [14]

โดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นจะมีความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วย แต่ข้อมูลโหลดมักมีความความไม่แน่นอนค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ตัวอื่น เช่น ข้อมูลโหลดที่ได้จากการวัดหรือการพยากรณ์โหลด ดังนั้นหัวข้อนี้จึงเน้นไปที่การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลด โดยการนำทฤษฎีฟัซซีมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองโหลดเพื่อสร้างแบบจำลองโหลดที่มีความไม่แน่นอน จากนั้นทำการวิเคราะห์ การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้หลักการของทฤษฎีฟัซซี และจะนำหลักการที่ได้กล่าวมานี้ไปประยุกต์ใช้ในหัวข้อที่ 4.4

4.2.1 นิยามของฟัซซี

ฟัซซีเซต A นิยามตามสมการที่ 4.1 และมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_A มีรายละเอียดดังนี้

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in R\} \quad (4.1)$$

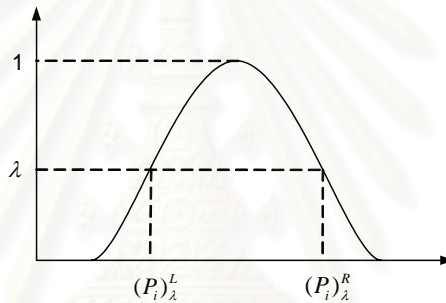
และฟังก์ชันเซตจะประกอบไปด้วยเซตของ λ - level cut และค่า λ - level cut ของ A คือ A_λ มีนิยามตามสมการที่ 4.2 ดังนี้

$$A_\lambda = \{x \in R : \mu_A(x) \geq \lambda\} \quad (4.2)$$

ค่า λ - level cut ของ A สามารถเขียนได้ในช่วงของ level λ ดังนี้

$$A_\lambda = [A_\lambda^L, A_\lambda^R] \quad (4.3)$$

โดยที่ A_λ^L และ A_λ^R คือขอบเขตซ้ายและขอบเขตขวาของช่วงข้อมูล



รูปที่ 4.1 แสดงช่วงของระดับ λ - level cut

4.2.2 ตัวเลขฟังก์ชัน

ตัวแปรฟังก์ชันจะเป็นแบบคอนเวกซ์(Convex) และมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง(Normalize) ความหมายของคอนเวกซ์อธิบายได้ดังนี้ สำหรับ $\lambda_1 > \lambda_2$ และ level cut ของ A จะมีคุณสมบัติดังนี้

$$A_{\lambda_1}^L \geq A_{\lambda_2}^L \quad (4.4a)$$

$$A_{\lambda_1}^R \leq A_{\lambda_2}^R \quad (4.4b)$$

โดย Level cut ที่ 1 จะเป็นตัวแปรฟังก์ชันที่เป็นแกนกลาง

4.2.3 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชี

สำหรับการวิเคราะห์ การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนี้ ตัวแปรทางด้านขาเข้าจะถูกจำลองให้เป็นตัวแปรพีชชีและกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าที่บัสเป็นตัวแปรด้านขาเข้า ขนาดและมุมของแรงดันที่บัสต่างๆ จะเป็นตัวแปรสถานะ และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะเป็นตัวแปรด้านขาออก ซึ่งจากสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านขาเข้าและตัวแปรด้านขาออกได้ดังนี้

$$P_i = P_i(V, \theta) \quad (4.5)$$

$$Q_i = Q_i(V, \theta) \quad (4.6)$$

$$P_{ij} = P_{ij}(V, \theta) \quad (4.7)$$

$$Q_{ij} = Q_{ij}(V, \theta) \quad (4.8)$$

โดยที่ P_i และ Q_i เป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลเข้าสู่บัส i
 P_{ij} และ Q_{ij} เป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลอยู่ระหว่างบัส i และ j
 V และ θ เป็นเวกเตอร์ของขนาดและมุมของแรงดัน

จากสมการข้างบนสามารถเขียนฟังก์ชันของตัวแปรสถานะและตัวแปรด้านขาออกให้อยู่ในรูปของตัวแปรด้านขาเข้าได้ดังนี้

$$V_i = g_i(P, Q) \quad (4.9)$$

$$\theta_i = h_i(P, Q) \quad (4.10)$$

$$P_{ij} = g_{ij}(P, Q) \quad (4.11)$$

$$Q_{ij} = h_{ij}(P, Q) \quad (4.12)$$

สมการ (4.9) - (4.12) เป็นการหาคำตอบของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบปกติ แต่สำหรับการวิเคราะห์ที่พิจารณาตัวแปรแบบพีชชีการคำนวณจะซับซ้อนขึ้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตัวแปรแบบพีชชีสามารถอธิบายได้ด้วยเซตของ level cut และการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจะพิจารณาที่แต่ละ level cut ตัวอย่างเช่น ให้ P_i และ Q_i เป็นตัวแปรพีชชีของข้อมูลด้านขาเข้า และ P_{Loss} เป็นตัวแปรสแตตหรือตัวแปรด้านขาออกที่ต้องการหาคำตอบ ที่ระดับ λ -level cut ของตัวแปรเหล่านี้จะได้ว่า $(P_i)_\lambda = [(P_i)_\lambda^L, (P_i)_\lambda^R]$ $(Q_i)_\lambda = [(Q_i)_\lambda^L, (Q_i)_\lambda^R]$ และ $(P_{Loss})_\lambda = [(P_{Loss})_\lambda^L, (P_{Loss})_\lambda^R]$ สมการย่อยของแต่ละระดับ Level cut สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$\text{Min or Max } P_{Loss} = P_{Loss}(V, \theta) \quad (4.13a)$$

$$P_i = P_i(V, \theta), i \in N \quad (4.13b)$$

$$Q_i = Q_i(V, \theta), i \in N \quad (4.13c)$$

$$(P_i)_\lambda^L \leq P_i \leq (P_i)_\lambda^R, i \in N \quad (4.13d)$$

$$(Q_i)_\lambda^L \leq Q_i \leq (Q_i)_\lambda^R, i \in N \quad (4.13e)$$

โดยที่ P_{Loss} คือกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งระบบ N คือจำนวนบัสทั้งหมด สมการที่ (4.13b) และ (4.13c) เป็นสมการแสดงการไหลของกำลังไฟฟ้า การคำนวณหาค่าขอบเขตซ้ายและค่าขอบเขตขวาของ $(P_{Loss})_\lambda$ ทำได้โดยหาค่ามากที่สุด(Maximum) และค่าน้อยที่สุด(Minimum) ของฟังก์ชันจุดประสงค์

สำหรับแบบจำลองที่ได้อธิบายข้างต้นนั้นสามารถแก้ปัญหาได้ด้วยวิธีโปรแกรมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Programming) หรือใช้วิธีการจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte-Carlo) โดยทั่วไปถ้าตัวแปรขาออกมีจำนวนไม่มากนักก็สามารถใช้วิธีโปรแกรมแบบไม่เชิงเส้นได้ แต่ถ้าตัวแปรขาออกมีจำนวนมากควรใช้วิธีการจำลองแบบมอนติคาร์โลจะเหมาะสมกว่า

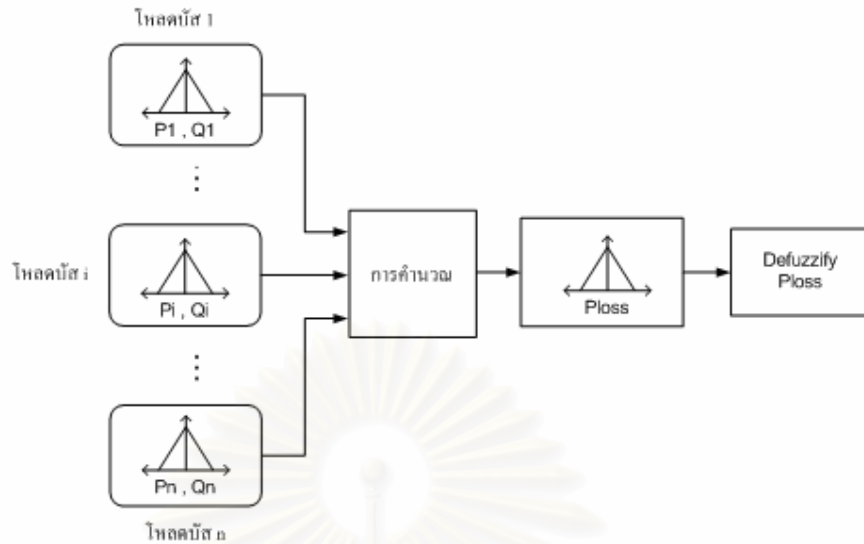
นอกจากนี้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีพีชเชิงอาจเกิดกรณีที่มีปัญหาขึ้นได้ เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัสอ้างอิงเกินกว่าขีดจำกัดของกำลังการผลิต การแก้ปัญหาในกรณีนี้ทำได้โดยเลือกบัสอ้างอิงมาพิจารณาเป็นกลุ่มแทนที่จะเลือกมาบัสเดียวและเพิ่มเงื่อนไขของบัสอ้างอิงเหล่านี้เข้าไปในแบบจำลองในสมการที่ (4.13)

$$\underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i, i \in \{\text{Selected slack bus}\} \quad (4.14a)$$

$$\underline{Q}_i \leq Q_i \leq \overline{Q}_i, i \in \{\text{Selected slack bus}\} \quad (4.14b)$$

และทำการวิเคราะห์ปัญหาเหมือนเดิม ผลลัพธ์ที่ได้คือคำตอบที่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลองการวิเคราะห์โหลดโพล์ด้วยวิธีฟัซซี

4.3 การอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference System) [15]

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้วิธี FIS กับไฟฟ้ากำลังในหลายสาขาด้วยกัน เช่น การประเมินความมั่นคงของระบบ (Security Assessment) การจัดการโหลด (Load management) การจัดการตาราง (Scheduling) การวางแผน (Planning) การตรวจจับความผิดปกติ (Fault detection) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบด้วย

ในระบบฐานความรู้ (Knowledge-based system) หรือระบบ FIS โดยทั่วไปจะประกอบด้วยกลุ่มคำสั่งต่างๆ ซึ่งจะทำงานเมื่อสถานะของระบบเป็นไปตามเงื่อนไขที่วางไว้ นั่นคือมีการประยุกต์การวิเคราะห์แบบตรรกศาสตร์ (Logic) ซึ่งระบบจะเริ่มทำงานเมื่อข้อมูลด้านขาเข้าของระบบตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามในระบบของจริงข้อมูลที่ใช้ อาจมีความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วย การวิเคราะห์แบบธรรมดาโดยทั่วไปจะต้องการข้อมูลที่แน่นอน ดังนั้นเมื่อนำมาใช้กับระบบของจริงอาจทำให้ผลการคำนวณผิดพลาดได้ จึงได้นำหลักการของทฤษฎีฟัซซีมาประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้น จะใช้การประมาณด้วยเหตุผล (Approximate reasoning) โดยเมื่อทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบแล้วก็จะทราบค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบได้ ทำให้สามารถเลือกตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดได้ ตัวอย่างเช่น บัสที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้มากเมื่อทำการ

ติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าที่บัสนี้และมีแรงดันต่ำจะเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบ แต่บัสที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้น้อยและมีแรงดันที่สูงอยู่แล้วก็ไม่ควรไปติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่ม เป็นต้น เนื่องจากความหมายของคำว่า ต่ำ และ สูง เป็นสัญลักษณ์ทางด้านภาษาซึ่งไม่สามารถนิยามเป็นค่าตัวเลขที่แน่นอนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์แบบทั่วไปได้ ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้หลักการของทฤษฎีฟัซซีมาแก้ปัญหาในส่วนนี้

4.3.1) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ในกระบวนการฟัซซี FIS จะประกอบด้วยเซตของกฎเกณฑ์ต่างๆ ที่ใช้กำหนดคุณสมบัติของข้อมูลแต่ละชนิด ในกระบวนการนี้กฎเกณฑ์ต่างๆ จะถูกแบ่งออกเป็นแต่ละระดับ สำหรับปัญหาทางการติดตั้งตัวเก็บประจุจะนิยามกฎเกณฑ์เพื่อใช้หาค่าตำแหน่งที่เหมาะสม

ในการวิเคราะห์หาค่าตำแหน่งที่เหมาะสมนั้นต้องใช้เซตของกฎเกณฑ์ต่างๆ มากมายเพื่อตรวจสอบสถานะของตัวแปรว่าอยู่ในช่วงใด โดยตัวแปรที่เป็นข้อมูลด้านขาเข้าคือค่าแรงดันและค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง ตัวแปรที่เป็นข้อมูลด้านขาออกคือดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสม กฎเกณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวแปรเอาต์พุตของกระบวนการ FIS เมื่อมีข้อมูลอินพุตต่างๆ

AND		Voltage				
		Low	Low - Normal	Normal	High - Normal	High
Power Loss Index	Low	Low - Medium	Low - Medium	Low	Low	Low
	Low - Medium	Medium	Low - Medium	Low - Medium	Low	Low
	Medium	High - Medium	Medium	Low - Medium	Low	Low
	High - Medium	High - Medium	High - Medium	Medium	Low - Medium	Low
	High	High	High - Medium	Medium	Low - Medium	Low - Medium

สำหรับค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงของบัส i ใดๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{Loss, index(i)} = P_{Loss, base} - P_{Loss, i} \quad (4.15)$$

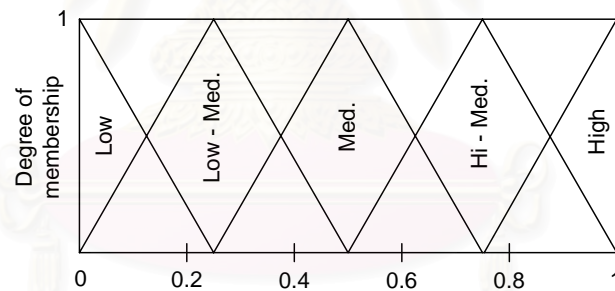
โดยที่ $P_{Loss, index(i)}$ คือ ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงของบัส i ใดๆ

$P_{Loss, base}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้จากกรณีฐาน(ในรูปที่ 3.10)

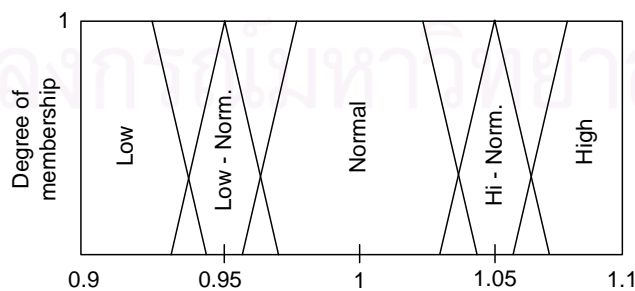
$P_{Loss, i}$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้เมื่อมีการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้า
เสมือนเข้าที่บัส i

รายละเอียดสำหรับการคำนวณหาค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงนี้จะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.11

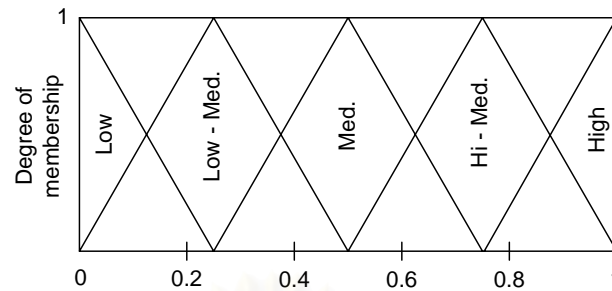
ตัวแปรฟuzzyต่างๆ เช่น ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง แรงดัน และดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสม จะนำมาสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในรูปแบบของสัญลักษณ์ทางภาษาโดยแบ่งออกเป็นระดับต่างๆ คือ High High-Medium Medium Low-Medium และ Low ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง



รูปที่ 4.4 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแรงดัน



รูปที่ 4.5 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสม

การวิเคราะห์แบบฟuzzyควรวเลือกฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอย่างระมัดระวัง เนื่องจากมีความสำคัญมาก และค่าความเป็นสมาชิกควรมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$

4.3.2) การวิเคราะห์ด้วย FIS

เมื่อทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแล้วจะได้ข้อมูลซึ่งจะใช้เป็นตัวแปรด้านขาเข้าของการอนุมานแบบฟuzzy และนำมาสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก สำหรับวิธีการวิเคราะห์ตัวแปรแบบฟuzzyนั้นจะใช้วิธี Max-prod method

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Max-prod method นั้นมีหลักการดังนี้ เริ่มแรกจะพิจารณาตัวแปรด้านขาเข้าในกรณีนี้คือค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงและค่าแรงดันในสภาวะปกติ และตรวจสอบตัวแปรทั้งสองค่านี้กับตารางที่ 4.1 วิเคราะห์ว่าตัวแปรด้านขาออกคือค่าดัชนีแสดงตำแหน่งที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงใด ถ้าค่าของตัวแปรด้านขาเข้าอยู่ในช่วงที่ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกซ้อนกัน เช่น ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงมีค่า 0.7 และค่าแรงดันในสภาวะปกติเท่ากับ 0.96 (Per unit) ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงจะอยู่ในช่วง High-Medium และ Medium ให้พิจารณาค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงออกเป็นสองกรณี กรณีแรกค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงอยู่ในช่วง High-Medium และค่าแรงดันอยู่ในช่วง Low-Normal กรณีที่สองคือค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงอยู่ในช่วง Medium และค่าแรงดันอยู่ในช่วง Low-Normal ในแต่ละกรณีให้เลือกค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน จากนั้นนำค่าที่ได้จากแต่ละกรณีมาเทียบกันหาค่าสุดท้ายออกมา จากหลักการที่ได้กล่าวมาสามารถแสดงสมการได้ดังนี้ (เมื่อแยกการพิจารณาได้เป็น k กรณี)

$$\mu_S(i) = \max_k [\mu_p(i) \cdot \mu_v(i)] \quad (4.16)$$

โดยที่ μ_p และ μ_v เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงและฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าแรงดันในสถานะปกติ

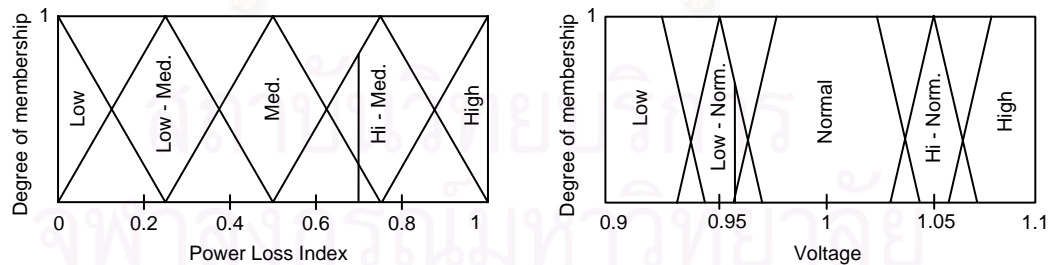
เมื่อกำหนดค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าดัชนีแสดงตำแหน่งที่เหมาะสมได้แล้ว ขั้นตอนต่อมาทำการ Defuzzify เพื่อจัดเรียงบัสตามค่าความเหมาะสมที่คำนวณได้ โดยจะทำการ Defuzzify ด้วยวิธี Centroid method ซึ่งจะทำการหาจุดศูนย์กลางของพื้นที่ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและสมการสำหรับ Defuzzify แสดงได้ดังนี้

$$S = \frac{\int \mu_S(z) \cdot z dz}{\int \mu_S(z) dz} \quad (4.17)$$

ในการคำนวณหาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุนั้น ถึงแม้ว่าจะใช้วิธีการ Defuzzify ที่แตกต่างกันแต่สุดท้ายคำตอบที่ได้จะเหมือนกัน

4.3.3) ตัวอย่างการคำนวณ

สมมติให้ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงเท่ากับ 0.7 และค่าแรงดันเท่ากับ 0.96 นำมาสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้ดังนี้



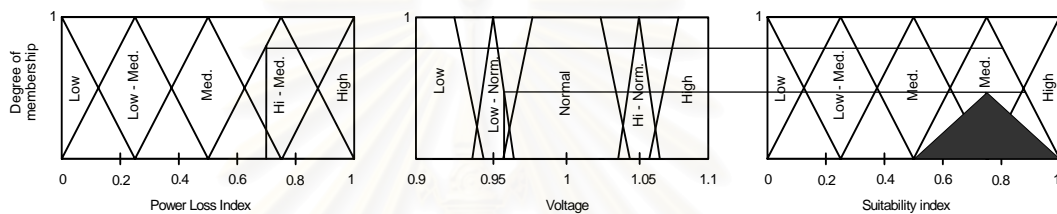
รูปที่ 4.6 แสดงค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตทั้งสองตัวแปร

จากรูปข้างบนค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงจะมีค่าอยู่ในช่วงที่ซ้อนกัน คือ ช่วง High-Medium และช่วง Medium ส่วนค่าแรงดันจะอยู่ในช่วง Low-Medium เพียงช่วงเดียว ในกรณีนี้เราจะแบ่งกฎเกณฑ์ออกเป็นสองกฎเกณฑ์ คือ

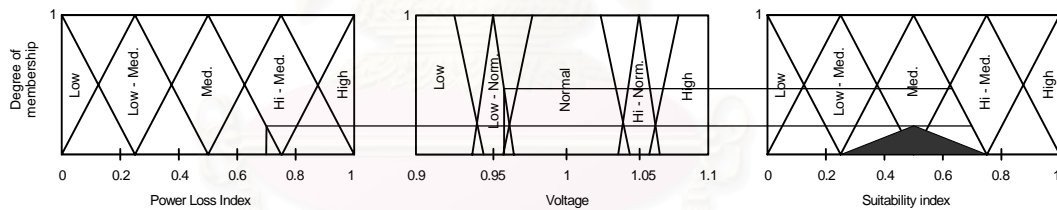
1. ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงจะมีค่าอยู่ในช่วง High-Medium และ ค่าแรงดันจะอยู่ในช่วง Low-Medium เมื่อพิจารณาค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสมจากตารางจะได้ค่าดัชนีอยู่ในช่วง High-Medium

2. ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงจะมีค่าอยู่ในช่วง Medium และ ค่าแรงดันจะอยู่ในช่วง Low-Medium เมื่อพิจารณาค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสมจากตารางจะได้ค่าดัชนีอยู่ในช่วง Medium

ทั้งสองกรณีสามารถแสดงได้ดังรูป

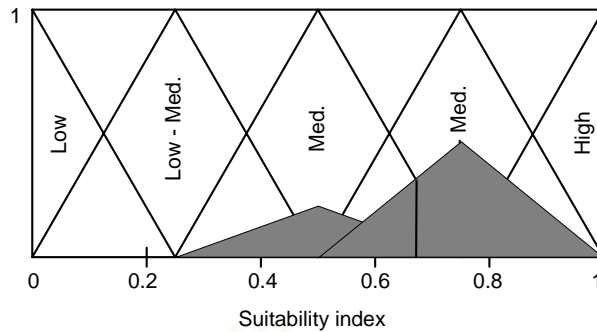


รูปที่ 4.7 กรณีที่ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงที่อยู่ในช่วง High-Medium



รูปที่ 4.8 กรณีที่ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงที่อยู่ในช่วง Medium

และเมื่อทำการหาอนุพันธ์ของค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสมของแต่ละกรณีจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.9



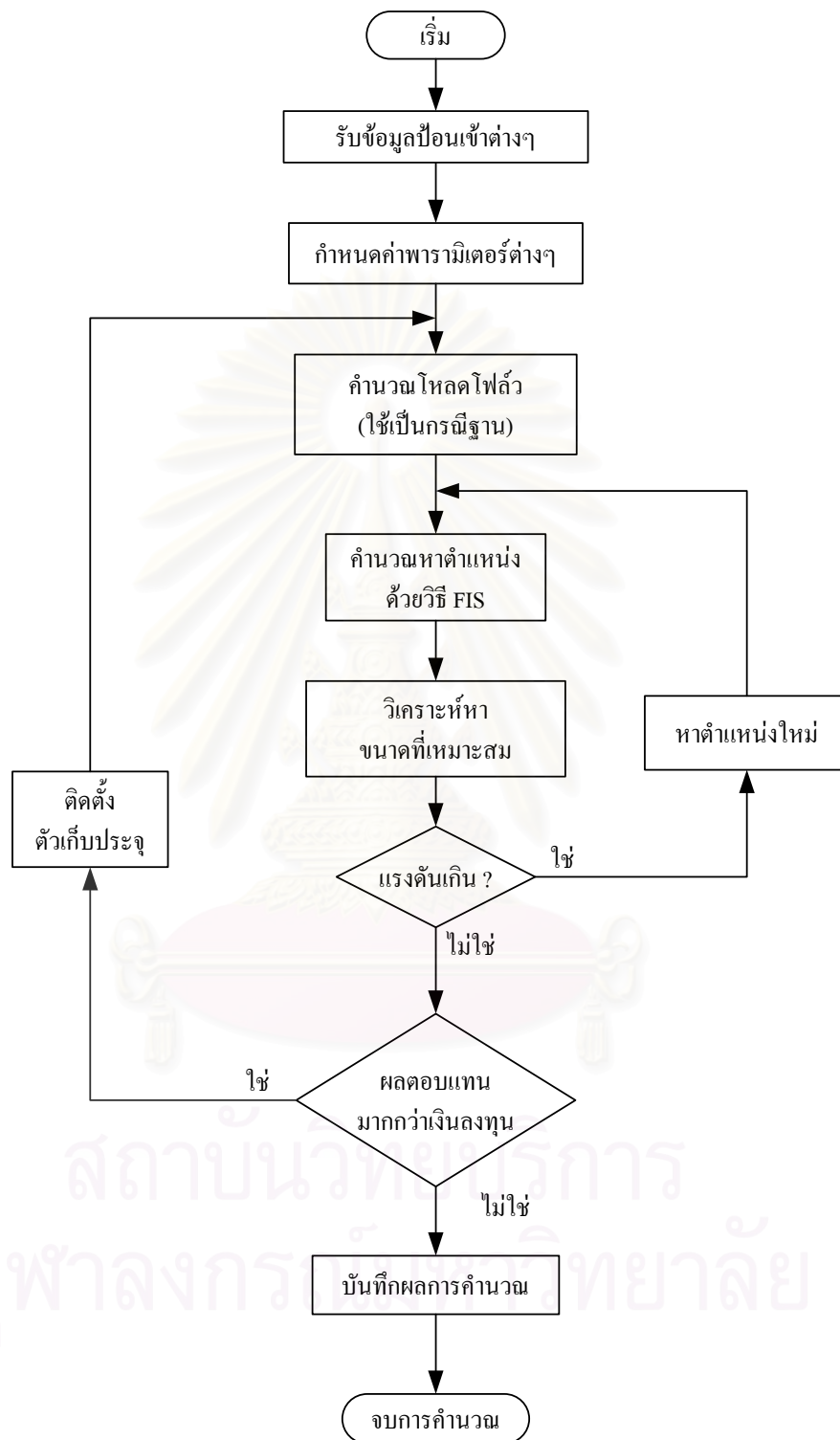
รูปที่ 4.9 แสดงค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสม

เมื่อทำการ Defuzzify ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกออกมาจะได้ค่าดัชนีที่แสดงตำแหน่งที่เหมาะสมเท่ากับ 0.68

4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประยุกต์ใช้หลักการของทฤษฎีฟัซซีเซตและทฤษฎีฟัซซีลอจิกมาวิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการพิจารณาผลของความไม่แน่นอนของโหลด สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์โดยรวมมีรายละเอียดดังนี้

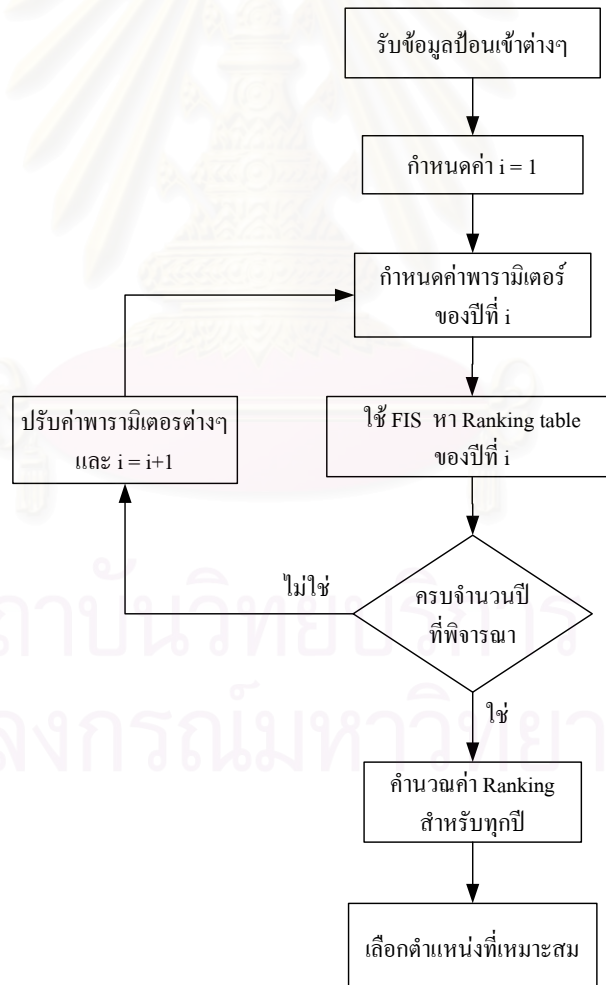
1. รับข้อมูลป้อนเข้าของระบบ
 2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และพิจารณาตัวเก็บประจุตัวแรกที่จะทำการติดตั้ง
 3. คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งผลการคำนวณ ในขั้นตอนนี้จะนำไปใช้เป็นกรณีฐาน
 4. วิเคราะห์หาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยวิธี FIS
 5. เมื่อได้ตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งแล้ว ขั้นตอนต่อมาทำการวิเคราะห์หาขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสม
 6. ตรวจสอบค่าแรงดันของแต่ละบัสว่าอยู่ในขีดจำกัดหรือไม่ และตรวจสอบค่าแรงดันที่สถานะโหลดต่ำสุดด้วย ถ้าเกิดแรงดันเกินขีดจำกัดให้กลับไปหาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุใหม่ แต่ถ้าแรงดันไม่เกินขีดจำกัดให้ดำเนินการตามขั้นตอนต่อไป
 7. ถ้าผลตอบแทนมากกว่าเงินลงทุนให้ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบและพิจารณาตัวเก็บประจุตัวถัดไป ถ้าไม่ใช่ให้บันทึกผลและจบการคำนวณ
- จากขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังนี้



รูปที่ 4.10 แสดงแผนผังการวิเคราะห์โดยรวม

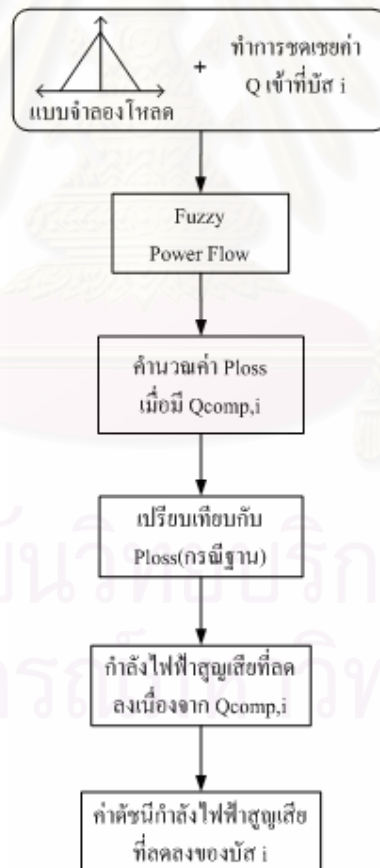
สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์หาตำแหน่งมีรายละเอียดดังนี้

1. รับข้อมูลป้อนเข้าต่างๆ
 2. กำหนดค่า $i = 1$
 3. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของปีที่ i
 4. ใช้ FIS หา Ranking table ของแต่ละปี
 5. ตรวจสอบว่าครบจำนวนปีที่พิจารณาหรือไม่ ถ้าไม่ให้ทำการพิจารณาที่ปีถัดไปและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
 6. เมื่อพิจารณาครบทุกปี(อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ)แล้วให้นำค่า Ranking table ของแต่ละปีมาวิเคราะห์โดยรวมอีกครั้งหนึ่ง เพื่อวิเคราะห์หาคะแนนรวมของแต่ละบัส
 7. เลือกตำแหน่งที่เหมาะสมจากบัสที่มีคะแนนดีที่สุด
- จากขั้นตอนที่กล่าวมาสามารถสรุปเป็นแผนผังได้ดังนี้



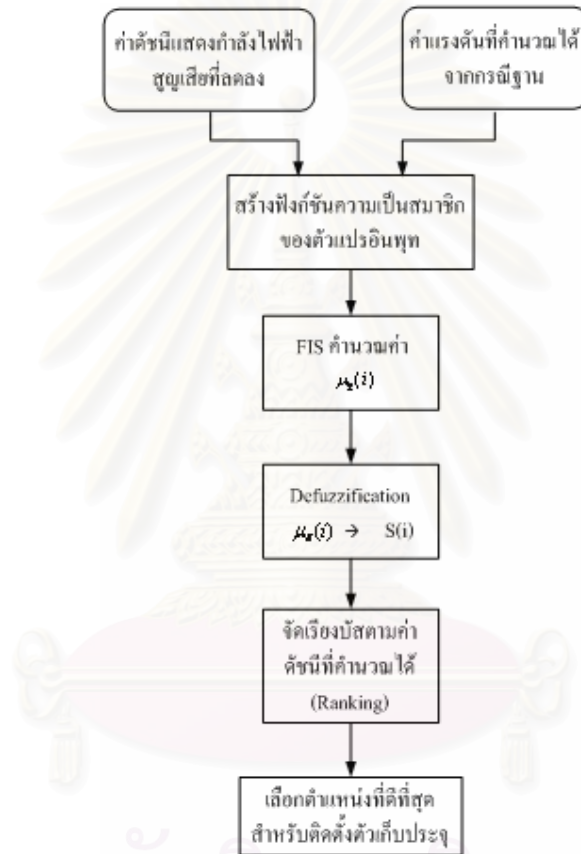
รูปที่ 4.11 แสดงการวิเคราะห์หาตำแหน่งบัส

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี FIS ของแต่ละปีนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลักๆ ดังนี้ ส่วนแรกจะทำการวิเคราะห์หาค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงของแต่ละบัส โดยจะใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีการพิจารณาผลของความไม่แน่นอนของโหลดโดยอาศัยทฤษฎีฟัซซี สำหรับข้อมูลโหลดของแต่ละจุดโหนดนั้นจะนำมาสร้างเป็นตัวแปรแบบฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมหรือแบบสี่เหลี่ยมคางหมู จากนั้นเมื่อสร้างตัวแปรสำหรับข้อมูลโหลดครบทุกจุดโหนดแล้ว ให้ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าที่บัส i จากนั้นทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีคำนวณค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงเนื่องจากการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส i ออกมา ทำเช่นนี้จนได้ค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงครบทุกบัสแล้วใช้การทำให้เป็นบรรทัดฐาน(Normalize) ค่านี้ด้วยเพื่อนำไปใช้เป็นตัวแปรอินพุทในหัวข้อถัดไป สำหรับรายละเอียดของการคำนวณค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงการวิเคราะห์หาค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงของบัส i ใดๆ

ขั้นตอนถัดมาเมื่อทราบค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงและผ่านการทำให้เป็นบรรทัดฐานจากขั้นตอนแรกแล้ว ให้นำค่านี้และค่าแรงดันที่ได้อการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า มาสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงและแรงดัน จากนั้นใช้กระบวนการฟัซซีคำนวณค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าดัชนีแสดงตำแหน่งที่เหมาะสม (μ_s) ออกมา และทำการ Defuzzify ค่านี้ สุดท้ายทำการจัดเรียงบัสตามค่าดัชนีความเหมาะสมที่คำนวณได้



รูปที่ 4.13 แสดงการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ

เมื่อคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งตัวเก็บประจุได้แล้ว ขั้นตอนต่อมาจะทำการวิเคราะห์หาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด เนื่องจากขนาดตัวเก็บประจุของจริงเป็นตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่องและมีขนาดมาตรฐานจำนวนไม่มากนักดังนั้นจึงสามารถใช้การวิเคราะห์ขนาดตัวเก็บประจุทีละตัวได้ สำหรับสมการที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมแสดงไว้ในสมการที่ (4.18) โดยเทอมแรกของสมการแสดงถึงผลตอบแทนที่

ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบในที่นี่หมายถึงพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง และเทอมสุดท้ายแสดงถึงค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุ

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & \sum_{Yr=1}^{t_L} K_{e,Yr} \left(\sum_{i=1}^{n_t} T_i \Delta P_{Loss,i}(X) \right) / (1+r)^{Yr} - C(u_k) \\ \text{Subject} \quad & F(u_k, X) = 0 \\ & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \end{aligned} \quad (4.18)$$

โดยที่	V_i	=	แรงดันที่บัส i
	V_{\min}, V_{\max}	=	ขีดจำกัดล่างและขีดจำกัดบนของแรงดันแต่ละบัส
	$C(u_k)$	=	ฟังก์ชันค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุ
	u_k	=	ขนาดของตัวเก็บประจุ
	X	=	ตัวแปรที่ใช้พิจารณา
	$F(u_k, X)$	=	เงื่อนไขของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า
	n_t	=	จำนวนระดับโหลดทั้งหมด
	t_L	=	อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ
	T_i	=	ช่วงเวลาของระดับโหลด i
	$\Delta P_{Loss,i}$	=	กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงจากการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ระดับโหลด i
	$K_{e,Yr}$	=	ราคาค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็นมูลค่าเงิน (บาท/kWh) ของแต่ละปี
	r	=	อัตราส่วนลด (Discount rate)

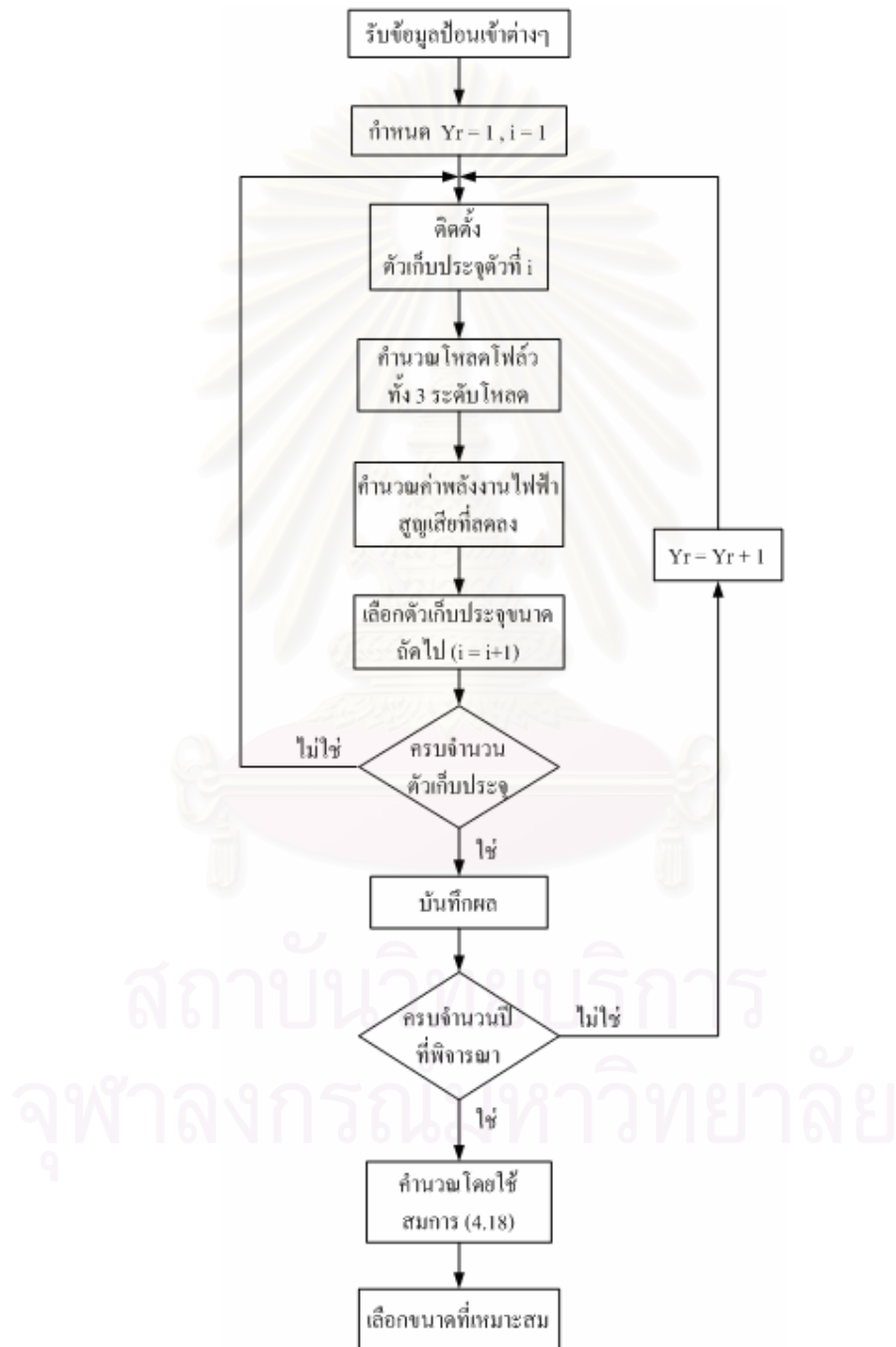
สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์หาขนาดตัวเก็บประจุมีรายละเอียดดังนี้

1. รับข้อมูลป้อนเข้าต่างๆ
2. เริ่มพิจารณาปีที่ 1 และตัวเก็บประจุตัวที่ 1
3. ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ i เข้ากับระบบ
4. คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าทุกระดับโหลด
5. คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง
6. พิจารณาตัวเก็บประจุตัวถัดไป
7. ตรวจสอบว่าครบจำนวนตัวเก็บประจุหรือไม่ ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3. อีก

รอบ

8. ตรวจสอบว่าครบจำนวนปีที่พิจารณาหรือไม่ ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3. อีก
รอบ

9. คำนวณหาขนาดที่เหมาะสมโดยใช้สมการที่ (4.18) โดยเลือกขนาดตัวเก็บประจุที่ให้
ผลตอบแทนสุทธิมากที่สุด



รูปที่ 4.14 แสดงการวิเคราะห์หาขนาดตัวเก็บประจุที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ

นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่นำเสนอครบทุกขั้นตอนแล้ว จะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุแบบปกติ (ไม่คิดผลของความไม่แน่นอนของโหลด) เพื่อพิจารณาว่าความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดมีผลต่อการวิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุน้อยเพียงใด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

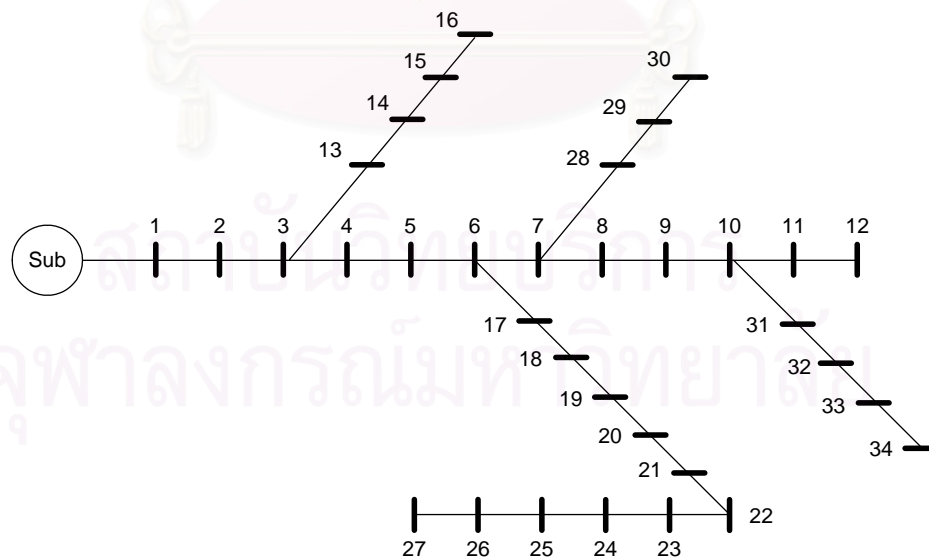
ผลการทดสอบ

บทนี้จะแสดงผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยอาศัยหลักการตามที่นำเสนอในบทก่อนหน้าซึ่งจะพิจารณาข้อมูลโหลดทั้งแบบปกติและโหลดที่มีความไม่แน่นอน โดยจะทำการศึกษาผลกระทบของความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดต่อการติดตั้งตัวเก็บประจุ

ในการวิเคราะห์จะใช้ระบบทดสอบ 3 ตัวอย่าง คือระบบทดสอบขนาด 34 บัส 70 บัส และระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบทดสอบท่าทรายขนาด 34 บัส ซึ่งเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดอยุธยา สำหรับโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์นั้นได้พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB 6.5

5.1 ระบบทดสอบขนาด 34 บัส[7]

ระบบนี้เป็นระบบจำหน่ายที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุ มีโครงสร้างเป็นแบบเรเดียล ค่าแรงดันฐานและกำลังไฟฟ้าฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ $V_{base} = 11kV$ และ $S_{base} = 100 MVA$ สำหรับข้อมูลโหลดและข้อมูลพารามิเตอร์ของสายจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 5.1 แผนผังแสดงระบบขนาด 34 บัส

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของโหลดต่อการติดตั้งตัวเก็บประจุ ดังนั้นจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองกรณี กรณีแรกจะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติ กรณีที่สองทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลด

เริ่มแรกทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะปกติ(ก่อนการวิเคราะห์ติดตั้งตัวเก็บประจุ) เพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบว่าเป็นอย่างไรและจะใช้เป็นกรณีฐานเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยวิธีที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 อันประกอบด้วย การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาข้อมูลโหลดทั้งแบบปกติและโหลดที่มีความไม่แน่นอน

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบในสถานะปกติที่ระดับโหลดสูงสุด

บัส	แรงดัน		บัส	แรงดัน	
	ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
1	1.0000	0.0000	18	0.9622	0.5458
2	0.9941	0.0527	19	0.9581	0.6285
3	0.9890	0.0990	20	0.9549	0.6954
4	0.9821	0.2133	21	0.9520	0.7539
5	0.9761	0.3127	22	0.9487	0.8331
6	0.9704	0.4075	23	0.9460	0.8985
7	0.9666	0.4985	24	0.9435	0.9603
8	0.9645	0.5484	25	0.9423	0.9902
9	0.9620	0.6070	26	0.9418	1.0017
10	0.9608	0.6351	27	0.9417	1.0051
11	0.9604	0.6461	28	0.9663	0.5069
12	0.9602	0.6494	29	0.9660	0.5125
13	0.9887	0.1069	30	0.9659	0.5153
14	0.9884	0.1140	31	0.9605	0.6431
15	0.9883	0.1160	32	0.9601	0.6511
16	0.9883	0.1161	33	0.9600	0.6551
17	0.9660	0.4828	34	0.9599	0.6564

$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 4.858 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 2.938 \text{ MVA}r \\
 P_{Load} &= 4.637 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 2.874 \text{ MVA}r \\
 P_{Loss} &= 0.221 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.856
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 34 บัสสรุปผลได้ดังนี้ โหลดกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดเท่ากับ 4.637 MW โหลดกำลังไฟฟ้าเสมือนเท่ากับ 2.874 MVAr กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้นสายเท่ากับ 4.858 MW กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้นสายเท่ากับ 2.938 MVAr กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งระบบเท่ากับ 0.221 MW คิดเป็น 4.76 % เมื่อเทียบกับโหลดกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมด และค่า Power Factor ที่ต้นสายคือ 0.856 จะเห็นว่าระบบทดสอบนี้มีค่า Power Factor ค่อนข้างต่ำและมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมาก

5.1.1 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติ

ทำการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุตามวิธีการที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.4 โดยพิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติซึ่งยังไม่รวมผลความไม่แน่นอนของโหลด สำหรับการวิเคราะห์ผลเราจะแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ แบบ ก) ซึ่งเป็นกรณีที่พิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 1 ปี และแบบ ข) กรณีที่พิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 ปี การวิเคราะห์แบบ ก) นั้นจะเป็นการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุซึ่งพิจารณาผลของตัวเก็บประจุแค่ปีเริ่มต้นที่ทำการติดตั้ง ส่วนกรณี ข) จะพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ตลอดอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเนื่องจากเมื่อมีการติดตั้งตัวเก็บประจุแล้วจะใช้งานจนกว่าตัวเก็บประจุจะใช้งานไม่ได้หรือเสื่อมสภาพหมดแล้ว

สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ขีดจำกัดบนของระดับแรงดัน(Vmax)	=	1.05 p.u.
ราคาค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย(Ke)	=	2.5 บาท/kWh
ปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี	=	5 %
อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Ke ในแต่ละปี	=	5 %
อัตราส่วนลด(Discount rate)	=	5 %

ตารางที่ 5.2 แบบจำลองของเส้นโค้งแสดงช่วงเวลาโหลดใน 1 ปี

ระดับโหลด	จำนวนชั่วโมง
60%	1000
80%	6560
100%	1200

สำหรับค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุที่นำมาพิจารณาได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และเนื่องจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชีจะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน ดังนั้นจึงเลือกขนาดตัวเก็บประจุที่แตกต่างกันดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ราคาของตัวเก็บประจุ

ขนาด(MVAr)	ราคา(บาท)
0.1	6,997
0.3	24,240
0.5	41,483
0.7	57,254
0.9	73,393
1.1	89,532
1.3	105,671
1.5	121,810
1.7	137,949
1.9	154,088
2.1	170,227
2.3	186,366
2.5	202,505
2.7	218,644
2.9	234,783
3.1	250,922
3.3	267,061

ก) เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 1 ปี

ตารางที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.1 ก)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVA _r)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	27	0.9	445,916.75
2	34	0.5	107,412.88
3	30	0.3	19,934.67
รวม		1.7	573,264.30

จากผลการวิเคราะห์ตารางที่ 5.4 อธิบายได้ดังนี้คือลำดับแรกจะแสดงรอบของการคำนวณหรือพิจารณาตัวเก็บประจุตัวที่เท่าไร ลำดับที่สองแสดงตำแหน่งบัสที่จะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ ลำดับที่สามแสดงขนาดตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุดในรอบนั้น และลำดับสุดท้ายแสดงค่าผลตอบแทนสุทธิ (สมการที่ 4.18) ในแต่ละรอบซึ่งเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงเนื่องจากการติดตั้งตัวเก็บประจุคิดเป็นราคาหักออกด้วยค่าใช้จ่ายของตัวเก็บประจุ

รอบที่หนึ่งจะเป็นการพิจารณาตัวเก็บประจุตัวแรก ซึ่งตำแหน่งที่ดีที่สุดคือบัส 27 และขนาดของตัวเก็บประจุเท่ากับ 0.9 MVA_r จะให้ผลตอบแทนสุทธิมากที่สุดสำหรับรอบแรกคือ 445,916.75 บาท และเมื่อวิเคราะห์จนถึงรอบสุดท้ายสรุปได้ว่าขนาดตัวเก็บประจุรวมทั้งหมดเท่ากับ 1.7 MVA_r และผลตอบแทนสุทธิรวมทั้งหมดเท่ากับ 573,264.30 บาท

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุดสำหรับกรณี 5.1.1 ก)

บัส	แรงดัน		บัส	แรงดัน	
	ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
1	1.0000	0.0000	18	0.9661	-0.1171
2	0.9948	-0.0337	19	0.9624	-0.1208
3	0.9903	-0.0673	20	0.9594	-0.1329
4	0.9840	-0.0777	21	0.9568	-0.1538
5	0.9786	-0.0931	22	0.9539	-0.1854
6	0.9735	-0.1145	23	0.9516	-0.2313
7	0.9701	-0.1418	24	0.9494	-0.3036
8	0.9681	-0.1415	25	0.9485	-0.3633
9	0.9659	-0.1573	26	0.9482	-0.4078
10	0.9648	-0.1789	27	0.9482	-0.4490
11	0.9644	-0.1680	28	0.9698	-0.1558
12	0.9643	-0.1648	29	0.9697	-0.1726
13	0.9900	-0.0595	30	0.9696	-0.1921
14	0.9897	-0.0524	31	0.9646	-0.2082
15	0.9896	-0.0504	32	0.9644	-0.2499
16	0.9896	-0.0503	33	0.9644	-0.2832
17	0.9695	-0.1125	34	0.9644	-0.3067

$$P_{Slack} = 4.806 \text{ MW}, \quad Q_{Slack} = 1.367 \text{ MVar}$$

$$P_{Load} = 4.637 \text{ MW}, \quad Q_{Load} = 2.874 \text{ MVar}$$

$$P_{Loss} = 0.170 \text{ MW}, \quad PF \text{ at slack bus} = 0.962$$

จากผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุตามที่คำนวณได้จากตารางที่ 5.4 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบลดลงจาก 0.221MW เหลือเพียง 0.170 MW และค่า Power Factor ที่ต้นสายป้อนก็เพิ่มขึ้นจาก 0.856 เป็น 0.962

ข) เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 ปี

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.1 ข)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVA _r)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	27	1.3	8,201,671.97
2	34	0.7	2,149,201.94
3	2	0.9	191,621.00
รวม		2.9	10,542,494.91

ตารางที่ 5.7 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.1 ข)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
27	1.4502	34	1.1170	2	0.9907
26	1.4502	33	1.1170	15	0.9907
25	1.4501	32	1.1170	16	0.9907
24	1.4500	12	1.1170	14	0.9907
23	1.4497	11	1.1170	13	0.9907
22	1.4494	31	1.1170	3	0.9906
21	1.4491	10	1.1170	4	0.9905
20	1.4488	9	1.1168	5	0.9903
19	1.4485	8	1.1166	6	0.9900
34	1.4483	30	1.1164	30	0.9899
33	1.4483	29	1.1164	29	0.9899
32	1.4483	28	1.1164	28	0.9899
12	1.4483	7	1.1163	17	0.9899
11	1.4483	6	1.1159	7	0.9898
31	1.4482	5	1.1158	8	0.9897

สรุปผลของตารางที่ 5.6 ได้ดังนี้ คิดตั้งตัวเก็บประจุที่ตำแหน่งบัส 27 34 และ 2 ขนาด 1.3 MVar 0.7 MVar และ 0.9 MVar ตามลำดับ ผลตอบแทนสุทธิที่ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งหมดเท่ากับ 10,542,494.91 บาท สำหรับการเลือกตำแหน่งบัสในแต่ละรอบของการคำนวณจะแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 5.7 ซึ่งในรอบแรกนั้นบัส 27 จะมีคะแนนดีที่สุดและรอบสองบัส 34 จะมีคะแนนดีที่สุด

ตารางที่ 5.7 จะแสดงตำแหน่งบัสเรียงตามคะแนนที่ได้โดยจะแสดงแค่ 15 บัสแรกที่มีคะแนนดีที่สุด สำหรับคะแนนของแต่ละบัสนั้นคำนวณจากผลรวมของค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงของแต่ละบัสตลอดระยะเวลา 10 ปี การเลือกตำแหน่งบัสที่จะทำการติดตั้งนั้นจะเลือกจากบัสที่มีคะแนนดีที่สุดในแต่ละรอบ สำหรับรายละเอียดและขั้นตอนการคำนวณได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.4

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหนดสูงสุดเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุทุกตัว

บัส	แรงดัน		บัส	แรงดัน	
	ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
1	1.0000	0.0000	18	0.9673	-0.3206
2	0.9953	-0.0984	19	0.9637	-0.3628
3	0.9909	-0.1460	20	0.9608	-0.4102
4	0.9847	-0.1780	21	0.9584	-0.4666
5	0.9794	-0.2133	22	0.9556	-0.5475
6	0.9744	-0.2548	23	0.9534	-0.6430
7	0.9709	-0.2672	24	0.9514	-0.7749
8	0.9690	-0.2866	25	0.9506	-0.8744
9	0.9668	-0.3323	26	0.9504	-0.9437
10	0.9659	-0.3738	27	0.9504	-1.0049
11	0.9654	-0.3629	28	0.9706	-0.2589
12	0.9653	-0.3597	29	0.9703	-0.2533
13	0.9905	-0.1382	30	0.9702	-0.2505
14	0.9902	-0.1311	31	0.9657	-0.4180
15	0.9902	-0.1291	32	0.9655	-0.4795
16	0.9902	-0.1290	33	0.9655	-0.5277
17	0.9705	-0.2856	34	0.9656	-0.5611

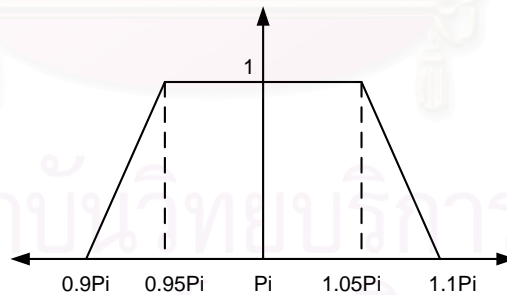
$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 4.806 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 0.204 \text{ MVar} \\
 P_{Load} &= 4.637 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 2.874 \text{ MVar} \\
 P_{Loss} &= 0.170 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.999
 \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าพบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณี 5.1.1 ข) เท่ากับ 0.170 MW ซึ่งใกล้เคียงกับกรณี 5.1.1 ก) แต่ขนาดตัวเก็บประจุรวมมีค่ามากกว่า

สรุปผลการวิเคราะห์สำหรับกรณีพิจารณาไหลแบบปกติพบว่า เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุตลอด 10 ปีจะได้ขนาดของตัวเก็บประจุรวมมากกว่าการพิจารณาแค่ปีแรกเพียงปีเดียว นอกจากนี้ผลตอบแทนสุทธิของกรณี 5.1.1 ข) ก็มากกว่าด้วย

5.1.2 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลด

รูปแบบของตัวแปรฟัซซีที่ใช้อธิบายความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดจะใช้ตัวแปรแบบสี่เหลี่ยมคางหมูและจะกำหนดโดยค่าพารามิเตอร์ 4 ตัวคือ $[x_1, x_2, x_3, x_4]$ ค่า x_1 และ x_2 จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนทางด้านซ้ายของข้อมูลโหลด ส่วนค่า x_3 และ x_4 จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนทางด้านขวาของข้อมูลโหลด ตัวอย่างเช่น $[-10\%, -5\%, +5\%, +10\%]$ มีรูปแบบของแบบจำลองโหลดดังนี้



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างแสดงแบบจำลองโหลด

รูปแบบของตัวแปรฟัซซีที่ใช้ในหัวข้อนี้จะพิจารณาอยู่ 3 รูปแบบ คือ รูปแบบของแบบจำลองโหลดเป็น $[-3\%, -2\%, +15\%, 20\%]$ $[-5\%, -2\%, +20\%, +25\%]$ และแบบจำลองโหลดของแต่ละจุดโหลดมีลักษณะแตกต่างกัน สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ขีดจำกัดบนของระดับแรงดัน(Vmax)	=	1.05 p.u.
ราคาค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย(Ke)	=	2.5 บาท/kWh
ปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี	=	5 %
อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Ke ในแต่ละปี	=	10 %
อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ	=	10 ปี
อัตราส่วนลด(Discount rate)	=	5 %
ความคลาดเคลื่อนในแต่ละปีของตัวแปรฟิชซี	=	10 %

ก) แบบจำลองโหลดเป็น [-3%,-2%,+15%,+20%]

ตารางที่ 5.9 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.2 ก)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVA _r)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	27	1.3	8,201,671.97
2	34	0.7	2,149,201.94
3	5	0.9	704,500.80
รวม		2.9	11,055,374.72

จะเห็นว่าเมื่อแบบจำลองโหลดเป็น [-3%,-2%,+15%,20%] ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุจะใกล้เคียงกับกรณีพิจารณาโหลดแบบปกติ แต่ตำแหน่งบัสในรอบที่สามจะแตกต่างกัน ทำให้ผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและค่าผลตอบแทนสุทธิจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย และเมื่อพิจารณาค่า Ranking table ของตำแหน่งบัสในแต่ละรอบของการคำนวณซึ่งมีผลการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 5.10 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.2 ก)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
27	1.5861	34	1.2057	5	1.0634
26	1.5861	33	1.2057	6	1.0629
25	1.5861	32	1.2057	7	1.0627
24	1.5860	12	1.2057	2	1.0583
23	1.5857	11	1.2057	15	1.0583
22	1.5855	31	1.2057	16	1.0583
21	1.5852	10	1.2057	14	1.0583
20	1.5849	9	1.2056	13	1.0582
19	1.5846	8	1.2053	3	1.0582
34	1.5844	30	1.2052	4	1.0580
33	1.5844	29	1.2052	30	1.0572
32	1.5844	28	1.2051	29	1.0572
12	1.5844	7	1.2051	28	1.0572
11	1.5844	5	1.2047	17	1.0572
31	1.5844	6	1.2047	8	1.0570

เมื่อเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้กับตารางที่ 5.7 พบว่าการจัดเรียงตำแหน่งบัสในรอบที่หนึ่ง และรอบที่สองจะเหมือนกันแต่รอบที่สามการจัดเรียงบัสตามคะแนนของแต่ละบัสจะแตกต่างกันออกไป ซึ่งพบว่าที่บัส 5 จะมีคะแนนดีที่สุดดังนั้นในรอบที่สามจึงเลือกบัสนี้เป็นตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ

ข) แบบจำลองโหลดเป็น [-5%,-2%,+20%,+25%]

ตารางที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.1.2 ข)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVA _r)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	27	1.3	8,201,671.97
2	31	0.9	2,585,643.69
3	2	0.9	123,611.66
รวม		3.1	10,910,927.32

ตารางที่ 5.12 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.2 ข)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
27	1.6289	31	1.2347	2	1.0343
26	1.6289	9	1.2315	15	1.0342
25	1.6289	34	1.2313	16	1.0342
24	1.6288	12	1.2313	14	1.0342
23	1.6285	11	1.2313	13	1.0341
22	1.6283	33	1.2313	3	1.0341
21	1.6280	32	1.2313	4	1.0337
20	1.6277	10	1.2312	5	1.0334
19	1.6274	8	1.2309	6	1.0330
34	1.6273	30	1.2308	17	1.0327
33	1.6273	29	1.2308	30	1.0326
32	1.6273	28	1.2308	29	1.0326
12	1.6273	7	1.2307	28	1.0326
11	1.6273	6	1.2304	7	1.0325
31	1.6272	5	1.2303	18	1.0325

ตารางที่ 5.13 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหนดสูงสุดสำหรับกรณี 5.1.2 ข)

บัส	แรงดัน		บัส	แรงดัน	
	ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
1	1.0000	0.0000	18	0.9676	-0.3837
2	0.9954	-0.1089	19	0.9640	-0.4260
3	0.9910	-0.1662	20	0.9612	-0.4734
4	0.9849	-0.2133	21	0.9588	-0.5299
5	0.9797	-0.2624	22	0.9560	-0.6109
6	0.9748	-0.3178	23	0.9538	-0.7064
7	0.9713	-0.3597	24	0.9518	-0.8384
8	0.9695	-0.3990	25	0.9510	-0.9379
9	0.9674	-0.4744	26	0.9507	-1.0072
10	0.9665	-0.5358	27	0.9508	-1.0684
11	0.9661	-0.5249	28	0.9710	-0.3514
12	0.9659	-0.5217	29	0.9708	-0.3459
13	0.9907	-0.1584	30	0.9707	-0.3431
14	0.9904	-0.1513	31	0.9664	-0.5949
15	0.9903	-0.1493	32	0.9660	-0.5870
16	0.9903	-0.1492	33	0.9659	-0.5830
17	0.9708	-0.3487	34	0.9658	-0.5817

$$P_{Slack} = 4.804 \text{ MW}, \quad Q_{Slack} = 0.015 \text{ MVAr}$$

$$P_{Load} = 4.637 \text{ MW}, \quad Q_{Load} = 2.874 \text{ MVAr}$$

$$P_{Loss} = 0.167 \text{ MW}, \quad PF \text{ at slack bus} = 0.999$$

จากผลการคำนวณกรณี 5.1.2 ข) ตารางที่ 5.11 จะได้ว่าควรจะติดตั้งตัวเก็บประจุดังต่อไปนี้ บัส 27 ขนาด 1.3 MVAr บัส 31 ขนาด 0.9 MVAr และบัส 2 ขนาด 0.9 MVAr สังเกตได้ว่าขนาดของตัวเก็บประจุรวมทั้งหมดและผลตอบแทนสุทธิสำหรับกรณีนี้จะมากกว่ากรณี 5.1.1 ข) ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าแบบจำลองโหลดที่ใช้มีความคลาดเคลื่อนเน้นไปทางด้านขวาของข้อมูลโหลดปกติทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้มีค่ามากกว่ากรณีปกติ ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบจึงมากกว่ากรณีไม่คิดความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลด

ค) แบบจำลองโหลดแต่ละจุดโหลดมีลักษณะแตกต่างกัน

ข้อมูลแสดงตัวแปรพีชชีของแต่ละจุดโหลดสำหรับกรณี ค) นั้นจะแสดงไว้ในภาคผนวก ง สำหรับผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นจะได้ผลเหมือนกรณีที่ 5.1.1 ข) ตารางที่ 5.6 แต่เมื่อพิจารณาค่า Ranking table ของตำแหน่งบัสในแต่ละรอบของการคำนวณพบว่ามีความแตกต่างกันอยู่บ้างดังแสดงไว้ในตาราง

ตารางที่ 5.14 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.1.2 ค)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
27	1.4319	34	1.1011	2	0.9726
26	1.4319	12	1.1011	15	0.9726
25	1.4319	33	1.1011	16	0.9726
24	1.4317	11	1.1011	14	0.9726
23	1.4315	32	1.1011	13	0.9725
22	1.4312	31	1.1011	3	0.9725
21	1.4309	10	1.1010	4	0.9723
20	1.4306	9	1.1009	5	0.9722
19	1.4302	8	1.1006	6	0.9719
34	1.4300	30	1.1005	30	0.9718
33	1.4300	29	1.1005	29	0.9718
12	1.4300	28	1.1004	28	0.9718
32	1.4300	7	1.1004	17	0.9717
11	1.4300	6	1.1000	7	0.9717
31	1.4300	5	1.0999	8	0.9715

จากตารางที่ 5.14 พบว่าการจัดเรียงบัสของตัวเก็บประจุแต่ละรอบจะเหมือนกับกรณีไม่คิดความไม่แน่นอนโหลด(ตารางที่ 5.7) แต่เมื่อพิจารณาค่าคะแนนของแต่ละบัสในแต่ละรอบพบว่ามีความแตกต่างจากค่าคะแนนของตารางที่ 5.7 อยู่บ้าง โดยแต่ละจุดโหลดมีรูปแบบของตัวแปรพีชชีไม่

เหมือนกัน บางจุดโหลดมีความคลาดเคลื่อนมากทางด้านขวา และบางจุดโหลดมีความคลาดเคลื่อนมากทางด้านซ้าย ทำให้เมื่อคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียออกมาแล้วมีค่าไม่แตกต่างจากกรณีปกติมากนัก ดังนั้นตำแหน่งบัสที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละรอบจึงมีค่าเหมือนกรณีไม่เกิดความไม่แน่นอนของโหลด

สรุปผลของกรณี 5.1.2 พบว่าแบบจำลองโหลดแบบ ก) นั้นจะได้ผลการคำนวณเหมือนกับกรณีไม่พิจารณาความไม่แน่นอนของโหลด แต่แบบจำลองโหลดแบบ ก) และแบบ ข) นั้นได้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างไปบ้างคือตำแหน่งของตัวเก็บประจุในบางรอบมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่พิจารณาความไม่แน่นอนของโหลด

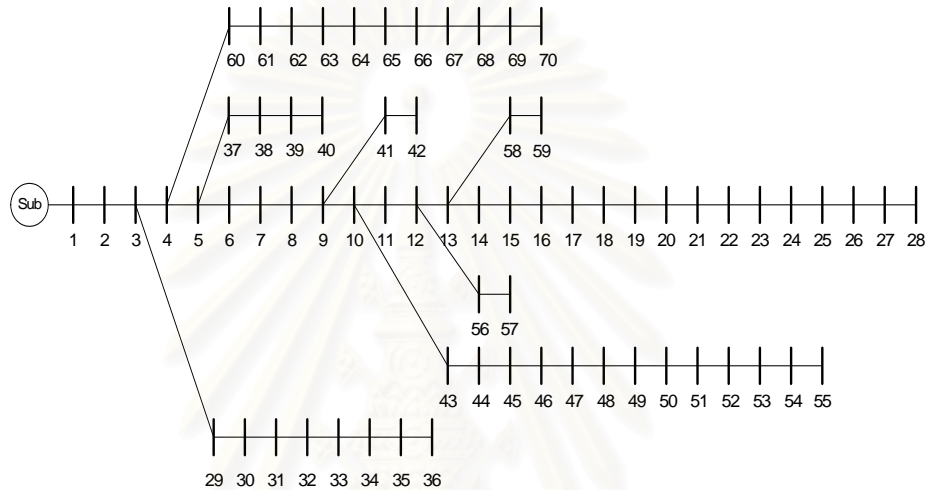
5.1.3 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบขนาด 34 บัส

จากผลการคำนวณทั้งกรณีไม่เกิดความไม่แน่นอนของโหลด(หัวข้อที่ 5.1.1) และกรณีพิจารณาผลของความไม่แน่นอนของโหลด(หัวข้อที่ 5.1.2) สังเกตผลที่ได้พบว่าตัวเก็บประจุตัวแรก ที่ทำการติดตั้งจะได้ผลเหมือนกันเกือบทุกกรณีทั้งตำแหน่งที่จะติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ แต่ตัวเก็บประจุตัวถัดไปจะได้ผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยอาจจะมีตำแหน่งที่เปลี่ยนไปหรือขนาดต่างจากกรณีปกติ อาจวิเคราะห์ได้ว่าตัวเก็บประจุตัวแรกที่ติดตั้งนั้นจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงต่อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ติดตั้งมีค่าสูงกว่าตัวเก็บประจุตัวถัดไปที่จะทำการติดตั้ง ความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดยังไม่ส่งผลต่อตำแหน่งที่ดีที่สุดของรอบแรก แต่ในรอบถัดไป กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงเนื่องจากตัวเก็บประจุตัวถัดมามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรอบแรกทำให้ความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดอาจส่งผลต่อค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงซึ่งนำมาจัดเรียงบัสในแต่ละรอบทำให้ตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเปลี่ยนไป เช่น เมื่อเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 5.6 กับตารางที่ 5.9 ตำแหน่งของตัวเก็บประจุตัวที่ 3 จะแตกต่างกัน นอกจากนี้รูปแบบของตัวแปร ฟิชชี่หรือความเคลื่อนก็จะมีส่วนต่อการวิเคราะห์ด้วย โดยที่ข้อมูลโหลดที่มีความคลาดเคลื่อนมากก็มีโอกาสที่ผลการวิเคราะห์จะแตกต่างจากกรณีปกติมาก

สำหรับพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบหลังจากติดตั้งตัวเก็บประจุตามผลที่คำนวณได้ทั้งสองกรณีพบว่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบจะลดลงไม่ว่าจะพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดหรือไม่ แต่จะขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุที่คำนวณได้ ส่วนผลตอบแทนสุทธิก็มีลักษณะคล้ายกันคือจะขึ้นอยู่กับผลการวิเคราะห์หว่าเป็นอย่างไร ถ้าผลกระทบจากความไม่แน่นอนของโหลดทำให้ผลการวิเคราะห์แตกต่างไปจากกรณีโหลดแบบปกติ ผลตอบแทนสุทธิก็จะแตกต่างกันด้วย

5.2 ระบบทดสอบขนาด 70 บัส[6]

สำหรับระบบทดสอบขนาด 70 บัส ทำการวิเคราะห์ระบบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.1 โดยค่าแรงดันฐานและกำลังไฟฟ้าฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ $V_{base} = 12 \text{ kV}$ และ $S_{base} = 10 \text{ MVA}$ สำหรับข้อมูลโหลดและข้อมูลพารามิเตอร์ของสายจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข.



รูปที่ 5.3 แผนผังแสดงระบบขนาด 70 บัส

ตารางที่ 5.15 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบในสภาวะปกติที่ระดับโหลดสูงสุด

บัส	แรงดัน		บัส	แรงดัน	
	ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
1	1	0	36	0.999	0.0104
2	1	-0.0012	37	0.9998	-0.0078
3	0.9999	-0.0025	38	0.9985	-0.0526
4	0.9999	-0.0025	39	0.9947	-0.1917
5	0.9998	-0.006	40	0.9942	-0.2115
6	0.999	-0.0186	41	0.9785	0.1386
7	0.9901	0.0493	42	0.9785	0.1388

บัส	แรงดัน		บัส	แรงดัน	
	ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
8	0.9808	0.1211	43	0.9747	0.169
9	0.9786	0.1383	44	0.9714	0.1946
10	0.9774	0.1471	45	0.9669	0.2302
11	0.9724	0.2319	46	0.9626	0.2652
12	0.9713	0.2507	47	0.9401	0.6618
13	0.9682	0.3036	48	0.929	0.8643
14	0.9653	0.3501	49	0.9248	0.9453
15	0.9624	0.3963	50	0.9197	1.0498
16	0.9595	0.4422	51	0.9123	1.1188
17	0.9589	0.4508	52	0.912	1.1216
18	0.9581	0.4649	53	0.9117	1.1252
19	0.9581	0.4651	54	0.9098	1.1431
20	0.9576	0.4736	55	0.9092	1.1484
21	0.9573	0.4791	56	0.9713	0.2519
22	0.9568	0.4879	57	0.9713	0.2519
23	0.9568	0.4881	58	0.9678	0.3096
24	0.9567	0.4894	59	0.9678	0.3096
25	0.9566	0.4923	60	0.9999	-0.003
26	0.9564	0.4955	61	0.9997	-0.0094
27	0.9563	0.4968	62	0.9996	-0.0119
28	0.9563	0.4971	63	0.9995	-0.0126
29	0.9999	-0.0027	64	0.9995	-0.0126
30	0.9999	-0.0053	65	0.9988	-0.0236
31	0.9997	-0.0032	66	0.9985	-0.0282
32	0.9997	-0.0028	67	0.9985	-0.0288
33	0.9996	-0.0009	68	0.9985	-0.029
34	0.9994	0.0035	69	0.9984	-0.0308
35	0.999	0.0094	70	0.9984	-0.0308

$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 4.027 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 2.797 \text{ MVAr} \\
 P_{Load} &= 3.802 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 2.695 \text{ MVAr} \\
 P_{Loss} &= 0.225 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.821
 \end{aligned}$$

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบขนาด 70 บัสได้ผลดังนี้ โหลดกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดเท่ากับ 3.802 MW โหลดกำลังไฟฟ้าเสมือนเท่ากับ 2.695 MVAr กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้นสายเท่ากับ 4.027 MW กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้นสายเท่ากับ 2.797 MVAr กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งระบบเท่ากับ 0.225 MW คิดเป็น 5.92 % เมื่อเทียบกับโหลดกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมด และค่า Power Factor ที่ต้นสายคือ 0.821 จะเห็นว่าระบบทดสอบนี้มีค่า Power Factor ค่อนข้างต่ำและมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมาก จึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นระบบทดสอบสำหรับวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุ

5.2.1 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติ

วิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.1.1 โดยแบบ ก) เป็นกรณีที่พิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 1 ปี และแบบ ข) กรณีที่พิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 ปี สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ขีดจำกัดบนของระดับแรงดัน}(V_{\max}) &= 1.05 \text{ p.u.} \\
 \text{ราคาค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย}(K_e) &= 2.5 \text{ บาท/kWh} \\
 \text{ปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี} &= 5 \% \\
 \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า } K_e \text{ ในแต่ละปี} &= 5 \%
 \end{aligned}$$

ก) เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 1 ปี

ตารางที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.1 ก)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVAr)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	55	0.9	646,084.16
2	27	0.3	47,610.33
รวม		1.2	693,694.49

ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหนดสูงสุดสำหรับกรณี 5.2.1 ก) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 3.967 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 1.717 \text{ MVA}r \\
 P_{Load} &= 3.802 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 2.695 \text{ MVA}r \\
 P_{Loss} &= 0.165 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.918
 \end{aligned}$$

ข) เมื่อพิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 ปี

ตารางที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.1 ข)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVA _r)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	55	1.1	11,615,232.67
2	27	0.3	1,197,075.42
3	40	0.5	123,359.62
รวม		1.9	12,935,667.72

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.18 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.2.1 ข)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
55	1.5039	27	1.0214	40	0.9581
54	1.5039	28	1.0214	39	0.9580
53	1.5037	26	1.0214	70	0.9579
52	1.5037	25	1.0214	69	0.9579
51	1.5036	24	1.0214	68	0.9579
50	1.5030	23	1.0214	67	0.9579
49	1.5024	22	1.0214	66	0.9579
48	1.5020	21	1.0213	38	0.9578
47	1.5009	20	1.0213	65	0.9578
27	1.4992	19	1.0213	35	0.9578
28	1.4991	18	1.0213	34	0.9578
26	1.4991	17	1.0212	36	0.9578
25	1.4991	16	1.0211	64	0.9578
24	1.4991	15	1.0208	63	0.9578
23	1.4991	14	1.0206	33	0.9578

ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหนดสูงสุดสำหรับกรณี 5.2.1 ข) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 3.965 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 1.036 \text{ MVar} \\
 P_{Load} &= 3.802 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 2.695 \text{ MVar} \\
 P_{Loss} &= 0.163 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.967
 \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาข้อมูลโหนดแบบปกติพบว่ากรณีที่พิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 ปี จะได้จำนวนตัวเก็บประจุมากกว่ากรณีที่พิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเพียงปีเดียวและขนาดตัวเก็บประจุโดยรวมก็มากกว่าด้วย และเมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุตามผลที่คำนวณได้พบว่าทั้งสองกรณีจะสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มาก โดยกรณี ก) เหลือกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 0.165

MW กรณี ข) เหลือกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 0.163 MW ซึ่งไม่แตกต่างกันมากแต่ถ้าพิจารณา ค่าผลตอบแทนสุทธิพบว่า กรณี ข) จะให้ผลตอบแทนสุทธิที่มากกว่า

5.2.2 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลด

รูปแบบของตัวแปรพีชชีที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบ 70 บัส จะพิจารณาอยู่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบของแบบจำลองโหลดเป็น [-5%,-2%,+20%,+30%] และ [-15%,-5%,+2%,+5%] และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ขีดจำกัดบนของระดับแรงดัน(Vmax)	=	1.05 p.u.
ราคาค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย(Ke)	=	2.5 บาท/kWh
ปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี	=	5 %
อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Ke ในแต่ละปี	=	10 %
อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุ	=	10 ปี
ความคลาดเคลื่อนในแต่ละปีของตัวแปรพีชชี	=	10 %

ก) แบบจำลองโหลดเป็น [-5%,-2%,+20%,+30%]

ตารางที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.2 ก)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVA _r)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	55	1.1	11,615,232.67
2	25	0.3	1,300,433.66
3	40	0.5	123,364.53
รวม		1.9	13,039,030.87

ตารางที่ 5.20 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.2.2 ก)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
55	1.6814	25	1.1086	40	1.0300
54	1.6814	19	1.1077	39	1.0300
53	1.6812	26	1.1073	70	1.0299
52	1.6812	17	1.1073	69	1.0299
51	1.6812	28	1.1073	67	1.0299
50	1.6806	24	1.1073	68	1.0299
49	1.6801	27	1.1071	66	1.0299
48	1.6798	20	1.1070	38	1.0299
47	1.6788	21	1.1069	65	1.0299
27	1.6773	23	1.1069	35	1.0298
28	1.6773	22	1.1068	34	1.0298
26	1.6773	16	1.1067	63	1.0298
25	1.6773	18	1.1067	64	1.0298
24	1.6773	15	1.1065	33	1.0298
23	1.6773	14	1.1060	36	1.0298

ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุดสำหรับกรณี 5.2.2 ก) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 3.964 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 1.036 \text{ MVar} \\
 P_{Load} &= 3.802 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 2.695 \text{ MVar} \\
 P_{Loss} &= 0.162 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.967
 \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณกรณี 5.2.2 ก) จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุตัวที่ 2 มีตำแหน่งบัสแตกต่างจากกรณี 5.2.1 ข) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 5.19 ในรอบที่ 2 บัส 25 จะมีคะแนนดีที่สุดและตารางที่ 5.17 ในรอบที่ 2 บัส 27 จะมีคะแนนดีที่สุด สำหรับขนาดของตัวเก็บประจุนั้นทั้งสองกรณีได้ผลเหมือนกันและเมื่อพิจารณาผลตอบแทนสุทธิรวมทั้งหมด กรณี 5.2.2 ก) จะมีค่าผลตอบแทนสุทธิตั้งรวมมากกว่ากรณี 5.2.1 ข) แต่กำลังไฟฟ้าสูญเสียของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน

ข) แบบจำลองโหลดเป็น [-15%,-5%,+2%,+5%]

ตารางที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.2.2 ข)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVA _r)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	55	1.1	11,615,232.67
2	27	0.3	1,197,075.42
3	40	0.5	123,359.62
รวม		1.9	12,935,667.72

ตารางที่ 5.22 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.2.2 ข)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
55	1.4626	27	0.9972	40	0.9358
54	1.4625	28	0.9972	39	0.9357
53	1.4624	26	0.9972	70	0.9356
52	1.4623	25	0.9972	69	0.9356
51	1.4623	24	0.9972	68	0.9356
50	1.4616	23	0.9972	67	0.9356
49	1.4611	22	0.9972	66	0.9355
48	1.4606	21	0.9972	38	0.9355
47	1.4595	20	0.9971	65	0.9355
27	1.4577	19	0.9971	35	0.9355
28	1.4577	18	0.9971	34	0.9355
26	1.4577	17	0.9970	36	0.9355
25	1.4577	16	0.9969	64	0.9355
24	1.4577	15	0.9967	63	0.9355
23	1.4577	14	0.9964	33	0.9355

สำหรับกรณี 5.2.2 ข) ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุเหมือนกับกรณีพิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติ 5.2.1 ข) ดังนั้นผลการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะเหมือนกันด้วย และจากตารางที่ 5.22 พบว่าลำดับการจัดเรียงบัสในแต่ละรอบจะเหมือนกับกรณีไม่มีความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดแต่ค่าคะแนนของแต่ละบัสที่ใช้ในการจัดเรียงจะแตกต่างกันเนื่องจากคะแนนที่ได้ี้คำนวณจากค่าดัชนีแสดงกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงของแต่ละบัส ซึ่งกรณี 5.2.2 ข) นั้นมีความคลาดเคลื่อนเน้นมาทางด้านซ้ายทำให้ค่าคะแนนของแต่ละบัสมีค่าน้อยกว่ากรณี 5.2.1 ข)

5.2.3 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบขนาด 70 บัส

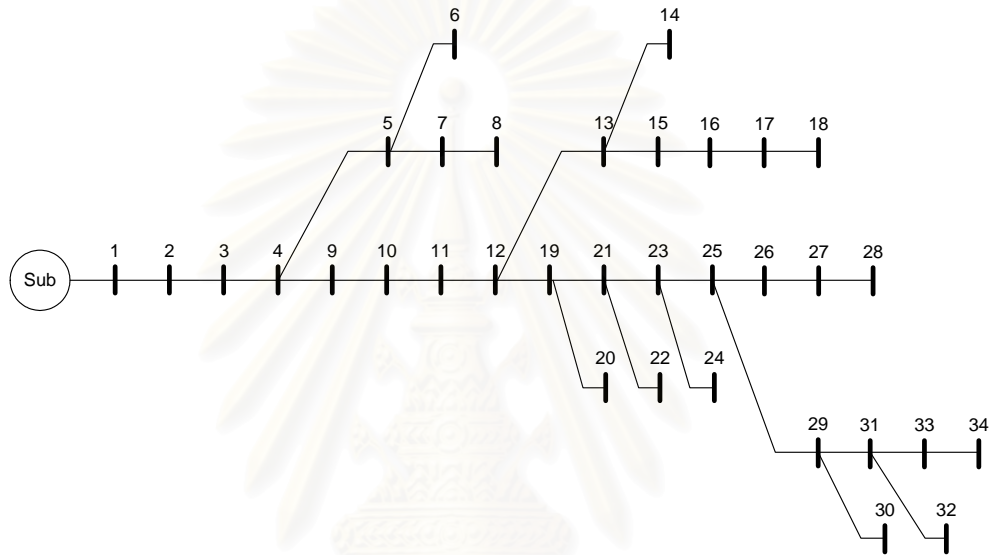
เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณสำหรับระบบทดสอบขนาด 70 บัส จะสังเกตได้ว่ากรณี 5.2.2 ก) จะได้ผลที่ต่างไปจากกรณีปกติซึ่งไม่พิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลด ส่วนกรณี 5.2.2 ข) นั้นได้ผลการคำนวณเหมือนกับกรณีปกติ สามารถวิเคราะห์ได้ว่ากรณี 5.2.2 ก) นั้นมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโหลดมาทางด้านขวาค่อนข้างมาก ทำให้ส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงบัสในแต่ละรอบ ดังนั้นตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุจึงมีการเปลี่ยนแปลง สำหรับกรณี 5.2.2 ข) ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโหลดมีค่าน้อยและไม่ทำให้การจัดเรียงบัสในแต่ละรอบเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้ผลการคำนวณเหมือนกรณีโหลดแบบปกติ

สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเมื่อเปรียบเทียบระหว่างก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุตามผลการวิเคราะห์พบว่าทั้งสองกรณี คือ กรณีที่พิจารณาโหลดแบบปกติและกรณีพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดสามารถลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบลงได้มาก และค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของทั้งสองกรณีก็ไม่แตกต่างกันมากนัก เช่น กรณีที่พิจารณาโหลดแบบปกติค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเหลือเพียง 0.163 MW หลังการติดตั้งตัวเก็บประจุตามผลที่คำนวณได้ ส่วนกรณีพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดแบบ ก) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเหลือเพียง 0.162 MW ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากขนาดตัวเก็บประจุที่คำนวณได้มีขนาดเท่ากัน แต่ตำแหน่งบัสที่จะติดตั้งมีการเปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดที่ใช้ในการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 ระบบทดสอบท่าทราย[17]

ระบบนี้เป็นระบบที่ดัดแปลงจากระบบท่าทรายซึ่งเป็นระบบจำหน่ายขนาด 34 บัส เขตอุตสาหกรรมอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ค่าแรงดันฐานและกำลังไฟฟ้าฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ $V_{base} = 22 \text{ kV}$, $S_{base} = 100 \text{ MVA}$ สำหรับข้อมูลโหลดและข้อมูลพารามิเตอร์ของสายจะแสดงไว้ในภาคผนวก ค.



รูปที่ 5.4 แผนผังแสดงระบบทดสอบท่าทราย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.23 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุด

บัส	แรงดัน		บัส	แรงดัน	
	ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
1	1.0000	0.0000	18	0.9518	-1.6786
2	0.9985	-0.0485	19	0.9580	-1.4538
3	0.9927	-0.2438	20	0.9580	-1.4538
4	0.9849	-0.5078	21	0.9567	-1.5024
5	0.9838	-0.5479	22	0.9566	-1.5023
6	0.9838	-0.5487	23	0.9554	-1.5466
7	0.9831	-0.5712	24	0.9551	-1.5572
8	0.9831	-0.5732	25	0.9546	-1.5790
9	0.9846	-0.5193	26	0.9545	-1.5808
10	0.9839	-0.5422	27	0.9544	-1.5849
11	0.9826	-0.5861	28	0.9544	-1.5848
12	0.9581	-1.4480	29	0.9537	-1.6110
13	0.9567	-1.5021	30	0.9536	-1.6126
14	0.9566	-1.5031	31	0.9534	-1.6225
15	0.9551	-1.5602	32	0.9533	-1.6224
16	0.9535	-1.6165	33	0.9533	-1.6266
17	0.9523	-1.6601	34	0.9532	-1.6265

$$P_{Slack} = 11.723 \text{ MW}, \quad Q_{Slack} = 7.654 \text{ MVar}$$

$$P_{Load} = 11.437 \text{ MW}, \quad Q_{Load} = 7.088 \text{ MVar}$$

$$P_{Loss} = 0.286 \text{ MW}, \quad PF \text{ at slack bus} = 0.837$$

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบทำทราายได้ผลดังนี้ โหลดกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดเท่ากับ 11.437 MW โหลดกำลังไฟฟ้าเสมือนเท่ากับ 7.088 MVar กำลังไฟฟ้าจริงที่ต้นสายเท่ากับ 11.723 MW กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้นสายเท่ากับ 7.654 MVar กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งระบบเท่ากับ 0.286 MW คิดเป็น 2.50 % เมื่อเทียบกับโหลดกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมด และค่า Power Factor ที่ต้นสายคือ 0.837

5.3.1 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติ

สำหรับระบบทดสอบที่ทำทรายนั้นจะวิเคราะห์โดยพิจารณาอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเท่ากับ 10 ปี ทั้งหมดและจะใช้ค่าพารามิเตอร์แบบเดียวกับระบบทดสอบขนาด 34 บัส ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.3.1

รอบที่	บัส	ขนาด (MVar)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	18	3.3	12,394,170.39
2	34	2.5	3,894,793.27
รวม		5.8	16,243,963.66

ตารางที่ 5.25 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.3.1

รอบที่ 1		รอบที่ 2	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
18	1.8752	34	1.4771
17	1.8752	32	1.4771
34	1.8750	33	1.4771
32	1.8750	31	1.4770
33	1.8750	30	1.4770
31	1.8750	29	1.4770
16	1.8750	26	1.4769
30	1.8750	25	1.4769
29	1.8750	27	1.4769
26	1.8749	28	1.4769
27	1.8749	24	1.4768
25	1.8749	23	1.4768
28	1.8749	22	1.4766
15	1.8748	21	1.4766
24	1.8748	8	1.4765

ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหนดสูงสุดสำหรับกรณี 5.3.1 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 11.644 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 1.922 \text{ MVar} \\
 P_{Load} &= 11.437 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 7.088 \text{ MVar} \\
 P_{Loss} &= 0.207 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.987
 \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาข้อมูลโหนดแบบปกติพบว่าควรจะมีการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 18 ขนาด 3.3 MVar และที่บัส 34 ขนาด 2.5 MVar และจะได้ผลตอบแทนสุทธิรวมเท่ากับ 16,243,963.66 บาท

5.3.2 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลโหนด

รูปแบบของตัวแปรฟิชชีที่ใช้ในหัวข้อนี้จะพิจารณาอยู่ 2 รูปแบบ คือ รูปแบบของแบบจำลองโหนดเป็น [-3%,-2%,+15%,20%] และแบบจำลองโหนดของแต่ละจุดโหนดมีลักษณะแตกต่างกัน สำหรับค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าเหมือนกับหัวข้อที่ 5.1

ก) แบบจำลองโหนดเป็น [-3%,-2%,+15%,+20%]

ตารางที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.3.2 ก)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVar)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	18	3.3	12,394,170.39
2	34	2.5	3,894,793.27
รวม		5.8	16,243,963.66

ตารางที่ 5.27 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.3.2 ก)

รอบที่ 1		รอบที่ 2	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
18	2.0515	34	1.7011
17	2.0515	33	1.7011
34	2.0513	32	1.7011
32	2.0513	31	1.7011
33	2.0513	30	1.7011
31	2.0513	29	1.7010
16	2.0513	28	1.7010
30	2.0513	27	1.7010
29	2.0513	26	1.7009
26	2.0512	25	1.7009
25	2.0512	24	1.6910
27	2.0512	23	1.6909
28	2.0512	22	1.6908
15	2.0511	21	1.6908
24	2.0511	8	1.6903

ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหลดสูงสุดสำหรับกรณี 5.3.2 ก) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_{Slack} &= 11.644 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 1.922 \text{ MVar} \\
 P_{Load} &= 11.437 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 7.088 \text{ MVar} \\
 P_{Loss} &= 0.207 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.987
 \end{aligned}$$

ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.3.2 ก) เหมือนกับกรณีพิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติทั้งตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุ

ข) แบบจำลองโหลดแต่ละจุดโหลดมีลักษณะแตกต่างกัน

ตารางที่ 5.28 ผลการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับกรณี 5.3.2 ข)

รอบที่	บัส	ขนาด (MVar)	ผลตอบแทนสุทธิ (บาท)
1	18	3.3	12,394,170.39
2	8	2.5	1,528,720.90
3	3	1.7	164,242.95
รวม		7.5	14,087,134.24

ตารางที่ 5.29 แสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสสำหรับกรณี 5.3.2 ข)

รอบที่ 1		รอบที่ 2		รอบที่ 3	
บัส	คะแนน	บัส	คะแนน	บัส	คะแนน
18	1.9290	8	1.5464	3	1.3973
17	1.9290	27	1.5324	2	1.3971
34	1.9289	28	1.5323	34	1.3968
32	1.9289	32	1.5323	32	1.3968
33	1.9289	31	1.5323	33	1.3968
31	1.9288	29	1.5323	31	1.3968
30	1.9288	34	1.5322	30	1.3968
16	1.9288	33	1.5322	29	1.3968
29	1.9288	30	1.5322	26	1.3967
26	1.9287	25	1.5322	27	1.3967
27	1.9287	26	1.5321	25	1.3967
28	1.9287	24	1.5320	28	1.3967
25	1.9287	23	1.5320	24	1.3966
15	1.9286	22	1.5318	23	1.3966
24	1.9286	21	1.5318	22	1.3964

ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ระดับโหนดสูงสุดสำหรับกรณี 5.3.2 ข) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{Slack} &= 11.654 \text{ MW}, & Q_{Slack} &= 0.221 \text{ MVAr} \\ P_{Load} &= 11.437 \text{ MW}, & Q_{Load} &= 7.088 \text{ MVAr} \\ P_{Loss} &= 0.217 \text{ MW}, & PF \text{ at slack bus} &= 0.999 \end{aligned}$$

สำหรับผลการคำนวณเมื่อแบบจำลอง โหลดของแต่ละจุดโหนดมีลักษณะแตกต่างกันจะ ได้ผลที่ต่างจากกรณี 5.3.1 เช่น ตัวเก็บประจุในรอบที่สองที่คำนวณได้จะติดตั้งเข้าที่บัส 8 ขนาด 2.5 MVAr นอกจากนี้ยังสามารถติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่สามได้อีก เมื่อพิจารณาตารางแสดงคะแนนรวมของแต่ละบัสจะเห็นว่าในรอบแรกนั้นลำดับการจัดเรียงบัสจะเหมือนกับกรณี 5.3.1 ส่วนในรอบที่สองนั้นลำดับการจัดเรียงบัสจะแตกต่างไปโดยบัส 8 จะมีคะแนนดีที่สุดและมีคะแนนของบัส นี้มากกว่าคะแนนของบัสอื่นๆ ก่อนข้างมาก เมื่อทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าหลังจากทำการติดตั้งตัวเก็บประจุตามผลที่คำนวณได้พบว่าสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจาก 0.286 MW เหลือเพียง 0.217 MW โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลง 0.069 MW นอกจากนี้ค่า Power Factor ที่ดันสาย ก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

5.3.3 สรุปผลการวิเคราะห์ระบบทดสอบท่าทราย

จากผลการคำนวณของระบบท่าทรายเมื่อประยุกต์ใช้แบบจำลองของความไม่แน่นอนทั้งสองกรณี พบว่ากรณีแรกนั้นผลการคำนวณจะเหมือนกับกรณีพิจารณาโหลดแบบปกติ ส่วนกรณีที่สองนั้นตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุในรอบที่สองจะต่างไปจากกรณีปกติ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทดสอบขนาด 34 บัสและระบบทดสอบขนาด 70 บัส จะสังเกตได้ว่าตัวเก็บประจุในรอบแรกผลการคำนวณจะเหมือนกันไม่ว่าจะพิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดหรือไม่ สำหรับตัวเก็บประจุตัวถัดไปความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดอาจทำให้ตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปได้

สรุปการทดสอบทั้งสามระบบทดสอบด้วยวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นมา พบว่าความไม่แน่นอนของโหลดจะมีผลต่อตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยเฉพาะโหลดที่มีความไม่แน่นอนหรือมีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโหลดค่อนข้างมากจะส่งผลกระทบต่อตำแหน่งบัสที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ แต่ถ้าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโหลดมีค่าน้อยผลการวิเคราะห์ก็จะเหมือนกับกรณีที่พิจารณาข้อมูลโหลดแบบปกติหรือไม่ก็ความไม่แน่นอนของโหลด ในกรณีที่ความไม่แน่นอนของโหลดส่งผล

ต่อตำแหน่งบัลลังก์ที่จะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ เราจะสังเกตได้ว่าตัวเก็บประจุในรอบแรกของการคำนวณหรือตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ที่สุดจะได้ผลการคำนวณเหมือนกับกรณีพิจารณาโหลดแบบปกติไม่ว่าความไม่แน่นอนของโหลดจะมากขนาดไหน แต่เมื่อพิจารณาตัวเก็บประจุในรอบถัดไป ความไม่แน่นอนของโหลดอาจทำให้ตำแหน่งบัลลังก์ที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุมีการเปลี่ยนแปลงไป และเมื่อตำแหน่งบัลลังก์มีการเปลี่ยนแปลงไปก็อาจทำให้ขนาดตัวเก็บประจุในรอบนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบและผลตอบแทนเนื่องจากการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุที่คำนวณได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นได้มีการวิจัยมาเป็นเวลานานแล้วและมีวิธีการวิเคราะห์หลายวิธีดังแสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 1 ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นจำเป็นต้องใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ข้อมูลโหลดของระบบ ข้อมูลสายป้อน ข้อมูลตัวเก็บประจุ เป็นต้น โดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นมักมีความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วย แต่ข้อมูลโหลดจะมีความความไม่แน่นอนค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ตัวอื่น เนื่องจากข้อมูลโหลดที่ได้จากการวัดหรือการพยากรณ์ โหลดมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก เช่น ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด ความคลาดเคลื่อนจากผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเน้นไปที่การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของโหลด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีการพิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลด โดยเริ่มนำเสนอตั้งแต่ความสำคัญของปัญหา ขั้นตอนการศึกษา อธิบายแบบจำลองของส่วนต่างๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า การหาค่าดัชนีกำหนดตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุ อธิบายหลักการพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซี ตรรกศาสตร์แบบฟัซซี วิธีการวิเคราะห์โดยใช้การอนุมานแบบฟัซซี และจะนำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดซึ่งได้อธิบายขั้นตอนการคำนวณไว้อย่างละเอียดในบทที่ 4

จากผลการทดสอบในบทที่ 5 สรุปได้ว่าความไม่แน่นอนของโหลดจะส่งผลต่อตำแหน่งที่จะติดตั้งตัวเก็บประจุ ซึ่งถ้าหากเกิดความไม่แน่นอนหรือความคลาดเคลื่อนของข้อมูลโหลดค่อนข้างมากก็มีโอกาสที่จะผลการคำนวณจะแตกต่างจากกรณีที่พิจารณาโหลดแบบปกติได้มาก แต่ถ้าหากความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โหลดมีค่าไม่มากนักผลการคำนวณก็จะใกล้เคียงกับกรณีที่พิจารณาโหลดแบบปกติ สำหรับค่ากำลังหรือพลังงานไฟฟ้าสูญเสียหลังจากติดตั้งตัวเก็บประจุตามผลที่คำนวณได้นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุแล้วพบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะลดลงไม่ว่าจะพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดหรือไม่ แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจะขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุที่ทำการติดตั้งเข้ากับระบบ ซึ่งจำนวนและขนาดตัวเก็บ

ประจุที่คำนวณได้นี้อาจแตกต่างกันระหว่างกรณีพิจารณาโหลดแบบปกติและกรณีพิจารณาโหลดที่มีความไม่แน่นอน

6.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการวิเคราะห์ตามวิธีการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้ ในการวิเคราะห์การติดตั้งตัวเก็บประจุโดยพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดนั้น ขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบที่มีการพิจารณาความไม่แน่นอนของโหลดจะใช้เวลาในการคำนวณค่อนข้างนาน โดยเฉพาะระบบทดสอบขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงควรหาวิธีเพิ่มความเร็วของกระบวนการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชี เช่น การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบดิคัปเปิล[16]กับแบบจำลองโหลดที่มีความไม่แน่นอน เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. William D. Stevenson, Jr. Elements of power system analysis. Fourth Edition. Singapore : McGraw-Hill, 1982.
2. J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma. Power system analysis and design. Third Edition.
3. T.J.Ross. Fuzzy Logic with Engineering Applications. Second Edition. England : John Wiley & Sons, 2004.
4. S.Civanlar, J.J. Grainger, H. Yin, and S.S.H. Lee, Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, IEEE Transaction on Power Delivery 3 (1998) : 1217-1223.
5. S.H.Lee and J.J.Grainger. Optimal placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems 100, 1 (Jan 1981) : 345-352.
6. M.E.Baran and F.F.Wu. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. IEEE Transaction on Power Delivery 4 , 1 (Jan 1989) : 725-734.
7. M.Chis , M.M.A.Salama , and S.Jayaram. Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution 144, 2 (May 1997) : 225-230.
8. S.Sundhararajan and A.Pahwa. Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm. IEEE Transaction on Power Systems, 9, 3 (Aug 1994) : 1499-1507.
9. T.Ananthapadmanabha, A.D.Kuulkarni, A.S.Gopala Rao, and K.Raghavendra Rao. Knowledge-based expert system for optimal reactive power control in distribution systems. Electrical Power & Energy Systems 18, 1 (1996) : 27-31.
10. N.I.Santoso and O.T.Tan. Neural-net based real-time control of capacitors installed on distribution systems. IEEE Transaction on Power Delivery 5, 1 (Jan 1990) : 266-272.
11. H.C.Chin. Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming. Electric Power Systems research 35 (1995) : 133-139.
12. H.N.Ng , M.M.A.Salama , and A.Y.Chikhani. Classification of capacitor allocation techniques. IEEE Transaction on Power Delivery 15 (Jan 2000) : 387-392.
13. Youman Deng, Xiaojuan Ren. Fuzzy modeling of capacitor switching for radial distribution systems. Proc. IEEE Power Engineering Soc. Winter Meeting (2001).

14. Hongbo Sun , D.C.Yu , and Yongsheng Xie. Application of fuzzy set theory to power flow analysis with uncertainty power injections. Power Engineering Society Winter Meeting 2 (Jan 2000) : 1191-1196.
15. H.N.Ng , M.M.A.Salama , and A.Y.Chikhani. Capacitor allocation by approximate reasoning: fuzzy capacitor placement. IEEE Transaction on Power Delivery 15, 1 (Jan 2000) : 393-398.
16. Stoti,B., and Alsac, O. Fast decoupled load flow. IEEE Transaction on Power Systems 93 (June 1974) : 859-869.
17. เสริมชัย จารุวัฒนดิลก. การติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
18. R.D. Zimmerman and D. Gan. Matpower:Version 3.0.0. Cornell University (Feb 2005).



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 34 บัส

ตาราง ก.1 แสดงข้อมูลโหลดของระบบทดสอบขนาด 34 บัส

Bus	P (MW)	Q(MVAR)	V(mag)	V(angle)	B (MVAR)
1	0.0000	0.0000	1	0	0
2	0.2300	0.1425	1	0	0
3	0.0000	0.0000	1	0	0
4	0.2300	0.1425	1	0	0
5	0.2300	0.1425	1	0	0
6	0.0000	0.0000	1	0	0
7	0.0000	0.0000	1	0	0
8	0.2300	0.1425	1	0	0
9	0.2300	0.1425	1	0	0
10	0.0000	0.0000	1	0	0
11	0.2300	0.1425	1	0	0
12	0.1370	0.0840	1	0	0
13	0.0720	0.0450	1	0	0
14	0.0720	0.0450	1	0	0
15	0.0720	0.0450	1	0	0
16	0.0135	0.0075	1	0	0
17	0.2300	0.1425	1	0	0
18	0.2300	0.1425	1	0	0
19	0.2300	0.1425	1	0	0
20	0.2300	0.1425	1	0	0
21	0.2300	0.1425	1	0	0
22	0.2300	0.1425	1	0	0
23	0.2300	0.1425	1	0	0
24	0.2300	0.1425	1	0	0
25	0.2300	0.1425	1	0	0
26	0.2300	0.1425	1	0	0
27	0.1370	0.0850	1	0	0
28	0.0750	0.0480	1	0	0
29	0.0750	0.0480	1	0	0

Bus	P (MW)	Q(MVAR)	V(mag)	V(angle)	B (MVAR)
30	0.0750	0.0480	1	0	0
31	0.0570	0.0345	1	0	0
32	0.0570	0.0345	1	0	0
33	0.0570	0.0345	1	0	0
34	0.0570	0.0345	1	0	0



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.2 แสดงข้อมูลสายป้อนของระบบทดสอบขนาด 34 บัส

FormBus	Tobus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
1	2	0.0967	0.0397	0
2	3	0.0886	0.0364	0
3	4	0.1359	0.0377	0
4	5	0.1236	0.0343	0
5	6	0.1236	0.0343	0
6	7	0.2598	0.0446	0
7	8	0.1732	0.0298	0
8	9	0.2598	0.0446	0
9	10	0.1732	0.0298	0
10	11	0.1083	0.0186	0
11	12	0.0866	0.0149	0
3	13	0.1299	0.0223	0
13	14	0.1732	0.0298	0
14	15	0.0866	0.0149	0
15	16	0.0433	0.0074	0
6	17	0.1483	0.0412	0
17	18	0.1359	0.0377	0
18	19	0.1718	0.0391	0
19	20	0.1562	0.0355	0
20	21	0.1562	0.0355	0
21	22	0.2165	0.0372	0
22	23	0.2165	0.0372	0
23	24	0.2598	0.0446	0
24	25	0.1732	0.0298	0
25	26	0.1083	0.0186	0
26	27	0.0866	0.0149	0
7	28	0.1299	0.0223	0
28	29	0.1299	0.0223	0
29	30	0.1299	0.0223	0
10	31	0.1299	0.0223	0
31	32	0.1732	0.0298	0
32	33	0.1299	0.0223	0
33	34	0.0866	0.0149	0

ภาคผนวก ข

ข้อมูลของระบบทดสอบขนาด 70 บัส

ตาราง ข.1 แสดงข้อมูลโหลดของระบบทดสอบขนาด 70 บัส

Bus	P(MW)	Q(MVAR)	V(mag)	V(angle)	B (MVAR)
1	0.0000	0.0000	1	0	0
2	0.0000	0.0000	1	0	0
3	0.0000	0.0000	1	0	0
4	0.0000	0.0000	1	0	0
5	0.0000	0.0000	1	0	0
6	0.0000	0.0000	1	0	0
7	0.0026	0.0022	1	0	0
8	0.0404	0.0300	1	0	0
9	0.0750	0.0540	1	0	0
10	0.0300	0.0220	1	0	0
11	0.0280	0.0190	1	0	0
12	0.1450	0.1040	1	0	0
13	0.1450	0.1040	1	0	0
14	0.0080	0.0055	1	0	0
15	0.0080	0.0055	1	0	0
16	0.0000	0.0000	1	0	0
17	0.0455	0.0300	1	0	0
18	0.0600	0.0350	1	0	0
19	0.0600	0.0350	1	0	0
20	0.0000	0.0000	1	0	0
21	0.0010	0.0006	1	0	0
22	0.1140	0.0810	1	0	0
23	0.0053	0.0035	1	0	0
24	0.0000	0.0000	1	0	0
25	0.0280	0.0200	1	0	0
26	0.0000	0.0000	1	0	0
27	0.0140	0.0100	1	0	0

Bus	P(MW)	Q(MVAR)	V(mag)	V(angle)	B (MVAR)
28	0.0140	0.0100	1	0	0
29	0.0260	0.0186	1	0	0
30	0.0260	0.0186	1	0	0
31	0.0000	0.0000	1	0	0
32	0.0000	0.0000	1	0	0
33	0.0000	0.0000	1	0	0
34	0.0140	0.0100	1	0	0
35	0.0195	0.0140	1	0	0
36	0.0060	0.0040	1	0	0
37	0.0000	0.0000	1	0	0
38	0.0790	0.0564	1	0	0
39	0.3847	0.2745	1	0	0
40	0.3847	0.2745	1	0	0
41	0.0405	0.0283	1	0	0
42	0.0036	0.0027	1	0	0
43	0.0044	0.0035	1	0	0
44	0.0264	0.0190	1	0	0
45	0.0240	0.0172	1	0	0
46	0.0000	0.0000	1	0	0
47	0.0000	0.0000	1	0	0
48	0.0000	0.0000	1	0	0
49	0.1000	0.0720	1	0	0
50	0.0000	0.0000	1	0	0
51	1.2440	0.8880	1	0	0
52	0.0320	0.0230	1	0	0
53	0.0000	0.0000	1	0	0
54	0.2270	0.1620	1	0	0
55	0.0590	0.0420	1	0	0
56	0.0180	0.0130	1	0	0
57	0.0180	0.0130	1	0	0
58	0.0280	0.0200	1	0	0
59	0.0280	0.0200	1	0	0
60	0.0260	0.0186	1	0	0

Bus	P(MW)	Q(MVAR)	V(mag)	V(angle)	B (MVAR)
61	0.0260	0.0186	1	0	0
62	0.0000	0.0000	1	0	0
63	0.0240	0.0170	1	0	0
64	0.0240	0.0170	1	0	0
65	0.0012	0.0010	1	0	0
66	0.0000	0.0000	1	0	0
67	0.0060	0.0043	1	0	0
68	0.0000	0.0000	1	0	0
69	0.0392	0.0263	1	0	0
70	0.0392	0.0263	1	0	0



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข.2 แสดงข้อมูลสายป้อนของระบบทดสอบขนาด 70 บัส

FormBus	Tobus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
1	2	0.0000	0.0001	0
2	3	0.0000	0.0001	0
3	4	0.0000	0.0000	0
4	5	0.0001	0.0002	0
5	6	0.0016	0.0018	0
6	7	0.0228	0.0116	0
7	8	0.0238	0.0121	0
8	9	0.0058	0.0029	0
9	10	0.0031	0.0016	0
10	11	0.0511	0.0169	0
11	12	0.0117	0.0039	0
12	13	0.0444	0.0147	0
13	14	0.0643	0.0212	0
14	15	0.0651	0.0215	0
15	16	0.0660	0.0218	0
16	17	0.0123	0.0041	0
17	18	0.0234	0.0077	0
18	19	0.0003	0.0001	0
19	20	0.0204	0.0068	0
20	21	0.0131	0.0043	0
21	22	0.0213	0.0070	0
22	23	0.0009	0.0003	0
23	24	0.0099	0.0033	0
24	25	0.0216	0.0071	0
25	26	0.0467	0.0154	0
26	27	0.0193	0.0064	0
27	28	0.0108	0.0036	0
3	29	0.0003	0.0007	0
29	30	0.0040	0.0098	0
30	31	0.0248	0.0082	0

FormBus	Tobus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
31	32	0.0044	0.0014	0
32	33	0.0219	0.0072	0
33	34	0.0523	0.0176	0
34	35	0.1066	0.0352	0
35	36	0.0920	0.0304	0
4	60	0.0003	0.0007	0
60	61	0.0040	0.0098	0
61	62	0.0066	0.0077	0
62	63	0.0019	0.0022	0
63	64	0.0001	0.0001	0
64	65	0.0454	0.0531	0
65	66	0.0193	0.0226	0
66	67	0.0026	0.0030	0
67	68	0.0006	0.0007	0
68	69	0.0068	0.0086	0
69	70	0.0000	0.0000	0
5	37	0.0002	0.0005	0
37	38	0.0053	0.0130	0
38	39	0.0181	0.0442	0
39	40	0.0051	0.0125	0
9	41	0.0058	0.0030	0
41	42	0.0207	0.0070	0
10	43	0.0109	0.0055	0
43	44	0.0127	0.0065	0
44	45	0.0177	0.0090	0
45	46	0.0176	0.0089	0
46	47	0.0992	0.0333	0
47	48	0.0489	0.0164	0
48	49	0.0190	0.0063	0
49	50	0.0241	0.0073	0
50	51	0.0317	0.0161	0
51	52	0.0061	0.0031	0
52	53	0.0090	0.0046	0

FormBus	Tobus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
53	54	0.0443	0.0226	0
54	55	0.0650	0.0331	0
12	56	0.0126	0.0038	0
56	57	0.0003	0.0000	0
13	58	0.0461	0.0152	0
58	59	0.0003	0.0000	0



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลของระบบที่ดัดแปลงจากระบบทดสอบท่าทราย

ตาราง ค.1 แสดงข้อมูลโหลดของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบทดสอบท่าทราย

Bus	P(MW)	Q(MVAR)	V(mag)	V(angle)	B (MVAR)
1	0.0000	0.0000	1	0	0
2	0.0000	0.0000	1	0	0
3	0.0000	0.0000	1	0	0
4	0.0000	0.0000	1	0	0
5	0.0000	0.0000	1	0	0
6	0.6800	0.4214	1	0	0
7	0.0000	0.0000	1	0	0
8	0.8500	0.5268	1	0	0
9	0.0850	0.0527	1	0	0
10	0.4250	0.2634	1	0	0
11	0.6800	0.4214	1	0	0
12	0.0000	0.0000	1	0	0
13	0.0000	0.0000	1	0	0
14	0.8500	0.5268	1	0	0
15	0.2125	0.1317	1	0	0
16	0.8033	0.4978	1	0	0
17	1.2750	0.7902	1	0	0
18	0.8500	0.5268	1	0	0
19	0.0000	0.0000	1	0	0
20	0.0850	0.0527	1	0	0
21	0.0000	0.0000	1	0	0
22	0.4250	0.2634	1	0	0
23	0.0000	0.0000	1	0	0
24	2.1250	1.3170	1	0	0
25	0.0000	0.0000	1	0	0
26	0.1360	0.0843	1	0	0
27	0.0000	0.0000	1	0	0

Bus	P(MW)	Q(MVAR)	V(mag)	V(angle)	B (MVAR)
28	0.0425	0.0263	1	0	0
29	0.0000	0.0000	1	0	0
30	1.2750	0.7902	1	0	0
31	0.0000	0.0000	1	0	0
32	0.4250	0.2634	1	0	0
33	0.0000	0.0000	1	0	0
34	0.2125	0.1317	1	0	0



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ค.2 แสดงข้อมูลสายป้อนของระบบทดสอบที่ดัดแปลงจากระบบทดสอบท่าทราย

FormBus	Tobus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
1	2	0.0054	0.0108	0
2	3	0.0218	0.0430	0
3	4	0.0290	0.0574	0
4	5	0.0327	0.0646	0
5	6	0.0015	0.0029	0
5	7	0.0341	0.0674	0
7	8	0.0029	0.0057	0
4	9	0.0015	0.0029	0
9	10	0.0029	0.0057	0
10	11	0.0058	0.0115	0
11	12	0.1198	0.2367	0
12	13	0.0160	0.0316	0
13	14	0.0015	0.0029	0
13	15	0.0218	0.0430	0
15	16	0.0225	0.0445	0
16	17	0.0240	0.0473	0
17	18	0.0254	0.0502	0
12	19	0.0015	0.0029	0
19	20	0.0028	0.0016	0
19	21	0.0123	0.0244	0
21	22	0.0055	0.0032	0
21	23	0.0123	0.0244	0
23	24	0.0058	0.0115	0
23	25	0.0182	0.0359	0
25	26	0.0116	0.0230	0
26	27	0.1133	0.2238	0
27	28	0.0441	0.0257	0
25	29	0.0196	0.0387	0
29	30	0.0015	0.0029	0
29	31	0.0211	0.0416	0
31	32	0.0110	0.0064	0
31	33	0.0225	0.0445	0
33	34	0.0055	0.0032	0

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลตัวแปรพีชชีของแต่ละจุดโหนด

Bus	x1	x2	x3	x4
1	0	0	0	0
2	10	5	2	5
3	15	10	2	5
4	20	15	5	10
5	25	20	5	10
6	5	2	5	10
7	5	2	10	15
8	10	5	10	20
9	10	5	20	25
10	10	5	2	5
11	15	10	2	5
12	20	15	5	10
13	25	20	5	10
14	5	2	5	10
15	5	2	10	15
16	10	5	10	20
17	10	5	20	25
18	10	5	2	5
19	15	10	2	5
20	20	15	5	10
21	25	20	5	10
22	5	2	5	10
23	5	2	10	15
24	10	5	10	20
25	10	5	20	25
26	10	5	2	5
27	15	10	2	5
28	20	15	5	10
29	25	20	5	10
30	5	2	5	10

Bus	x1	x2	x3	x4
31	5	2	10	15
32	10	5	10	20
33	10	5	20	25
34	10	5	2	5



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรชัย เชาวนาธิคม เกิดวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2546 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย