

การประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาถึง
ความไม่แน่นอนของค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



นาย ธีรัฐติ แผ่นสุวรรณ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

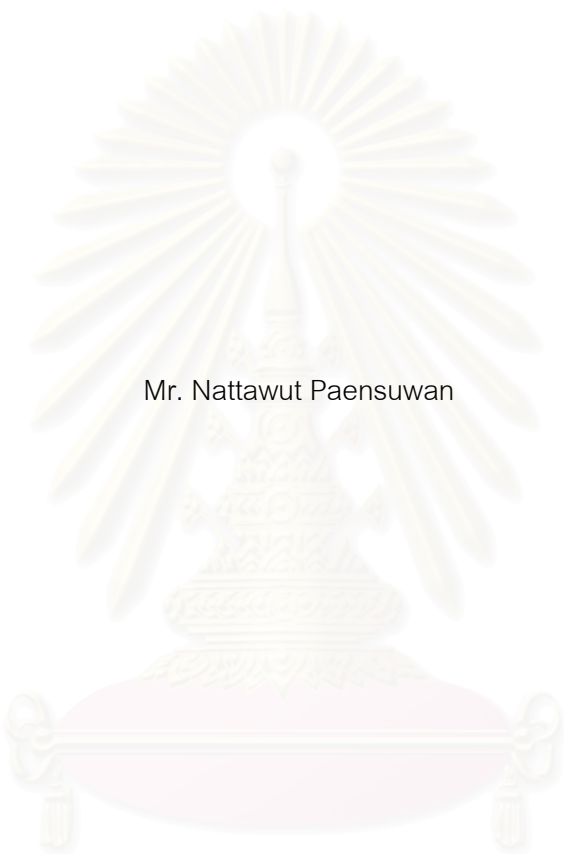
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2801-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POWER LOSS ASSESSMENT IN POWER SYSTEM WITH CONSIDERATION
OF POWER AND VOLTAGE UNCERTAINTY



Mr. Nattawut Paensuwan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

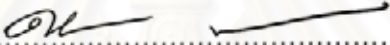
Chulalongkorn University

Academic year 2005

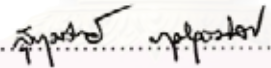
ISBN 974-53-2801-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า
โดย	นายฉัฐวุฒิ แผ่นสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
 (ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


 ประธานกรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทช์ ภูมิวุฒิสาร)


 อาจารย์ที่ปรึกษา
 (รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)


 กรรมการ
 (อาจารย์ ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)


 กรรมการ
 (คุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญชูานนท์)

ณัฐวุฒิ แผ่นสุวรรณ : การประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังโดยพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของค่ากำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า. (POWER LOSS ASSESSMENT IN POWER SYSTEM WITH CONSIDERATION OF POWER AND VOLTAGE UNCERTAINTY)

อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, 140 หน้า. ISBN 974-53-2801-4.

กำลังไฟฟ้าสูญเสียมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นกว่าในอดีตทั้งในแง่ของเทคนิค เศรษฐศาสตร์และมาตรฐานการดำเนินการ ในปัจจุบันการไฟฟ้าหลายแห่งกำหนดให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็นดัชนีตัวหนึ่งที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพการดำเนินงานและใช้เป็นส่วนประกอบในการวางแผนและควบคุม ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งครอบคลุมปัญหาทั้งในระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับระบบส่งจะประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยอาศัยทฤษฎีพีชชีและการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชี เพื่อคิดผลจากความไม่แน่นอนในส่วนของข้อมูลป้อนเข้าอันประกอบด้วยค่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือค่าขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันเป็นต้น สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส อย่างไรก็ตามการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยวิธีดังกล่าวโดยทั่วไปมักประสบปัญหาในทางปฏิบัติเนื่องจากข้อมูลไหลของหม้อแปลงจำหน่ายนั้นไม่มีการตรวจวัดและบันทึกไว้ ทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ามีไม่ครบถ้วน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้แนะนำแบบจำลองไหลด้วยการกระจายค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่วัดได้ ณ สถานีจ่ายไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกที่ติดตั้งอยู่ในระบบ โดยอาศัยค่าสัดส่วนที่คำนวณมาจากค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization factor) ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า นอกจากนี้ค่าสัดส่วนดังกล่าวใช้ในการปรับค่าโหลดที่จุดโหลดต่างๆในแต่ละรอบการคำนวณจนกระทั่งค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้ ณ ต้นทางสายป้อนเท่ากับค่าที่ตรวจวัด จากนั้นจึงประมาณค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะแนะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่สามารถประยุกต์ใช้กับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชี โดยจะพิจารณาผลจากความไม่แน่นอนของความยาวสายที่ใช้และความไม่แน่นอนของการกระจายตัวของโหลด ผลจากการนำวิธีที่ได้เสนอในข้างต้นมาใช้จะทำให้การประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีความยืดหยุ่นและถูกต้องมากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... *ณัฐวุฒิ แผ่นสุวรรณ*
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *[Signature]*
 ปีการศึกษา.....2548..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4770291521: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: LOSS / FUZZY SET THEORY / POWER FLOW / FUZZY POWER FLOW

NATTAWUT PAENSUWAN: POWER LOSS ASSESSMENT IN POWER SYSTEM WITH CONSIDERATION OF POWER AND VOLTAGE UNCERTAINTY. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. BUNDHIT EUA-ARPORN, 140 pp. ISBN 974-53-2801-4.

Power loss has become more important than in the past not only on the technical and economic, but also on the regulatory aspects. It has been used as one of the key performance indices to measure system performance. In addition, power loss is usually one of the controlling factors on evaluating alternative planning and operative strategies. Therefore, this thesis proposes methods to estimate power loss for both transmission and distribution systems. For high voltage transmission and sub-transmission systems, power loss is determined from fuzzy power flow analysis which takes into account uncertainty in system input data, e.g., forecasted demand, generation, and voltage magnitude at voltage-controlled buses. For medium voltage distribution systems, power loss is estimated from three-phase power flow analysis. However a conventional power flow calculation is not applicable since the load information which is the distribution transformer load is not generally measured. Therefore, the power recorded by CSCS at a substation is distributed to each distribution transformer corresponding to the factors calculated from utilization factors given by expert utility officers. These factor are also used to adjust load at every load point in each iteration until the calculated power of the slack bus is equal to the recorded one. The total system load is then estimated. For low voltage distribution systems, a mathematical model is proposed which helps reduce the complexity of a problem. With the developed model, power loss is then estimated from fuzzy power flow analysis taking into account uncertainty in line length and demand. The obtained result is more flexible and lies within an acceptable range.

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....*Nattawut Paensuwan*.....
 Field of study.....Electrical Engineering.....Advisor's signature.....*B. Bundhit*.....
 Academic year.....2005.....Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีมาตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. สุขุมวิทย์ ภูมิวุฒิสาร อาจารย์ ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี และคุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอขอบพระคุณการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลของระบบทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อน พี่น้องทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินงาน.....	3
1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
2. การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	5
2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	5
2.1.1 การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	7
2.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อหาผลเฉลย ของสมการเพาเวอร์โฟลว์.....	8
2.1.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส.....	12
2.2 สรุปการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า ด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	19
3. ทฤษฎีพีชชีเซต ตัวเลขพีชชี.....	21
3.1 แนวและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีพีชชี.....	21
3.2 ทฤษฎีพีชชีเซต.....	22
3.2.1 การนำเสนอของพีชชีเซต.....	25
3.2.2 λ -level cut ของพีชชีเซต.....	26
3.2.3 คุณสมบัติความเป็น Convex.....	27
3.2.4 พีชคณิตบนช่วง.....	28

บทที่	หน้า
3.2.5 ตัวเลขฟัซซี่.....	29
3.2.6 ฟังก์ชันฟัซซี่.....	30
3.2.7 Defuzzification.....	31
3.3 สรุปการประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซี่เซตกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	33
4. การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งและระบบจำหน่าย.....	34
4.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียและแนวทางการประเมิน.....	34
4.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่ง.....	37
4.2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี่.....	38
4.3 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันปานกลาง.....	42
4.3.1 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยค่าสัดส่วนในขั้นต้น.....	42
4.3.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการกระจายโหลดแบบสุ่ม.....	45
4.4 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ.....	51
4.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ.....	51
4.4.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ.....	60
5. ผลการทดสอบ.....	62
5.1 ระบบทดสอบและผลการทดสอบสำหรับระบบส่ง.....	62
5.2 ระบบทดสอบและผลการทดสอบสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง.....	77
5.3 ระบบทดสอบและผลการทดสอบสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ.....	94
5.4 สรุปผลการทดสอบ.....	105
6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	106
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	106
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก.....	111
ภาคผนวก ก ระบบทดสอบ.....	112
ภาคผนวก ข ข้อมูลจากระบบ CSCS.....	133
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ข้อมูลหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในระบบตัวอย่าง.....	46
5.1 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 14 บัส.....	65
5.2 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 30 บัส.....	65
5.3 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 57 บัส.....	65
5.4 ตัวประกอบการใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า.....	79
5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	80
5.6 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันอังคารที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	81
5.7 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันพุธที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	82
5.8 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันพฤหัสบดีที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	83
5.9 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันศุกร์ที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	84
5.10 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันเสาร์ที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	85
5.11 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันอาทิตย์ที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	86
5.12 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 และ 4 เทียบกับกรณีที่ 2....	93
5.13 ข้อมูลมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบทดสอบแรงดันต่ำ.....	99
5.14 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในระบบทดสอบแรงดันต่ำ.....	100
ก.1 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบขนาด 14 บัส.....	113
ก.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 14 บัส.....	114
ก.3 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบขนาด 30 บัส.....	116
ก.4 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 30 บัส.....	117
ก.5 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบขนาด 57 บัส.....	120
ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 57 บัส.....	122
ก.7 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบสายป้อนที่ 2.....	126
ก.8 ข้อมูลสายในวงจรทดสอบสายป้อนที่ 2.....	127
ก.9 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบแรงดันต่ำ.....	130
ก.10 ข้อมูลสายในวงจรทดสอบแรงดันต่ำ.....	132
ข.1 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันจันทร์ที่ 23 พ.ค. 2548.....	133
ข.2 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันอังคารที่ 24 พ.ค. 2548.....	134
ข.3 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันพุธที่ 25 พ.ค. 2548.....	135

ข.4	ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันพฤหัสบดีที่ 26 พ.ค. 2548.....	136
ข.5	ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันศุกร์ที่ 27 พ.ค. 2548.....	137
ข.6	ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันเสาร์ที่ 28 พ.ค. 2548.....	138
ข.7	ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันอาทิตย์ที่ 29 พ.ค. 2548.....	139



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แผนผังการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	11
3.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set) และฟัซซีเซต.....	24
3.2 ลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set) และฟัซซีเซตตามตัวอย่างที่ 3.1.....	25
3.3 ลักษณะความเป็น Convex ของฟัซซีเซต และลักษณะฟัซซีเซตที่ Normalized.....	27
3.4 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ.....	30
4.1 ระบบทดสอบตัวอย่างของ IEEE ขนาด 30 บัส.....	37
4.2 ตัวเลขฟัซซีของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ.....	39
4.3 แผนผังการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี.....	41
4.4 แผนผังการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง ด้วยค่าสัดส่วนในขั้นต้น.....	44
4.5 ระบบตัวอย่าง.....	45
4.6 ผลการกระจายโหลดแบบสุ่ม.....	49
4.7 แผนผังการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยการกระจายโหลดแบบสุ่ม.....	50
4.8 วงจรด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง.....	51
4.9 วงจรสมมูลด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง.....	52
4.10 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอ.....	53
4.11 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอ.....	53
4.12 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร.....	55
4.13 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร.....	55
4.14 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ต้นวงจร.....	56
4.15 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ต้นวงจร.....	57
4.16 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่กลางวงจร.....	58
4.17 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่กลางวงจร.....	58
4.18 วงจรสมมูลของสายป้อนในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ.....	60
5.1 ตัวเลขฟัซซีค่าโหลดที่มีความไม่แน่นอน 10 %.....	63
5.2 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 1 ของระบบทดสอบ 14 บัส.....	66
5.3 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2 ของระบบทดสอบ 14 บัส.....	66
5.4 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 ของระบบทดสอบ 14 บัส.....	67

5.5	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 ของระบบทดสอบ 14 บัส.....	67
5.6	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 5 ของระบบทดสอบ 14 บัส.....	68
5.7	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 6 ของระบบทดสอบ 14 บัส.....	68
5.8	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 1 ของระบบทดสอบ 30 บัส.....	69
5.9	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2 ของระบบทดสอบ 30 บัส.....	69
5.10	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 ของระบบทดสอบ 30 บัส.....	70
5.11	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 ของระบบทดสอบ 30 บัส.....	70
5.12	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 5 ของระบบทดสอบ 30 บัส.....	71
5.13	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 6 ของระบบทดสอบ 30 บัส.....	71
5.14	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 1 ของระบบทดสอบ 57 บัส.....	72
5.15	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2 ของระบบทดสอบ 57 บัส.....	72
5.16	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 ของระบบทดสอบ 57 บัส.....	73
5.17	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 ของระบบทดสอบ 57 บัส.....	73
5.18	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 5 ของระบบทดสอบ 57 บัส.....	74
5.19	ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 6 ของระบบทดสอบ 57 บัส.....	74
5.20	ระบบทดสอบสายป้อนที่ 2 อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา.....	78
5.21	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ ของวันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	87
5.22	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ ของวันอังคารที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	87
5.23	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ ของวันพุธที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	88
5.24	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ ของวันพฤหัสบดีที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	88
5.25	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ ของวันศุกร์ที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	89
5.26	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ ของวันเสาร์ที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	89
5.27	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ ของวันอาทิตย์ที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	90

5.28 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ในวันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	91
5.29 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ในวันพุธที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2548.....	92
5.30 ระบบทดสอบแรงดันต่ำของการไฟฟ้านครหลวง เขตบางกะปิ.....	95
5.31 วงจรสมมูลสำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3.....	96
5.32 วงจรสมมูลสำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4.....	97
5.33 ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3.....	103
5.34 ตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4.....	104
ก.1 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบขนาด 14 บัส.....	112
ก.2 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบขนาด 30 บัส.....	115
ก.3 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบขนาด 57 บัส.....	119
ก.4 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบสายป้อนที่ 2 อำเภอ เสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา.....	125
ก.5 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบแรงดันต่ำของการไฟฟ้านครหลวง เขตบางกะปิ.....	129

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกได้เป็น 3 ระบบหลักๆ คือ ระบบผลิต (Generation system) ระบบส่ง (Transmission system) และระบบจำหน่าย (Distribution system) แต่ละระบบจะมีหน้าที่แตกต่างกันไปโดยระบบผลิตทำหน้าที่ในการผลิตไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและเพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมถึงการวางแผนขยายกำลังการผลิตเพื่อรองรับปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต ระบบส่งมีหน้าที่จัดส่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไปสู่สถานีจ่ายไฟฟ้าต้นทางให้เหมาะสม ส่วนระบบจำหน่ายมีหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าต้นทางไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเพื่อจัดจำหน่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าต่างๆที่อยู่ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีคุณภาพไฟฟ้า ณ ราคาที่เหมาะสม

ระบบส่งในที่นี้ประกอบด้วยระบบส่งของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและระบบส่งย่อยของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระบบส่งเริ่มต้นจากการรับไฟฟ้าที่ผลิตจากโรงไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและโรงไฟฟ้าเอกชนก่อนที่จะแปลงระดับแรงดันโดยหม้อแปลงเพื่อส่งที่ระดับแรงดัน 230-500 kV ไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าต้นทางของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งจะลดระดับแรงดันลงเป็น 69 หรือ 115 kV ซึ่งจะเป็นในส่วนของระบบส่งย่อย (Sub-transmission system) จากนั้นจะส่งต่อไปที่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Distribution substation) จากนั้นจะถูกแปลงโดยหม้อแปลงสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (Substation transformer) ให้มีขนาดแรงดันลดลงเป็น 12, 24 หรือ 33 kV ก่อนส่งไปยังบริเวณต่างๆโดยสายป้อน แล้วจึงแปลงแรงดันให้ต่ำลงเหลือ 220/380 หรือ 240/400 V โดยหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution transformer) จากนั้นจึงเดินสายแรงต่ำไปสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราศึกษาเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งและระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและต่ำตามลำดับ การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งโดยทั่วไปจะคำนวณจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดา อย่างไรก็ตามสำหรับการวางแผนในระยะยาว การขยายกำลังการผลิตเพื่อรองรับความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมาจากการพยากรณ์โดยอาศัยข้อมูลทางสถิติและแบบจำลองที่เหมาะสม ซึ่งตามความเป็นจริงนั้นข้อมูลดังกล่าวย่อมมีความไม่แน่นอนรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้อง

กับการนำผลไปใช้งานในอนาคตเราจึงควรพิจารณาผลของความไม่แน่นอนดังกล่าวด้วยซึ่งทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความยืดหยุ่นและถูกต้องมากขึ้น

สำหรับระบบจำหน่ายปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียอยู่ที่ความพร้อมและความถูกต้องของข้อมูลที่ต้องใช้ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะและปริมาณการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งปัจจัยเกี่ยวกับการวัด การบันทึกและการจัดเก็บข้อมูลที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องของข้อมูลด้วยเช่นกัน ดังนั้นความถูกต้องของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จึงเป็นสิ่งสำคัญมากเพื่อให้การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีความถูกต้อง แม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าต่างๆดังนี้ ระบบส่งจะประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยอาศัยทฤษฎีฟัซซีและการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีเพื่อคิดผลจากความไม่แน่นอนในส่วนของข้อมูล อาทิเช่นค่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดัน เป็นต้น

สำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองโหลดด้วยการกระจายค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่วัดได้ ณ สถานีจ่ายไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกที่ติดตั้งอยู่ในระบบ โดยอาศัยค่าสัดส่วนที่คำนวณมาจากค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization factor) ของหม้อแปลงจำหน่ายที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า

ส่วนการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีได้ โดยคิดผลจากความไม่แน่นอนของความยาวสายที่ใช้และความไม่แน่นอนของตำแหน่งโหลด ผลจากการนำวิธีที่ได้เสนอในข้างต้นมาใช้จะทำให้การประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีความยืดหยุ่นและถูกต้องมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) นำเสนอวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งและระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ โดยอาศัยหลักการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีและทฤษฎีฟัซซี
- 2) เพื่อศึกษาผลของการประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory) เนื่องจากความไม่แน่นอนและความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลที่มีผลต่อการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสีย
- 3) เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งและระบบจำหน่าย

1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งและระบบจำหน่าย
- 2) พิจารณาเฉพาะ Technical loss
- 3) ไม่พิจารณาถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Distributed generator) ในระบบจำหน่าย
- 4) ไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากจุดต่อ กระแสดีสซาร์จจากอุปกรณ์ที่ไม่สมบูรณ์
- 5) พิจารณาระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและต่ำเฉพาะที่เป็นแบบเรเดียล

1.4 ขั้นตอนศึกษาและวิธีดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
- 2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับพีซีเซตและการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ
- 3) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบที่จะนำมาทดสอบ
- 4) ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 5) ออกแบบ ปรับปรุงและพัฒนาโปรแกรม
- 6) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 7) เรียบเรียงผลงานวิจัย พิมพ์ผลงานและจัดเข้ารูปเล่มเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาและสามเฟส โดยอาศัยวิธี Newton-Raphson

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่จำเป็นของฟัซซีเซต (Fuzzy set) ตัวเลขฟัซซี (Fuzzy number) และพีชคณิตฟัซซี (Fuzzy arithmetic)

บทที่ 4 กล่าวถึงการประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าโดยแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักคือ ระบบส่ง ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ โดยที่แต่ละระบบจะพิจารณาลักษณะของปัญหาและเลือกใช้วิธีการที่แตกต่างกัน สำหรับระบบส่งจะใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีเพื่อคิดผลกระทบจากความไม่แน่นอนของข้อมูลที่มาจากการพยากรณ์ ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยอาศัยแบบจำลองการกระจายโหลดที่เหมาะสมด้วยค่าสัดส่วน และระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีเพื่อพิจารณาผลจากความไม่สมบูรณ์ของข้อมูล

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากการใช้วิธีที่นำเสนอ สำหรับระบบส่งจะใช้ระบบทดสอบขนาด 14, 30 และ 57 บัสตามลำดับ สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะทดสอบด้วยวงจรทดสอบสายป้อนที่ 2 อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าขนาด 225 kVA ลูกหนึ่งในเขตบางกะปิของการไฟฟ้านครหลวง

บทที่ 6 กล่าวถึง บทสรุป ประโยชน์ที่ได้และข้อดี ข้อเสียของวิธีการที่นำเสนอ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า [1-2]

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นเริ่มต้นจากการพิจารณาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น แผนภาพเส้นเดี่ยว (Single line diagram) ของระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งนี้ข้อมูลที่เราให้ความสนใจเป็นอันดับแรกคือข้อมูลประจำสายส่งแต่ละเส้นซึ่งเราสามารถแทนวงจรต่อเฟสได้ด้วยวงจรแบบ π โดยข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และแอดมิตแตนซ์อัดประจุ (Line-charging admittance) (Y_{sus}) ค่าต่างๆเหล่านี้จำเป็นต้องใช้เพื่อคำนวณค่าสมาชิกต่างๆของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (Bus admittance matrix) สำหรับระบบไฟฟ้าขนาด N บัสนั้น เราสามารถเขียนค่าสมาชิกเหล่านี้ในรูปทั่วไปได้ด้วย Y_{ij} ซึ่งกำหนดโดย

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + j|Y_{ij}| \sin(\theta_{ij}) \quad (2.1)$$

นอกจากนี้ข้อมูลที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ายังรวมถึงค่าอิมพีแดนซ์และค่าพิคคของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ค่าพิคคของตัวเก็บประจุต่อขนาน (Shunt capacitor) และการตั้งค่าแทปของหม้อแปลงเป็นต้น นอกจากนี้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเรามักจำเป็นต้องกำหนดค่าของแรงดันประจำบัสและกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัสสำหรับบัสบางประเภทจึงจะทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าตอบได้ ดังที่จะอธิบายต่อไป

ทั้งนี้เราสามารถเริ่มขั้นตอนในการพิจารณาปัญหาได้โดยอาศัยพิคคเชิงขั้วในการกำหนดค่าแรงดันที่บัส i ใดๆในระบบไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.2)

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos(\delta_i) + j|V_i| \sin(\delta_i) \quad (2.2)$$

กระแสไฟฟ้าสุทธิที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ บัส i ในพจน์ของสมาชิกของแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{iN}V_N = \sum_{k=1}^N Y_{ik}V_k \quad (2.3)$$

กำหนดให้ P_i และ Q_i แทนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟสุทธิที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ บัส i ซึ่งเราสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ว่า $P_i + jQ_i = V_i I_i^*$ ดังนั้นเมื่ออาศัยสมการที่ (2.2) และ (2.3) เราจะได้ค่าตั้งยุคเชิงซ้อน (Complex conjugate) ของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าบัส i คือ

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^N Y_{ik} V_k \quad (2.4)$$

ซึ่งเราสามารถแทนค่าได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) เป็นดังนี้

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^N |Y_{ik} V_i V_k| \angle \theta_{ik} + \delta_k - \delta_i \quad (2.5)$$

เมื่อทำการกระจายสมการที่ (2.5) และแยกสมการส่วนจริงและส่วนจินตภาพเราจะได้

$$P_i = \sum_{k=1}^N |V_i V_k Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (2.6)$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^N |V_i V_k Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (2.7)$$

สมการที่ (2.6) และ (2.7) คือสมการเพาเวอร์โพลว์ ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาลำดับกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟตามลำดับ โดยที่สมการเพาเวอร์โพลว์ทั้งสองสมการนั้นมีลักษณะเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นต้องใช้วิธีการแก้สมการไม่เชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยของสมการ วิธีการที่เหมาะสมสำหรับการแก้สมการไม่เชิงเส้นโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณคือวิธีการวิเคราะห์เชิงเลข (Numerical analysis method) ด้วยกระบวนการทำซ้ำ (Iterative method) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธีเช่น วิธีของเกาส์ (Gauss method) วิธีของเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel method) และวิธีของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เป็นต้น วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพลว์มากที่สุดคือวิธีของนิวตัน-ราฟสันเนื่องจากมีข้อดีคือมีคุณสมบัติการลู่เข้าหาคำตอบที่รวดเร็วแบบกำลังสอง (Quadratic convergence) [4] ใช้เวลาในการคำนวณทั้งหมดน้อยกว่าวิธีอื่นและจำนวนรอบของการคำนวณซ้ำไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้วิธีของนิวตัน-ราฟสันในการผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพลว์สำหรับการคำนวณที่ระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1.0 ในส่วนของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีซีซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

2.1.1 การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

ในการหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นจำนวน N สมการและจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า N ตัวแปรดังสมการที่ (2.8)

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_2 \\ &\vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_N) &= b_N \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่

x_1, x_2, \dots, x_N คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า
 b_1, b_2, \dots, b_N คือ ตัวแปรที่ทราบค่า

ถ้าเริ่มรอบการคำนวณด้วยค่าประมาณเริ่มต้น $x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0$ สำหรับตัวแปรที่ไม่ทราบค่า และถ้า $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N$ เป็นค่าปรับแต่ง (Correction) ใช้สำหรับปรับค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพื่อให้ผลเฉลยคู่เข้าสู่คำตอบจะได้

$$\begin{aligned} f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) &= b_1 \\ f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) &= b_2 \\ &\vdots \\ f_N(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) &= b_N \end{aligned} \quad (2.9)$$

ใช้อนุกรมเทย์เลอร์ประมาณฟังก์ชันในสมการที่ (2.9) โดยพิจารณาถึงพจน์ที่มีอันดับอนุพันธ์เท่ากับหนึ่งและเมื่อ $i = 1, 2, \dots, N$ จะได้

$$\begin{aligned} f_i(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, x_N^0 + \Delta x_N) \\ = f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0) + \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_i^{(0)}}{\partial x_N} \Delta x_N \\ = b_i \end{aligned} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.9) และ (2.10) จะได้เซตของสมการเชิงเส้นในรูปของเมตริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \\ \vdots \\ b_N - f_N(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_N^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1^{(0)}}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2^{(0)}}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N^{(0)}}{\partial x_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_N^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

หรือ
$$\Delta f = J\Delta x \quad (2.12)$$

โดยที่

J คือ เมทริกซ์ของอนุพันธ์ย่อย ซึ่งเรียกว่าจาโกเบียนเมทริกซ์ (Jacobian matrix)

การหาผลเฉลยของระบบสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน จะอาศัยกระบวนการทำซ้ำ โดยการสมมติค่าคำตอบในตอนเริ่มต้นแล้วคำนวณหาค่าปรับแต่งเพื่อนำไปปรับค่าคำตอบในรอบถัดไป การปรับแต่งจะกำหนดโดยสมการที่ (2.13)

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \quad (2.13)$$

2.1.2 การประยุกต์ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อหาผลเฉลยของสมการเพาเวอร์โพลว์

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เราจะจำแนกบัสออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

บัสอ้างอิง (Slack Bus)

บัสอ้างอิงเป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อยุบัสหนึ่งในระบบซึ่งทำหน้าที่ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งแอกทีฟและรีแอกทีฟเพื่อให้ระบบเกิดความสมดุลของกำลังไฟฟ้า ณ บัสอ้างอิงนี้เราจะทำการกำหนดขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าโดยที่ยังไม่สามารถระบุค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟได้

บัสควบคุมแรงดัน (PV Bus)

บัสทุกบัสในระบบที่ต่อยุบัสกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นบัสควบคุมแรงดันยกเว้นบัสอ้างอิง โดยบัสควบคุมแรงดันเป็นบัสที่เราสามารถกำหนดการผลิตกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ส่วนค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟจะเป็นตัวแปรอิสระและมุมของแรงดันไฟฟ้าจะเป็นตัวแปรสถานะ (State variable) ของบัส

โหลดบัส (PQ Bus)

โหลดบัสเป็นบัสในระบบที่ไม่ต่อเชื่อมอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โหลดบัสเราจะทราบค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ ส่วนค่าขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าในบัสนี้จะเป็นตัวแปรสถานะ (State variable) ของระบบ

จากสมการที่ (2.6)-(2.7) ทำให้ทราบว่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟของแต่ละบัสเป็นฟังก์ชันในเทอมของขนาดและมุมเฟสของแรงดันของทุกบัส เมื่อเราระบุค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟในแต่ละบัสด้วยตัวยก Sch เราสามารถเขียนสมการเพาเวอร์โพลวได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 P_1(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) &= P_1^{Sch} \\
 &\vdots \\
 P_N(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) &= P_N^{Sch} \\
 Q_1(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) &= Q_1^{Sch} \\
 &\vdots \\
 Q_N(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) &= Q_N^{Sch}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

ในทำนองเดียวกับสมการที่ (2.11) เราสามารถแสดงสมการที่ (2.14) ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} P_1^{Sch} - P_1(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) \\ \vdots \\ P_N^{Sch} - P_N(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) \\ Q_1^{Sch} - Q_1(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) \\ \vdots \\ Q_N^{Sch} - Q_N(\delta_1, \dots, \delta_N, V_1, \dots, V_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \vdots \\ \Delta\delta_N \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} & \frac{\partial P_N}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} & \frac{\partial Q_N}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

สมการที่ (2.15) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

ดังนั้นในทุกๆรอบของการคำนวณเราจะได้ค่าปรับแต่ง (Correction) ของขนาดและมุมเฟสของแรงดันในแต่ละบัสดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

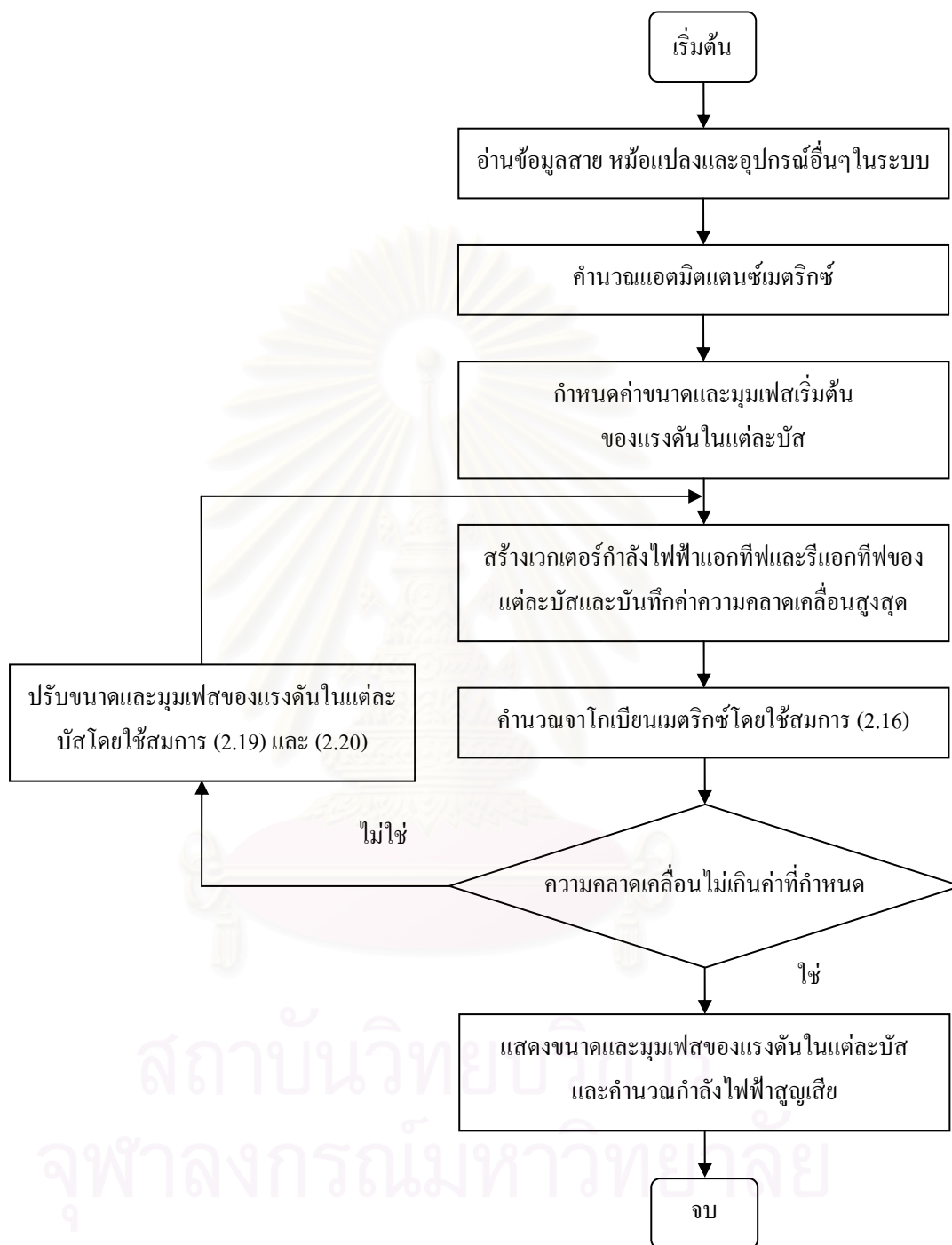
จากสมการที่ (2.13) และ (2.18) จะได้ว่า

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta \delta^{(k)} \quad (2.19)$$

$$V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta V^{(k)} \quad (2.20)$$

เราสามารถสรุปขั้นตอนการแก้สมการเพาเวอร์โฟลว์แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 แผนผังการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

2.1.3 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส [1-2]

สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางเราจะพิจารณากรณีที่ระบบเป็นแบบสามเฟส ซึ่งอาจเกิดความไม่สมดุลขึ้นในระบบได้ ดังนั้นเพื่อทำให้ง่ายต่อการคำนวณ ฟอर्टেসคิว (Fortescue) ได้พิสูจน์ไว้ว่า ระบบ n เฟสเซอร์ที่ไม่สมดุลสามารถที่จัดให้อยู่ในรูปของระบบที่เฟสเซอร์สมดุลได้ n ระบบ ซึ่งเรียกว่า “องค์ประกอบสมมาตร” ของเฟสดั้งเดิม

จากทฤษฎีของฟอर्टেসคิว (Fortescue's theorem) [2] ระบบสามเฟสไม่สมดุลสามารถจัดให้อยู่ในรูปของระบบที่เฟสเซอร์สมดุล 3 ระบบ ได้ดังนี้

1. องค์ประกอบลำดับบวก ประกอบด้วยขนาดที่เท่ากันทั้งสามเฟสแต่ละเฟสมีมุมต่างกัน 120° และมีลำดับเฟสเช่นเดียวกับเฟสดั้งเดิม
2. องค์ประกอบลำดับลบ ประกอบด้วยขนาดที่เท่ากันทั้งสามเฟสแต่ละเฟสมีมุมต่างกัน 120° และมีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับเฟสดั้งเดิม
3. องค์ประกอบลำดับศูนย์ ประกอบด้วยขนาดที่เท่ากันทั้งสามเฟสแต่ละเฟสจะอยู่ในทิศทางเดียวกัน

ดังนั้นจากข้อมูลที่อยู่ในรูปขององค์ประกอบสมมาตร เราสามารถทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเฟส abc โดยใช้เมตริกซ์การแปลง (Transformation matrix) ดังนี้

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

โดย $a = e^{j(2\pi/3)} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

เนื่องจากแบบจำลองสายจำหน่ายเป็น Stationary bilateral element ดังนั้นเมตริกซ์ที่ได้จะสมมาตรซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

โดยที่

Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ (zero-sequence)

Z_1 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวก (positive-sequence)

Z_2 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับลบ (negative-sequence)

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (2.22) และ (2.23) จะได้ว่า

$$Z_0 = Z_s + 2Z_m \quad (2.24)$$

$$Z_1 = Z_s - Z_m \quad (2.25)$$

$$Z_2 = Z_s - Z_m \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.21) จะได้ว่า

$$[Z_{abc}] = [T][Z_{012}][T]^{-1} \quad (2.27)$$

$$Z_{abc} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

โดยที่ $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_s$

$Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{ba} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_{cb} = Z_m$

ในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถเขียนสมการทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$[I_{bus}] = [Y_{bus}][V_{bus}] \quad (2.30)$$

โดย $[Y_{bus}]$ เป็นแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ซึ่งแสดงถึงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆในระบบ เราสามารถเขียนแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในรูปของจำนวนเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$[Y_{bus}] = [G_{bus}] + j[B_{bus}] \quad (2.31)$$

สำหรับทุกๆโหนดบัส i จะได้กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนในแต่ละเฟสดังนี้

$$S_i^p = V_i^p (I_i^p)^* = V_i^p \left(\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^3 Y_{ik}^{pm} V_k^m \right)^* \quad (2.32)$$

แทนค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในสมการที่ (2.32) ได้ดังนี้

$$S_i^p = |V_i^p| \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^3 |V_k^m| \left(\cos(\delta_i^p - \delta_k^m) + j \sin(\delta_i^p - \delta_k^m) \right) (G_{ik}^{pm} - jB_{ik}^{pm}) \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) เราสามารถแสดงกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในแต่ละเฟสที่ได้จากการคำนวณดังนี้

$$P_i^p = |V_i^p| \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^3 |V_k^m| \left(G_{ik}^{pm} \cos(\delta_i^p - \delta_k^m) + B_{ik}^{pm} \sin(\delta_i^p - \delta_k^m) \right) \quad (2.34)$$

$$Q_i^p = |V_i^p| \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^3 |V_k^m| \left(G_{ik}^{pm} \sin(\delta_i^p - \delta_k^m) - B_{ik}^{pm} \cos(\delta_i^p - \delta_k^m) \right) \quad (2.35)$$

เราสามารถหาคำนวนการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน โดยวิธีการทำซ้ำ (Iterative Method) ตามที่ได้กล่าวในข้างต้น โดยเริ่มจากการสมมติค่าของคำตอบในครั้งแรกก่อน แล้วจึงคำนวณหาค่าผิดพลาด (Mismatch) เพื่อนำไปปรับเปลี่ยนค่าของคำตอบในรอบถัดไป ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^p \\ \Delta Q_i^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i^p \\ \Delta V_i^p \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad \text{คือ จาโกเบียนเมตริกซ์}$$

ΔP_i^p คือ ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟผิดพลาดในแต่ละเฟส

ΔQ_i^p คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟผิดพลาดในแต่ละเฟส

เราสามารถเขียนสมการแสดงค่ากำลังไฟฟ้าผิดพลาดได้ดังนี้

$$\Delta P_i^p = (P_i^p)^{Sch} - |V_i^p| \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^3 |V_k^m| (G_{ik}^{pm} \cos(\delta_i^p - \delta_k^m) + B_{ik}^{pm} \sin(\delta_i^p - \delta_k^m)) \quad (2.37)$$

$$\Delta Q_i^p = (Q_i^p)^{Sch} - |V_i^p| \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^3 |V_k^m| (G_{ik}^{pm} \sin(\delta_i^p - \delta_k^m) - B_{ik}^{pm} \cos(\delta_i^p - \delta_k^m)) \quad (2.38)$$

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{abc}}{\partial \delta_{abc}} & \frac{\partial P_{abc}}{\partial V_{abc}} \\ \frac{\partial Q_{abc}}{\partial \delta_{abc}} & \frac{\partial Q_{abc}}{\partial V_{abc}} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

โดยที่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อทราบจาโกเบียนเมตริกซ์และค่ากำลังไฟฟ้าผิดพลาด เราสามารถทำการคำนวณหาขนาดและมุมของแรงดันเพื่อนำไปคำนวณหาผลตอบใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_{1a} \\ \Delta\delta_{1b} \\ \Delta\delta_{1c} \\ \vdots \\ \Delta\delta_{Na} \\ \Delta\delta_{Nb} \\ \Delta\delta_{Nc} \\ \Delta V_{1a} \\ \Delta V_{1b} \\ \Delta V_{1c} \\ \vdots \\ \Delta V_{Na} \\ \Delta V_{Nb} \\ \Delta V_{Nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{1a} \\ \Delta P_{1b} \\ \Delta P_{1c} \\ \vdots \\ \Delta P_{Na} \\ \Delta P_{Nb} \\ \Delta P_{Nc} \\ \Delta Q_{1a} \\ \Delta Q_{1b} \\ \Delta Q_{1c} \\ \vdots \\ \Delta Q_{Na} \\ \Delta Q_{Nb} \\ \Delta Q_{Nc} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

จะได้ว่า

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta\delta^{(k)} \quad (2.45)$$

$$V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta V^{(k)} \quad (2.46)$$

เมื่อได้ค่า δ และ V ใหม่ นำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ทำการคำนวณซ้ำต่อไปจนกระทั่งค่ากำลังไฟฟ้าผิดพลาดที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงที่เราสามารถยอมรับได้ซึ่งโดยทั่วไปช่วงที่ยอมรับได้จะอยู่ที่ประมาณ $10^{-3} - 10^{-4}$

2.2 สรุปการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นเป็นส่วนหนึ่งของ Technical loss ที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่า Technical loss ในส่วนอื่นๆ อาทิเช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสียบริเวณจุดต่อ (Junction loss) หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการคิสรจของอุปกรณ์ที่ไม่สมบูรณ์เป็นต้นนั้นไม่สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไป อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียดังกล่าวโดยทั่วไปมีสัดส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะมีความละเอียดและแม่นยำซึ่งทำให้การไฟฟ้าสามารถประเมินและแยกแยะพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบสาเหตุของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นว่ามาจากส่วนใดมากน้อยเพียงใด อันจะทำให้การไฟฟ้าสามารถกำหนดแนวทางการลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า 2 ประเภทอันประกอบด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส โดยที่แต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาในระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังนี้

การประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งจะอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสมดุล เนื่องจากโดยทั่วไปการไฟฟ้าจะพยายามจัดโหลดที่แต่ละจุดโหลด (จุดโหลดในระบบส่งคือสถานีไฟฟ้า) ให้มีความสมดุลในแต่ละเฟสทำให้สามารถพิจารณาเสมือนเป็นระบบสามเฟสสมดุลได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการวางแผนระยะยาวในอนาคต (Long-term planning) การประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลจะมีความเหมาะสมเนื่องจากข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากการพยากรณ์นั้นจะระบุเป็นปริมาณโดยรวมไม่ได้เจาะจงสัดส่วนในแต่ละเฟส

การประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสเนื่องจากจุดโหลดในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางคือหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งมีทั้งชนิดเฟสเดียวและสามเฟส โดยเฉพาะระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางในเขตชนบทมักมีการติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าเฟสเดียวเป็นจำนวนมาก การจัดโหลดให้มีความสมดุลจึงทำได้ยากและผลจากความไม่สมดุลนั้นทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นดังนั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสจึงมีความเหมาะสมสำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรายังคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กด้วย (Transformer core loss) เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางส่วนมากมาจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของ

หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าตามที่ระบุไว้ใน [19] โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าดังกล่าวจะมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับปริมาณการใช้ไฟฟ้า (No load loss)

ส่วนระบบจำหน่ายแรงดันต่ำมีลักษณะความไม่สมดุลของโหลดเช่นเดียวกับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางซึ่งควรจะประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส แต่พบว่าในทางปฏิบัติวิธีดังกล่าวไม่เหมาะสมเนื่องจากระบบจำหน่ายแรงดันต่ำมีปริมาณข้อมูลเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น จุดโหลด (ผู้ใช้ไฟฟ้า) ในบางระบบอาจมีมากกว่า 200 ราย ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณและข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้าบางรายอาจไม่ครบถ้วน ดังนั้นการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลแทนและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของปัญหาทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยลง ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้จึงเป็นค่าขั้นต่ำเนื่องจากเราละเลยผลกระทบจากความไม่สมดุล



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีฟัซซีเซต ตัวเลขฟัซซี

ปัญหาที่สำคัญในการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าอยู่ที่ความพร้อมและความถูกต้องของข้อมูล ดังนั้นในบทที่ 3 นี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของฟัซซีเซต ตัวเลขฟัซซี เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนเพื่อนำไปประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าต่อไป

3.1 แนวคิดและความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซี [3]

แนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซีเซตได้ถูกนำเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1965 โดย “Zadeh” ลักษณะที่สำคัญที่เป็นจุดเด่นของทฤษฎีฟัซซีเซตคือทฤษฎีฟัซซีเซตเป็นแนวทางในการอธิบายถึงความคลุมเครือ (Vagueness) ความไม่ชัดเจนของคำพูด คำอธิบายในเชิงภาษา (Linguistic expression) หรือความไม่ชัดเจนของข้อมูลให้ออกมาในรูปของคณิตศาสตร์ได้

โดยการพิจารณาแนวคิดและหลักการพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซตจะพบว่า หลักการพื้นฐานที่แตกต่างกันระหว่างความเป็นฟัซซี (Fuzziness) และความน่าจะเป็น (Probability) คือความเป็นฟัซซีนั้นเกี่ยวข้องกับความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ที่หาค่าหรือกำหนดได้ (Deterministic plausibility) ความเป็นฟัซซีเป็นรูปลักษณะหนึ่งของความไม่แน่นอนเป็นความคลุมเครือที่พบในคำจำกัดความของแนวคิดหรือความหมายของคำ พิจารณาตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น “โหลดในช่วงเย็นวันจันทร์มีค่าประมาณ 2500 MW” จะเห็นได้ว่าคำกล่าวนี้ ระบุว่าเกิดโหลดค่าหนึ่งในตอนเย็นวันจันทร์อย่างแน่นอนและสามารถระบุขอบเขตของค่านั้นๆได้คือประมาณ 2500 MW แต่ไม่สามารถระบุค่าอย่างเจาะจงได้ ซึ่งคำว่า “ประมาณ” ที่ใช้ไม่ได้บ่งชี้ว่าจะต้องมีช่วงของค่ากว้างหรือแคบเพียงใด ในขณะที่ความน่าจะเป็นจะเกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็น (Likelihood) ของเหตุการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์หรือกำหนดได้ (Non-deterministic) และเป็นแบบ Stochastic ความไม่แน่นอนตามแนวคิดของความน่าจะเป็นนั้นจะเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ซึ่งมีลักษณะแบบสุ่ม (Randomness) พิจารณาตัวอย่างเช่น “เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีโอกาสเสียถ้าใช้งานติดต่อกันเกิน 4000 ชั่วโมง” จากคำกล่าวนี้เหตุการณ์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเสียหรือไม่นั้นไม่สามารถทราบได้และขึ้นกับสถานะในเวลาปัจจุบันที่พิจารณา บางทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจมีโอกาสเสียก่อนที่มีการใช้งานเป็นเวลาถึง 4000 ชั่วโมงก็ได้

จากตัวอย่างทั้งสองจะพบว่าการกล่าวถึงความไม่แน่นอนในลักษณะของโหลดเทียบกับความไม่แน่นอนในสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความแตกต่างกัน

นอกจากนี้ความเป็นฟัซซี (Fuzziness) และความเป็นเชิงสุ่ม (Randomness) แตกต่างกันในการแสดงความไม่แน่นอน โดยความเป็นฟัซซีจะแสดงความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแตกต่างทางความคิดหรือคำจำกัดความที่ขึ้นกับแต่ละคนจะคิด (Subjective) ส่วนความเป็นเชิงสุ่มจะแสดงความไม่แน่นอนทางด้านทฤษฎีหรือรูปธรรม (Objective) ซึ่งเป็นข้อมูลที่อ้างอิงถึงสถิติ (Statistic)

ความแตกต่างระหว่างความเป็นฟัซซีและความน่าจะเป็นนั้นหากพิจารณาจากการสร้างแบบจำลอง (Modeling) แล้วจะพบว่าแบบจำลองฟัซซีและแบบจำลองทางสถิติ (Statistical model) ประกอบด้วยชนิดของข้อมูลที่แตกต่างกันในเชิงปรัชญาคือแบบจำลองฟัซซีจะแสดงอยู่ในรูปของค่าความเป็นสมาชิก (Membership) ที่แสดงถึงความคล้ายกันของวัตถุต่างๆที่ไม่สามารถระบุคุณสมบัติอย่างชัดเจนโดยค่าความเป็นสมาชิกนั้นจะได้มาจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ที่กำหนดขึ้นส่วนแบบจำลองทางสถิติจะแสดงถึงการเกิดของข้อมูลในเชิงความถี่สัมพันธ์ สำหรับความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function, pdf) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) มีดังต่อไปนี้

- 1) pdf แสดงความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้น (Likelihood) ของ x ใดๆ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะแสดงถึงค่าความเป็นสมาชิกของ x ใดๆในเซต
- 2) ค่ามากที่สุดของ pdf จะเป็นตัวเลขจำนวนจริงบวกค่าหนึ่งโดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า 1 ส่วนค่าที่มากที่สุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1
- 3) การอินทิเกรต (Integrate) ฟังก์ชัน pdf จะได้ค่าความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative probability) ส่วนการอินทิเกรตฟังก์ชันความเป็นสมาชิกไม่มีนิยาม
- 4) รอยตัดในแต่ละระดับตามแนวนอนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เรียกว่า λ -level cut จะแสดงถึงค่าความเป็นสมาชิกในเซตที่ระดับความเชื่อมั่นหนึ่งๆ ส่วนกรณีของ pdf นั้นไม่มีนิยาม

3.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory) [3]

เซตตามความหมายดั้งเดิม (Classical crisp set) คือการจัดกลุ่มของวัตถุ (Object) ที่มีลักษณะเหมือนกันหรือสอดคล้องกันตามคำนิยามของเซตนั้นนำมาไว้รวมเป็นกลุ่มเดียวกัน การกำหนดนิยามของเซตจะเป็นไปในแนวทางเพื่อแบ่งแยกกลุ่มวัตถุต่างๆในขอบเขตทั้งหมดที่เราสนใจหรือเอกภพสัมพัทธ์ (Universe of discourse) ออกเป็นสองกลุ่มคือเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิก ลักษณะขอบเขตในการแบ่งแยกการเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกของเซตจะถูกกำหนดอย่างแน่นอน (Crisp) และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันที ณ เส้นแบ่งขอบเขตนั้น

เราสามารถนิยามเซตความหมายดั้งเดิม (Crisp set) โดยการกำหนดฟังก์ชันที่จะระบุถึงคุณสมบัติหรือลักษณะเฉพาะของเซตนั้น (Characteristic function) ถ้ากำหนดให้ U คือขอบเขตทั้งหมดที่เราสนใจหรือเอกภพสัมพัทธ์ ฟังก์ชันคุณสมบัติของเซต A (Crisp set) ใน $U(\mu_A(x))$ จะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 นั่นคือ

$$\begin{aligned}\mu_A(x) &= 1 \text{ เมื่อ } x \in A \\ &= 0 \text{ เมื่อ } x \notin A\end{aligned}\quad (3.1)$$

สังเกตว่าตรงจุดขอบเขตของเซต A จะมีลักษณะคมและแบ่งแยกกลุ่มของ x ออกเป็นสองกลุ่มอย่างชัดเจน นั่นคือ $x \in A$ หรือ $x \notin A$

ฟuzzy เซต (Fuzzy set) มีลักษณะที่แตกต่างจากเซตดั้งเดิมตรงที่ได้ขยายหลักการพื้นฐานของเซตดั้งเดิมออกไปและแสดงออกในรูปแบบทั่วไปยิ่งขึ้น (Generalization) โดยฟuzzy เซตจะแสดงลักษณะของความคลุมเครือ ความไม่ชัดเจนโดยการกำหนดขอบเขตในการแบ่งแยกความเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจนตามหลักการดั้งเดิมออกไปและกำหนดให้ค่าของความเป็นสมาชิกค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นจากความไม่เป็นสมาชิกเลยไปถึงระดับที่มีความเป็นสมาชิกเต็มที่หรือในทางตรงกันข้ามค่าความเป็นสมาชิกจะค่อยๆลดลงจากระดับที่มีความเป็นสมาชิกเต็มที่ไปจะถึงระดับที่ไม่มีความเป็นสมาชิกเลย

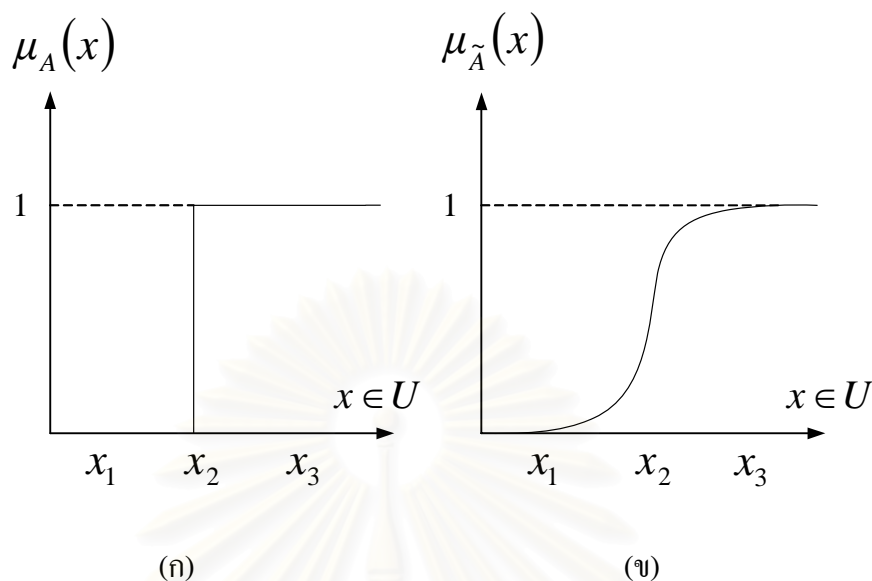
ฟuzzy เซต \tilde{A} (ใช้สัญลักษณ์ $\tilde{\cdot}$ แสดงถึงฟuzzy เซต) ในเอกภพสัมพัทธ์ U สามารถแสดงได้ในลักษณะของเซตของคู่อันดับ ดังนี้

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

โดย $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$ คือ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของ \tilde{A} และ $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$ จะแสดงถึงระดับความเป็นสมาชิกของ x ใน \tilde{A} หรืออาจมองได้ว่า $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$ แสดงถึงการจัดลำดับของวัตถุต่างๆใน \tilde{A} โดยเรียงตามระดับความเป็นสมาชิก ในกรณีที่

- $\mu_{\tilde{A}}(\cdot): U \rightarrow M \mid M = \{0,1\}$ โดย M คือ ค่าความเป็นสมาชิกที่เป็นไปได้ (Membership space) กรณีนี้เซต \tilde{A} จะไม่เป็นฟuzzy เซตแต่จะเป็นเซตดั้งเดิม
- $\mu_{\tilde{A}}(\cdot): U \rightarrow M \mid M \subset R^+, \sup(M) = \infty$ เซต \tilde{A} จะเป็นฟuzzy เซตซึ่งโดยปกติทั่วไปจะกำหนดให้ $M = [0,1]$

รูปที่ 3.1(ก) แสดงฟังก์ชันคุณสมบัติของเซต (Crisp) A และรูปที่ 3.1(ข) แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต \tilde{A} ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set) และฟัซซีเซต

ตัวอย่างที่ 3.1 กำหนดให้ U เป็นเอกภพสัมพัทธ์บนเส้นจำนวนจริง R และเซต (Crisp) A เป็นเซตของจำนวนจริงที่มากกว่าหรือเท่ากับ 5 จะได้ว่า

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}$$

โดยฟังก์ชันคุณสมบัติ (Characteristic function) สำหรับเซตนี้ คือ

$$\begin{aligned} \mu_A(x) &= 0 \text{ เมื่อ } x < 5 \\ &= 1 \text{ เมื่อ } x \geq 5 \end{aligned}$$

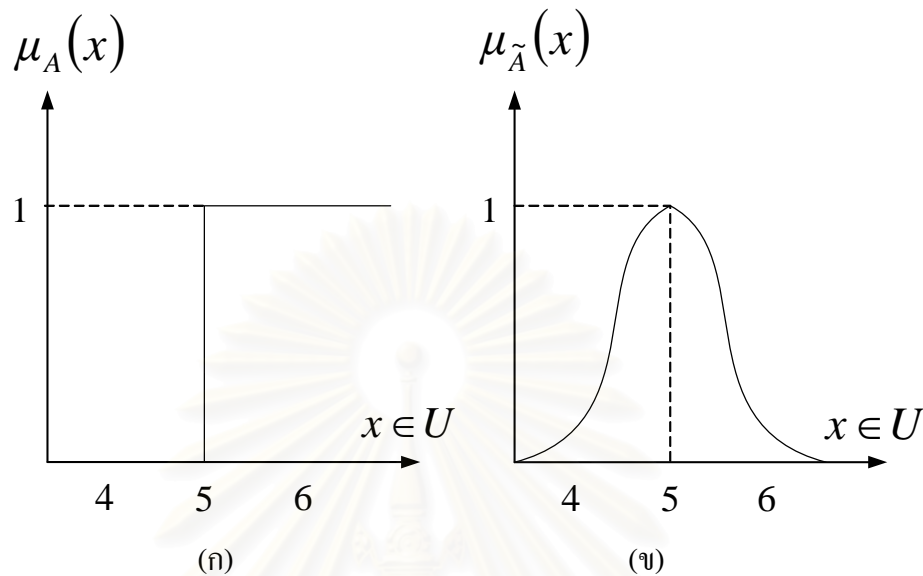
ดังแสดงในรูป 3.2(ก) ถ้าให้ฟัซซีเซต \tilde{A} เป็นเซตของ จำนวนจริงที่ใกล้เคียง 5 จะได้ว่า

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

โดยที่ในกรณีนี้เราสามารถกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ดังนี้

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{1}{1 + 10(x - 5)^2}$$

ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข) สังเกตว่าเราสามารถเลือกใช้หรือกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับ \tilde{A} ได้หลายรูปแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวผู้กำหนดเอง (Subjective) ว่าต้องการจะกำหนดให้มีลักษณะเป็นแบบใด



รูปที่ 3.2 ลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม (Crisp set) และฟัซซีเซตตามตัวอย่างที่ 3.1

ทั้งนี้การกำหนดลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นขึ้นอยู่กับการศึกษาว่าลักษณะของฟังก์ชันใดเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้อธิบายและจัดลำดับองค์ประกอบหรือวัตถุต่างๆ ใน \tilde{A} เพื่อให้สอดคล้องกับนิยามของเซต \tilde{A} นั้น

3.2.1 การนำเสนอของฟัซซีเซต (Representation of fuzzy set)

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

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

ฟัซซีเซตที่เป็นเซตว่าง (Empty fuzzy set) จะมี $\text{supp}(\tilde{A})$ 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 + 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 มีค่าต่อเนื่อง (Continuous) จะได้ว่า

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

โดยที่เครื่องหมาย \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 (Convexity)

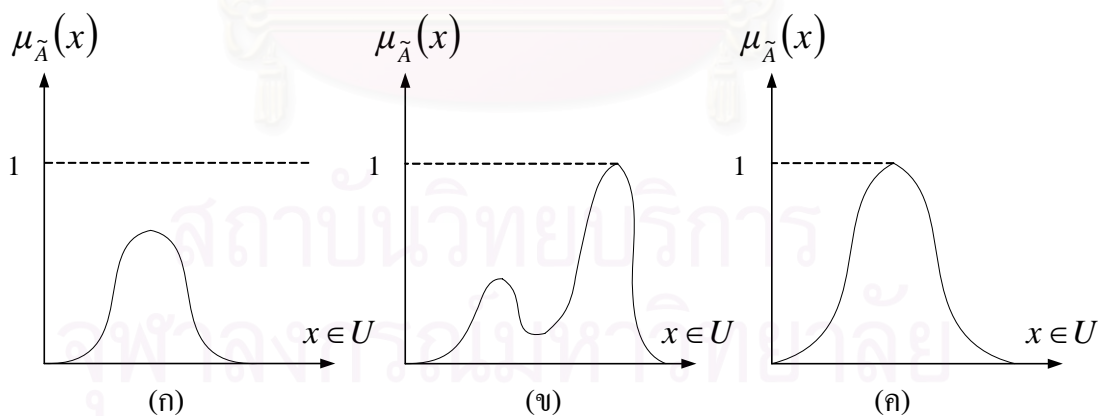
ฟังก์ชันเซตจะมีคุณสมบัติ Convex ก็ต่อเมื่อแต่ละ λ -level cut ของฟังก์ชันเซตเป็นเซตที่ Convex กล่าวคือ

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

โดย $x_1, x_2 \in U$ และ $\alpha \in (0,1]$ จากสมการที่ (3.9) กล่าวได้ว่า เมื่อพิจารณาจุด 2 จุดใดๆ คือ x_1, x_2 ในฟังก์ชันเซต \tilde{A} เมื่อลากเส้นตรงเชื่อมจุดสองจุดดังกล่าวแล้ว ค่าความเป็นสมาชิกของทุกๆ จุด (x) บนเส้นตรงจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความเป็นสมาชิกของ x_1 หรือ x_2 แล้วแต่ที่ว่าค่าใดต่ำกว่ากัน นอกจากนี้ พิจารณานิยามความสูงของฟังก์ชันเซต (Height of fuzzy set) ดังนี้

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

จากนิยามความสูงของฟังก์ชันเซตตามสมการที่ (3.10) กล่าวได้ว่า ฟังก์ชันเซตที่ถูก Normalize แล้วจะมีค่า $Height(\tilde{A}) = 1$ รูปที่ 3.3(ก) แสดงตัวอย่างฟังก์ชันเซตที่ Convex แต่ไม่ Normalized รูปที่ 3.3(ข) แสดงตัวอย่างฟังก์ชันเซตที่ Normalized แต่ไม่ Convex และรูปที่ 3.3(ค) แสดงตัวอย่างฟังก์ชันเซตที่ Convex และ Normalized ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ลักษณะความเป็น Convex ของฟังก์ชันเซต และลักษณะฟังก์ชันเซตที่ Normalized

3.2.4 พีชคณิตบนช่วง (Interval arithmetic)

ส่วนมากงานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมจะเกี่ยวข้องกับค่าที่ไม่แน่นอนหรือข้อมูลที่ไม่เที่ยงตรงอันเป็นผลจากผู้วัดหรือเครื่องมือวัดซึ่งค่าเหล่านี้มักถูกระบุในลักษณะเป็นช่วงของค่า (Interval) เราจึงใช้การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical operation) ในการกระทำบนช่วงเหล่านี้เพื่อที่จะได้ค่าประมาณของการวัดที่เชื่อถือได้แสดงอยู่ในรูปของช่วง ดังนั้นการวิเคราะห์ช่วงของค่า (Interval analysis) หรือ พีชคณิตบนช่วง (Interval arithmetic) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณประเภทนี้

พิจารณาค่าหรือข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ที่มีค่าไม่แน่นอนเราสามารถระบุตำแหน่งค่าที่ไม่แน่นอนนี้บนเส้นจำนวนจริงได้ภายในช่วงปิด (Closed interval) ช่วงหนึ่งนั่นคือ ค่าที่ไม่แน่นอนจะอยู่ภายในช่วงของความเชื่อมั่นหนึ่ง (Interval of confidence) ของ $R, x \in [a_1, a_2]$ โดย $a_1 \leq a_2$ การกระทำเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าเราแน่ใจว่าค่า x นั้นมากกว่าหรือเท่ากับ a_1 และน้อยกว่าหรือเท่ากับ a_2 หรือกล่าวได้ว่าเราจำกัดความไม่แน่นอนของข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่ถูกกำหนดโดย ขอบบนและขอบล่าง (a_1 และ a_2)

กำหนดให้สัญลักษณ์ $A = [a_1, a_2]$ ในการแสดงถึงช่วงของค่าช่วงหนึ่งและถ้าค่าที่ไม่แน่นอน (x) อยู่ภายในช่วงปิดนี้จะเขียนได้ว่า

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

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

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

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

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

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

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

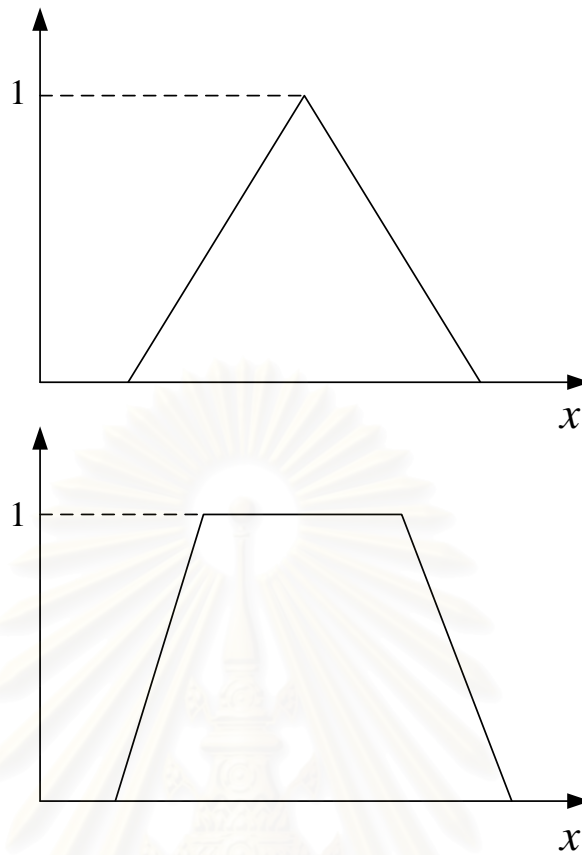
$$A \wedge B = [a_1 \wedge b_1, a_2 \wedge b_2] \quad (3.17)$$

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) $\mu_{\tilde{A}}(\cdot) : R \rightarrow [0,1]$

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

ตัวเลขฟัซซีรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและตัวเลขฟัซซีรูปสามเหลี่ยมเป็นตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูและรูปสามเหลี่ยมตามลำดับซึ่งเป็นตัวเลขฟัซซีที่นิยมใช้กันมากที่สุด ตัวเลขฟัซซีรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal fuzzy number) แสดงถึงข้อความที่ว่า “มีค่าอยู่ในช่วง” และตัวเลขฟัซซีรูปสามเหลี่ยม (Triangular fuzzy number) แสดงถึงข้อความที่ว่า “มีค่าประมาณ” ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีตัวเลขฟัซซีรูปแบบอื่นๆ เช่นตัวเลขฟัซซีที่เป็นรูประฆัง (Bell-shaped) ซึ่งมีทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เพิ่มขึ้นอย่างเดียวหรือลดลงอย่างเดียวซึ่งสื่อถึงข้อความที่ว่า “ตัวเลขค่ามาก” (Large number) และ “ตัวเลขค่าน้อย” (Small number)



รูปที่ 3.4 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ

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 $\lambda \in [0,1]$ เราจะได้ช่วงปิดสองช่วง คือ $A_{\lambda_1} \equiv [a_1^{\lambda_1}, a_2^{\lambda_1}]$ จากตัวเลขฟัซซี \tilde{A} และ $B_{\lambda_1} \equiv [b_1^{\lambda_1}, b_2^{\lambda_1}]$ จากตัวเลขฟัซซี \tilde{B} ซึ่งเราสามารถนำหลักการของพีชคณิตบนช่วงมาประยุกต์ใช้ได้

ดังนั้นเราสามารถมองว่าตัวเลขฟัซซีเป็นการขยายแนวความคิดของช่วงตัวเลข (Interval) คือแทนที่จะพิจารณาช่วงตัวเลขเพียงแค่ระดับเดียว 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 (·) 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 หรือ 2

3.2.7 Defuzzification

Defuzzification คือ การเปลี่ยนตัวเลขฟัซซีให้เป็นตัวเลขธรรมดาที่มีค่าๆหนึ่ง วิธีการ Defuzzification มีด้วยกันหลายวิธีในตอนนี้จะกล่าวถึงเพียง 2 วิธีคือ

1) วิธีจุดศูนย์กลางของพื้นที่ (Center of area method)

วิธีนี้อาจเรียกว่า Center of gravity method หรือ Centroid method พื้นที่ใต้กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จะถูกแบ่งเป็นพื้นที่ที่มีขนาดเท่ากันสองพื้นที่ ค่าที่ได้จากการ Defuzzification คำนวณได้จากสมการ (3.23)

$$d_{CA}(C) = \frac{\int_{-c}^c C(z)zdz}{\int_{-c}^c C(z)dz} \quad (3.23)$$

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

$$d_{CA} = \frac{\sum_{k=1}^n C(z_k) z_k}{\sum_{k=1}^n C(z_k)} \quad (3.24)$$

2) วิธีศูนย์กลางของค่ามากที่สุด (Center of maximum method)

ในวิธีนี้ ค่าที่ได้จากการ Defuzzification จะถูกนิยามเหมือนกับค่าเฉลี่ยของค่าที่น้อยที่สุด และค่าที่มากที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d_{CM}(C) = \frac{\inf M + \sup M}{2} \quad (3.25)$$

โดยที่

$$M = \{z \in [-c, c] \mid C(z) = \text{Height}(C)\} \quad (3.26)$$

ในกรณีที่เป็น Discrete จะคำนวณได้จากสมการ

$$d_{CM} = \frac{\min\{z_k \mid z_k \in M\} + \max\{z_k \mid z_k \in M\}}{2} \quad (3.27)$$

โดยที่

$$M = \{z \in C \mid C(z) = \text{Height}(C)\} \quad (3.28)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 สรุปการประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีเซตกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีเซตกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อพิจารณาผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนหรือความไม่แน่นอนของข้อมูลที่มีผลกระทบต่อการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง อาทิเช่น ค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าในอนาคตจากการพยากรณ์และค่าแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันเป็นต้น โดยเราจะนำเสนอข้อมูลดังกล่าวในลักษณะของตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมแทนตัวเลขธรรมดา เนื่องจากตัวเลขฟัซซีสามารถสะท้อนผลจากความไม่แน่นอนได้ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 จากนั้นเราจะคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีซึ่งรายละเอียดจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 4 โดยมีลักษณะที่สำคัญพอสังเขปดังนี้ ที่ระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 (จุดยอดของรูปสามเหลี่ยม) เราจะคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาและผลตอบที่ได้จะเป็นผลตอบที่คาดการณ์ไว้ซึ่งมีลักษณะเป็นตัวเลขค่าเดียวที่ไม่สามารถสะท้อนผลจากความไม่แน่นอนของข้อมูลได้ ส่วนที่ระดับความเป็นสมาชิกอื่นๆ จะเป็นการแก้ปัญหา Non-linear optimization ที่มีสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นสมการเชิงเส้นซึ่งจะแตกต่างจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปที่มีลักษณะเป็นการแก้ระบบสมการไม่เชิงเส้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีจะเป็นตัวเลขฟัซซีที่สะท้อนผลจากความไม่แน่นอนของข้อมูลต่างๆ ไว้ กล่าวโดยสรุปการพิจารณาผลตอบในรูปของตัวเลขฟัซซีจะทำให้ทราบขอบเขตของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ชัดเจน และสามารถนำเสนอผลจากความไม่แน่นอนได้ในลักษณะที่เป็นรูปธรรมมากขึ้น นอกจากนี้เราสามารถเปลี่ยนตัวเลขฟัซซีไปเป็นตัวเลขธรรมดาได้โดยการ Defuzzify ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 3.2.7

บทที่ 4

การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งและระบบจำหน่าย

4.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียและแนวทางการประเมิน

โดยทั่วไปกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้ [9-12]

1) Technical loss ประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายตัวนำ หม้อแปลงไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลง (Core loss) ในรอยต่อ (Connection loss) และการดิสชาร์จ (Discharge loss)

2) Non-technical loss เป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการตรวจวัดที่ผิดพลาดหรือไม่ครบถ้วนหรือเกิดจากระบบการเก็บข้อมูลที่บกพร่อง โดยทั่วไป Non-technical loss จะคำนวณจากผลต่างระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (Total loss) กับ Technical loss

การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่น่าเสนอนี้ เราจะเน้นไปที่กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสีย ในส่วนของ Technical loss ที่คำนวณได้จากวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าผ่านแบบจำลองไฟฟ้าเช่น สายตัวนำ หม้อแปลงไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ เนื่องจากการไฟฟ้าสามารถนำ Technical loss ที่เกิดขึ้นไปประเมินเพื่อประกอบการวางแผนเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อาทิเช่นการติดตั้งตัวเก็บประจุหรือการกำหนดเกณฑ์การเลือกขนาดหม้อแปลงและสายอย่างเหมาะสมเป็นต้น โดยสรุปแล้ว Technical loss นั้นมีสาเหตุมาจากส่วนประกอบต่างๆซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนสำคัญดังนี้

1) กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขึ้นกับปริมาณการใช้ไฟฟ้า (Load loss) ซึ่งประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสาย (Line loss) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer copper loss) กำลังไฟฟ้าสูญเสียดังกล่าวนี้มีสาเหตุจากการที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานของสายตัวนำ หม้อแปลงไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเพิ่มสูงขึ้นและสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์

2) กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับปริมาณการใช้ไฟฟ้า (No-load loss) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer core loss) โดยเฉพาะระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าเป็นจำนวนมากพบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในส่วนนี้จะ มีค่าสูงโดยมีรายละเอียดระบุไว้ใน [19]

โดยทั่วไปนั้นการไฟฟ้าสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้จากการประมาณโดยใช้ตัวเลขหน่วยซื้อไฟฟ้าหรือหน่วยผลิตไฟฟ้าลบด้วยจำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ขายให้แก่ลูกค้า [19] พลังงานไฟฟ้าสูญเสียดังกล่าวนี้เป็นพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้น (Total loss) ซึ่งประกอบด้วย Technical loss และ Non-technical loss ตามที่ได้กล่าวในข้างต้น จากนั้นการไฟฟ้าจะคำนวณ Technical loss ซึ่งมีแนวทางการคำนวณอยู่หลายวิธี [9-14] โดยทั่วไปแล้วหากต้องการผลการคำนวณที่มีความละเอียดและแม่นยำมักอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งผลตอบที่ได้นั้นทำให้การไฟฟ้าสามารถประเมินและแยกแยะพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบว่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากส่วนใดมากน้อยเพียงใด อันจะทำให้การไฟฟ้าสามารถกำหนดแนวทางการลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียหรือพลังงานไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก ยกตัวอย่างในกรณีระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าที่แต่ละจุดโหลดในแต่ละเวลา ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากไม่มีการติดตั้งมิเตอร์เพื่อตรวจวัดและบันทึกค่าดังกล่าว นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งเนื่องจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อนำไปใช้กับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่มีปริมาณและรายละเอียดของข้อมูลเป็นจำนวนมากและอาจมีไม่ครบถ้วนหรือไม่ชัดเจนซึ่งจะใช้เวลาในการคำนวณนาน สำหรับการคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งนั้นสามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเนื่องจากมีข้อมูลโหลดอย่างครบถ้วนเพราะสถานีไฟฟ้าซึ่งเป็นจุดโหลดของระบบส่งนั้นมีการวัดและจดบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าไว้ประจำทุกๆชั่วโมง อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญสำหรับระบบส่งในการวางแผนระยะยาวคือผลกระทบจากความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ได้จากการประมาณหรือพยากรณ์ เนื่องจากผลตอบที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นไม่สามารถสะท้อนผลจากความไม่แน่นอนได้ ด้วยขีดจำกัดดังกล่าวในการนำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าไปประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ทฤษฎีพีชซีเซตตามที่นำเสนอหลักการไว้ในบทที่ 3 ควบคู่กับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชซี [7-8] มาจัดการกับความไม่แน่นอนหรือความไม่ชัดเจนของข้อมูล และนำเสนอแบบจำลองโหลดเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณและมีความสอดคล้องกับปริมาณข้อมูลที่มีในทางปฏิบัติซึ่งประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีการตรวจวัดตามปกติ เช่นค่ากำลังไฟฟ้าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS (Computer system control substation) ณ สถานีไฟฟ้าและข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้าที่จุดโหลดต่างๆและลักษณะของวงจรที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า ด้วยแบบจำลองดังกล่าวทำให้การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นง่ายขึ้นและช่วยลดเวลาในการคำนวณ ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดกระบวนการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียซึ่งจะดำเนินการโดยแยกพิจารณาแบบออกตามระดับแรงดันไฟฟ้าได้เป็น 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้

- 1) ระบบส่งแรงดันสูง เช่น 230 หรือ 500 kV เป็นต้น
- 2) ระบบส่งย่อยแรงดันสูง เช่น 69 หรือ 115 kV เป็นต้น
- 3) ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง เช่น 22 หรือ 24 kV เป็นต้น
- 4) ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ เช่น 380 หรือ 400 V เป็นต้น

สำหรับวิธีการวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละระบบนั้นมีรายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้

1) ระบบส่งและระบบส่งย่อยแรงดันสูง เราประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยอาศัยทฤษฎีฟิซซีและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟิซซีเพื่อคิดผลจากความไม่แน่นอนของข้อมูล อาทิ เช่นค่าความต้องการใช้ไฟฟ้า กำลังการผลิตไฟฟ้าและระดับแรงดันไฟฟ้าที่บังคับควบคุมแรงดันเป็นต้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้จะอยู่ในรูปของตัวเลขฟิซซีทำให้เราทราบภาพรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ดีขึ้น อาทิเช่นกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากที่สุดและกำลังไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดที่อาจเกิดขึ้น

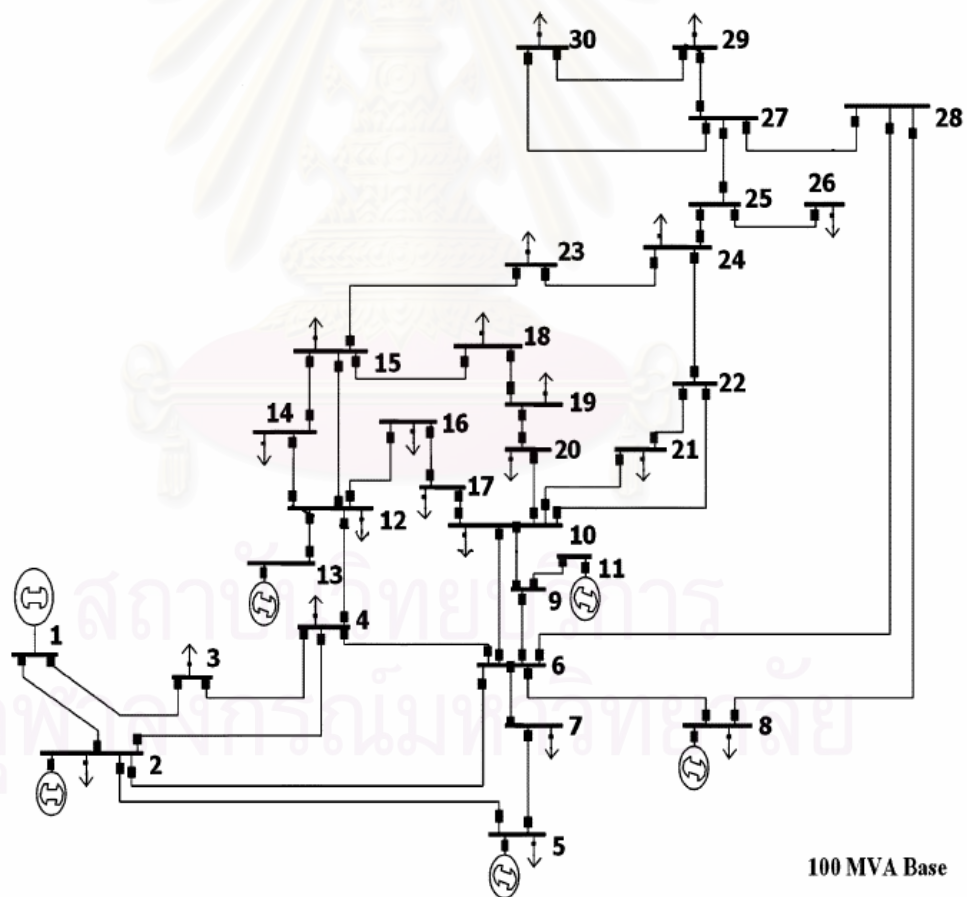
2) ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสเนื่องจากความไม่สมดุลของโหลดในระบบและสร้างแบบจำลองโหลดโดยอาศัยข้อมูลที่มีอยู่ในทางปฏิบัติอันประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS (Computer system control substation) ณ สถานีไฟฟ้าและข้อมูลที่ได้จากการสอบถามเจ้าหน้าที่ไฟฟ้าเกี่ยวกับตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization factor) ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกที่ติดตั้งในระบบ จากนั้นจึงคำนวณค่าสัดส่วนเพื่อใช้สำหรับกระจายและปรับเปลี่ยนค่าโหลดของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกในแต่ละรอบการคำนวณจนกระทั่งค่ากำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้เท่ากับค่าที่ตรวจวัดได้ จากนั้นจึงคำนวณค่าความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมเพื่อนำไปกระจายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแบบสุ่มอีกครั้งจนกระทั่งได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียครบตามที่กำหนดไว้ เช่น 1000 แล้วจึงนำไปคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยและการกระจายตัวต่อไป

3) ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะใช้ทฤษฎีฟิซซีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาเรื่องความไม่ชัดเจนของข้อมูล อาทิเช่น ตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบ ค่าความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าที่พิจารณา เป็นต้น จากนั้นเราจะดัดแปลงแบบจำลองดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำไปวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟิซซีได้ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปของตัวเลขฟิซซีและสามารถทำให้เป็นเลขค่าเดียวได้โดยการ Defuzzify

รายละเอียดของแต่ละวิธีการได้นำเสนอไว้ดังนี้

4.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่ง

ระบบส่งในที่นี้ครอบคลุมในส่วนของระบบส่งแรงดันสูงและระบบส่งย่อยแรงดันสูง โดยระบบส่งแรงดันสูง หมายถึงระบบที่เริ่มจากโรงไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตหรือโรงไฟฟ้าเอกชนที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งที่ระดับแรงดันสูง 230 หรือ 500 kV ไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าต้นทางของระบบจำหน่าย ซึ่งก็คือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง สำหรับระบบส่งย่อยแรงดันสูง หมายถึงระบบที่เริ่มจากสถานีจ่ายไฟฟ้าต้นทาง ส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งที่ระดับแรงดัน 69 หรือ 115 kV ไปยังสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย สำหรับตัวอย่างการเชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตและระบบส่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นระบบทดสอบตัวอย่างของ IEEE ขนาด 30 บัส



รูปที่ 4.1 ระบบทดสอบตัวอย่างของ IEEE ขนาด 30 บัส

4.2.1 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี [7-8]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี (Fuzzy power flow) มาใช้ในการประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งแรงดันสูง ทั้งนี้เนื่องจากความไม่แน่นอนของข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์อันเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์หรือจากการวัดและการจัดเก็บข้อมูล ดังนั้นเราจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีเพื่อคิดผลจากความไม่แน่นอนในส่วนของคุณค่าดังกล่าว

ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้น เรากำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิที่แต่ละโหลดบัสและค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสุทธิและขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดันเป็นตัวแปรอินพุต (Input variable) และกำหนดให้ค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสเป็นตัวแปรสถานะ (State variable) สำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี เราจะเพิ่มในส่วนของคุณค่าตัวแปรผลลัพธ์ (Output variable) ซึ่งก็คือค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแอกทีฟนั่นเอง ดังนั้นเราสามารถเขียนตัวแปรอินพุตและตัวแปรผลลัพธ์ในเทอมของตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ (4.1) ถึงสมการที่ (4.3)

$$P_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (4.1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) \quad (4.2)$$

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4.3)$$

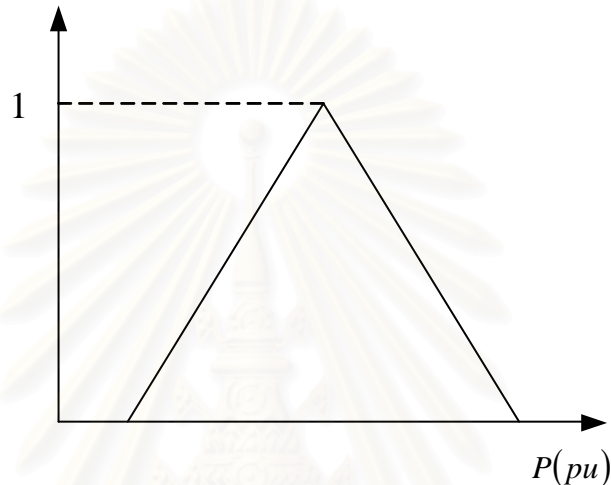
โดยที่

- P_i คือค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสุทธิที่บัส i
- Q_i คือค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟสุทธิที่บัส i
- G_{ij} คือส่วนจริงของสมาชิกแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว i หลัก j
- B_{ij} คือส่วนจินตภาพของสมาชิกแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว i หลัก j
- Y_{ij} คือสมาชิกแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว i หลัก j
- δ_i คือค่ามุมของแรงดันที่บัส i
- δ_j คือค่ามุมของแรงดันที่บัส j

P_{loss} คือค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียค่าจริงทั้งหมดในระบบ

θ_{ij} คือค่ามุมของสมาชิกแอดมิตแดนซ์เมตริกซ์แถว i หลัก j

จากนั้นเราจะกำหนดให้ตัวแปรอินพุตเป็นตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม ที่กำหนดลักษณะของรูปจากค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่แน่นอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวเลขฟัซซีของค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเลขฟัซซีตามที่นำเสนอหลักการไว้ในบทที่ 3 เราสามารถแบ่งการคำนวณออกเป็นการคำนวณย่อยที่แต่ละระดับ λ -level cut โดยที่เราจะทำการคำนวณหาค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรผลลัพธ์ ซึ่งก็คือค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่เป็นตัวเลขฟัซซี (\tilde{P}_{loss}) ทั้งนี้ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางซ้ายหรือค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียค่าจริงที่เป็นไปได้ น้อยที่สุด (\tilde{P}_{loss})_L จะคำนวณจากการทำ Minimization ของตัวแปรผลลัพธ์ และ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางขวาหรือค่าของกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียที่เป็นไปได้มากที่สุด (\tilde{P}_{loss})_R จะคำนวณจากการทำ Maximization ของตัวแปรผลลัพธ์ โดยมีสมการของการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นสมการเงื่อนไข ดังแสดงไว้ในสมการที่ (4.4)

$$\text{Min or Max } P_{loss} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4.4)$$

Subject to

$$P_i - \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) = 0$$

$$Q_i - \sum_{j=1}^N |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) = 0$$

$$(\tilde{P}_i)_L^\lambda \leq P_i \leq (\tilde{P}_i)_R^\lambda$$

$$(\tilde{Q}_i)_L^\lambda \leq Q_i \leq (\tilde{Q}_i)_R^\lambda$$

$$(\tilde{V}_i)_L^\lambda \leq V_i \leq (\tilde{V}_i)_R^\lambda \quad \text{สำหรับบัสควบคุมแรงดัน}$$

โดยที่ แต่ละระดับ λ -level cut จะได้ว่า

$(\tilde{P}_i)_L^\lambda$ คือ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางซ้ายของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสุทธิที่บัส i

$(\tilde{P}_i)_R^\lambda$ คือ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางขวาของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟสุทธิที่บัส i

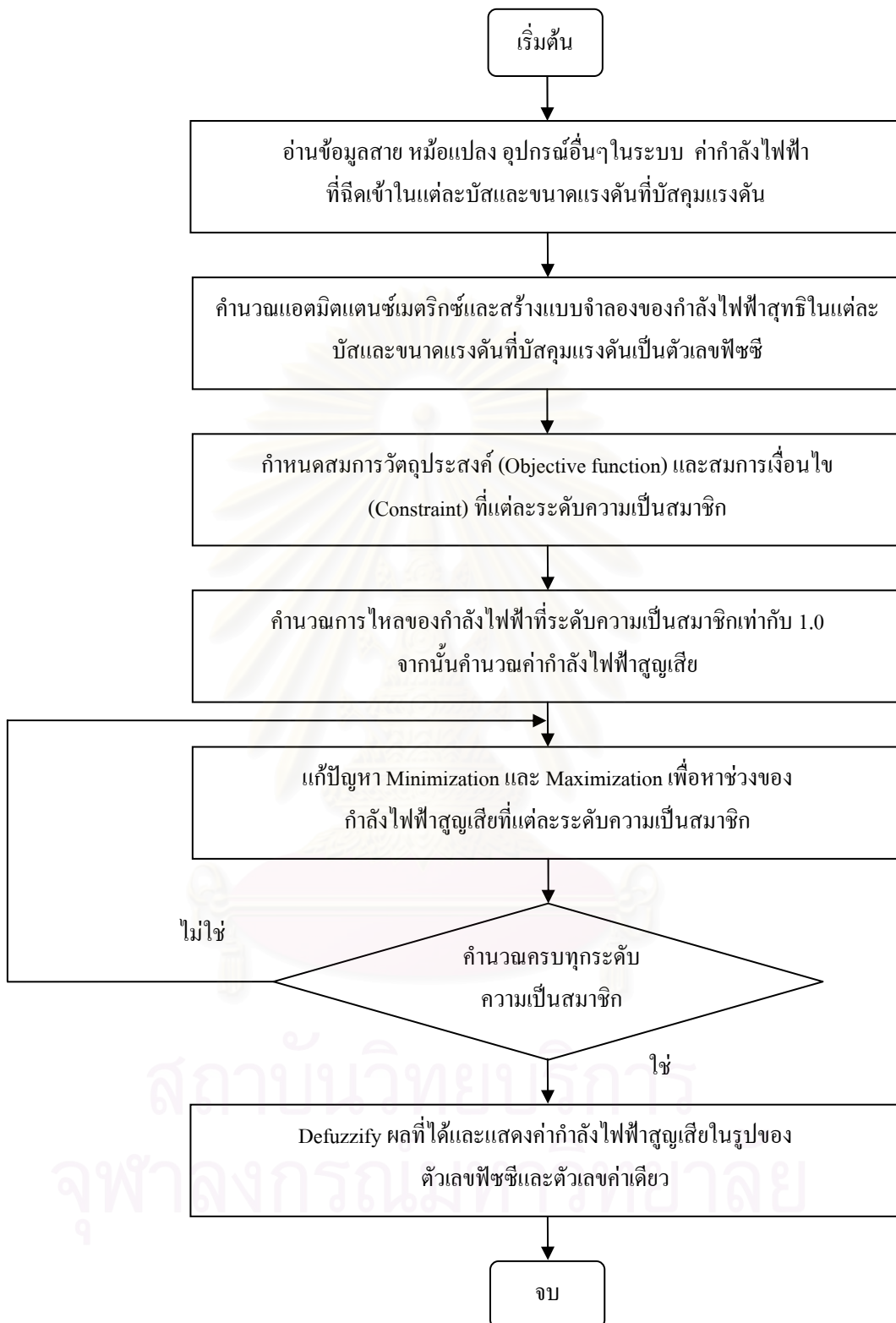
$(\tilde{Q}_i)_L^\lambda$ คือ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางซ้ายของกำลังไฟฟารีแอกทีฟสุทธิที่บัส i

$(\tilde{Q}_i)_R^\lambda$ คือ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางขวาของกำลังไฟฟารีแอกทีฟสุทธิที่บัส i

$(\tilde{V}_i)_L^\lambda$ คือ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางซ้ายของแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดัน i

$(\tilde{V}_i)_R^\lambda$ คือ ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางขวาของแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดัน i

จากนั้นทำการคำนวณจนครบทุกระดับ λ -level cut ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการคำนวณทั้งหมด 5 level cut ดังนี้ 0.0, 0.2, 0.5, 0.8 และ 1.0 level cut ตามลำดับ สำหรับที่ 1.0 level-cut เราจะคำนวณโดยใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดา เราสามารถสรุปขั้นตอนในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzy ได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนผังการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซี

4.3 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันปานกลาง

การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันปานกลางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

4.3.1 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยค่าสัดส่วนในขั้นต้น

เมื่อพิจารณาระบบแรงดันปานกลางเรามักทราบข้อมูลแผนภาพเส้นเดียวที่แสดงแนวการเดินทางสายไฟฟ้าของระบบได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์มักพบปัญหาเนื่องจากความไม่แน่นอนและไม่สมบูรณ์ของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละจุดโหลดเพราะว่าในทางปฏิบัติเรามักทราบเฉพาะปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ผ่านทางต้นสายของสายป้อน ณ สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (P,Q) เท่านั้น ซึ่งข้อมูลนี้อาจได้มาจากการบันทึกค่าของระบบ Computer System Control Substation (CSCS) ซึ่งสามารถทำการบันทึกปริมาณกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังของสายป้อนไว้ทุกๆช่วงเวลาที่กำหนด อาทิเช่น ทุกๆ 15 นาที เป็นต้น

เพื่อที่จะคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสเราต้องสร้างแบบจำลองโหลดขึ้นโดยในขั้นแรก เราสอบถามข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่แต่ละจุดโหลดอย่างคร่าวๆจากเจ้าหน้าที่ไฟฟ้าโดยระบุเป็นระดับ น้อย ปานกลาง มาก จากนั้นเราจะกำหนดค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization factor) ให้สอดคล้องและคำนวณค่าตัวประกอบกำลังจากค่ากำลังไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ ณ สถานีไฟฟ้า เพื่อนำไปคำนวณค่าสัดส่วนซึ่งใช้สำหรับการกระจายค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งบันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูก ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส จากนั้นเรานำค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ต้นทาง (Slack bus) ที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีไฟฟ้ามาปรับเปลี่ยนค่าโหลดของหม้อแปลงจำหน่ายแต่ละลูกและทำซ้ำไปเรื่อยๆจนกระทั่งปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณและปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีไฟฟ้าเท่ากัน จากนั้นเราสามารถคำนวณค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมได้ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมค่าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีไฟฟ้าเนื่องจากค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีไฟฟ้าเป็นผลรวมระหว่างค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมของทุกๆจุดโหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียดังสมการที่ (4.5) และ (4.6)

$$P_{sub} = P_{Load} + P_{Loss} \quad (4.5)$$

$$Q_{sub} = Q_{Load} + Q_{Loss} \quad (4.6)$$

โดย

P_{Sub}, Q_{Sub} คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่บันทึกด้วยระบบ CSCS

P_{Load}, Q_{Load} คือ ผลรวมของปริมาณการใช้ไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่ทุกๆจุดโหลด

P_{Loss}, Q_{Loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียแอกทีฟและรีแอกทีฟ

ในการกระจายและปรับเปลี่ยนค่าโหลดที่จุดโหลดต่างๆ เราใช้ค่าสัดส่วนที่คำนวณจากขนาดของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าและตัวประกอบการใช้ประโยชน์ที่จุดโหลด (λ_i) ดังนี้

$$\lambda_i = \frac{UF_i \times kVA_{Tr(i)}}{\sum_i^N UF_i \times kVA_{Tr(i)}} \quad (4.7)$$

จากนั้น เรากำหนดสมการที่ใช้สำหรับการปรับเปลี่ยนโหลดดังนี้

$$P_{Load(i)}^{(k+1)} = P_{Load(i)}^{(k)} - \lambda_i P_{err}^{(k)} \quad (4.8)$$

$$Q_{Load(i)}^{(k+1)} = Q_{Load(i)}^{(k)} - \lambda_i Q_{err}^{(k)} \quad (4.9)$$

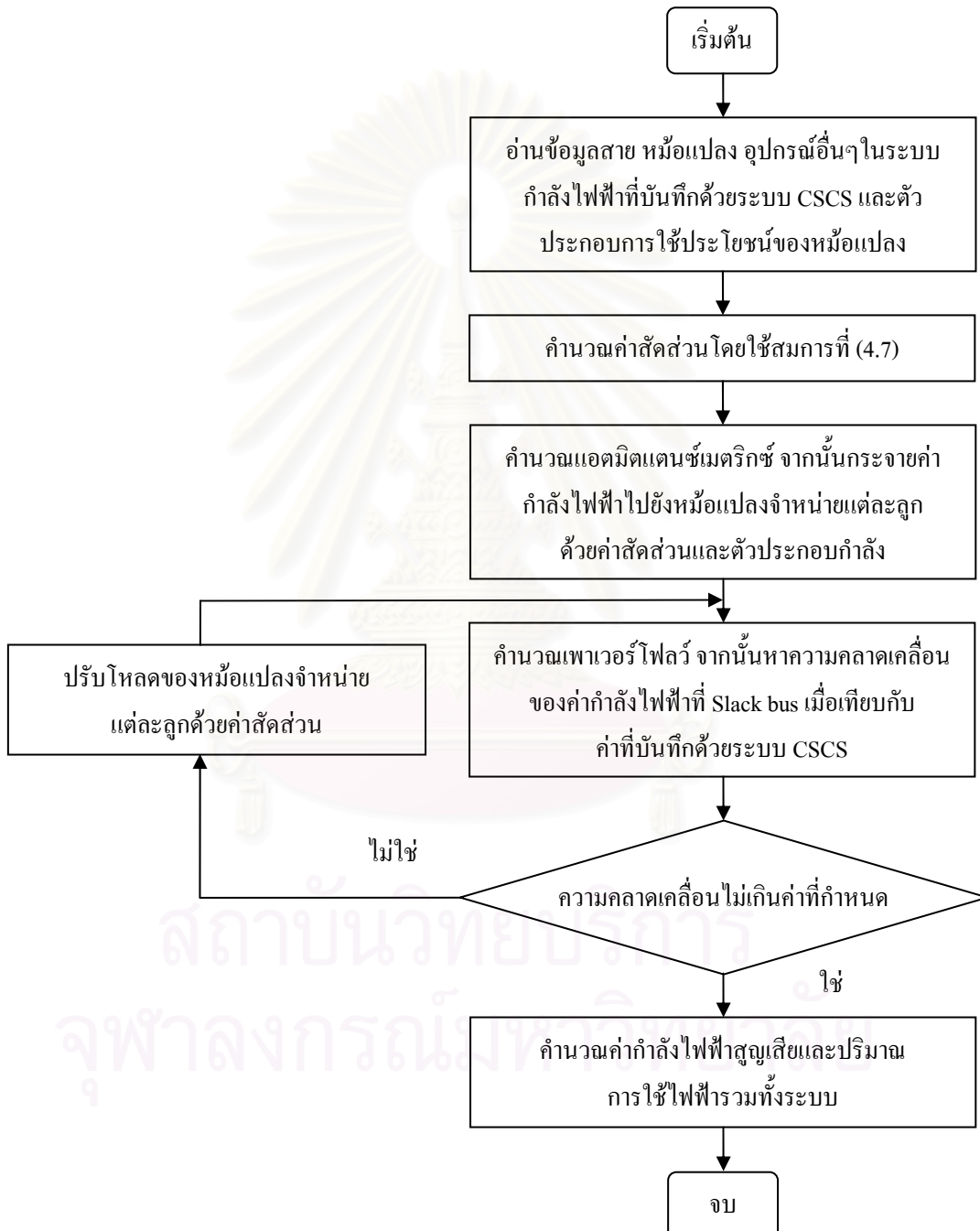
โดยที่ $P_{err}^{(k)}, Q_{err}^{(k)}$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟที่ต้นทาง (Slack bus) จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีไฟฟ้างั้นเราสามารถสรุปหลักการในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 รับข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ เช่นแผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบ ข้อมูลสายตัวนำ และหม้อแปลงที่ใช้ในระบบ จากนั้นทำการคำนวณหาแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ และกำหนดค่าแรงดันเริ่มต้นที่แต่ละบัส

ขั้นที่ 2 กำหนดค่าปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบโดยอาศัยข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ไฟฟ้า ก่อนกระจายโหลดไปสู่จุดโหลดแต่ละจุด

ขั้นที่ 3 ทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส จากนั้นทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากต้นทาง (Slack bus) จากการคำนวณก่อนนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน P_{err}, Q_{err}

ขั้นที่ 4 นำค่าความคลาดเคลื่อนและค่าสัดส่วน ไปปรับเปลี่ยนค่าโหลดที่จุดโหลดต่างๆในระบบ และทำการคำนวณซ้ำในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนกระทั่งค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากต้นทาง (Slack bus) จากการคำนวณเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (CSCS) เราสามารถสรุปขั้นตอนในรูปแบบผังการการคำนวณ ได้ดังนี้

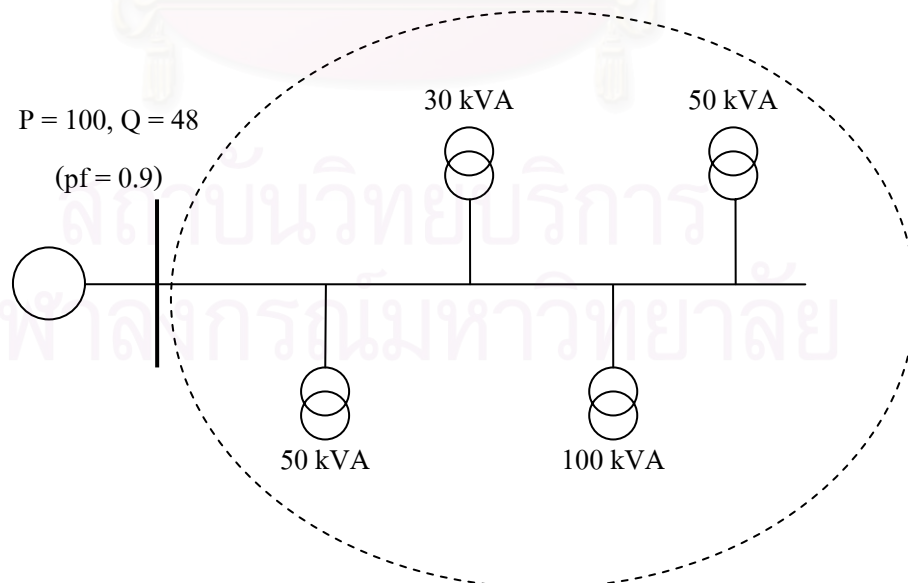


รูปที่ 4.4 แพนผังการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง ด้วยค่าสัดส่วนในขั้นต้น

ความแม่นยำในการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณและความแม่นยำของข้อมูลจากเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า หากเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าสามารถระบุข้อมูลของตัวประกอบการใช้ประโยชน์ได้ครบถ้วนและสอดคล้องกับลักษณะของปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละช่วงเวลา ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความถูกต้องมากขึ้น

4.3.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการกระจายโหลดแบบสุ่ม

เนื่องจากผลตอบที่ได้จากการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขั้นต้นตามที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3.1 นั้นเป็นเพียงผลลัพธ์ค่าหนึ่งของลักษณะโหลดที่อาจเกิดขึ้นซึ่งทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับค่าที่ได้จากการตรวจวัด ดังนั้นผลดังกล่าวย่อมมีโอกาสคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากการกระจายตัวของโหลดที่ประเมินในขั้นต้นนี้ต่างจากความเป็นจริง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการวิธีในการลดผลจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าว โดยนำค่าโหลดรวมที่คำนวณได้จากการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยค่าสัดส่วนในขั้นต้นมากระจายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกในลักษณะสุ่มเพื่อที่จะหารูปแบบที่เป็นไปได้ของโหลดซึ่งจะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดไม่เกิน 2% ก่อนนำค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้จากรูปแบบต่างๆมาหาค่าเฉลี่ยและการกระจายตัวขั้นตอนในการกระจายโหลดแบบสุ่มแสดงไว้ในตัวอย่างต่อไปนี้ พิจารณาระบบตัวอย่างแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ระบบตัวอย่าง

กำหนดให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมมีค่าเท่ากับ $100 + j48$ (ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9) และสมมติให้ค่าตัวประกอบกำลังของหม้อแปลงจำหน่ายแต่ละลูกมีค่าระหว่าง 0.8-0.95 และตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization factor) ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกซึ่งเจ้าหน้าที่ไฟฟ้าประเมินค่าในเบื้องต้น สมมติให้เป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในระบบตัวอย่าง

หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า #	ขนาด (kVA)	ตัวประกอบการใช้ประโยชน์
1	50	0.5
2	30	0.2
3	100	0.5
4	50	0.9

ขั้นแรกเราตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟสูงสุดที่สามารถจ่ายได้จากข้อมูลที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่ไฟฟ้า (พิจารณาที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.95 โดยอาจกำหนดเป็นค่าอื่นได้)

$$\begin{bmatrix} P_{1\max} \\ P_{2\max} \\ P_{3\max} \\ P_{4\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U.F._1 \times size_1 \times 0.95 \\ U.F._2 \times size_2 \times 0.95 \\ U.F._3 \times size_3 \times 0.95 \\ U.F._4 \times size_4 \times 0.95 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \times 50 \times 0.95 \\ 0.2 \times 30 \times 0.95 \\ 0.9 \times 100 \times 0.95 \\ 0.9 \times 50 \times 0.95 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.75 \\ 5.70 \\ 85.50 \\ 42.75 \end{bmatrix}$$

พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟรวมที่จ่ายได้เท่ากับ 157.7 kW ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าการใช้ไฟฟ้ารวม (100 kW) ตามที่กำหนด ดังนั้นค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ที่กำหนดขึ้นนั้นมีความเป็นไปได้ จากนั้นทำการสุ่มค่าจากคำสั่ง rand ใน MATLAB สำหรับตัวอย่างนี้สมมติสุ่มได้ดังนี้

$$[0.7 \ 0.9 \ 0.1 \ 0.4]^T$$

ทำการแปลงค่าที่สุ่มได้ให้เป็นสัดส่วนในการกระจายโหลด ที่กำหนดโดยสมการที่ (4.10)

$$\frac{1}{\sum_1^N R_i} \times R \quad (4.10)$$

โดยที่

R คือ เวกเตอร์ค่าที่สุ่ม

N คือ จำนวนค่าที่ทำการสุ่ม

จะได้ว่าค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงทั้ง 4 ลูกจากการสุ่มดังนี้

$$\frac{1}{(0.7+0.9+0.1+0.4)} \times \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.9 \\ 0.1 \\ 0.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.43 \\ 0.05 \\ 0.19 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่กระจายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกเท่ากับผลคูณระหว่างปริมาณการใช้ไฟฟารวมกับค่าสัดส่วน ดังสมการที่ (4.11)

$$100 \times \begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.43 \\ 0.05 \\ 0.19 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33 \\ 43 \\ 5 \\ 19 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

พบว่าหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าลูกที่ 1 และ 2 จ่ายเกินค่าสูงสุดที่กำหนดไว้คือ 23.75 และ 5.70 kW ตามที่คำนวณไว้ในเบื้องต้น ดังนั้นเราจะปรับตั้งค่าดังกล่าวให้เท่ากับค่าสูงสุด ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ยังขาดอยู่เมื่อเทียบกับค่าที่กำหนดซึ่งเป็นผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากต้นทางที่คำนวณได้ในหัวข้อที่แล้ว (ในที่นี้สมมติให้มีค่า 100 kW) เท่ากับ $100 - (23.75 + 5.7 + 5 + 19) = 46.55$ kW ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำไปกระจายต่อไปให้กับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าลูกอื่นที่สามารถจ่ายโหลดได้อีก โดยใช้สัดส่วนการรองรับในการกำหนดปริมาณกำลังไฟฟ้าที่แบ่งจ่าย โดยมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มต้นจากพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่ยังรองรับได้ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าลูกที่ 3 และ 4 โดยคำนวณจากค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้สูงสุดหักออกด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกแบ่งมาในขั้นต้น ดังสมการที่ (4.12)

$$\begin{bmatrix} 85.5 - 5 \\ 42.75 - 19 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 80.5 \\ 23.75 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัดส่วนการรองรับสำหรับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าลูกที่ 3 และ 4 กำหนดโดยสมการที่ (4.13)

$$\frac{1}{(80.5 + 23.75)} \times \begin{bmatrix} 80.5 \\ 23.75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.77 \\ 0.23 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าที่ขาดไปในขั้นต้นจะถูกแบ่ง ดังนี้

$$46.55 \times \begin{bmatrix} 0.77 \\ 0.23 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 35.84 \\ 10.71 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นเราจะได้อำนาจกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่กระจายไปที่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้างานี้

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.75 \\ 5.7 \\ 40.84 \\ 29.71 \end{bmatrix}$$

พบว่าหม้อแปลงที่จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเท่ากับค่าสูงสุด เราสามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากค่าตัวประกอบกำลัง ก่อนนำไปหักออกจากปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวม เพื่อนำไปกระจายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าลูกอื่นต่อไป
ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของหม้อแปลงลูกที่ 1 และ 2 คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.75 \times \tan(\cos^{-1}(0.95)) \\ 5.7 \times \tan(\cos^{-1}(0.95)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.8 \\ 1.9 \end{bmatrix}$$

เพราะฉะนั้นค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหลือ เท่ากับ $48 - (7.8 + 1.9) = 38.3 \text{ kVAr}$

ทำการหาค่าขอบเขตบนและล่างของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าสองลูกที่เหลือ

$$\begin{bmatrix} Q_{3 \min} \\ Q_{4 \min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.84 \times \tan(\cos^{-1}(0.95)) \\ 29.71 \times \tan(\cos^{-1}(0.95)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.42 \\ 9.76 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{3 \max} \\ Q_{4 \max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.84 \times \tan(\cos^{-1}(0.8)) \\ 29.71 \times \tan(\cos^{-1}(0.8)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 30.63 \\ 22.28 \end{bmatrix}$$

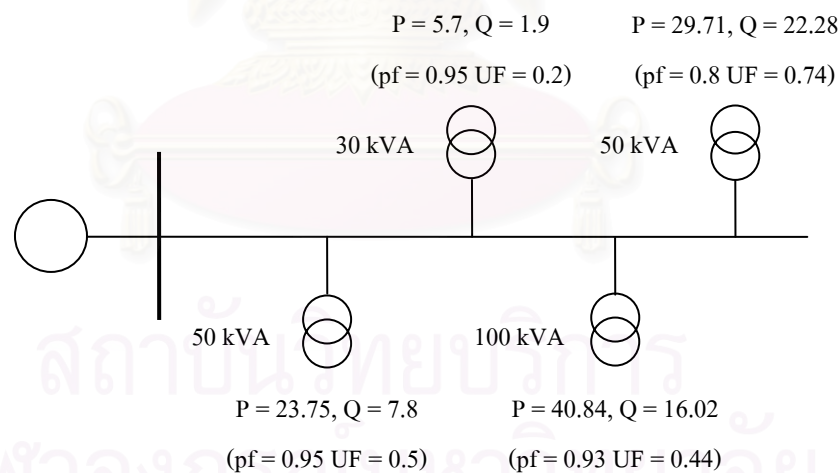
ทำการสุ่มค่าและแปลงเป็นค่าสัดส่วนเช่นเดียวกับกรณีของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ดังนั้นค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่กระจายไปยังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกแสดงไว้ดังสมการที่ (4.14)

$$38.3 \times \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.75 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.575 \\ 28.725 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

พบว่าหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าลูกที่สามมีค่าต่ำไป และลูกที่สี่มีค่าสูงไป ดังนั้นเราจะปรับให้ค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟของหม้อแปลงลูกที่สี่เท่ากับค่าขอบเขตบน ดังนั้นส่วนที่เหลือหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าลูกที่สามรับไป

$$\begin{bmatrix} Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16.02 \\ 22.28 \end{bmatrix}$$

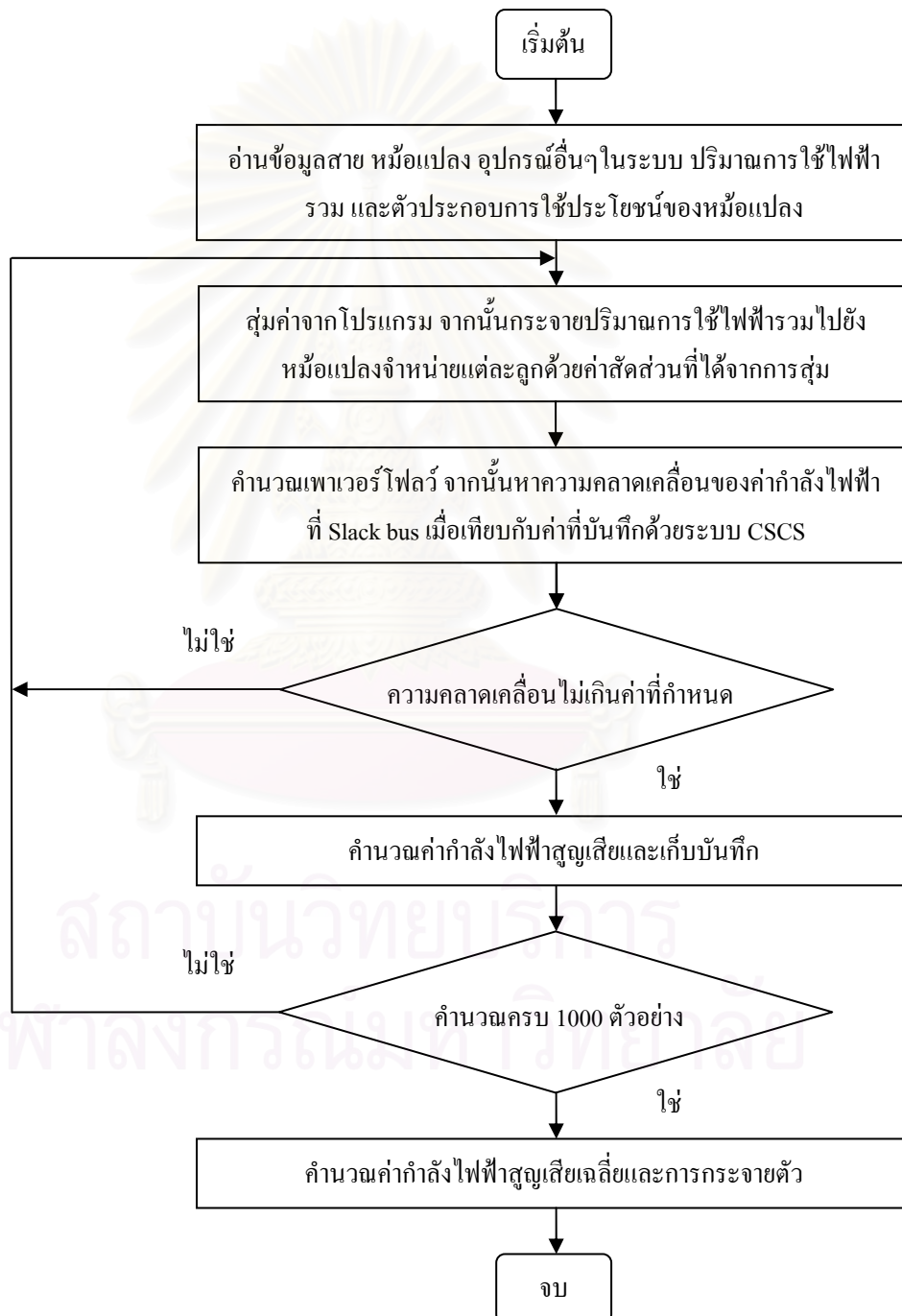
ผลจากการกระจายโหลด เราสามารถสรุปไว้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเราจะถือว่าเป็นลักษณะการกระจายโหลดรูปแบบหนึ่ง จากนั้นจะนำข้อมูลดังกล่าวไปป้อนเข้าสู่การคำนวณเพาเวอร์โพลล์เพื่อคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อไป



รูปที่ 4.6 ผลการกระจายโหลดแบบสุ่ม

จากนั้นคำนวณการกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและเลือกใช้ค่าเฉลี่ยจากการคำนวณทั้งสิ้น 1000 รอบเป็นตัวแทนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ซึ่งการสุ่มตัวอย่าง 1000 ตัวอย่างนั้นเพียงพอที่จะทำให้ผลการประมาณ โดยการใช้ค่าเฉลี่ย (Mean value) จากการสุ่มมีระดับความเชื่อมั่น (Confidence level, [5]) มากพอในระดับหนึ่ง ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ได้ดังกล่าว

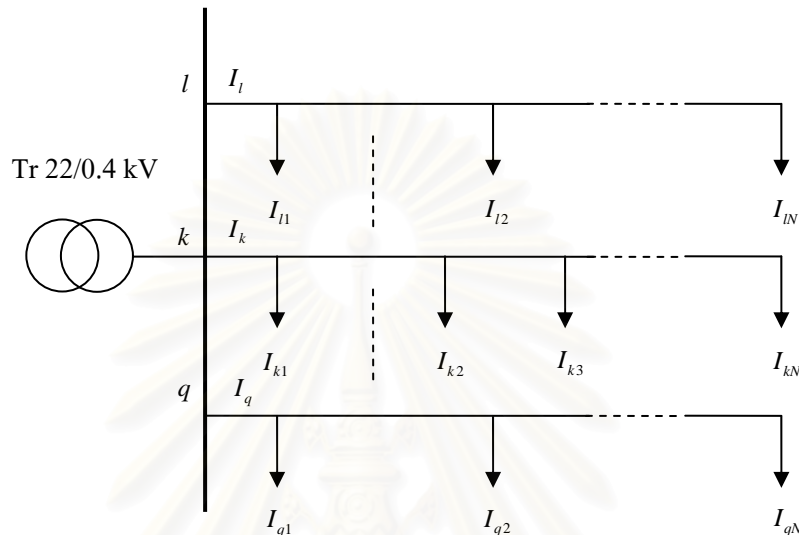
จึงมีโอกาสใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง โดยเลือกเฉพาะผลตอบที่มีค่ากำลังไฟฟ้าที่ Slack bus จากการคำนวณคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2% จากค่าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีจ่ายไฟฟ้า กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเราพยายามหารูปแบบของโหลดที่เป็นไปได้ทั้งหมดโดยมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ Slack bus ค่าหนึ่งจากนั้นเราจะคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมด เราสามารถสรุปขั้นตอนในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนผังการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยการกระจายโหลดแบบสุ่ม

4.4 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่จะนำมาพิจารณานั้นเป็นวงจรที่เริ่มตั้งแต่หลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าไปจนกระทั่งถึงมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 วงจรด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง

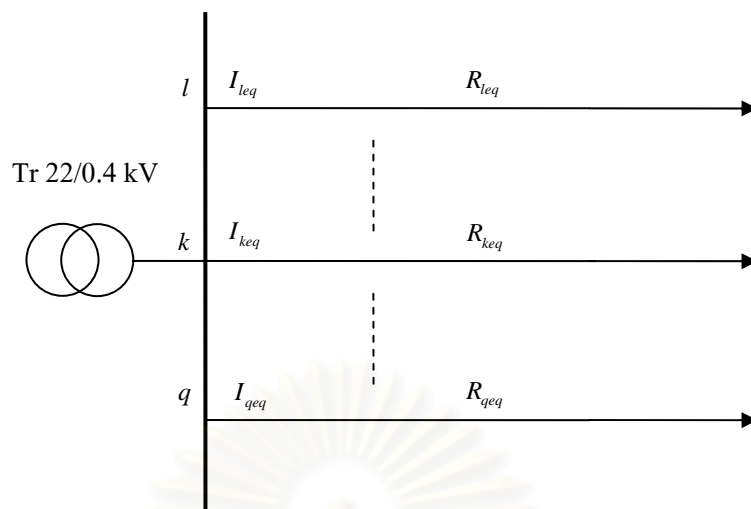
โดย

I_l, I_k, I_q คือ กระแสที่ไหลในแต่ละเส้นทางย่อยของวงจรหลัก

I_{li}, I_{ki}, I_{qi} คือ กระแสที่ไหลในวงจรย่อย (Lateral) ที่แยกออกจากแนววงจรหลัก

4.4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบปกติสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ ปัญหาสำคัญจะอยู่ที่จำนวนจุดไหลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากและข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัดของจุดไหลในแต่ละจุด ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเราจะทำการแปลงแผนภาพเส้นเดียวของวงจรไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าดังรูปที่ 4.8 ให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลอย่างง่ายดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.9 โดยที่ผลลัพธ์ที่คำนวณได้นั้นจะมีค่าเท่าเดิมเนื่องจากเราจะกำหนดให้วงจรทั้งสองมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากัน



รูปที่ 4.9 วงจรสมมูลด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง

กำลังไฟฟ้าสูญเสียทางด้านแรงดันต่ำที่เกิดขึ้นหลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละสายป้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{kloss} = I_{keq}^2 R_{keq} \quad (4.15)$$

โดย

P_{kloss} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายที่ k หลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

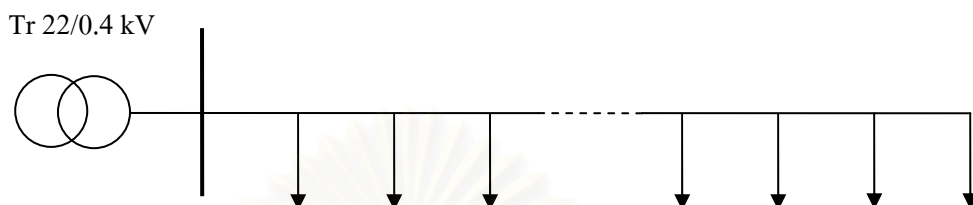
I_{keq} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าสมมูลที่ไหลในสายที่ k หลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

R_{keq} คือ ค่าความต้านทานสมมูลของสายที่ k หลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

ความต้านทานสมมูล (Equivalent resistance) เท่ากับผลคูณของความต้านทานต่อหน่วยความยาวของสายของสายกับความยาวสายสมมูล โดยที่ความยาวสายสมมูลจะคำนวณโดยอาศัยความหนาแน่นของกระแส (Current density), [15]) โดยค่าที่ได้ จะขึ้นกับความหนาแน่นของโหลดที่สายนั้น ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี โดยที่แต่ละกรณีจะกำหนดให้มีค่ากระแสสมมูลเท่ากัน ดังนี้

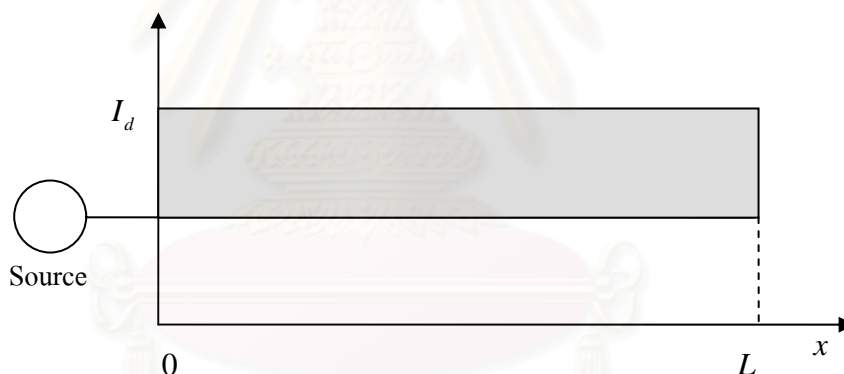
กรณีที่ 1 โหลดกระจายตัวหนาแน่นสม่ำเสมอตลอดทั้งสาย

ในกรณีนี้เราจะสมมติให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งสาย และมีการใช้ไฟฟ้าโดยประมาณเท่าๆกันทั้งระบบ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 4.10 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูล โดยพิจารณาความหนาแน่นของกระแสแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอ

จากรูปที่ 4.11 เราจะได้ว่าค่าความหนาแน่นของกระแสเป็นค่าคงที่ตลอดทั้งสายซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d(x) = \frac{1}{2} I_d \quad (4.16)$$

ดังนั้นค่ากระแสรวมซึ่งเท่ากับกระแสสมมูล I_{eq} สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 4.11

$$I_{eq} = \frac{1}{2} I_d L \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.17) ค่าของกระแสรวมจะเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 4.11 เมื่อทราบค่ากระแสรวมแล้ว เราสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ดังนี้

$$P_{loss} = I_{eq}^2 R_{eq} = \frac{1}{4} I_d^2 L^2 R_b L_{eq} \quad (4.18)$$

เมื่อกำหนดให้ R_b คือความต้านทานของสายต่อหน่วยความยาว จากรูปที่ 4.11 จะได้ว่า

$$I(x) = \int_x^L I_d(x) dx \quad (4.19)$$

$$I(x) = \frac{I_d}{2} (L - x) \quad (4.20)$$

$$P_{loss} = \int_0^L I^2(x) R_b dx \quad (4.21)$$

เมื่อแทนค่า $I(x)$ จากสมการที่ (4.20) ลงในสมการที่ (4.21) จะได้ว่า

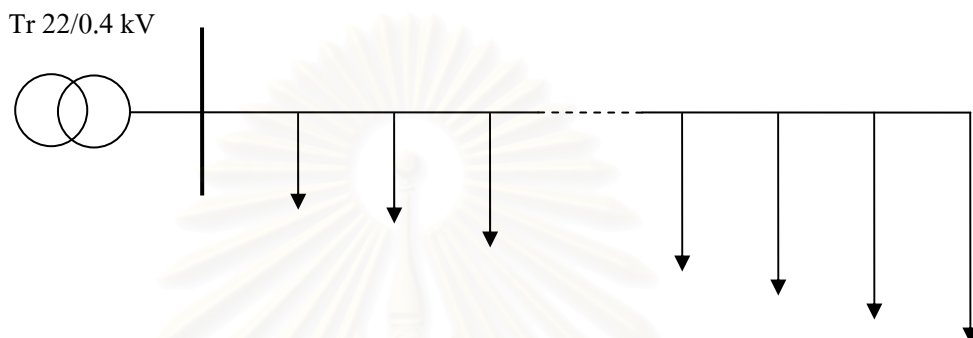
$$P_{loss} = \frac{I_d^3 L^3 R_b}{12} \quad (4.21)$$

เมื่อเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้ในสมการที่ (4.22) กับ สมการที่ (4.18) เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสายสมมูลได้ดังนี้

$$L_{eq} = \frac{L}{3} \quad (4.23)$$

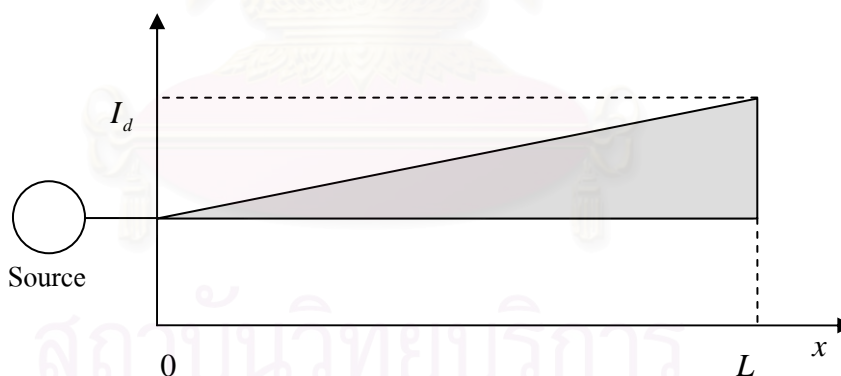
กรณีที่ 2 โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายสาย

ในกรณีนี้เราจะสมมติให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรและโหลดที่ต้นทางมีค่าน้อยที่สุด ต่อจากนั้น โหลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ห่างจากหม้อแปลง จนมามีค่ามากที่สุดที่ปลายสาย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร

จากรูปที่ 4.12 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลโดยพิจารณาความหนาแน่นของกระแส แสดงไว้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร

จากรูปที่ 4.13 เราจะได้ว่าค่าความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นเป็นสมการเส้นตรง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d(x) = \frac{I_d}{L} x \quad (4.24)$$

จากรูปที่ 4.13 จะได้ว่า

$$I(x) = \int_x^L I_d(x) dx \quad (4.25)$$

$$I(x) = I_d \left(\frac{L}{2} - \frac{x^2}{2L} \right) \quad (4.26)$$

เมื่อแทนค่า $I(x)$ จากสมการที่ (4.26) ลงในสมการที่ (4.21) จะได้ว่า

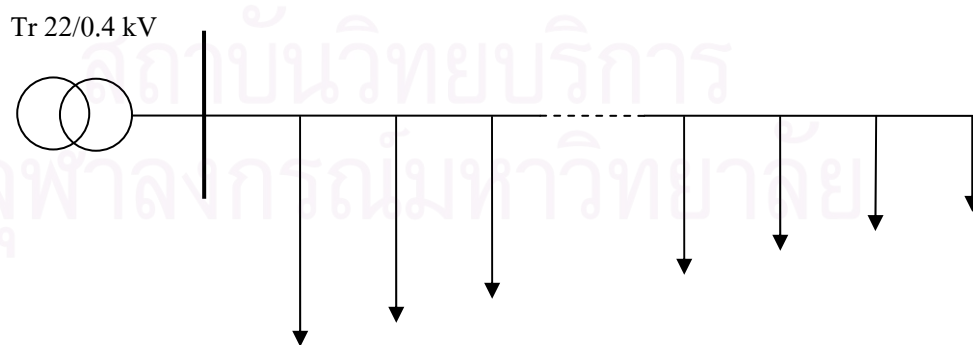
$$P_{loss} = \frac{8I_d L^3 R_b}{60} \quad (4.27)$$

เมื่อเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้ในสมการที่ (4.27) กับ สมการที่ (4.18) เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสายสมมูลได้ดังนี้

$$L_{eq} = \frac{8L}{15} \quad (4.28)$$

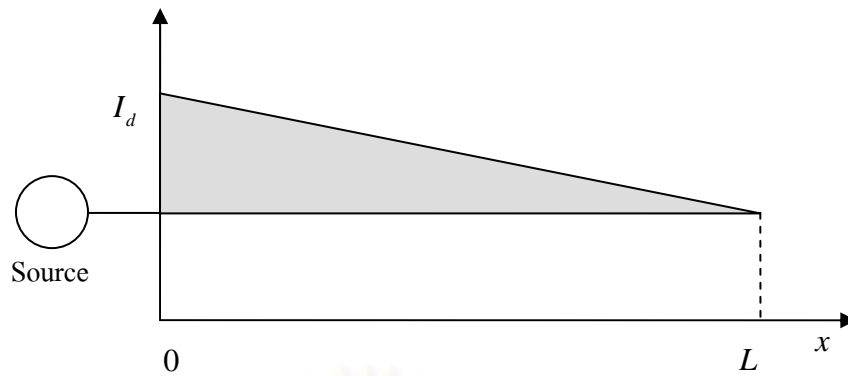
กรณีที่ 3 โหลดมีความหนาแน่นมากที่ต้นสาย

ในกรณีนี้เราจะสมมติให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรและโหลดที่ต้นทางมีค่ามากที่สุด ต่อจากนั้น โหลดจะมีค่าลดลงตามระยะทางที่ห่างจากหม้อแปลง จนมีค่าน้อยที่สุดที่ปลายสาย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ต้นวงจร

จากรูปที่ 4.14 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลโดยพิจารณาความหนาแน่นของกระแสแสดงไว้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหนดมีความหนาแน่นมากที่สุดที่ต้นวงจร

จากรูปที่ 4.15 เราจะได้ว่าค่าความหนาแน่นของกระแสลดลงเป็นสมการเส้นตรง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_d(x) = \frac{-I_d}{L}x + I_d \quad (4.29)$$

จากรูปที่ 4.15 จะได้ว่า

$$I(x) = \int_x^L I_d(x) dx \quad (4.30)$$

$$I(x) = I_d \left(\frac{L}{2} + \frac{x^2}{2L} - x \right) \quad (4.31)$$

เมื่อแทนค่า $I(x)$ จากสมการที่ (4.31) ลงในสมการที่ (4.21) จะได้ว่า

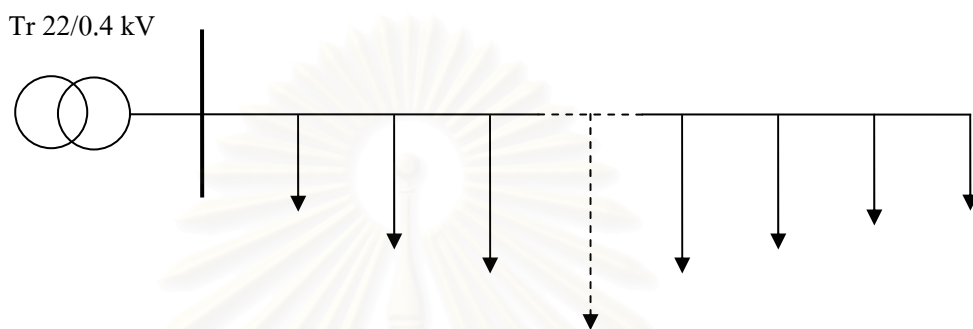
$$P_{loss} = \frac{I_d L^3 R_b}{20} \quad (4.32)$$

เมื่อเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้ในสมการที่ (4.32) กับ สมการที่ (4.18) เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสายสมมูลได้ดังนี้

$$L_{eq} = \frac{L}{5} \quad (4.33)$$

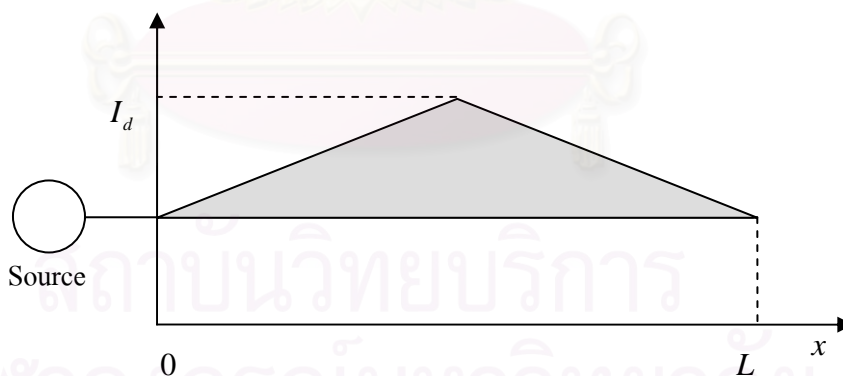
กรณีที่ 4 โหลดมีความหนาแน่นมากที่กลางสาย

ในกรณีนี้เราจะสมมติให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรและโหลดที่ต้นทางมีค่าน้อยที่สุด ต่อจากนั้น โหลดจะมีค่าเพิ่มตามระยะทางที่ห่างจากหม้อแปลง จนมาถึงค่ามากที่สุดที่กลางสาย ต่อจากนั้น โหลดจะลดลง จนมาถึงค่าต่ำสุดที่ปลายสาย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 วงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่กลางวงจร

จากรูปที่ 4.16 เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานสมมูลโดยพิจารณาความหนาแน่นของกระแส แสดงไว้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความหนาแน่นของกระแสที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่กลางวงจร

จากรูปที่ 4.17 เราจะได้ว่าค่าความหนาแน่นของกระแสเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นสมการเส้นตรง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 I_d(x) &= \frac{2I_d}{L}x && \text{เมื่อ } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \\
 &= -\frac{2I_d}{L}x + 2I_d && \text{เมื่อ } \frac{L}{2} \leq x \leq L
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

การพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายที่มีความยาวน้อยกว่า $\frac{L}{2}$ ส่วนที่สองจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายที่มีความยาวมากกว่า $\frac{L}{2}$ จนถึง L จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 I(x) &= I_d \left(\frac{L}{2} - \frac{x^2}{L} \right) && \text{เมื่อ } 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \\
 &= 2I_d \left(\frac{L}{2} + \frac{x^2}{2L} - x \right) && \text{เมื่อ } \frac{L}{2} \leq x \leq L
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

เมื่อแทนค่า $I(x)$ จากสมการที่ (4.35) ลงในสมการที่ (4.21) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 P_{loss} &= \int_0^{L/2} \left(I_d \left(\frac{L}{2} - \frac{x^2}{L} \right) \right)^2 R_b dx + \int_{L/2}^L \left(2I_d \left(\frac{L}{2} + \frac{x^2}{2L} - x \right) \right)^2 R_b dx \\
 P_{loss} &= \frac{23I_d L^3 R_b}{240}
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

เมื่อเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้ในสมการที่ (4.36) กับ สมการที่ (4.18) เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสายสมมูลได้ดังนี้

$$L_{eq} = \frac{23L}{60} \tag{4.37}$$

4.4.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

ระบบจำหน่ายด้านแรงต่ำ เริ่มพิจารณาตั้งแต่หลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าจนถึงมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่านั้น

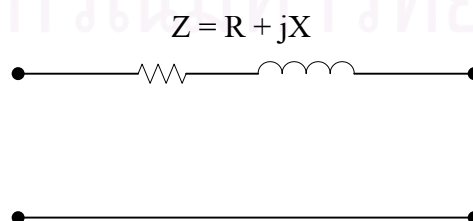
เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับแผนภาพเส้นเดี่ยว (Single line diagram) ที่แสดงวงจรทางด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลงจำหน่ายและข้อมูลแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายมีอยู่อย่างไม่ชัดเจนหรือมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาเราจึงประยุกต์ใช้ทฤษฎีพีชชีกับข้อมูลต่างๆ และการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชีสำหรับคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ข้อมูลต่างๆที่เราพอทราบค่าได้มีดังนี้

- อัตราส่วน โหลดต่อฟักัดหม้อแปลง (Utilization factor)

$$U.F. = \frac{S_{load}}{kVA_{Tr}} \quad (4.39)$$

- ค่าโหลดของสายแรงดันต่ำแต่ละสายโดยประมาณ (S_{loadk})
- แรงดันไฟฟ้า (V)
- ความยาวสายสมมูลของสายแรงดันต่ำแต่ละสาย (L_{eqk})

เนื่องจากสายจำหน่ายแรงดันต่ำมักมีความยาวไม่เกิน 1-2 กิโลเมตร ดังนั้นแบบจำลองสายป้อนจึงจัดอยู่ในประเภทสายส่งระยะสั้น คุณสมบัติของสายป้อนระยะสั้นคือ ไม่มีการคิดผลจากไลน์ชาร์จิง (Line charging) ที่มีอยู่ในสายเนื่องจากมีค่าน้อยมาก มีแต่การนำเอาค่าอิมพีแดนซ์ของสายมาคิดเท่านั้นซึ่งสามารถแสดงวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 วงจรสมมูลของสายป้อนในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

จากนั้นเรากำหนดให้ค่าโหลดจริงและความยาวสายสมมูลของแต่ละสายเป็นตัวเลขวฟชชี่ ที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมและเนื่องจากระบบจำหน่ายแรงดันต่ำส่วนมากเป็นแบบเรเดียล ดังนั้นสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟชชี่ การแก้ปัญหา Minimization เราจะใช้ค่าขอบเขตทางซ้ายของความยาวสายสมมูลในการคำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ และใช้ค่าขอบเขตทางขวาของความยาวสายสมมูลในการคำนวณค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สำหรับการแก้ปัญหา Maximization ผลตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปตัวเลขวฟชชี่ตามระดับค่าความเป็นสมาชิก และผลตอบที่ได้นี้สามารถ Defuzzify จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เป็นตัวเลขวค่าเดียวได้

การนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้ในการวิเคราะห์กำลังสูญเสียนั้น ผลตอบที่ได้อาจมีค่าคลาดเคลื่อนจากความจริงไปข้างขึ้นอยู่กับผู้นำไปใช้นั้นเลือกแบบจำลองได้เหมาะสมกับสภาพการกระจายตัวของโหลดในระบบหรือไม่ เนื่องจากค่าความยาวสมมูลที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่ 1 – 4 นั้น คำนวณมาจากการกำหนดการกระจายตัวของโหลด หากระบบที่นำมาทดสอบมีการกระจายตัวของโหลดที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ ผลลัพธ์ที่ได้ย่อมมีความผิดพลาดมากขึ้น นอกจากนี้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ประมาณได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงเนื่องจากเราสมมติให้โหลดสมดุลและแบบจำลองที่ใช้มิได้พิจารณารวมถึงสายป้อนแรงต่ำที่แยกออกจากสายป้อนหลัก

กล่าวโดยสรุปจะได้ว่า ในการประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียตามที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ส่วนตามระดับแรงดัน โดยระบบส่งจะคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟชชี่ ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะคำนวณโดยอาศัยค่าสัดส่วนสำหรับการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขั้นต้น ก่อนนำค่าโหลดรวมที่ประมาณได้ไปกระจายแบบสุ่มเพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอีกครั้ง สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากแบบจำลองและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟชชี่ โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จะอยู่ในรูปตัวเลขวฟชชี่ ซึ่งสามารถ Defuzzify เพื่อให้อยู่ในรูปของตัวเลขวค่าเดียวได้

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

บทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบ แนวคิดและวิธีการที่กล่าวไว้ในบทต่างๆก่อนหน้านี้ โดยในการทดสอบจะแบ่งตามระดับแรงดันซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 1 อย่างไรก็ตามเนื่องจากการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละระบบนั้นจะพิจารณาลักษณะปัญหาและอาศัยวิธีที่แตกต่างกันตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ดังนั้นเราจึงแบ่งระบบทดสอบออกเป็น 3 ระบบ ดังนี้

ระบบทดสอบสำหรับระบบส่ง

ระบบทดสอบสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง

ระบบทดสอบสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

5.1 ระบบทดสอบและผลการทดสอบสำหรับระบบส่ง [17]

การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบดังกล่าวจะคำนวณโดยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชซีเพื่อพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของข้อมูลโหลดที่ได้จากการพยากรณ์และระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดันสำหรับการวางแผนในระยะยาว ระบบทดสอบที่เลือกใช้มีทั้งสิ้น 3 ระบบ ดังนี้

1) ระบบทดสอบขนาด 14 บัส

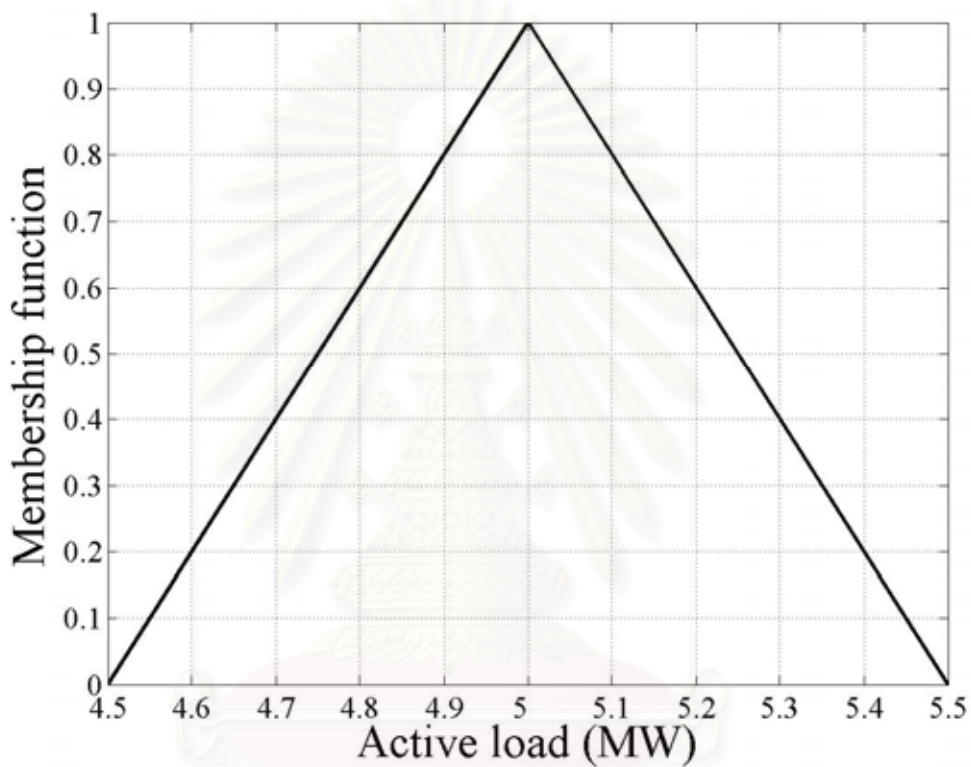
2) ระบบทดสอบขนาด 30 บัส

3) ระบบทดสอบขนาด 57 บัส

สำหรับรายละเอียดของระบบทดสอบแต่ละระบบแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ในการทดสอบนั้นเราแบ่งการทดสอบออกเป็น 6 กรณีต่อระบบทดสอบ 1 ระบบ โดยที่แต่ละกรณีจะกำหนดให้มีระดับความไม่แน่นอนของข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งเราจะนำข้อมูลดังกล่าวไปกำหนดลักษณะของตัวเลขพีชซีรูปสามเหลี่ยมที่ใช้ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชซี ยกตัวอย่างเช่นถ้าเรามีข้อมูลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่บัสหนึ่งที่ได้จากการพยากรณ์มีค่าประมาณ 5 MW เมื่อเรากำหนดให้ความไม่แน่นอนของการพยากรณ์เท่ากับ 10% เราจะได้ตัวเลขพีชซีของค่าโหลดดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 สำหรับจุดขอบเขตทางซ้ายและขวาของตัวเลขพีชซีจะคำนวณแสดงไว้ดังสมการที่ (5.1) และ (5.2) ตามลำดับ

$$P_L = 5 \times \left(1 - \frac{10}{100}\right) = 4.5 \quad (5.1)$$

$$P_R = 5 \times \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 5.5 \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.1 ตัวเลขฟuzzyค่าโหลดที่มีความไม่แน่นอน 10 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ในแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังนี้

กรณีที่ 1 กำหนดให้ข้อมูลของกำลังไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนเท่ากับ 5% และขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 0% นั่นคือเราสามารถควบคุมขนาดแรงดันที่บัสดังกล่าวได้โดยที่ไม่มีความคลาดเคลื่อน

กรณีที่ 2 กำหนดให้ข้อมูลของกำลังไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนเท่ากับ 10% และขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 0% นั่นคือเรากำหนดให้ข้อมูลโหลดที่ได้จากการพยากรณ์มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น

กรณีที่ 3 กำหนดให้ข้อมูลของกำลังไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนเท่ากับ 5% และขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 1% ในที่นี้เรากำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนในการควบคุมขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดัน

กรณีที่ 4 กำหนดให้ข้อมูลของกำลังไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนเท่ากับ 10% และขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 1%

กรณีที่ 5 กำหนดให้ข้อมูลของกำลังไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนเท่ากับ 5% และขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 2%

กรณีที่ 6 กำหนดให้ข้อมูลของกำลังไฟฟ้ามีความไม่แน่นอนเท่ากับ 10% และขนาดแรงดันที่บัสควบคุมแรงดันมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 2%

เมื่อทำการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนให้กับข้อมูลต่างๆแล้วก็จะทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟัซซีโดยแบ่งการคำนวณออกตามระดับความเป็นสมาชิกรวมทั้งสิ้น 5 ระดับ ซึ่งประกอบด้วย 0.0, 0.2, 0.5, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราใช้ตัวเลขฟัซซีรูปสามเหลี่ยมมาจำลองผลจากความไม่แน่นอนของข้อมูลซึ่งประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าที่แต่ละบัสและขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดัน ดังนั้นการคำนวณที่ระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1.0 จะคำนวณด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าตามปกติ ช่วงค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แต่ละระดับความเป็นสมาชิก (เป็น MW) และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ผ่านการ Defuzzify ของระบบทดสอบทั้งสามระบบแสดงไว้ในตารางที่ 5.1-5.3 ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบเรากำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้ ณ ระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1.0 เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากค่าดังกล่าวคำนวณจากข้อมูลที่พยากรณ์ไว้ เพื่อที่จะดูผลกระทบของความไม่แน่นอนของข้อมูลอันประกอบด้วยข้อมูลโหลดจากการพยากรณ์และค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดันที่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย เราจะพิจารณาผลตอบของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งในรูปของตัวเลขฟัซซีและตัวเลขค่าเดียวที่ผ่านการ Defuzzify ประกอบกัน รูปตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆของระบบทดสอบขนาด 14, 30 และ 57 บัสแสดงไว้ดังรูปที่ 5.2-5.19

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 14 บั๊ต

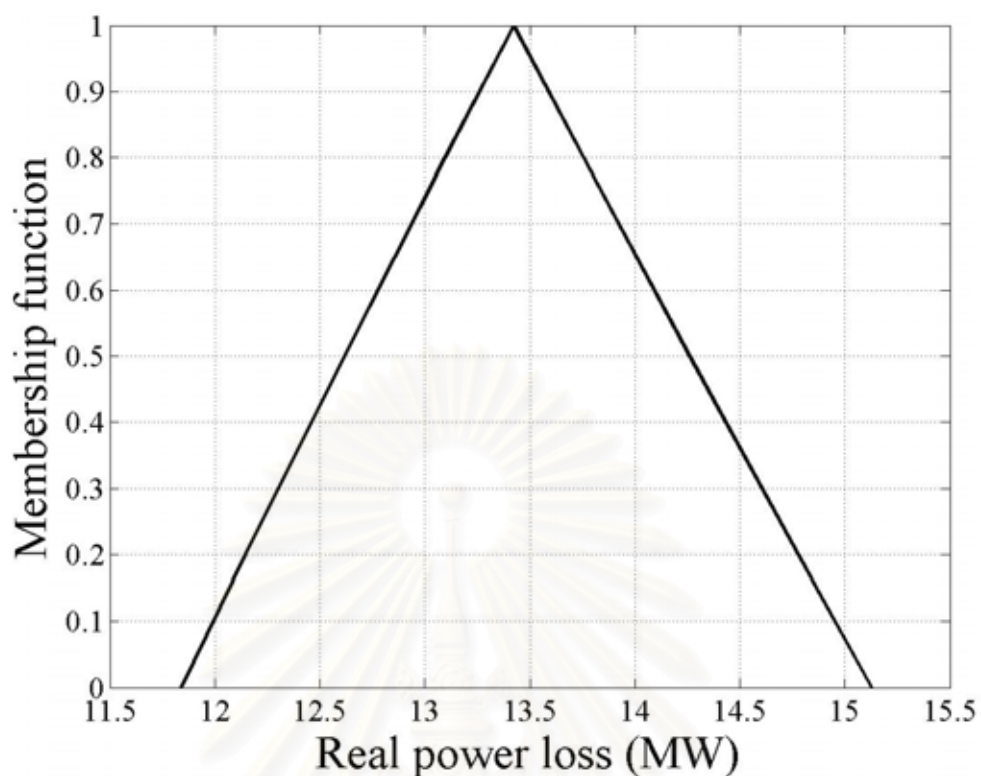
กรณี	0.0		0.2		0.5		0.8		1.0	Defuzzified value
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
1	11.84	15.13	12.15	14.78	12.62	14.26	13.1	13.76	13.42	13.43
2	10.37	16.95	10.94	16.21	11.84	15.13	12.78	14.09	13.42	13.458
3	11.8	15.23	12.11	14.85	12.59	14.3	13.09	13.77	13.42	13.44
4	10.33	17.03	10.91	16.25	11.81	15.16	12.76	14.12	13.42	13.462
5	11.77	15.49	12.09	15.02	12.57	14.36	13.08	13.77	13.42	13.45
6	10.3	17.31	10.88	16.45	11.8	15.23	12.75	14.12	13.42	13.48

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 30 บั๊ต

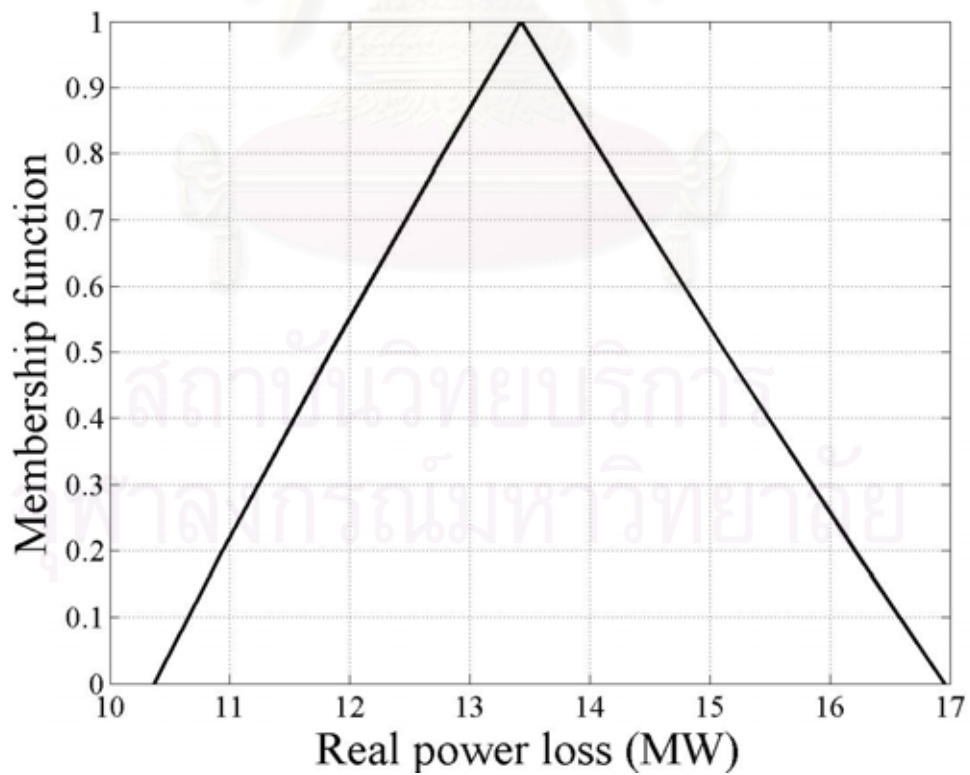
กรณี	0.0		0.2		0.5		0.8		1.0	Defuzzified value
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
1	2.05	3.0	2.12	2.88	2.23	2.70	2.35	2.54	2.45	2.46
2	1.75	3.75	1.86	3.43	2.05	3.0	2.27	2.65	2.45	2.49
3	1.95	3.4	2.03	3.11	2.16	2.83	2.32	2.58	2.45	2.47
4	1.66	4.17	1.78	3.73	1.99	3.16	2.24	2.69	2.45	2.52
5	1.91	4.0	1.99	3.57	2.13	3.04	2.3	2.64	2.45	2.52
6	1.63	4.71	1.75	4.25	1.95	3.4	2.21	2.74	2.45	2.57

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 57 บั๊ต

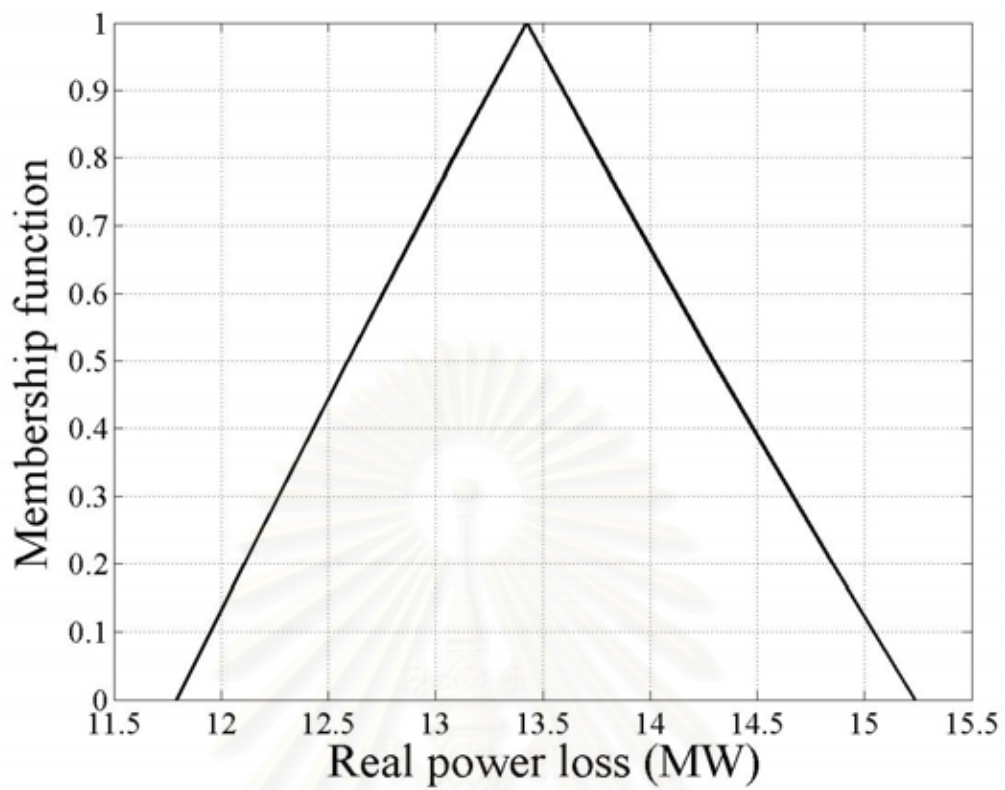
กรณี	0.0		0.2		0.5		0.8		1.0	Defuzzified value
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
1	21.23	37.9	22.35	35.6	24.16	32.42	26.28	29.58	27.86	28.1
2	17.32	51.62	18.79	45.67	21.3	37.9	24.83	31.44	27.86	28.84
3	20.04	40.2	21.29	37.32	23.45	33.4	25.97	29.93	27.86	28.18
4	16.14	54.01	17.76	47.45	20.59	38.9	24.53	31.79	27.86	28.92
5	19.39	43.71	20.65	39.48	22.91	34.67	25.7	30.32	27.86	28.37
6	15.51	57.0	17.13	50.02	20.04	40.2	24.25	32.19	27.86	29.14



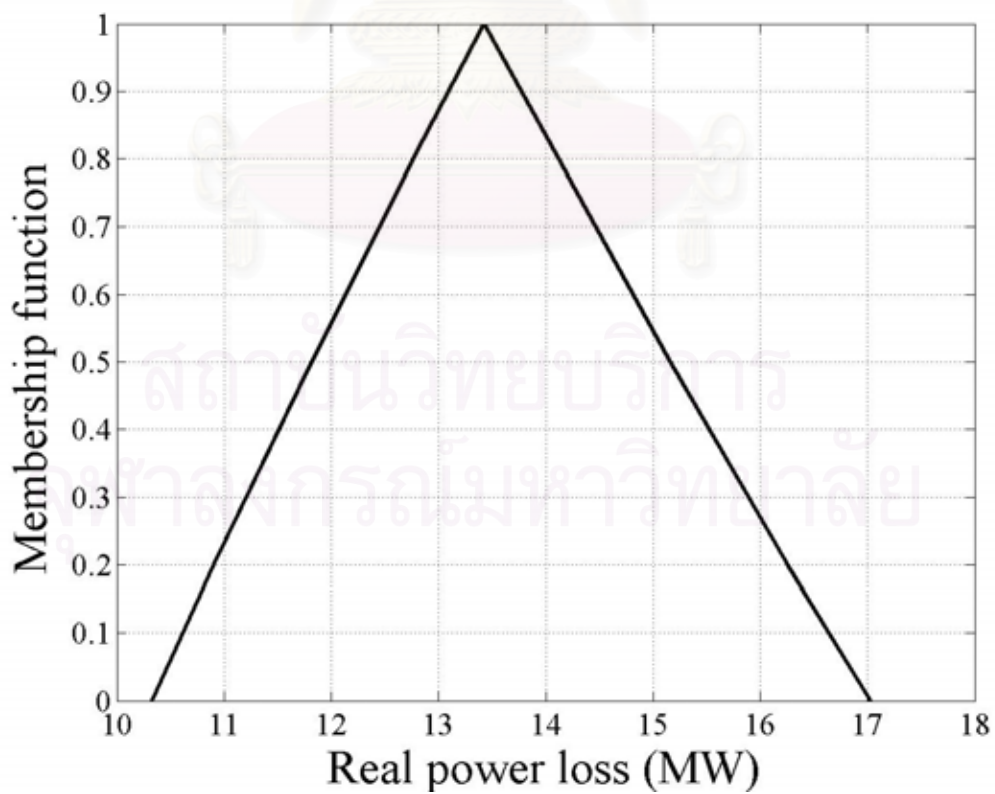
รูปที่ 5.2 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 1 ของระบบทดสอบ 14 บัส



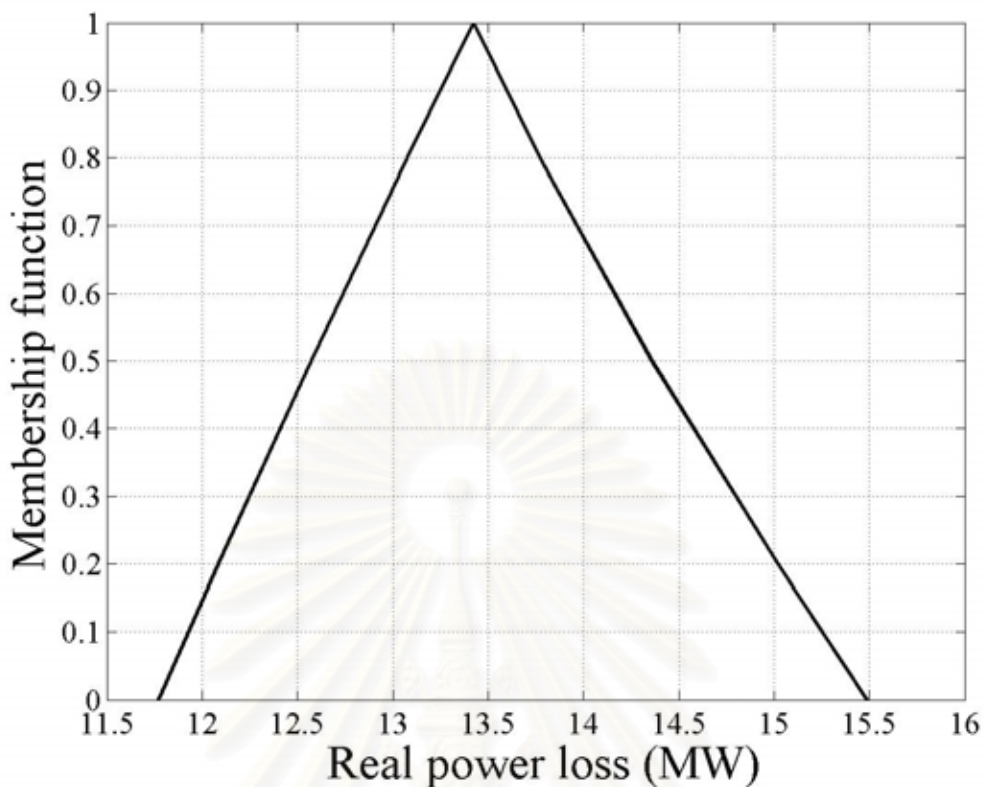
รูปที่ 5.3 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2 ของระบบทดสอบ 14 บัส



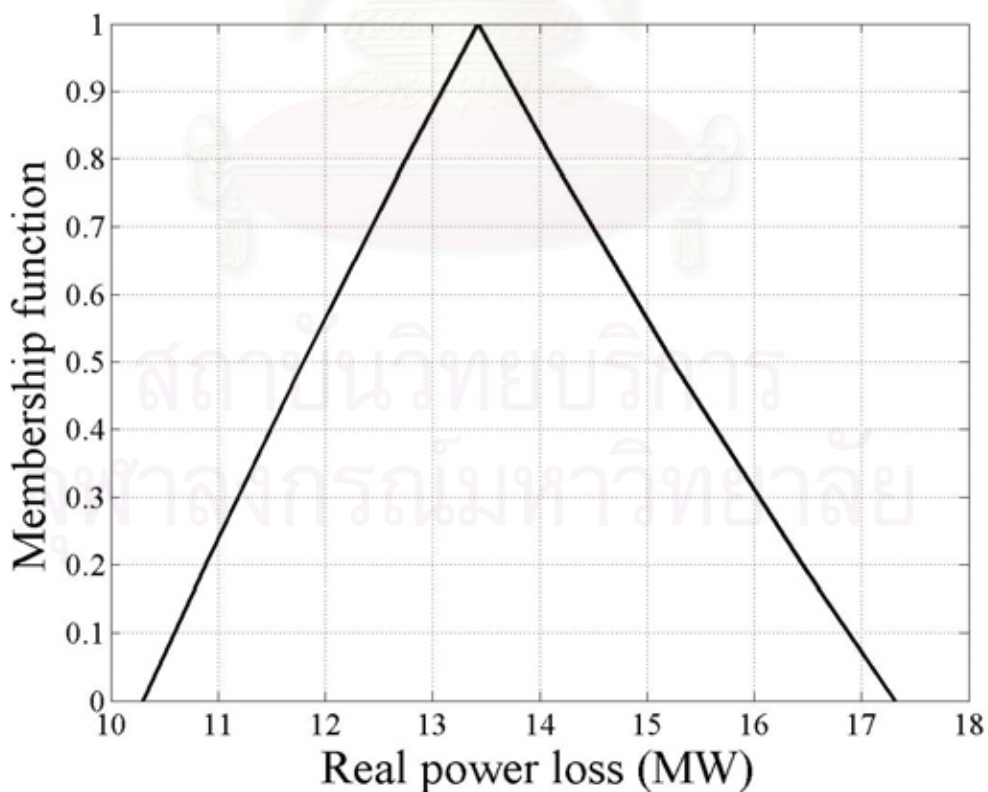
รูปที่ 5.4 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 ของระบบทดสอบ 14 บัส



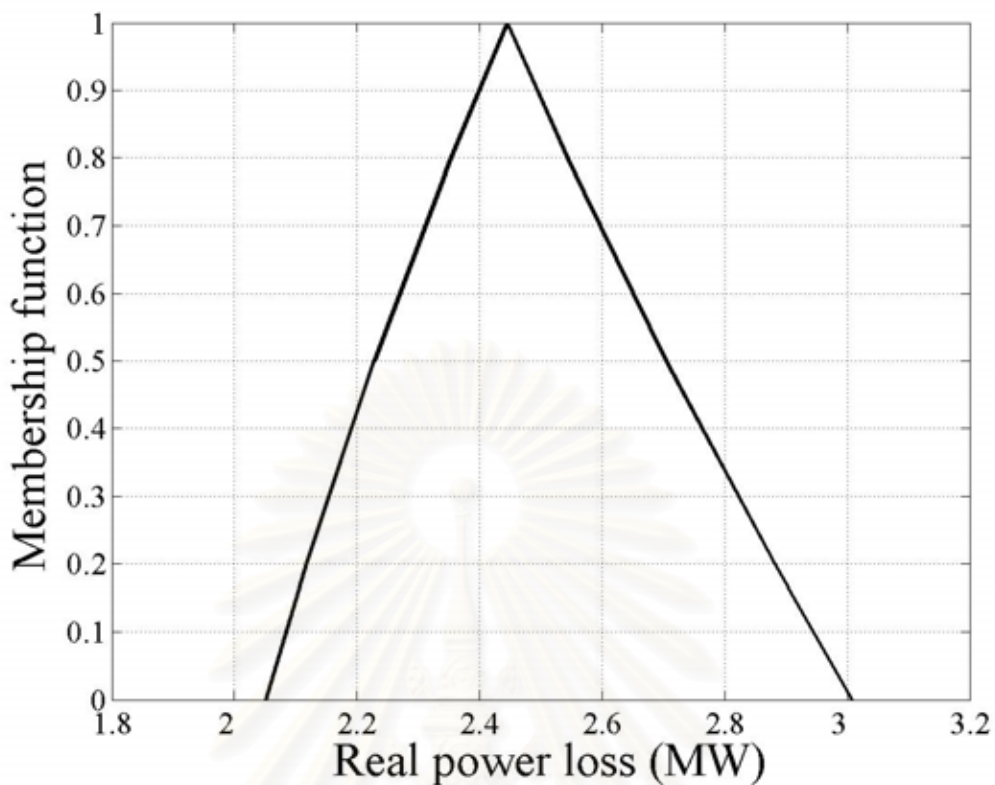
รูปที่ 5.5 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 ของระบบทดสอบ 14 บัส



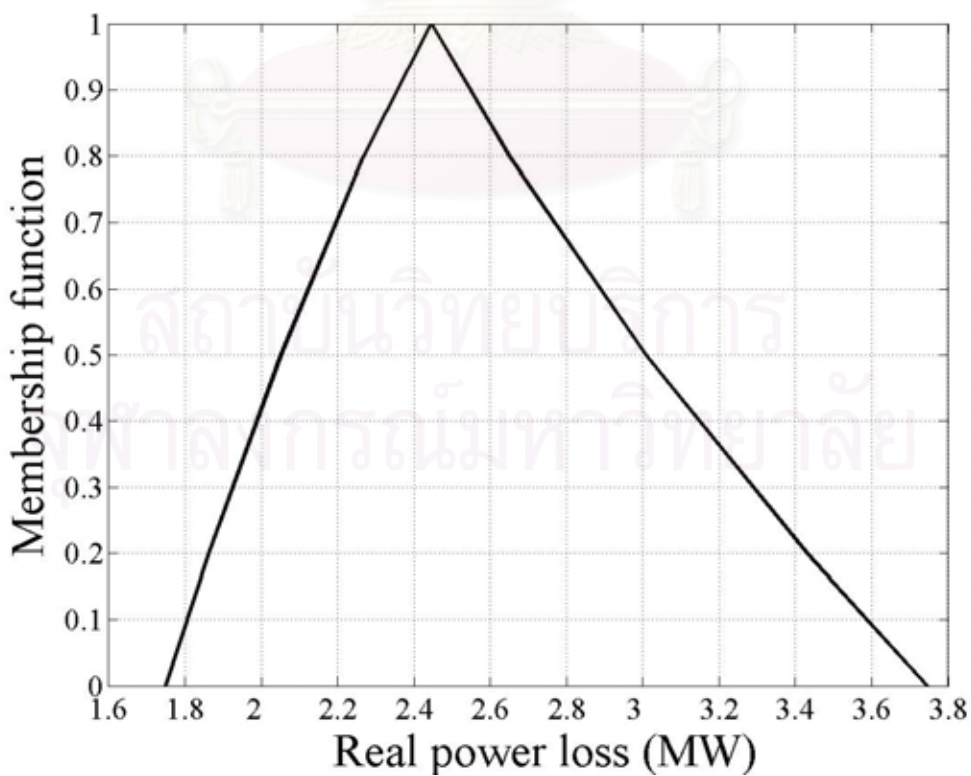
รูปที่ 5.6 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 5 ของระบบทดสอบ 14 บัส



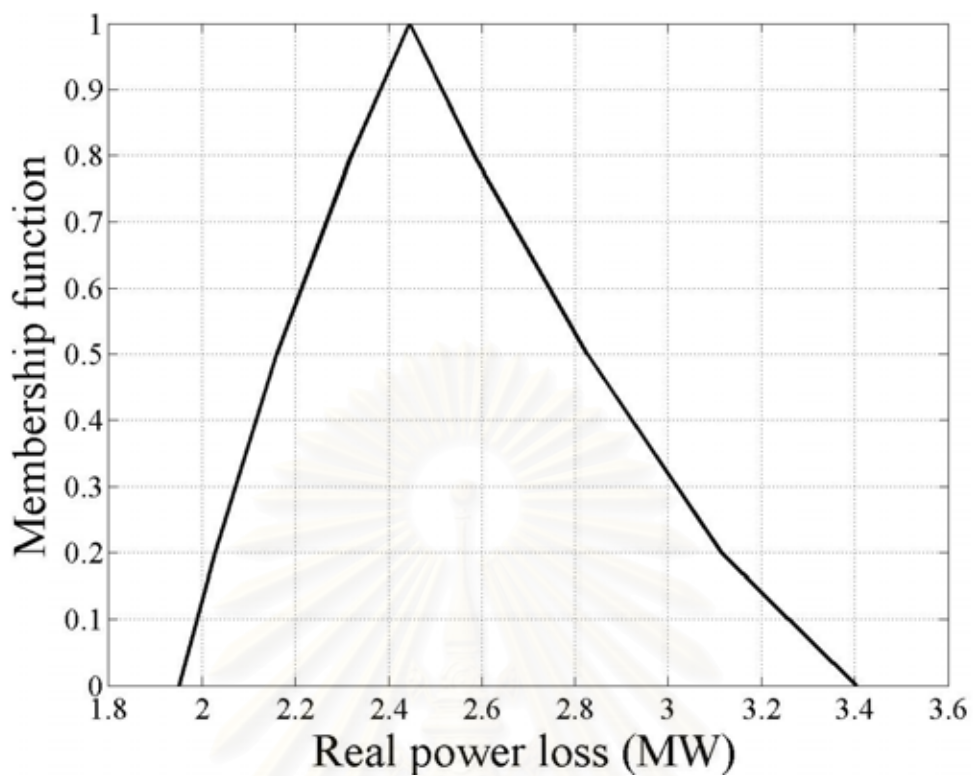
รูปที่ 5.7 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 6 ของระบบทดสอบ 14 บัส



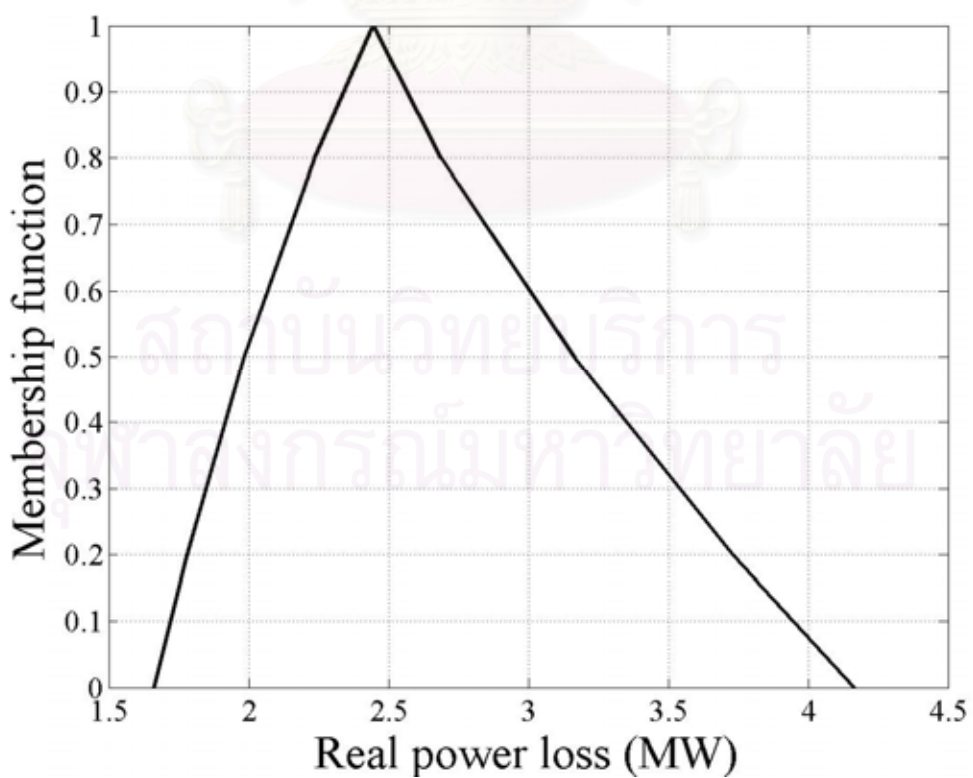
รูปที่ 5.8 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 1 ของระบบทดสอบ 30 บัส



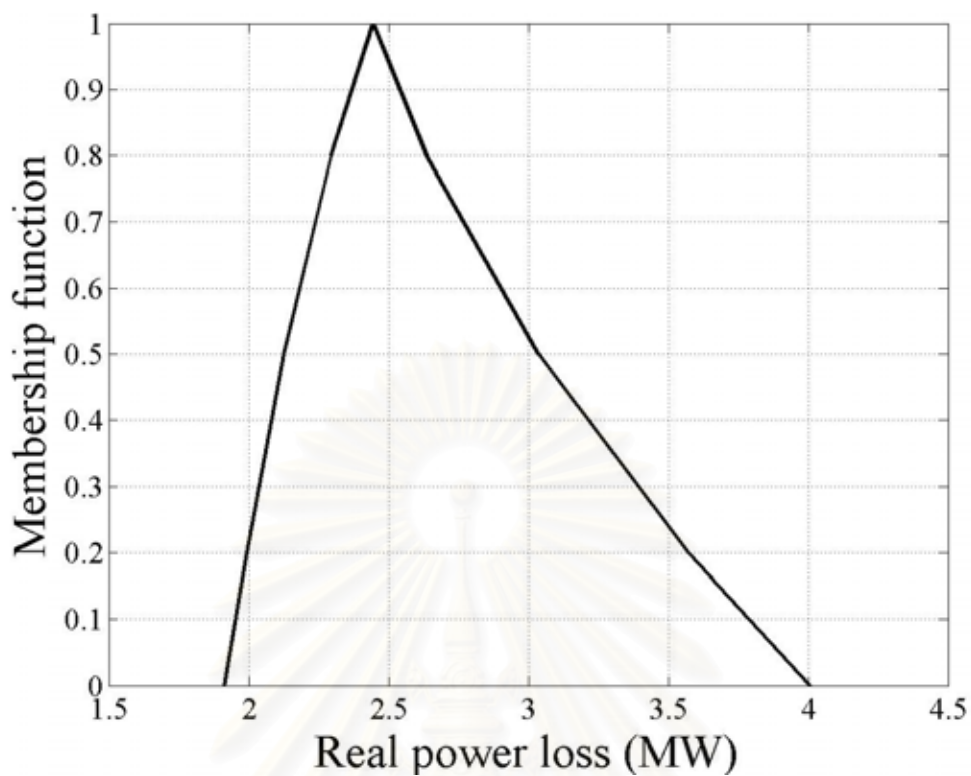
รูปที่ 5.9 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2 ของระบบทดสอบ 30 บัส



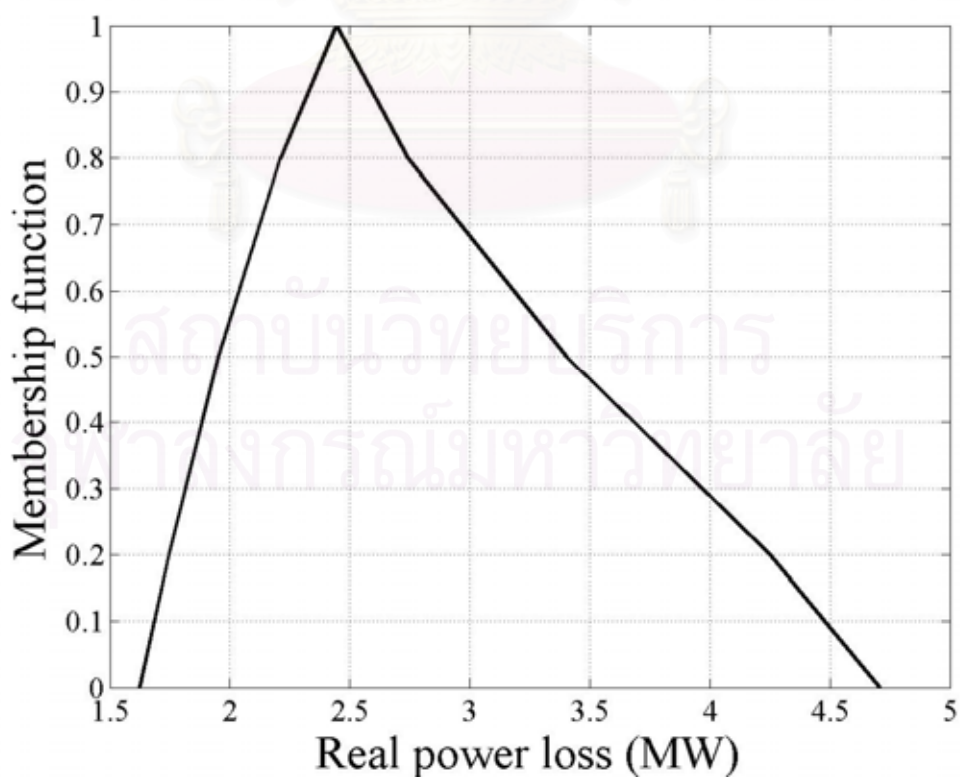
รูปที่ 5.10 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 ของระบบทดสอบ 30 บัส



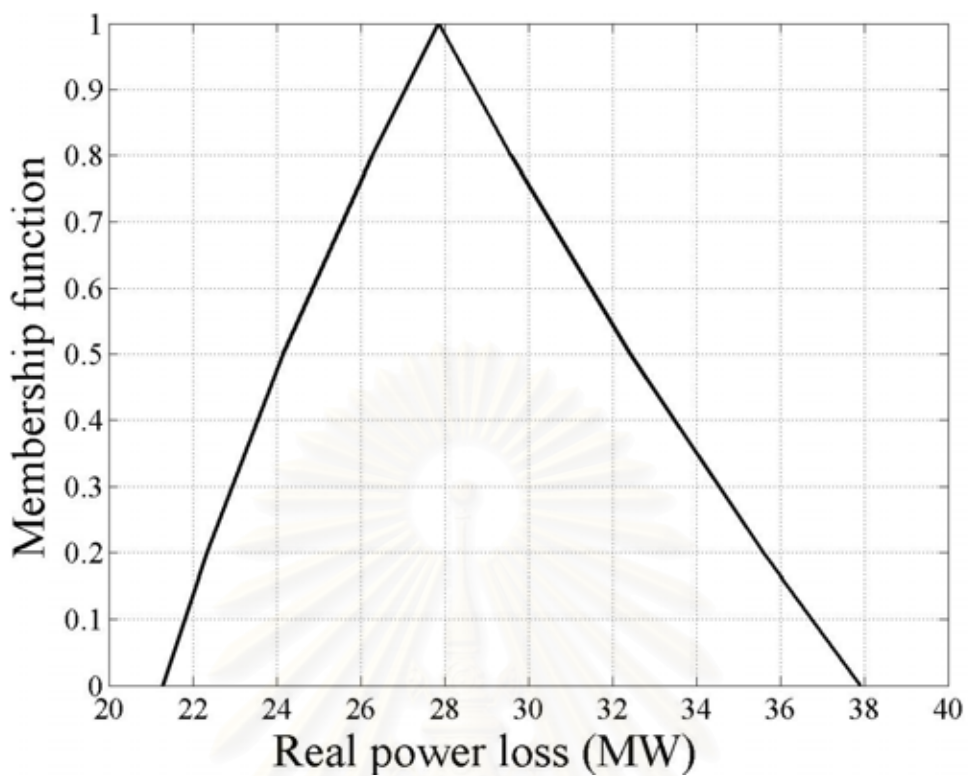
รูปที่ 5.11 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 ของระบบทดสอบ 30 บัส



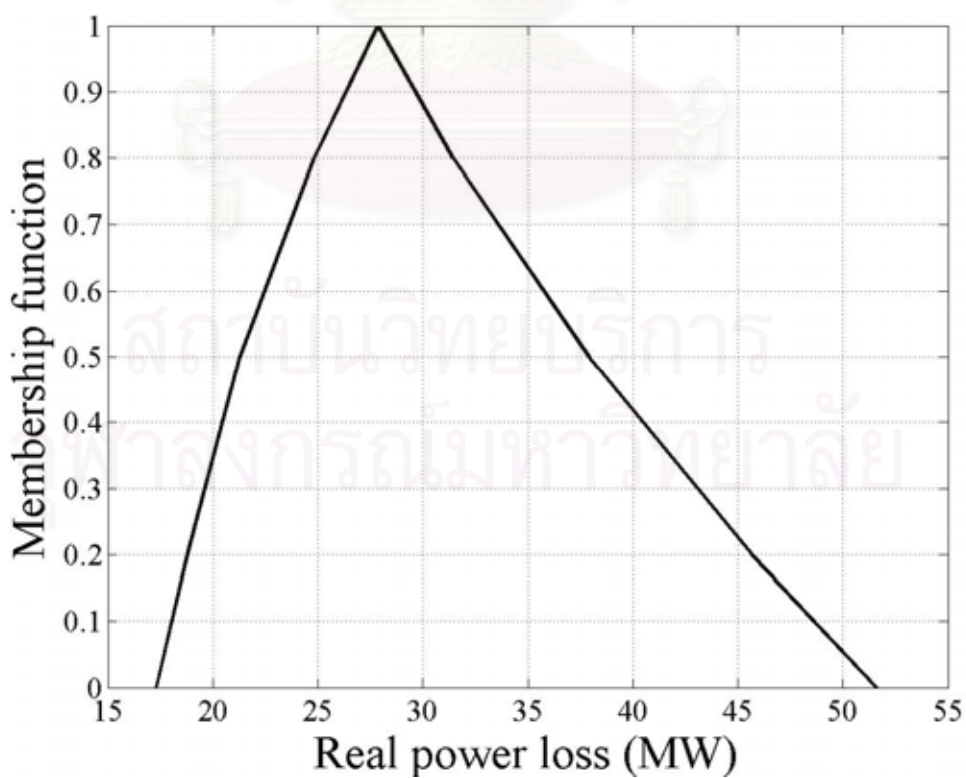
รูปที่ 5.12 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 5 ของระบบทดสอบ 30 บัส



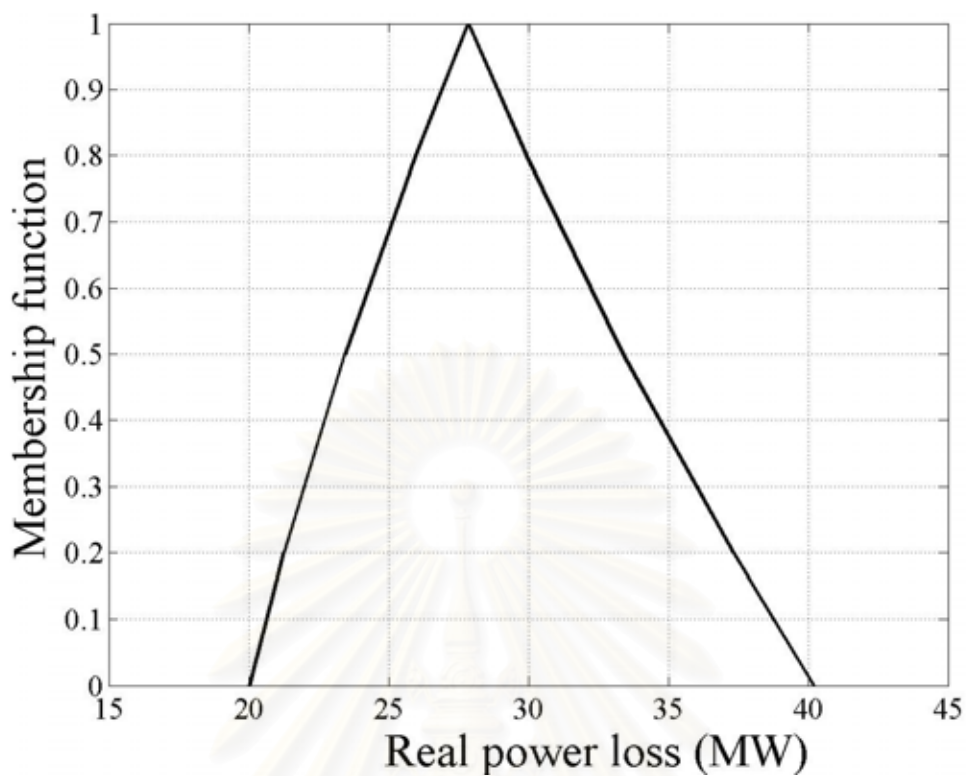
รูปที่ 5.13 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 6 ของระบบทดสอบ 30 บัส



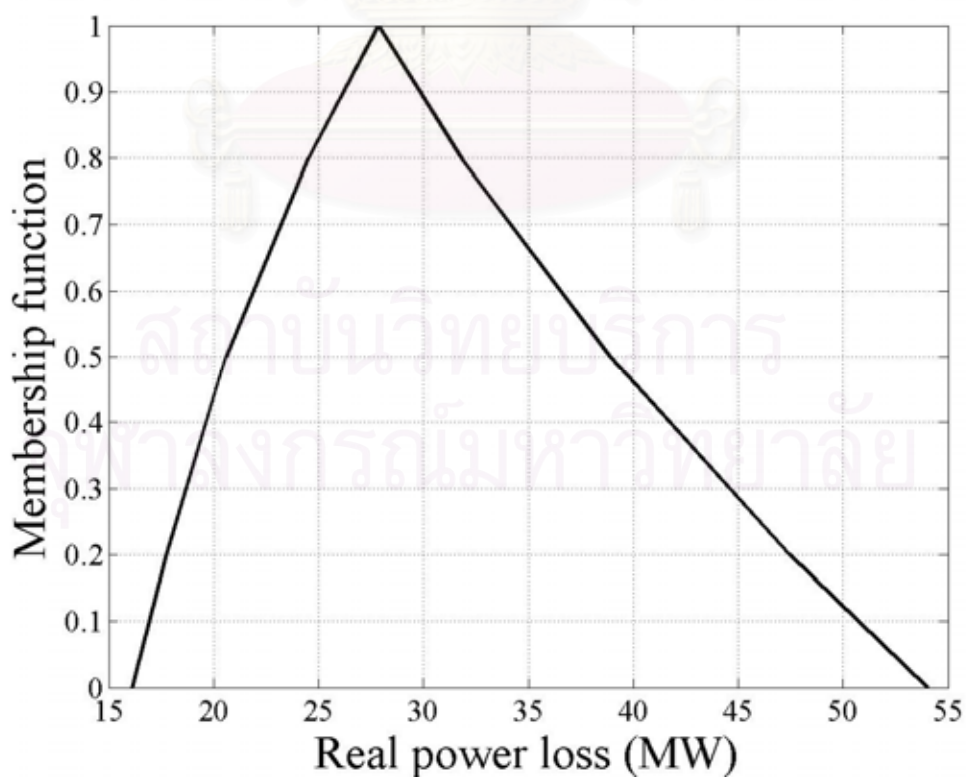
รูปที่ 5.14 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 1 ของระบบทดสอบ 57 บัส



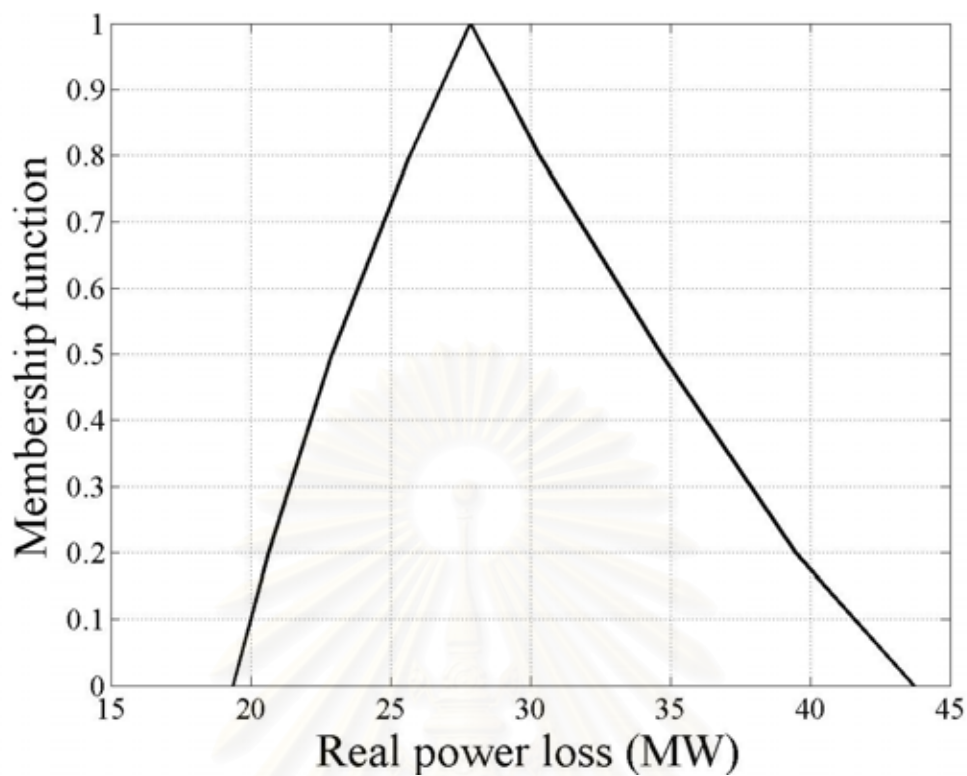
รูปที่ 5.15 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2 ของระบบทดสอบ 57 บัส



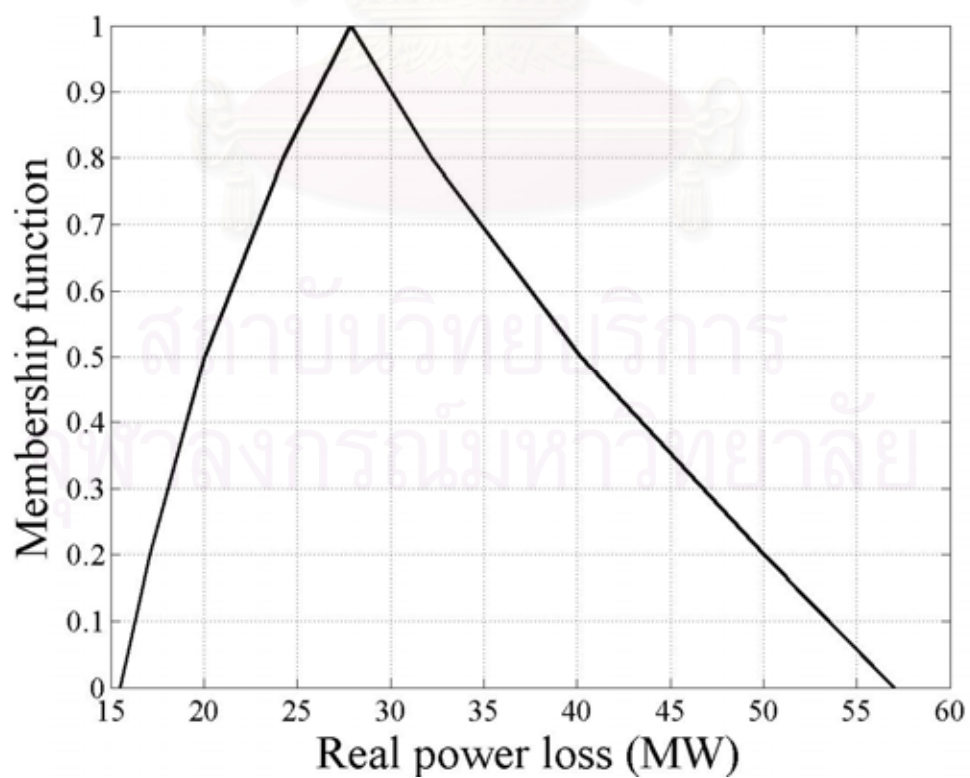
รูปที่ 5.16 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 ของระบบทดสอบ 57 บัส



รูปที่ 5.17 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 ของระบบทดสอบ 57 บัส



รูปที่ 5.18 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 5 ของระบบทดสอบ 57 บัส



รูปที่ 5.19 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 6 ของระบบทดสอบ 57 บัส

ลักษณะที่สำคัญประการหนึ่งที่พบในผลการทดสอบคือเมื่อระดับความไม่แน่นอนของข้อมูลเพิ่มขึ้น อาทิเช่น ข้อมูลโหลดมีความไม่แน่นอนเพิ่มขึ้นจาก 5% ไปเป็น 10% นั่นคือเมื่อพิจารณาที่แต่ละระดับความเป็นสมาชิกช่วงค่าของข้อมูลจะกว้างขึ้นซึ่งส่งผลให้ช่วงค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมทั้งระบบเพิ่มขึ้นด้วย กล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อคิดผลกระทบจากความไม่แน่นอนของข้อมูลมีโอกาสดลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คาดการณ์ไว้ ยกตัวอย่างเช่นในกรณีระบบทดสอบขนาด 14 บัสในกรณีที่ 6 (กรณีที่ข้อมูลมีความไม่แน่นอนมากที่สุด) ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จากการ Defuzzify ตัวเลขฟัซซีมีค่าเท่ากับ 13.48 MW ซึ่งต่างจากค่าที่คาดการณ์ไว้ (13.42 MW) เท่ากับ 0.06 MW คิดเป็น 0.45% สำหรับระบบทดสอบ ขนาด 30 และ 57 บัสสามารถสรุปผลได้ในลักษณะเดียวกันแต่ผลจากความไม่แน่นอนของข้อมูลส่งผลกระทบต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าในกรณีระบบทดสอบ ขนาด 14 บัส โดยมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จากการ Defuzzify ในกรณีที่ 6 กับค่าที่คาดการณ์ไว้ซึ่งเท่ากับ 4.9% และ 4.6% ตามลำดับซึ่งมากกว่าในกรณีของระบบทดสอบขนาด 14 บัส (0.45%) จะเห็นได้ว่าระบบที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ความไม่แน่นอนของข้อมูลจะมีโอกาสส่งผลกระทบต่อการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ขึ้นกับลักษณะของระบบ (System configuration) และเป็นแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้นการพิจารณาผลกระทบของความไม่แน่นอนดังกล่าวเปรียบเทียบกับระหว่างระบบทดสอบที่นำเสนอในข้างต้นอาจมีนัยสำคัญไม่มากนัก นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จากการ Defuzzify ตัวเลขฟัซซีในกรณีต่างๆ (1 ถึง 6) พบว่าเมื่อพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของค่ากำลังไฟฟ้าจะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2 มากกว่ากรณีที่ 1 และกรณีที่ 4 มากกว่ากรณีที่ 3 และกรณีที่ 6 มากกว่ากรณีที่ 5 เนื่องจากความไม่แน่นอนของค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 10% ในทำนองเดียวกันสำหรับผลกระทบจากความไม่แน่นอนของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดันพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 มากกว่ากรณีที่ 1 และกรณีที่ 4 มากกว่ากรณีที่ 2 เนื่องจากความไม่แน่นอนของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 1% และพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 5 มากกว่ากรณีที่ 3 และกรณีที่ 6 มากกว่ากรณีที่ 4 เนื่องจากความไม่แน่นอนของค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดันเพิ่มขึ้นจาก 1% เป็น 2% สำหรับระบบทดสอบขนาด 30 และ 57 บัสก็มีผลการทดสอบในลักษณะเดียวกัน

นอกจากนี้เราสามารถสรุปผลเพิ่มเติมจากตัวเลขฟัซซีได้เนื่องจากตัวเลขฟัซซีจะบอกข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับภาพรวมของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้น พิจารณาผลการทดสอบกับระบบทดสอบขนาด 14 บัสในกรณีที่ 6 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอาจมีค่ามากถึง 17.31 MW ซึ่งแตกต่างจากค่าที่คาดการณ์ไว้ค่อนข้างมาก (คิดเป็น 29%) ทั้งนี้การสรุปขอบเขตของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากตัวเลขฟัซซีสามารถพิจารณาแยกตามระดับความเป็นสมาชิกโดยคำนึงถึงระดับความเชื่อมั่นที่มีต่อข้อมูล กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเลือกพิจารณาเฉพาะระดับความเป็นสมาชิกที่สอดคล้องกับระดับ

ความไม่แน่นอนของข้อมูล ดังนั้นการสรุปว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอาจมีค่าสูงถึง 17.31 MW ตามที่ได้กล่าวหาความความที่เราเชื่อมั่นว่าข้อมูลมีความไม่แน่นอนใกล้เคียงกับที่คาดไว้ (ในกรณีที่ 6 คาดการณ์ว่าค่ากำลังไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสควบคุมแรงดันมีความไม่แน่นอนเท่ากับ 10% และ 2% ตามลำดับ) จะเห็นได้ว่าการนำทฤษฎีฟิชชีและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟิชชีมาประยุกต์ใช้กับการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสำหรับการวางแผนในระยะยาวที่ได้รับผลกระทบจากความไม่แน่นอนของข้อมูล ผลตอบที่ได้นั้นมีความยืดหยุ่นมากกว่าการประเมินโดยใช้ค่าที่คาดการณ์ไว้ที่มีค่าเดียวซึ่งอาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงที่อาจเกิดขึ้นเมื่อข้อมูลมีความไม่แน่นอนมากขึ้น นอกจากนี้ผลตอบที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟิชชีในรูปของตัวเลขฟิชชีสามารถสะท้อนภาพรวมทั้งระบอบเขตน้อยที่สุดและมากที่สุดของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยเลือกสรุปจากระดับความเป็นสมาชิกที่สอดคล้องกับระดับความเชื่อมั่นของผู้ประเมินที่มีต่อข้อมูล การให้ความสำคัญกับความไม่แน่นอนของข้อมูลช่วยให้เราได้ผลตอบที่มีความยืดหยุ่นและสามารถนำไปประกอบการวางแผนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในทางปฏิบัติเรามักให้ความสำคัญกับพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมากกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียสามารถคิดเป็นมูลค่าได้ ซึ่งสะดวกต่อการประเมินหรือการประยุกต์ใช้งานอื่นๆ อาทิเช่นเราสามารถนำมูลค่าของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียไปรวมไว้ในสมการวัตถุประสงค์ (Objective function) เพื่อแก้ปัญหาค่าเหมาะสม (Optimization) เป็นต้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอขึ้นคำนวณจากค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดจากการพยากรณ์ (Peak forecasted demand) เพียงระดับเดียว ดังนั้นการแปลงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยการคูณด้วยระยะเวลา (365 วัน หรือ 8760 ชั่วโมง) จะให้ผลตอบที่สูงเกินจริง ดังนั้นการนำวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟิชชีไปใช้นั้นควรใช้ควบคู่กับ Forecasted load duration curve โดยอาจแบ่งค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าออกเป็น 3 ระดับ (น้อย ปานกลาง มาก) และระบุระยะเวลาการเกิดของแต่ละระดับ (วันหรือชั่วโมง) จากนั้นจึงวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แต่ละระดับก่อนแปลงเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยการคูณด้วยระยะเวลา ดังนั้นผลที่ได้จะเป็นตัวเลขฟิชชีค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของแต่ละระดับความต้องการใช้ไฟฟ้าซึ่งสามารถนำมารวมกันด้วยการดำเนินการของตัวเลขฟิชชีทำให้ได้ตัวเลขฟิชชีค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมที่อาจเกิดขึ้น ด้วยกระบวนการวิธีนี้จะทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่อาจเกิดขึ้นจริงมากขึ้น

5.2 ระบบทดสอบและผลการทดสอบสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง [19-20]

เรานำวงจรสายป้อนที่ 2 ของสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นระบบทดสอบ เนื่องจากมีระบบ Computer System Control Substation (CSCS) ติดตั้งใช้งานที่ สถานีไฟฟ้าและมีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่แต่ละจุดโหลดซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยศูนย์บริการวิชาการแห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [19]

วงจรทดสอบสายป้อนที่ 2 นี้จ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าเขตชนบทที่มีความยาวสายป้อนรวม 31 กิโลเมตร มีจำนวนจุดโหลดทั้งสิ้น 30 จุดประกอบด้วยหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าสามเฟสจำนวน 7 ลูก หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสจำนวน 22 ลูก และจุดโหลดที่ซื้อไฟแรงสูง 1 จุดแสดงไว้ดัง รูป 5.20 ในการทดสอบเรานำตัวอย่างข้อมูลการจ่ายไฟฟ้าประจำทุกๆ ชั่วโมงเป็นเวลาหนึ่ง สัปดาห์ ตั้งแต่วันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548 ถึงวันอาทิตย์ที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2548 มาใช้ ในการทดสอบโปรแกรมประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่พัฒนาขึ้นเนื่องจากข้อมูลในช่วงสัปดาห์ ดังกล่าวมีความสมบูรณ์มากที่สุด ทั้งนี้ข้อมูลโหลดในช่วงสัปดาห์อื่นๆ นั้นมีบางจุดโหลดที่ข้อมูล ขาดหายไปเนื่องจากมิเตอร์ชำรุด ข้อมูลการจ่ายไฟฟ้าของสายป้อนประกอบด้วยค่ากำลังไฟฟ้าเอก ทิฟและรีแอกทีฟรวมทั้งสามเฟสที่จ่ายจากสถานีตั้งแต่เวลา 0.00 - 23.00 น. สำหรับลักษณะโหลด โดยทั่วไปของวงจรทดสอบสายป้อนที่ 2 จะมีค่าสูงในช่วงเช้าเวลาประมาณ 5.00 - 6.00 น. และ ในช่วงหัวค่ำเวลาประมาณ 19.00 - 21.00 น. และมีค่าต่ำในช่วงเวลา 0.00 - 4.00 น. โดยตัวประกอบ กำลังมีค่าอยู่ระหว่าง 0.80 – 0.95 ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลดังกล่าวได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ข.

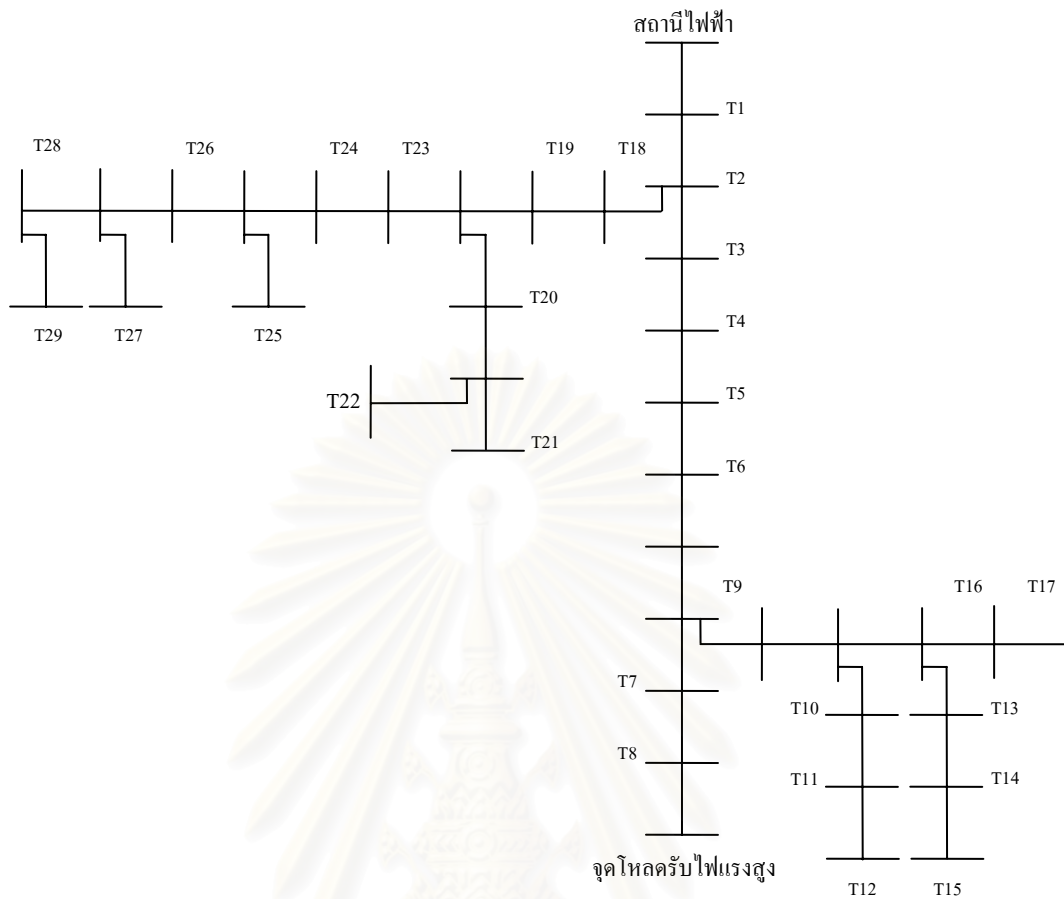
ในการทดสอบเราแบ่งเป็น 4 กรณีโดยมีรายละเอียดดังนี้

กรณีที่ 1 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสาม เฟส โดยใช้ข้อมูลโหลดทั้งสามเฟสที่ได้จากการตรวจวัดจริง

กรณีที่ 2 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสาม เฟส โดยใช้ข้อมูลโหลดที่ได้จากการตรวจวัดจริงมาทำให้สมดุลในแต่ละเฟสเพื่อใช้เป็นกรณี เปรียบเทียบเนื่องจากกระบวนการวิธีการกระจายโหลดที่พัฒนาขึ้นให้แก่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าเป็น แบบสมดุล

กรณีที่ 3 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสาม เฟส โดยใช้ข้อมูลการกระจายโหลดไปยังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกโดยอาศัยค่าสัดส่วนซึ่ง จะเป็นการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขั้นต้น

กรณีที่ 4 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสาม เฟสโดยใช้ข้อมูลโหลดที่กระจายไปยังหม้อแปลงจำหน่ายแต่ละลูกแบบสุ่มตามกระบวนการวิธีที่ นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2 ในบทที่ 4



รูปที่ 5.20 ระบบทดสอบสายป้อนที่ 2 อำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ข้อมูลตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization factor) ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกสรุปไว้ดังตารางที่ 5.4 โดยกำหนดจากค่าสูงสุดของโหลดที่เกิดขึ้นในช่วงสัปดาห์ที่พิจารณา อย่างไรก็ตามการนำวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไปใช้ในทางปฏิบัติ ค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์จะถูกกำหนดโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า สำหรับค่าตัวประกอบกำลังจะใช้ค่าเดียวกับค่าที่ตรวจวัดได้ ณ สถานีไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้ในแต่ละกรณีแสดงไว้ในตารางที่ 5.5-5.11 และรูปที่ 5.21-5.27

ตารางที่ 5.4 ตัวประกอบการใช้ประโยชน์ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า	ขนาด (kVA)	ตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (%)
1	100	50
2	30	90
3	30	20
4	100	50
5	50	20
6	60	90
7	100	50
8	50	50
9*	-	-
10	250	10
11	20	20
12	30	20
13	20	50
14	30	90
15	30	90
16	30	20
17	20	90
18	20	50
19	30	20
20	30	50
21	30	90
22	30	50
23	30	90
24	100	50
25	10	90
26	10	50
27	20	50
28	10	20
29	50	50
30	10	50

* หมายเหตุ จุดโหลดที่รับไฟแรงดันสูงจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ 5.5 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
0:00	9.49	9.4	8.96	9.42
1:00	8.81	8.74	8.39	8.82
2:00	8.53	8.45	8.17	8.59
3:00	8.4	8.33	7.97	8.39
4:00	8.61	8.52	8.02	8.44
5:00	9.77	9.68	9.37	9.59
6:00	15.1	15	13.95	14.41
7:00	9.92	9.78	9.5	9.96
8:00	9.21	9.13	8.65	9.09
9:00	10	9.83	9.7	10.16
10:00	10.15	10.05	9.79	10.3
11:00	10.17	10	9.73	10.2
12:00	9.98	9.85	9.82	10.31
13:00	9.28	9.18	8.86	9.35
14:00	10.25	10.13	10.02	10.52
15:00	10.21	10.01	9.93	10.43
16:00	10.61	10.49	10.42	10.91
17:00	11.76	11.51	11.57	12.12
18:00	11.71	11.57	10.86	11.39
19:00	14.49	14.27	13.43	13.89
20:00	20.81	20.59	19.38	19.59
21:00	17.68	17.52	16.43	16.78
22:00	13.61	13.5	12.86	13.34
23:00	10.92	10.82	10.23	10.76
รวม (kWh)	269.47	266.35	256.01	266.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.6 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันอังคารที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
0:00	9.31	9.23	8.84	9.31
1:00	8.78	8.72	8.38	8.82
2:00	8.64	8.57	8.23	8.65
3:00	8.61	8.55	8.17	8.6
4:00	8.88	8.82	8.15	8.6
5:00	10.64	10.56	9.82	10.3
6:00	16.73	16.59	15.66	16.07
7:00	9.65	9.55	9.17	9.65
8:00	8.78	8.69	8.27	8.71
9:00	9.64	9.46	9.51	9.96
10:00	10.11	9.94	9.55	10
11:00	9.78	9.6	9.32	9.77
12:00	9.54	9.37	9.18	9.64
13:00	8.95	8.82	8.37	8.86
14:00	9.5	9.36	9.08	9.56
15:00	9.48	9.33	9.19	9.67
16:00	9.99	9.86	9.63	10.1
17:00	10.55	10.43	10.47	11
18:00	10.78	10.71	9.97	10.5
19:00	13.38	13.21	12.42	12.9
20:00	20.62	20.45	19.21	19.42
21:00	17.86	17.71	16.69	17
22:00	13.56	13.44	12.68	13.22
523:00	10.66	10.56	10.07	10.58
รวม (kWh)	264.42	261.53	250.03	260.89

ตารางที่ 5.7 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันพุธที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
0:00	9.14	9.08	8.72	9.18
1:00	8.62	8.57	8.22	8.64
2:00	8.23	8.16	7.88	8.3
3:00	8.3	8.24	7.9	8.31
4:00	8.74	8.67	8.08	8.45
5:00	10.78	10.7	10.08	10.58
6:00	16.95	16.83	15.74	16.15
7:00	9.52	9.44	9.05	9.51
8:00	8.59	8.48	8.12	8.54
9:00	9.17	9.07	8.58	9.07
10:00	8.95	8.83	8.34	8.81
11:00	8.98	8.87	8.37	8.85
12:00	8.55	8.44	8.09	8.56
13:00	8.9	8.78	8.33	8.8
14:00	9.54	9.41	8.91	9.39
15:00	9.61	9.47	8.98	9.47
16:00	9.97	9.88	9.46	9.95
17:00	10.69	10.59	10.16	10.68
18:00	10.98	10.89	10.4	10.8
19:00	13.21	13.08	12.07	12.47
20:00	19.63	19.46	18.34	18.57
21:00	15.93	15.76	14.64	15.06
22:00	11.85	11.75	11.15	11.71
23:00	9.72	9.66	9.29	9.83
รวม (kWh)	254.55	252.11	238.90	249.68

ตารางที่ 5.8 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันพฤหัสบดีที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
0:00	8.76	8.71	8.48	8.93
1:00	8.25	8.2	7.92	8.33
2:00	8.17	8.12	7.89	8.3
3:00	8.11	8.05	7.77	8.18
4:00	8.5	8.44	7.8	8.21
5:00	10.26	10.16	9.6	10.09
6:00	15.47	15.36	14.4	14.85
7:00	9.15	9.05	8.72	9.18
8:00	8.57	8.42	8.03	8.49
9:00	8.55	8.39	8.13	8.59
10:00	8.98	8.81	8.68	9.13
11:00	8.89	8.74	8.51	8.98
12:00	8.52	8.41	8.24	8.69
13:00	8.53	8.43	8.04	8.51
14:00	9.01	8.79	8.39	9.02
15:00	9.49	9.34	9.04	9.53
16:00	9.91	9.78	9.28	9.76
17:00	10.91	10.78	10.54	11.08
18:00	11.14	11.05	10.37	10.89
19:00	12.61	12.43	11.54	12.11
20:00	21.18	20.82	19.58	19.8
21:00	17.6	17.4	16.49	16.84
22:00	13.48	13.37	12.49	13.03
23:00	10.9	10.81	10.23	10.75
รวม (kWh)	254.94	251.86	240.16	251.27

ตารางที่ 5.9 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันศุกร์ที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

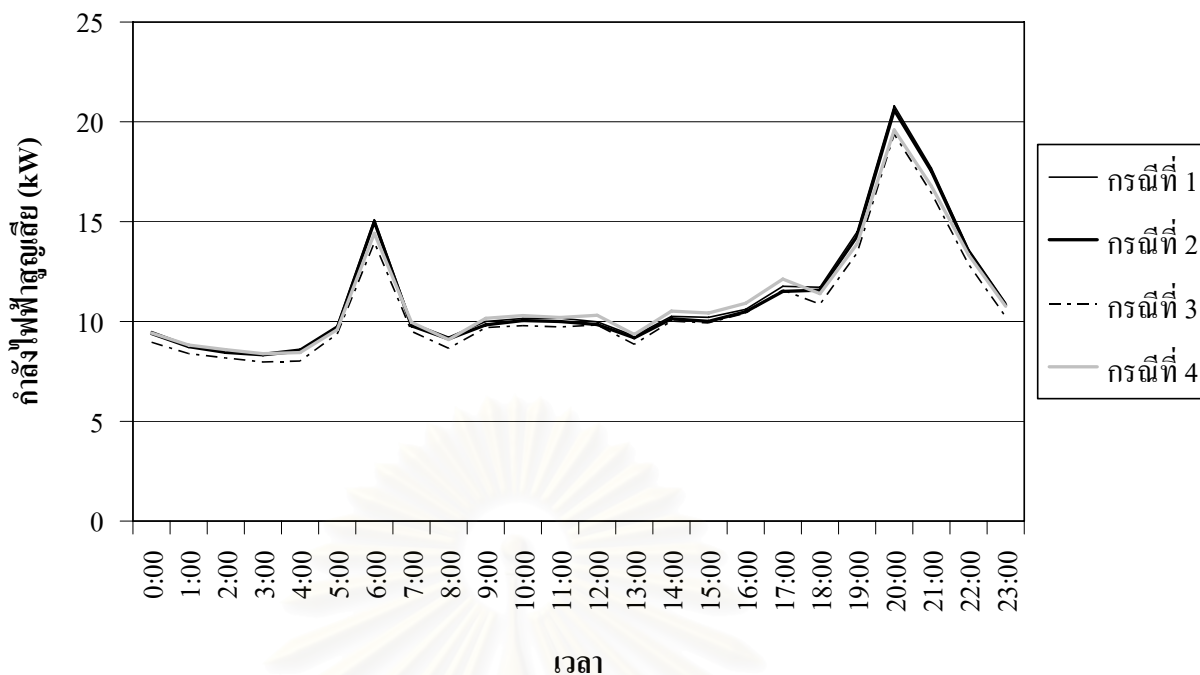
เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
0:00	9.74	9.67	9.28	9.77
1:00	9	8.94	8.55	9.07
2:00	8.68	8.6	8.26	8.71
3:00	8.49	8.41	8.12	8.51
4:00	8.9	8.85	8.23	8.68
5:00	10.64	10.56	10.48	10.41
6:00	15.52	15.42	14.59	15.05
7:00	9.78	9.68	9.2	9.67
8:00	8.66	8.58	8.13	8.56
9:00	9.05	8.96	8.52	9.03
10:00	8.88	8.73	8.42	8.91
11:00	8.51	8.34	8.16	8.65
12:00	8.6	8.44	8.2	8.68
13:00	8.37	8.27	7.88	8.33
14:00	10.58	10.32	9.8	10.34
15:00	10.08	9.93	9.47	9.99
16:00	10.72	10.56	9.95	10.48
17:00	11.27	11.07	10.54	11.05
18:00	11.53	11.44	10.9	11.44
19:00	12.79	12.65	11.93	12.45
20:00	22.05	21.79	21.18	21.33
21:00	19.5	19.31	17.81	18.1
22:00	15.08	14.95	13.86	14.34
23:00	11.95	11.86	11.2	11.74
รวม (kWh)	268.37	265.33	252.66	263.29

ตารางที่ 5.10 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันเสาร์ที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

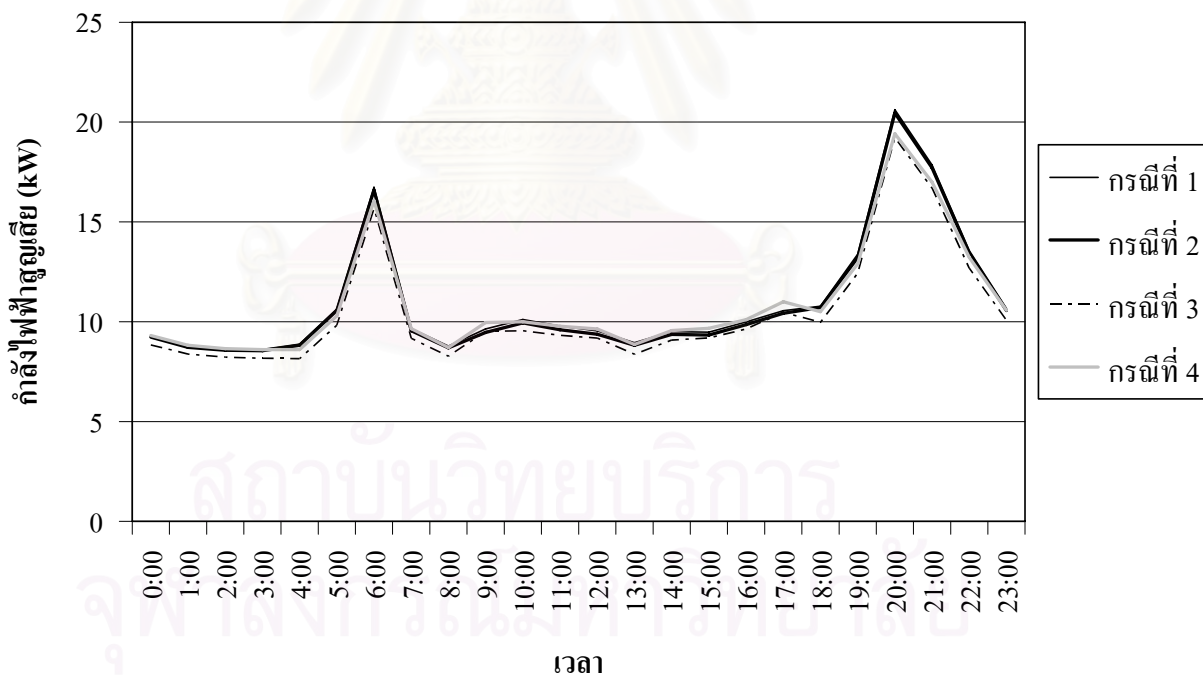
เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
0:00	9.92	9.85	9.4	9.89
1:00	9.28	9.23	8.85	9.31
2:00	8.98	8.93	8.53	8.99
3:00	8.88	8.82	8.4	8.85
4:00	8.8	8.74	8.36	8.81
5:00	10.49	10.4	9.75	10.25
6:00	15.39	15.29	14.14	14.59
7:00	10.5	10.4	9.91	10.4
8:00	9.59	9.46	9.05	9.53
9:00	10.19	10.09	9.64	10.14
10:00	9.51	9.38	9.05	9.58
11:00	9.41	9.27	8.99	9.48
12:00	9.22	9.15	8.85	9.34
13:00	9.2	9.12	8.73	9.22
14:00	9.61	9.5	9.08	9.57
15:00	9.73	9.64	9.23	9.74
16:00	10.36	10.26	9.96	10.43
17:00	11.28	11.16	10.71	11.25
18:00	11.94	11.76	11.04	11.6
19:00	16.28	16.1	15.13	15.51
20:00	19.64	19.42	18.54	18.23
21:00	16.43	16.26	15.09	15.5
22:00	12.95	12.83	12.05	12.6
23:00	10.94	10.85	10.18	10.89
รวม (kWh)	268.52	265.91	252.66	263.70

ตารางที่ 5.11 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในกรณีต่างๆ ณ วันอาทิตย์ที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

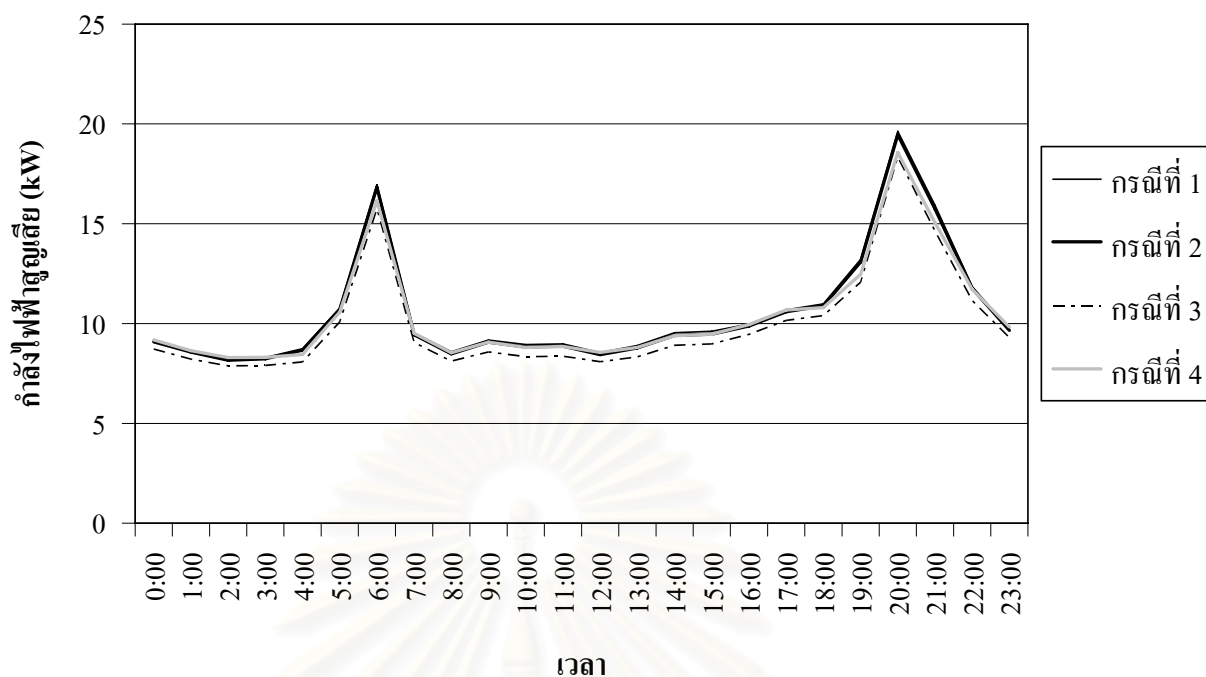
เวลา	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
0:00	9.43	9.37	8.98	9.47
1:00	9.03	8.97	8.6	9.07
2:00	8.49	8.43	8.16	8.61
3:00	8.31	8.27	7.97	8.4
4:00	8.54	8.48	8.13	8.56
5:00	10.05	9.95	9.39	9.9
6:00	13.83	13.71	12.63	13.13
7:00	10.2	10.1	9.71	10.22
8:00	9.42	9.37	8.99	9.47
9:00	10.09	9.98	9.35	9.89
10:00	9.33	9.27	8.77	9.27
11:00	9.49	9.38	8.91	9.4
12:00	9.56	9.44	8.97	9.47
13:00	9.44	9.32	8.84	9.34
14:00	9.89	9.8	9.41	9.92
15:00	9.7	9.63	9.11	9.6
16:00	10.79	10.69	10.11	10.63
17:00	11.52	11.39	10.69	11.23
18:00	12.1	11.99	11.37	11.94
19:00	17.06	16.8	15.67	16.1
20:00	19.51	19.3	17.79	18.04
21:00	15.29	15.16	14.01	14.47
22:00	12.16	12.04	11.11	11.69
23:00	10.03	9.98	9.36	9.58
รวม (kWh)	263.26	260.82	246.03	257.4



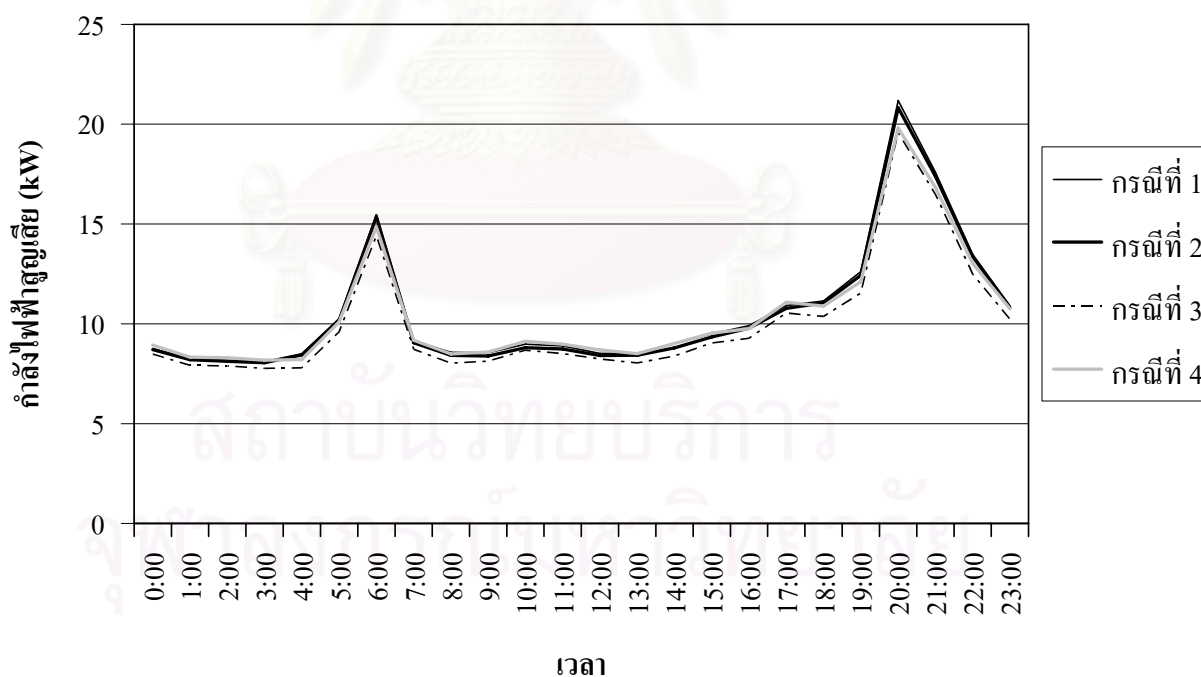
รูปที่ 5.21 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ
ของวันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548



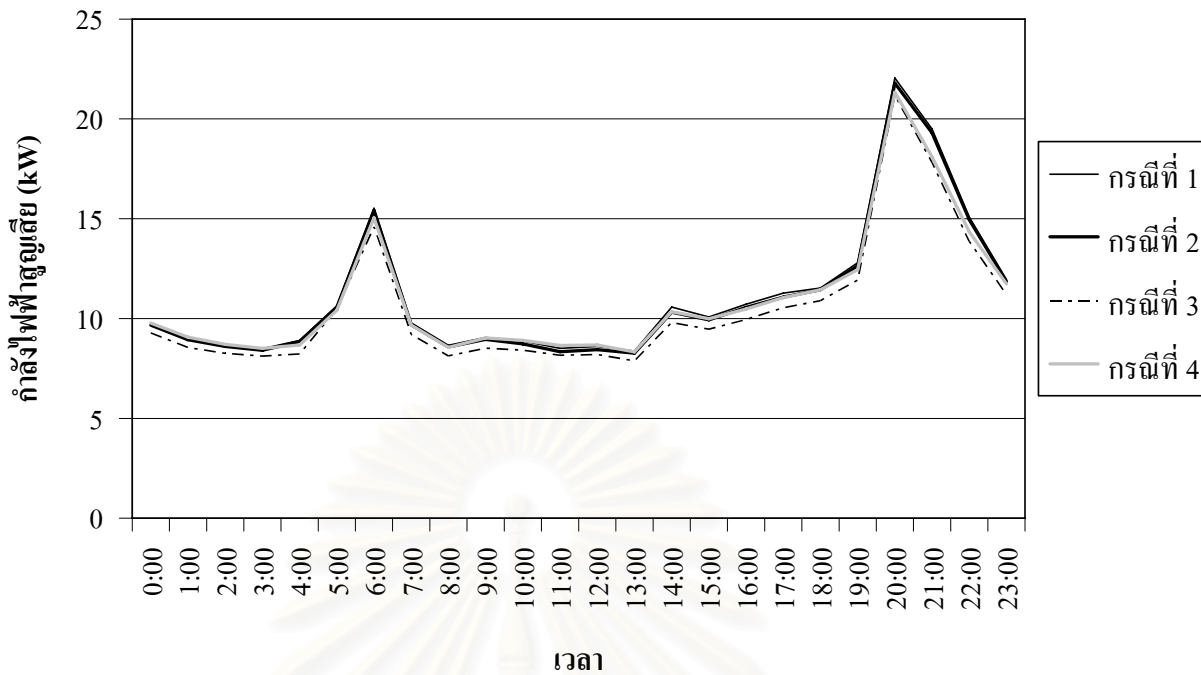
รูปที่ 5.22 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ
ของวันอังคารที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2548



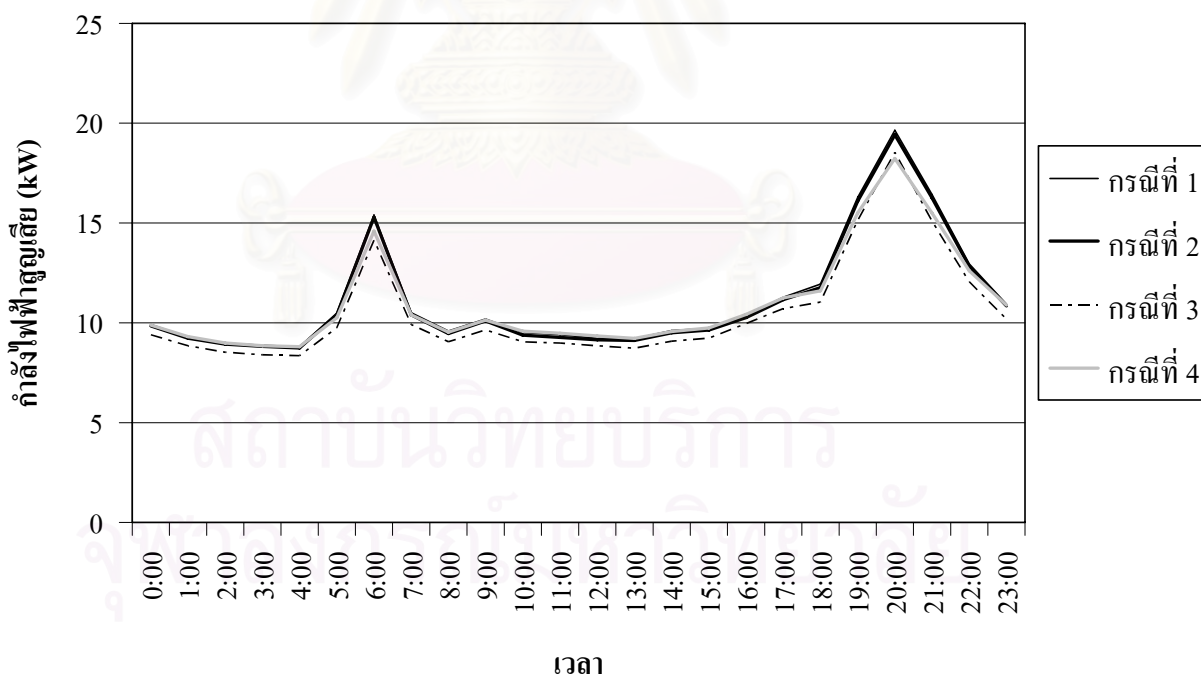
รูปที่ 5.23 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ
ของวันพุธที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2548



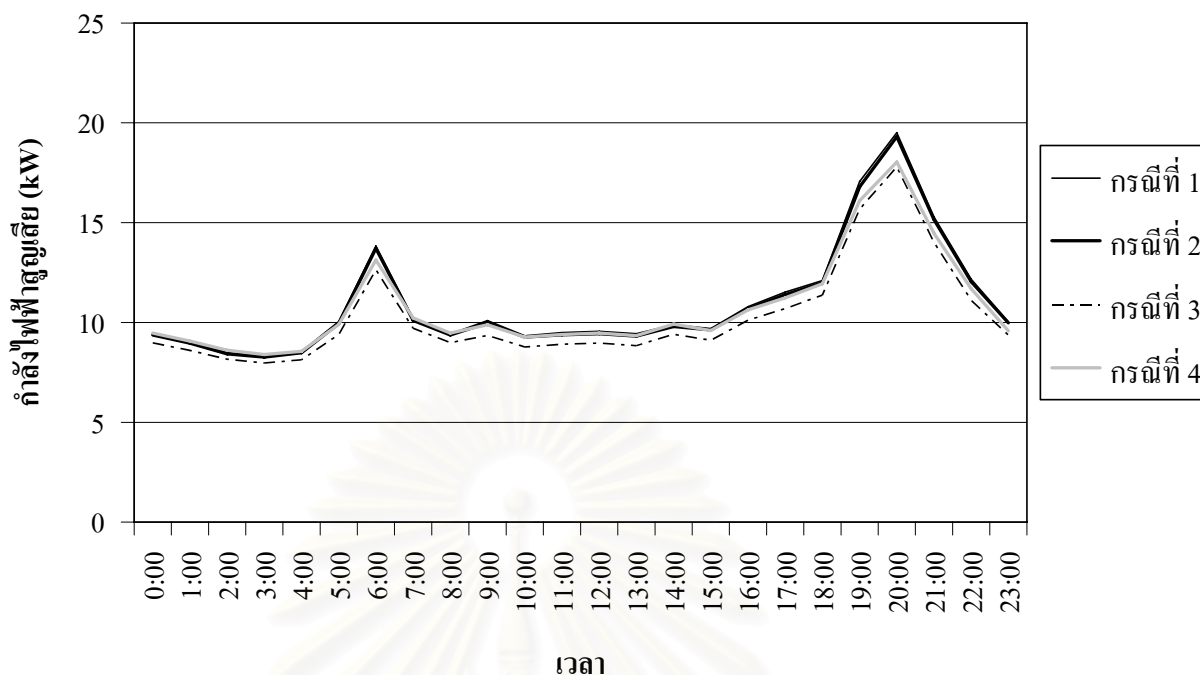
รูปที่ 5.24 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ
ของวันพฤหัสบดีที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2548



รูปที่ 5.25 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ
ของวันศุกร์ที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2548



รูปที่ 5.26 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ
ของวันเสาร์ที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

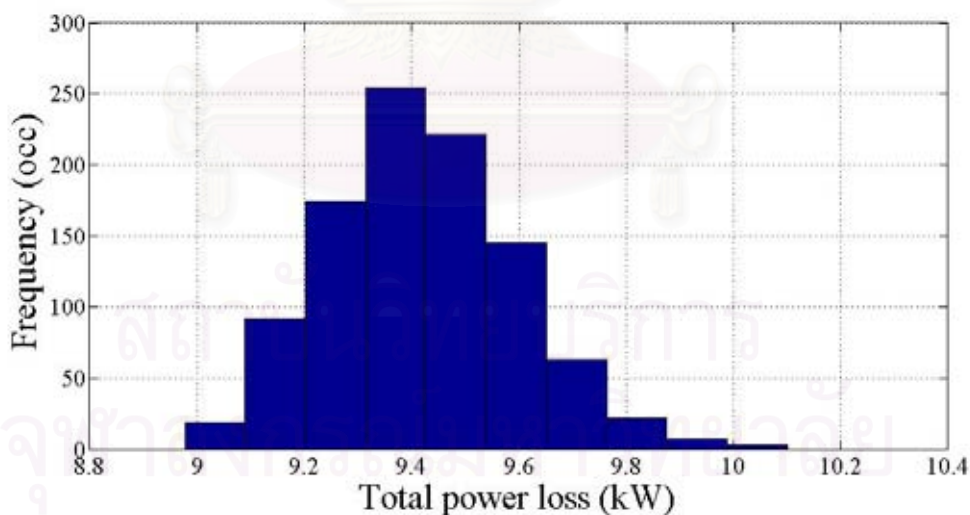


รูปที่ 5.27 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีต่างๆ
ของวันอาทิตย์ที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2548

เมื่อพิจารณาในภาพรวมจากรูปที่ 5.21 ถึง 5.27 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ประมาณด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น (กรณีที่ 3 และ 4) มีค่าสอดคล้องกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจริงโดยมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือช่วงเวลาที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าสูง อาทิเช่น ช่วงเวลาประมาณ 18.00 ถึง 21.00 ค่าที่ได้จากการประมาณก็มีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน แม้ว่าค่าที่ได้ในแต่ละรายชั่วโมงที่พิจารณาอาจแตกต่างกันแต่เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วถือว่าค่าที่ได้จากการประมาณสามารถสะท้อนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

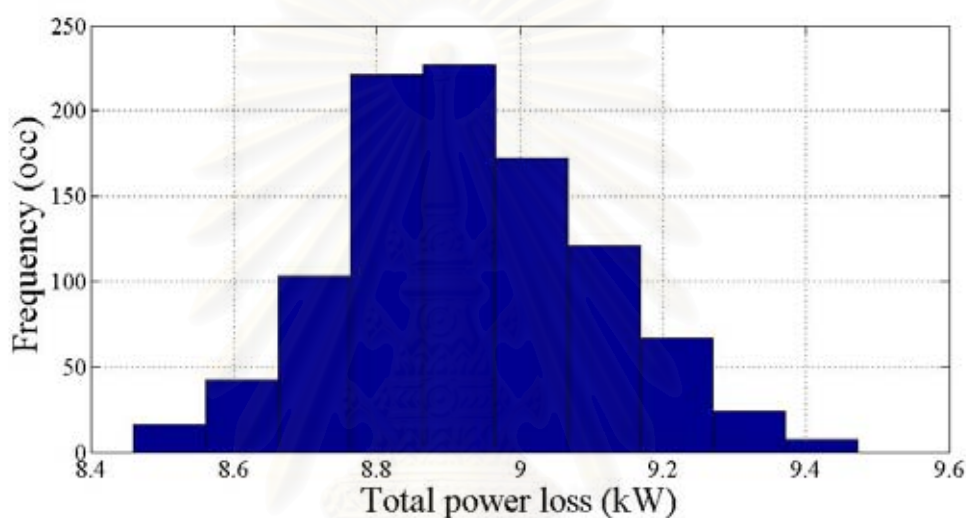
การสรุปจากผลการทดสอบจะพิจารณาภาพรวมผ่านค่าพลังงานสูญเสียรวมในแต่ละวันเป็นหลัก เนื่องจากการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเราให้ความสนใจกับภาพรวมทั้งวัน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเราสนใจค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในชั่วโมงใดชั่วโมงหนึ่ง เริ่มต้นจากการพิจารณาผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดที่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบทดสอบตัวอย่าง ผลกระทบดังกล่าวอาจมากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะของระบบและการใช้ไฟฟ้า โดยทั่วไประบบจำหน่ายที่อยู่ในพื้นที่ชนบทมักมีความไม่สมดุลของโหลดสูง เนื่องจากมีการติดตั้งหม้อแปลงจำหน่าย 1 เฟสเป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้ในกรณีที่ 1 และ 2 ทั้ง 7 วัน พบว่าผลจากความไม่สมดุลของโหลดทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นจากกรณีที่สมดุล (กรณีที่ 2) มากที่สุดเท่ากับ 1.16% (วันจันทร์ที่ 23) ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.93% (วันอาทิตย์ที่ 29) และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.06%

ถัดไปเราจะพิจารณาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2, 3 และ 4 เปรียบเทียบกัน จะพบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 คลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้ในกรณีที่ 2 ประมาณ 4-5% ซึ่งค่อนข้างสูงเนื่องจากการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละชั่วโมงในกรณีที่ 3 จะอาศัยค่าสัดส่วนในการกระจายและปรับค่าโหลดของหม้อแปลงจำหน่ายแต่ละลูกจนกระทั่งมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ Slack bus เท่ากับค่าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ตามที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3.1 ดังนั้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จึงเป็นเพียงผลลัพธ์ค่าหนึ่งของลักษณะโหลดที่อาจเกิดขึ้นซึ่งทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับค่าที่ได้จากการตรวจวัด ผลดังกล่าวว่ายังมีโอกาสคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจากการกระจายตัวของโหลดในความเป็นจริงแตกต่างกันไป เพื่อที่จะลดผลจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยการนำค่าโหลดรวมที่คำนวณได้จากการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยค่าสัดส่วนในขั้นต้นมากระจายให้กับหม้อแปลงจำหน่ายแต่ละลูกแบบสุ่มเพื่อที่จะหารูปแบบที่เป็นไปได้ของโหลด (ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ 1000 รูปแบบ) ที่ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ Slack bus ที่ได้จากการคำนวณคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดไม่เกิน 2% ก่อนนำค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้จากรูปแบบต่างๆมาหาค่าเฉลี่ยและการกระจายตัวตามที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3.2 รูปที่ 5.28 ซึ่งเป็นตัวอย่างการกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย ณ เวลา 0.00 น. ของวันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548



รูปที่ 5.28 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย
ในวันจันทร์ที่ 23 พฤษภาคม พ.ศ. 2548 เวลา 0.00 น.

จากรูปที่ 5.28 ทำให้เราเห็นภาพรวมของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจเกิดขึ้น ณ เวลาที่พิจารณาได้ดีขึ้นซึ่งจะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในเวลาดังกล่าวส่วนมากมีค่าระหว่าง 9.3-9.4 kW ทั้งนี้ค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 9.4 kW (กรณีที่ 2) อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจริงไม่จำเป็นต้องอยู่ในช่วงดังกล่าว เนื่องจากรูปแบบโหลดที่ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงดังกล่าวอาจไม่ใช่รูปแบบที่เกิดขึ้นบ่อยตามลักษณะการเกิดของโหลดแบบสุ่ม ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีวันพุธที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2548 เวลา 0.00 น. โดยมีการกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแสดงไว้ดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 การกระจายตัวของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย
ในวันพุธที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2548 เวลา 0.00 น.

จากรูปที่ 5.29 จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในเวลาดังกล่าวส่วนมากมีค่าระหว่าง 8.9-9.0 kW โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 8.76 kW (กรณีที่ 2) ซึ่งไม่ได้อยู่ในช่วงดังกล่าว อย่างไรก็ตามข้อมูลสำคัญที่ทราบได้จากรูปการกระจายตัวก็คือขอบเขตของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พิจารณา โดยที่เราเลือกใช้ค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้ จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ประมาณ โดยวิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำในระดับหนึ่งโดยใช้ข้อมูลที่มีอยู่จริงในทางปฏิบัติผนวกกับประสบการณ์ของเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า ดังนั้นการให้ข้อมูลของเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าเกี่ยวกับลักษณะโหลดของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละลูกจึงมีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อคำตอบที่ได้ เนื่องจากการให้ข้อมูลที่แม่นยำทำให้สามารถสร้างแบบจำลองโหลดได้ใกล้เคียงกับลักษณะโหลดที่เกิดขึ้นจริงมากขึ้น

ลักษณะสำคัญประการหนึ่งของผลการทดสอบคือค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละวันที่คำนวณได้ในกรณีที่ 4 มีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจริง (คลาดเคลื่อนไม่เกิน 2%) แม้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละชั่วโมงจะคลาดเคลื่อนไปจากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาโดยรวมตลอดทั้งวัน ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จะมีการหักล้างกัน และเนื่องจากเราตั้งสมมติฐานว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละจุดโหลดและค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ดังนั้นเมื่อสุ่มตัวอย่างได้เพียงพอ (1000 ตัวอย่างในแต่ละชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 24000 ตัวอย่างในหนึ่งวัน) จะทำให้ผลการประมาณโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean value) จากการสุ่มมีระดับความเชื่อมั่น (Confidence level, [5]) มากพอในระดับหนึ่ง ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ได้ดังกล่าวจึงมีโอกาสใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 และ 4 (เป็นเปอร์เซ็นต์) เทียบกับกรณีที่ 2 แสดงไว้ดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 และ 4 เทียบกับกรณีที่ 2

วันที่	กรณีที่ 3 (%)	กรณีที่ 4 (%)
23 พ.ค. 2548	3.88	0.15
24 พ.ค. 2548	4.4	0.24
25 พ.ค. 2548	5.24	0.96
26 พ.ค. 2548	4.65	0.23
27 พ.ค. 2548	4.78	0.77
28 พ.ค. 2548	4.98	0.83
29 พ.ค. 2548	5.67	1.31

5.3 ระบบทดสอบและผลการทดสอบสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ [21]

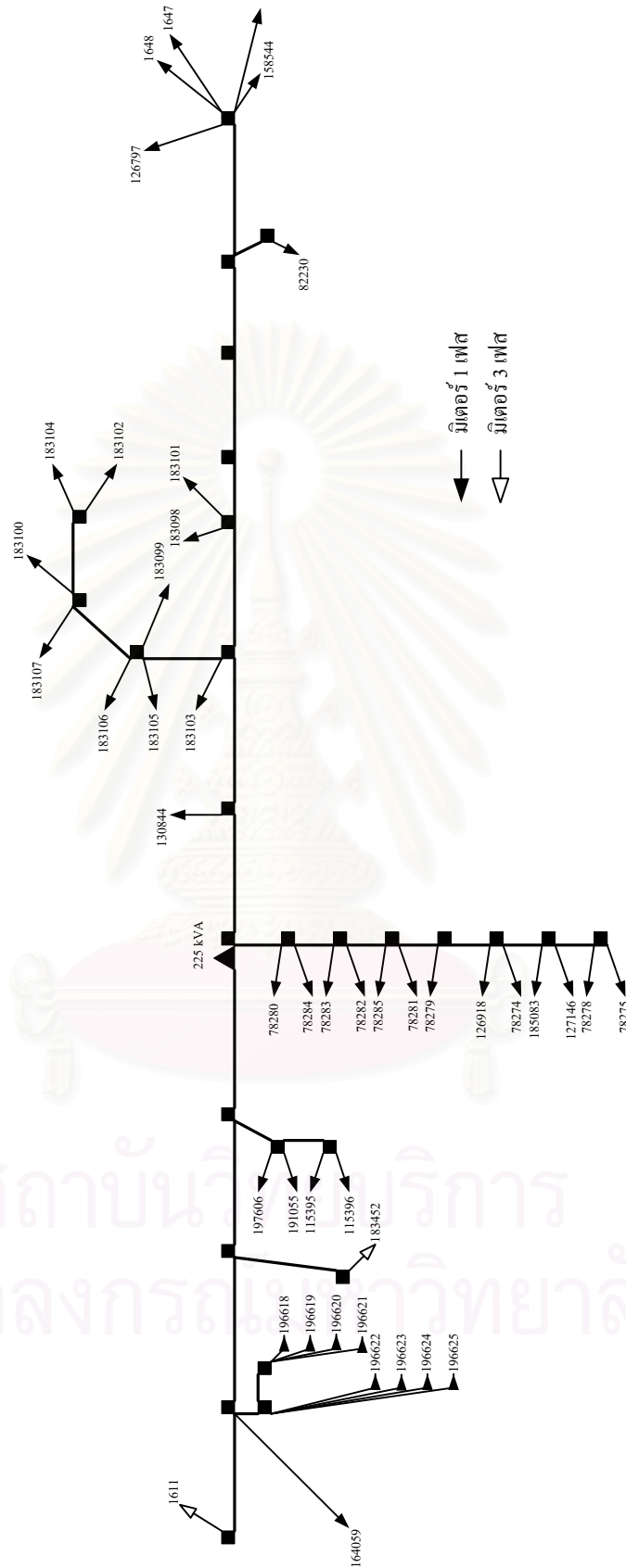
ระบบทดสอบสำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่นำมาใช้นี้เป็นตัวอย่างจริงในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง เขตบางกะปิแสดงในรูปที่ 5.30 เป็นวงจรของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าสามเฟสขนาด 225 kVA จำนวน 26 บัส ผู้ใช้ไฟฟ้า 45 รายเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าเฟสเดียว 43 รายและผู้ใช้ไฟฟ้าสามเฟส 2 ราย โหลดส่วนใหญ่เป็นแบบที่อยู่อาศัย (Residential load) ข้อมูลแผนภาพเส้นเคเบิลของวงจร ตำแหน่งมิเตอร์ผู้ใช้ไฟได้จากข้อมูลระบบแผนที่ทางภูมิศาสตร์(GIS) โดยแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ในการทดสอบได้กำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้ามีตัวประกอบการใช้ประโยชน์เท่ากับ 0.65 และโหลดทุกจุดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.92 ในทางปฏิบัติค่าดังกล่าวจะประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า จากนั้นเราจะกระจายโหลดไปยังจุดโหลดต่างๆในระบบโดยอาศัยค่าสัดส่วนที่คำนวณจากพิกัดกระแสของมิเตอร์ผู้ใช้ไฟแต่ละราย การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 4 กรณีตามรายละเอียดดังนี้

กรณีที่ 1 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากโปรแกรม PSS/ADEPT โดยคิดทุกจุดโหลดที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าหรือมิเตอร์ติดตั้งอยู่ตามจริง

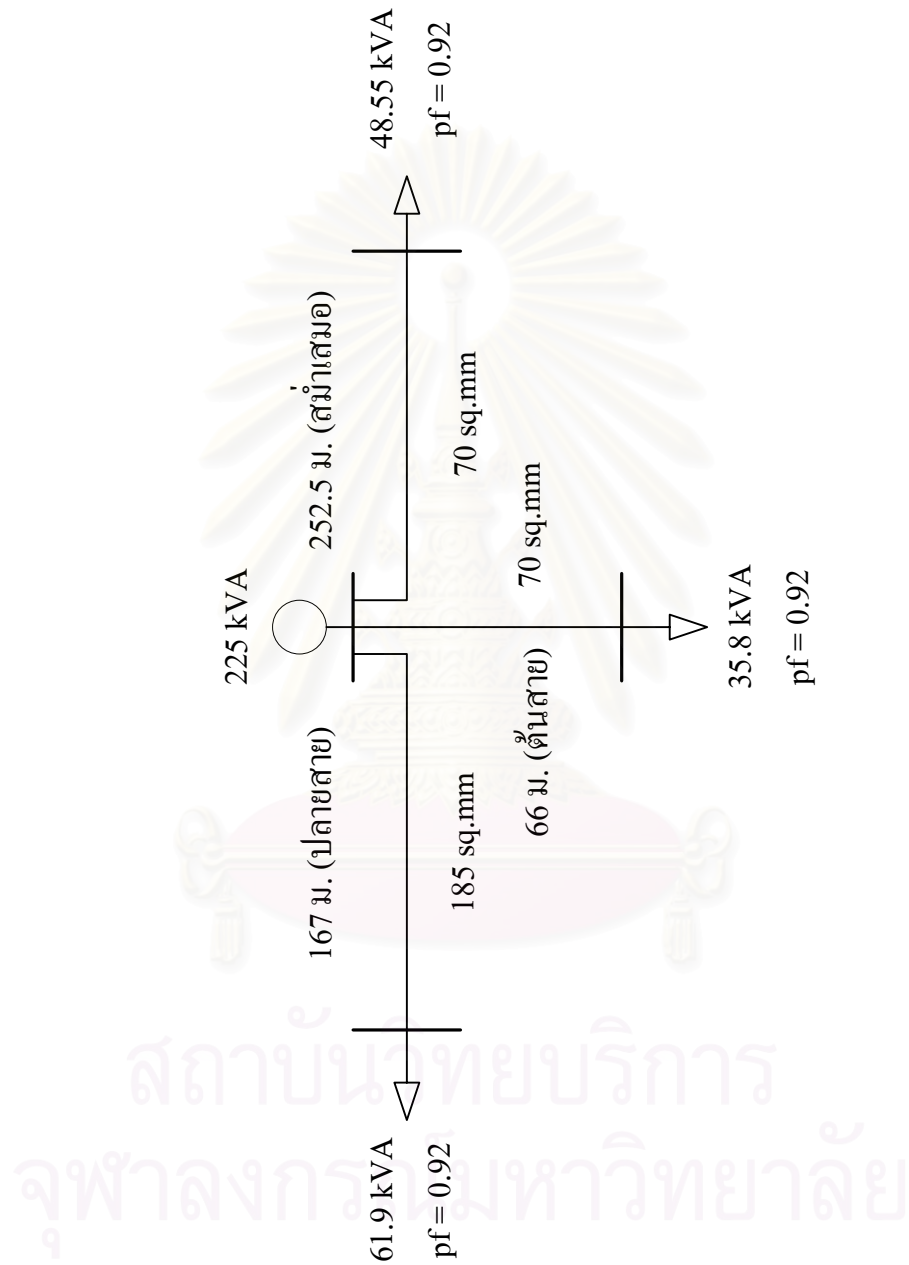
กรณีที่ 2 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากโปรแกรม PSS/ADEPT เช่นเดียวกับกรณีที่ 1 แต่ค่าโหลดจะถูกกำหนดให้สมดุล (พิจารณาเสมือนระบบสามเฟสสมดุล) โดยนำค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม ณ จุดโหลดนั้นมาแบ่งให้เท่าๆกันในแต่ละเฟส

กรณีที่ 3 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้น ในกรณีนี้จากรูปที่ 5.30 เราสามารถแบ่งออกเป็นสามเส้นทางหลักแสดงไว้ดังรูปที่ 5.31 เนื่องจากระยะการเดินสายในวงจรได้คำนวณจากข้อมูล GIS ซึ่งมีความแม่นยำในระดับหนึ่ง ดังนั้นเราจะกำหนดให้ระดับความคลาดเคลื่อนหรือค่าความไม่แน่นอนของความยาวสายเท่ากับ 5% และกำหนดให้ความไม่แน่นอนของค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมที่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าที่คาดการณ์ไว้ (ตัวประกอบการใช้ประโยชน์เท่ากับ 0.65 คิดเป็น 146.25 kVA) เท่ากับ 10% จากนั้นเราจึงทำการกำหนดความยาวสายสมดุลในแต่ละเส้นทางให้สอดคล้องกับลักษณะความหนาแน่นของโหลดประจำแต่ละเส้นทางนั้นดังรูปที่ 5.31

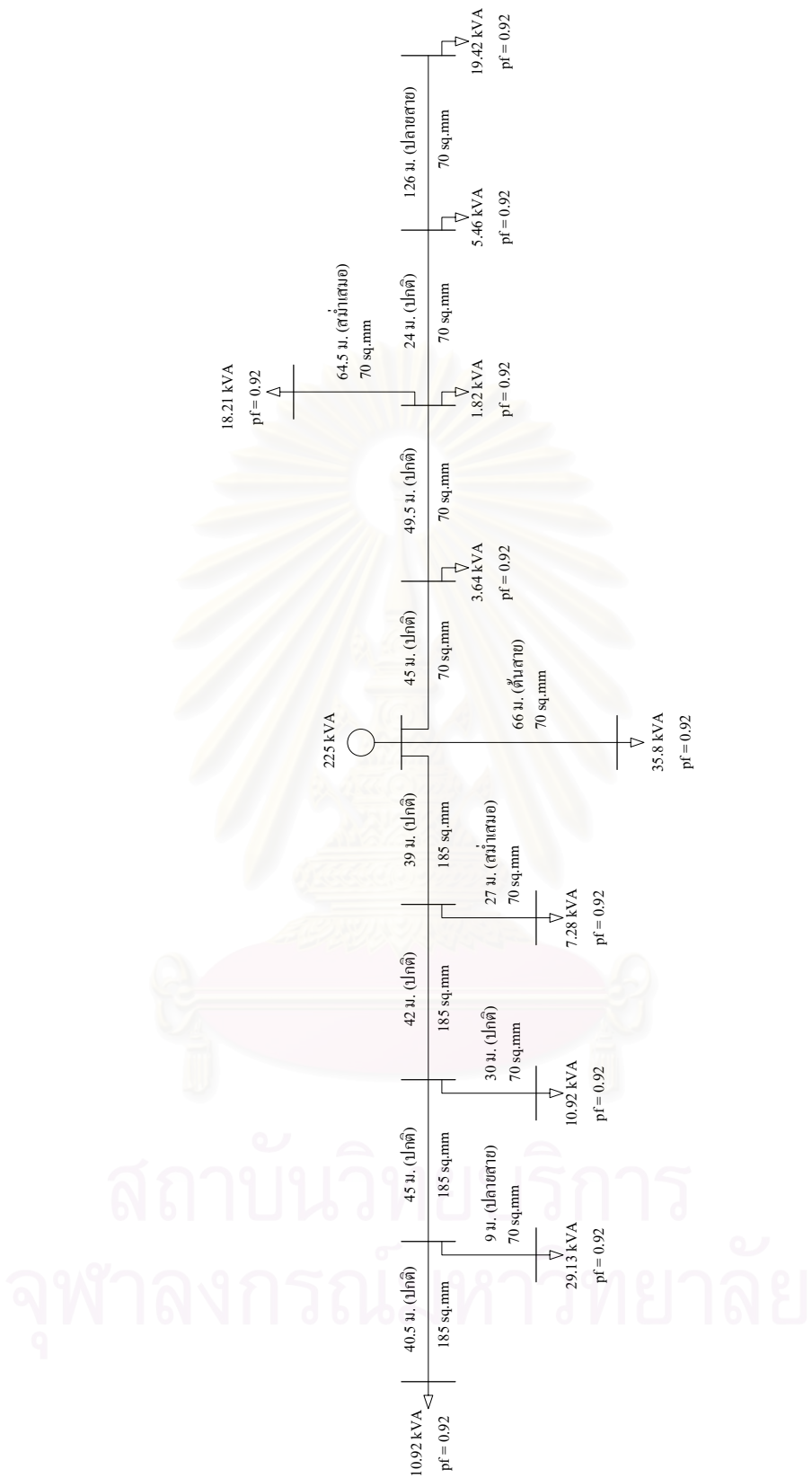
กรณีที่ 4 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชซีโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่นเดียวกับกรณีที่ 3 แต่ในกรณีนี้จะพิจารณาวงจรที่มีรายละเอียดมากขึ้น นั่นคือมีการแบ่งวงจรออกเป็นวงจรย่อยๆ เพื่อคิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ละเอียดไปในส่วนของวงจร Lateral จากกรณีที่ 3 และคำนึงถึงขนาดของสายที่แตกต่างกัน อาทิเช่นสายหลักที่จ่ายออกจากต้นหม้อแปลงจำหน่ายจะใช้สายขนาด 185 sq.mm แต่เมื่อทำการเดินสายไปยังมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ถัดไปจากแนวนอน (แนวยาวหลัก) จะมีการเปลี่ยนขนาดสายไปเป็นสายขนาด 70 sq.mm เป็นต้น รูปของวงจรที่ใช้ในการคำนวณแสดงไว้ดังรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.30 ระบบทดสอบแรงดันต่ำของการไฟฟ้านครหลวง เขตบางกะปิ



รูปที่ 5.31 วงจรสมมูลสำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3



รูปที่ 5.32 วงจรสมมูลสำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4

ค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละจุดโหลดนั้นจะคำนวณจากพิกัดกระแสของมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยพิจารณาแยกตามประเภทมิเตอร์ (มิเตอร์สามเฟสหรือมิเตอร์หนึ่งเฟส) เพื่อคำนวณพิกัดค่ากำลังไฟฟ้าของมิเตอร์ก่อนนำไปคำนวณเป็นค่าสัดส่วนดังสมการที่ (5.5) ซึ่งเป็นตัวกำหนดสัดส่วนปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ตำแหน่งจุดโหลดต่างๆ โดยการนำค่าสัดส่วนดังกล่าวไปคูณกับปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมที่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า

พิกัดค่ากำลังไฟฟ้าของมิเตอร์สามเฟสและหนึ่งเฟสสามารถคำนวณจากสมการที่ (5.3) และ (5.4) ตามลำดับ โดยกำหนดให้แรงดันสายมีขนาด 400 โวลต์

$$S_{3-phase}^{meter} = \sqrt{3} \times 400 \times I_{rated}^{meter} \quad (5.3)$$

$$S_{1-phase}^{meter} = \frac{400}{\sqrt{3}} \times I_{rated}^{meter} \quad (5.4)$$

ค่าสัดส่วนของมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายคำนวณจากสมการที่ (5.5)

$$\lambda_i = \frac{S_i^{meter}}{\sum_i^N S_i^{meter}} \quad (5.5)$$

โดยที่ N คือจำนวนมิเตอร์ทั้งหมด

ผลการคำนวณค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า ค่าสัดส่วนและค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่แต่ละจุดโหลดของระบบทดสอบแรงดันต่ำของการไฟฟ้านครหลวงเขตบางกะปิแสดงไว้ดังตารางที่ 5.13 โดยข้อมูลหมายเลขมิเตอร์ ชนิด และพิกัดกระแสในตารางที่ 5.13 เป็นข้อมูลจริงของระบบจำหน่ายแรงดันต่ำของการไฟฟ้านครหลวง เขตบางกะปิ ทั้งนี้การประเมินค่าความยาวสายป้อนในรูปที่ 5.31 จะพิจารณาจากความยาวเฉพาะสายป้อนหลักเท่านั้น

ตารางที่ 5.13 ข้อมูลมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบทดสอบแรงดันต่ำ

หมายเลข มิเตอร์	ประเภท	พิกัดกระแส (A)	พิกัดค่า กำลังไฟฟ้า (kVA)	ค่าสัดส่วน	ค่าปริมาณ การใช้ไฟฟ้า (kVA)
1611	3-phase	30	20.79	0.075	10.92
164059	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196618	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196619	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196620	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196621	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196622	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196623	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196624	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
196625	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
183452	3-phase	30	20.79	0.075	10.92
197606	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
191055	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
115395	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
115396	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
78280	1-phase	50	11.55	0.041	6.07
78284	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
78283	1-phase	50	11.55	0.041	6.07
78282	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
78285	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
78281	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
78279	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
126918	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
78274	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
185083	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
127146	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
78278	1-phase	15	3.465	0.012	1.82

ตารางที่ 5.13 (ต่อ) ข้อมูลมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบทดสอบแรงดันต่ำ

หมายเลข มิเตอร์	ประเภท	พิกัดกระแส (A)	พิกัดค่า กำลังไฟฟ้า (kVA)	ค่าสัดส่วน	ค่าปริมาณ การใช้ไฟฟ้า (kVA)
78275	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
130844	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
183103	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
183105	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
183106	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
183099	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
183107	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
183100	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
183102	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
183104	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
183098	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
183101	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
82230	1-phase	5	1.155	0.004	0.61
126797	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
1647	1-phase	50	11.55	0.041	6.07
1648	1-phase	15	3.465	0.012	1.82
186892	1-phase	30	6.93	0.025	3.64
158544	1-phase	30	6.93	0.025	3.64

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้ในแต่ละกรณี (เป็น kW) แสดงไว้ในตารางที่ 5.14 โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 และ 4 จะใช้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ผ่านการ Defuzzify จากตัวเลขฟัซซีซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.33 และ 5.34

ตารางที่ 5.14 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW) ในระบบทดสอบแรงดันต่ำ

กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
1.79	1.53	1.4304	1.4492

พิจารณาผลการทดสอบจากตารางที่ 14 จะได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบทดสอบ จำหน่ายแรงดันต่ำในกรณีที่ 1 (1.79 kW) มากกว่ากรณีที่ 2 (1.53 kW) คิดเป็น 14.52% แสดงให้เห็นว่าความไม่สมดุลของปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละเฟสในแต่ละจุดโหลดส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเพิ่มขึ้นมาก แม้ว่าจะพยายามจัดโหลดให้มีความสมดุลในแต่ละเฟสที่ต้นหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแล้วก็ตาม (สำหรับระบบทดสอบนี้มีอัตราส่วนเท่ากับ 0.91:0.93:1.00) ดังนั้นการวางแผนสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียควรคำนึงถึงการกระจายปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละเฟสให้มีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกๆจุดโหลด (กลุ่มของมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียงกัน) สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้ในกรณีที่ 3 และ 4 คลาดเคลื่อนไปจากกรณีที่ 1 คิดเป็น 23.5% และ 22.27% ตามลำดับและเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ในกรณีที่ 2 พบว่าคลาดเคลื่อนไปเท่ากับ 6.51% และ 5.28% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบผลเราจะเลือกใช้ กรณีที่ 2 เป็นกรณีอ้างอิง (Reference case) เนื่องจากสอดคล้องกับสมมติฐานของกระบวนการวิวัฒนาการที่พัฒนาขึ้นซึ่งพิจารณาระบบเป็นแบบสามเฟสสมดุล จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 คลาดเคลื่อนน้อยกว่ากรณีที่ 3 เนื่องจากเราใช้วงจรสมมูลที่มีรายละเอียดมากขึ้นโดยคำนึงถึงวงจร Lateral ที่แยกออกจากวงจรหลักและการใช้ขนาดสายป้อนที่แตกต่างกันทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้มีค่าใกล้เคียงมากขึ้น อย่างไรก็ตามการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4 จำเป็นต้องมีข้อมูลเพิ่มเติม การคำนวณจะมีความซับซ้อนมากขึ้นซึ่งอาจไม่สะดวกในทางปฏิบัติ เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักในการนำวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่นำเสนอไปใช้คือสามารถประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้รวดเร็วและมีความแม่นยำในระดับหนึ่งโดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามหากวงจรย่อยมีความยาวค่อนข้างมากหรือมีเป็นจำนวนมากและส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย การละเลยวงจรย่อย (กรณีที่ 3) อาจให้คำตอบที่ต่ำกว่าความเป็นจริง ในกรณีนี้เราอาจใช้ข้อมูลเพิ่มเติมในส่วนของวงจรย่อย (Lateral) อันประกอบไปด้วย ชนิดของสาย ความยาวสาย ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (สามารถคำนวณได้จากค่าพิคคกระแสดำเนินที่ใต้กล่าวในข้างต้น) และลักษณะการกระจายตัวของโหลดในวงจรย่อยนั้น เพื่อนำไปคำนวณค่าความยาวสายที่จะนำไปรวมกับความยาวสายสมมูลของสายป้อนหลักซึ่งกำหนดโดย

$$L = \left(\frac{S_{lateral}}{S_{main}} \right)^2 \times \left(\frac{R_{lateral}}{R_{main}} \right) \times L_{lateral}^{eq} \quad (5.6)$$

โดย

$S_{lateral}$ คือ ค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมในวงจรย่อย

S_{main} คือ ค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวมในวงจรหลัก

- $R_{lateral}$ คือ ความต้านทานต่อหน่วยความยาวในวงจรย่อย
 R_{main} คือ ความต้านทานต่อหน่วยความยาวในวงจรหลัก
 $L_{lateral}^{eq}$ คือ ความยาวสายสมมูลของวงจรย่อย

สมการที่ (5.6) เป็นการประมาณโดยการแปลงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรย่อยไปเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรหลัก การปรับค่าความยาวสายสมมูลดังกล่าวยังคงทำให้การคำนวณนั้นง่ายกว่าการคำนวณในกรณีที่ 4 ที่มีจำนวนบัสมากกว่า (กรณีที่ 3 วงจรมีขนาด 4 บัส ในขณะที่กรณีที่ 4 วงจรมีขนาด 14 บัส) ตัวอย่างการคำนวณการปรับความยาวสายสมมูลของวงจรในรูปที่ 5.31 แสดงไว้ดังสมการที่ (5.7) โดยมีรายละเอียดดังนี้ พิจารณาวงจรในรูปที่ 5.31 ทางขวา (ด้านที่มีความยาวสายป้อนหลักเท่ากับ 252.5 เมตร) พบว่ามีวงจรย่อยที่มีความยาววงจรค่อนข้างสูง (64.5 เมตร) อยู่ 1 วงจร โดยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 18.21 kVA (จากรูปที่ 5.32) และโหลดมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จะได้ว่า

$$L = \left(\frac{18.21}{48.55} \right)^2 \times 1 \times \frac{64.5}{3} = 3.025 \quad (5.7)$$

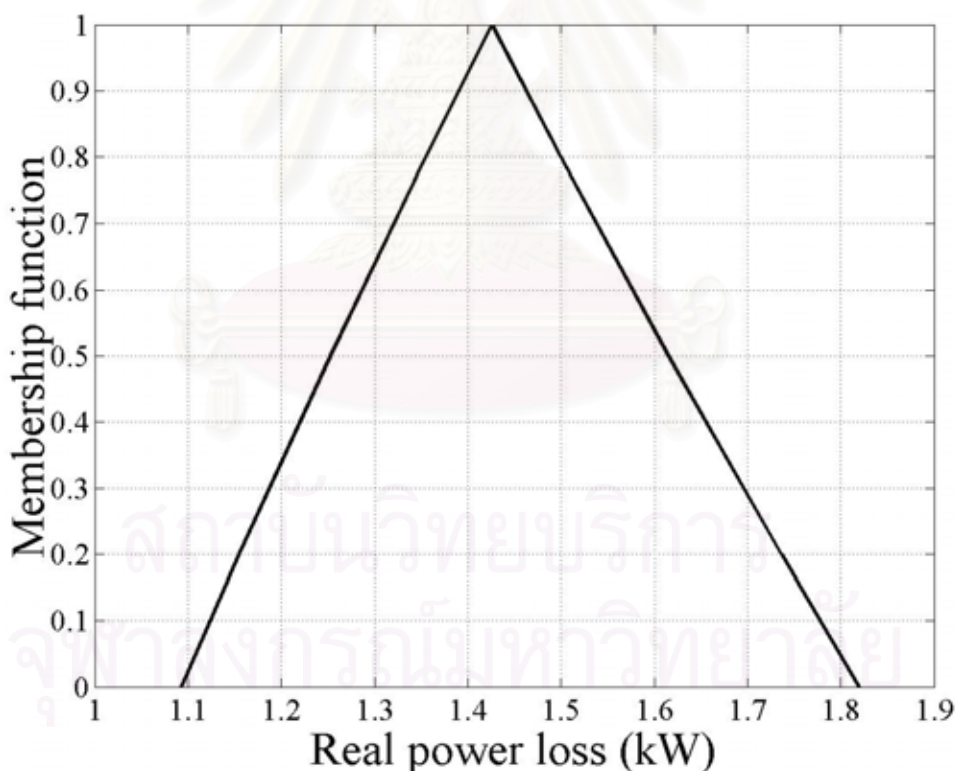
ดังนั้นความยาวสายป้อนหลักจะเพิ่มขึ้นเป็น $252.5 + 3.025 = 255.525$ เมตร

อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นทั้งในกรณีที่ 3 และ 4 ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากวงจรทดสอบมีคุณสมบัติที่ไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณวงจรสมมูล (ความยาวสายสมมูล) แต่วงจรทดสอบที่ใช้มีจำนวนจุดโหลดไม่มากซึ่งการคำนวณค่าความยาวสายสมมูลในหัวข้อ 4.4.1 จะสมมติให้มีจุดโหลดเป็นจำนวนมากกระจายตัวต่อเนื่องตลอดทั้งสายป้อน ดังนั้นวงจรสมมูลดังกล่าวจะทำให้ผลตอบควรให้ผลตอบที่แม่นยำมากขึ้นหากนำไปใช้กับวงจรจำหน่ายแรงดันต่ำที่มีจุดโหลดอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่มีจุดโหลดไม่มากนักอาจทำได้โดยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแต่หากระบบจำหน่ายมีจุดโหลดเพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่นระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่มีมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้ามากกว่า 200 เครื่องการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าอาจไม่สะดวกเนื่องจากปริมาณข้อมูลที่มีเป็นจำนวนมากและอาจไม่ครบถ้วน ในกรณีดังกล่าวนี้จึงจะเหมาะสมที่จะนำวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่นำเสนอไปใช้

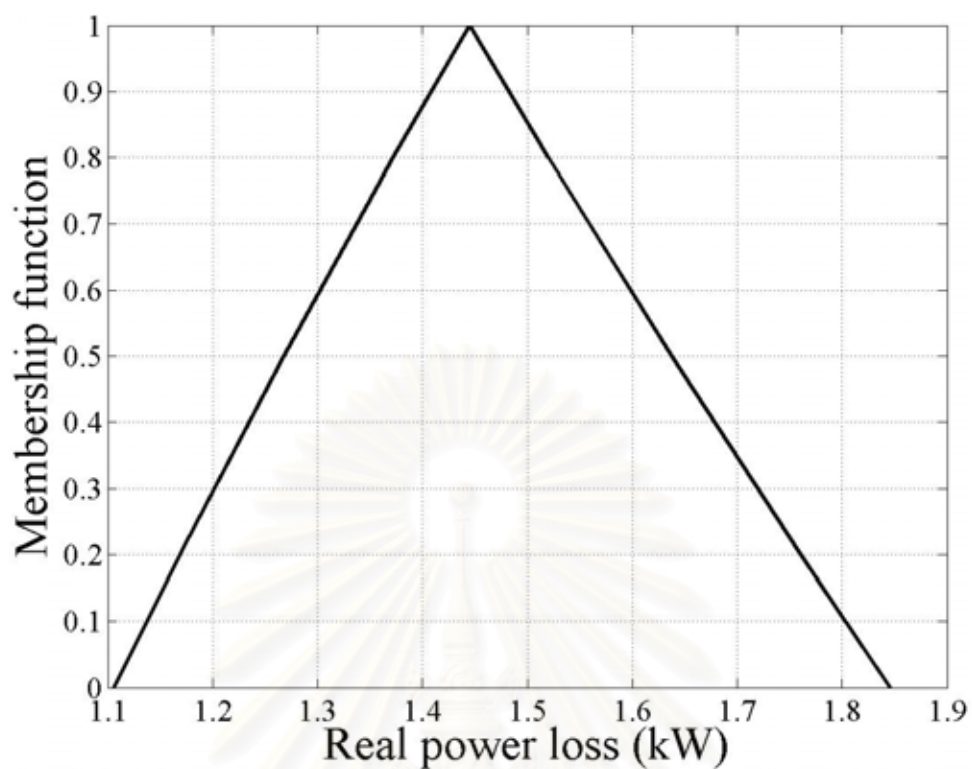
ในส่วนของตัวเลขพีชชีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3 และ 4 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.33 และ 5.34 แสดงให้เห็นว่าความไม่แน่นอนจากการคาดการณ์โหลดของหม้อแปลงจำหน่าย (พิจารณาในรูปของตัวประกอบการใช้ประโยชน์ซึ่งเท่ากับ 0.65 และมีความไม่แน่นอน 10%) และความยาวของ

สายป้อนแรงต่ำ (กำหนดให้เท่ากับ 5%) ส่งผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเล็กน้อยเพียงใด ทำให้เราทราบขอบเขตที่ชัดเจนมากขึ้น

กล่าวโดยสรุปการประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำด้วยวิธีที่นำเสนอควรนำไปใช้กับระบบที่มีจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมากซึ่งไม่สะดวกที่จะวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดาเนื่องจากข้อมูลมีเป็นจำนวนมากและในทางปฏิบัติข้อมูลดังกล่าวมักมีไม่ครบถ้วนหรือไม่แน่นอน ดังนั้นการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำด้วยวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบฟuzzyและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ความยาวสายสมมูล) จึงช่วยให้การวิเคราะห์นั้นง่ายขึ้นและสามารถสะท้อนผลจากความไม่แน่นอนหรือความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณได้จะเป็นค่าขั้นต่ำอันเป็นผลมาจากสมมติฐานในการคำนวณที่กำหนดให้ระบบเป็นแบบสามเฟสสมดุลและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียบางส่วนในวงจรย่อยที่ถูกละเลยไปและวงจรที่พิจารณาไม่คุณสมบัติไม่สอดคล้องกับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (ความยาวสายสมมูล)



รูปที่ 5.33 ตัวเลขฟuzzyค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3



รูปที่ 5.34 ตัวเลขฟัซซีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 สรุปผลการทดสอบ

การประเมินค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังตามที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้กระบวนการวิธีการแก้ปัญหที่แตกต่างกันขึ้นกับลักษณะของปัญหาที่พิจารณา กระบวนการวิธีที่น่าเสนอช่วยให้การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีประสิทธิภาพมากขึ้น สอดคล้องกับลักษณะข้อมูลที่มีอยู่ในทางปฏิบัติและเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาที่พบในแต่ละระบบซึ่งสรุปได้ดังนี้

การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งได้มุ่งเน้นไปที่ปัญหาในการวางแผนระยะยาว โดยพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของข้อมูล อาทิเช่น ค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ได้จากการพยากรณ์ เป็นต้น ผลกระทบดังกล่าวได้ถูกสะท้อนและทำให้เห็นเป็นรูปธรรมมากขึ้นในรูปของตัวเลขพีชชี ซึ่งเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับ Load duration curve ที่พยากรณ์สำหรับอนาคตแล้วเราสามารถเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพื่อนำไปคิดเป็นมูลค่าใช้ประกอบการวางแผนต่อไป

ในส่วนจากระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางเรานำเสนอการสร้างแบบจำลองของโหลดจากข้อมูลที่มีอยู่พร้อมในทางปฏิบัติ อาทิเช่น ค่ากำลังไฟฟ้าที่บันทึกด้วยระบบ CSCS ณ สถานีไฟฟ้าผนวกกับข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า แบบจำลองดังกล่าวทำให้การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้านั้นง่ายขึ้นและพบว่ามีคามแม่นยำอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจะอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชีเพื่อคิดผลจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอันประกอบด้วยความยาวของสายป้อน ตำแหน่งโหลดและค่าปริมาณการใช้ไฟฟ้ารวม นอกจากนี้ยังนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อลดความซับซ้อนของปัญหาและทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลตอบที่ได้จะเป็นค่าขั้นต่ำอันเป็นผลจากการละเลยส่วนของวงจรบางส่วน (วงจรย่อย) และสมมติฐานในการคำนวณที่กำหนดให้เป็นแบบสามเฟสสมดุล

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคำตอบจากวิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชีในระบบส่งและระบบจำหน่ายแรงดันต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการตามปกติซึ่งคำนวณจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าพบว่ามีคามยืดหยุ่นและสามารถสะท้อนผลของความไม่แน่นอนให้เป็นรูปธรรมได้ดีขึ้น สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางคำตอบที่ได้เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมพบว่ามีคามแม่นยำในระดับที่น่าพอใจ นอกจากนี้แบบจำลองโหลดที่น่าเสนอช่วยให้การประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียง่ายขึ้น

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

การจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ในส่วนของระบบส่งและระบบจำหน่ายย่อมเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียขึ้นซึ่งประกอบด้วย Non-technical loss และ Technical loss ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 โดยทั่วไปการวิเคราะห์ Technical loss จะอาศัยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยอาศัยแบบจำลองทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ผลตอบที่ได้จะมีความละเอียดและแม่นยำ ซึ่งสามารถแยกแยะกำลังไฟฟ้าสูญเสียว่ามาจากส่วนใดมากน้อยเพียงใดซึ่งโดยทั่วไป Technical loss ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขึ้นกับความต้องการใช้ไฟฟ้า (Load loss) ที่สูญเสียในสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไม่ขึ้นกับความต้องการใช้ไฟฟ้า (No-load loss) ซึ่งมีสาเหตุจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า นอกจากนี้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่นำเสนอนี้มี 2 ประเภทคือการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลและการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส ซึ่งแต่ละแบบมีความเหมาะสมกับลักษณะของปัญหาและระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสมดุลจะเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ระบบส่งเนื่องจากการจัดปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่จุดโหลด (สถานีไฟฟ้า) ต่างๆ ในระบบมักจะมีความสมดุลทำให้สามารถพิจารณาเสมือนเป็นระบบสามเฟสสมดุลได้ ส่วนระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและแรงดันต่ำจะวิเคราะห์ด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสเนื่องจากระบบดังกล่าวมักมีความไม่สมดุลค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามแม้ว่าผลตอบที่ได้จากการคำนวณด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าจะมีความแม่นยำ แต่ในทางปฏิบัติการนำวิธีดังกล่าวไปใช้นั้นมีข้อจำกัดหลายประการ อาทิเช่นผลตอบของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าไม่สามารถสะท้อนผลจากความไม่แน่นอนของข้อมูลได้ ทำให้การประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งสำหรับการวางแผนระยะยาว (Long-term planning) มีโอกาสคลาดเคลื่อนและไม่สามารถเห็นภาพรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจจะเกิดขึ้น สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางมักประสบปัญหาในส่วนของข้อมูลที่มีไม่ครบถ้วน ยกตัวอย่างเช่นข้อมูลโหลดที่จุดโหลด (หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า) ต่างๆ ในระบบ ณ เวลาที่พิจารณามักไม่ทราบเนื่องจากโดยทั่วไปไม่มีการติดตั้งมิเตอร์เพื่อตรวจวัดและบันทึกค่าดังกล่าว ส่วนระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่มีผลกระทบจากความไม่สมดุลเช่นเดียวกับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางแต่เนื่องจากปริมาณและรายละเอียดของข้อมูลในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำที่มีเป็นจำนวนมากและข้อมูลนั้นอาจ

ไม่ครบถ้วนทำให้ไม่เหมาะสมที่จะวิเคราะห์ด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส ด้วยขีดจำกัดดังกล่าววิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ทฤษฎีพีชชีตามที่ได้นำเสนอหลักการไว้ในบทที่ 3 มาจัดการกับความไม่แน่นอนของข้อมูลและนำเสนอแบบจำลองของโหลดและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ากับการประเมินกำลังไฟฟ้าสูญเสียในส่วนต่างๆระบบไฟฟ้ากำลังที่มีลักษณะของปัญหาที่แตกต่างกัน

กล่าวโดยสรุปวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วนตามระดับแรงดัน คือระบบส่ง และระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ ระบบส่งจะวิเคราะห์ด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชีเพื่อพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคตที่ได้จากการพยากรณ์และค่าแรงดันไฟฟ้าที่บังคับควบคุมแรงดันโดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณด้วยการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบธรรมดา จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อข้อมูลมีระดับความไม่แน่นอนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแตกต่างกันไปจากค่าที่คาดการณ์ไว้มากขึ้น นอกจากนี้ผลตอบในรูปของตัวเลขพีชชีจะแสดงถึงภาพรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ดีขึ้น วิธีที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ควบคู่กับ Forecasted load duration curve ทำให้สามารถพิจารณาในรูปของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียซึ่งคิดเป็นมูลค่าได้ ทำให้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานอื่นๆมากขึ้น

สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางจะวิเคราะห์ด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสและแบบจำลองโหลดที่สร้างจากข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะโหลดของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า จากผลการวิเคราะห์พบว่าที่ปริมาณโหลดเท่าๆกันในระบบไฟฟ้า ความไม่สมดุลของโหลดจะส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้นกว่าในกรณีที่โหลดสมดุล โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียจะมีค่ามากแปรผันตามความไม่สมดุล นอกจากนี้การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าโดยการกระจายโหลดแบบสุ่มเมื่อพิจารณาในภาพรวม (พลังงานไฟฟ้าสูญเสียตลอดทั้งวัน) นั้นมีความแม่นยำอยู่ในระดับที่น่าพอใจ (เปรียบเทียบกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณจากค่าที่ตรวจวัดจริง, [19]) การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยวิธีที่นำเสนอไม่มีข้อดีในด้านความเร็วและใช้เฉพาะข้อมูลที่มีอยู่จริงในทางปฏิบัติแต่มีข้อเสียคือค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างซึ่งขึ้นกับคุณภาพและความถูกต้องของข้อมูลที่ประเมินโดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้า

สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะวิเคราะห์ด้วยการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบพีชชีเพื่อพิจารณาผลจากความไม่แน่นอนในส่วนของแต่ละตำแหน่ง โหลดและค่าความต้องการใช้ไฟฟารวมที่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำให้การคำนวณง่ายขึ้นโดยผลที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวเลขพีชชีซึ่งสามารถแสดงถึงภาพรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในระบบได้ การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยวิธีที่นำเสนอมีข้อดีในด้านความเร็วและใช้เฉพาะ

ข้อมูลที่มีอยู่ในทางปฏิบัติแต่มีข้อเสียคือค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง ซึ่งขึ้นกับคุณภาพและความถูกต้องของข้อมูลที่ประเมิน โดยเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าและแบบจำลองการกระจายตัวของโหลดที่เลือกใช้ อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้นั้นจะเป็นค่าขั้นต่ำเนื่องจากสมมติฐานของการคำนวณที่กำหนดเป็นสามเฟสสมดุล และความไม่สอดคล้องของแบบจำลองที่เลือกใช้กับระบบที่พิจารณา

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มเติม
- 2) ควรพิจารณาเพิ่มเติมถึงผลกระทบจากการมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่ออยู่ในระบบ
- 3) ควรพัฒนาวิธีประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการสอบถามเจ้าหน้าที่การไฟฟ้าหรือจัดทำเป็นแนวทางที่ชัดเจนมากขึ้น
- 4) ควรพิจารณาเพิ่มเติมสำหรับการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและแรงดันต่ำในกรณีที่ยังไม่เป็นแบบเบเรเดิล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Glenn W. Stagg, Ahmed H. El-Abiad Computer Methods in Power System Analysis.
United States of America. : McGraw-Hill, 1980.
2. William D. Stevenson, Jr. Element of Power system analysis. Fourth edition. Singapore. :
McGraw-Hill, 1982.
3. George, J. KLIR, Bo Yuan Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications.
United States of America. : Prentice-Hill, 1995.
4. Stephen G. Nash, Ariela Sofer Linear and Nonlinear programming. International edition.
Singapore. : McGraw-Hill, 1996.
5. Harrell, Ghosh, Bowden Simulation using Promodel. Second International edition.
Singapore. : McGraw-Hill, 2003.
6. Alvarado F., Hu Y., Adapa R. Uncertainty in power system modeling and computation.
IEEE International conference. (October 1992) 1 : 754 – 760.
7. Hongbo Sun, David C. Yu, Yongsheng Xie Application of fuzzy set theory to power flow
analysis with uncertain power injections. IEEE Power Engineering Society Winter
Meeting. (January 2000) 2 : 1191 – 1196.
8. Pajan P.A., Paucar V.L. Fuzzy power flow: considerations and applications to the planning
and operation of a real power system. Proceedings PowerCon, 2002, International
conference. (October 2002) 1 : 433 – 437.
9. Carlos A. Dortolina, Ramon Nadira The loss that is unknown is no loss at all: A Top-
down/Bottom-up approach for estimating distribution losses. IEEE Transactions on
power system. (May 2005) 2 : 1119 – 1125.
10. Oliveira, C.C.B., Kagan N., Meffe A., Jonathan S., Caparroz S., Cavaretti J.L. A new
method for the computation of technical losses in electrical power distribution
systems. Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th
International conference and exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482). (June 2001) 5
11. Nadira, R., Benchluch, S., Dortolina, C.A. A novel approach to computing distribution
losses. Transmission and Distribution conference and exposition, 2003 IEEE PES.
(September 2003) 2 : 659 – 663.

12. Poveda, M. A new method to calculate power distribution losses in an environment of high unregistered load. IEEE Transmission and Distribution conference. (April 1999) 2 : 609 – 614.
13. Nazarko, J., Styczynski, Z., Poplawski, M. The fuzzy approach to energy losses calculations in low voltage distribution networks. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. (January 2000) 2 : 2763 – 2768.
14. C.S. Chen, M.Y. Cho, Y.W. Chen Development of simplified loss models for distribution system analysis. IEEE Transaction on power delivery. 9 : 1545 – 1551.
15. Caisheng Wang, M. Hashem Nehrir Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power system. IEEE Transaction on power systems. (November 2004) 19 : 2068 – 2076.
16. ศิริชัย วัฒนาโสภณ. การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
17. R.D. Zimmerman, D. Gan. Matpower user's manual: Version 2.0. Cornell University, 1997.
18. PSS/ADEPT manual: Version 4. Power Technologies, Inc., Schenectady, NY.
19. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 โครงการวิจัยเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า ฉบับปรับปรุง. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2544.
20. เสริมชัย จารุวัฒนดิถก. โครงการวิจัยเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548.
21. กองระบบแผนที่ทางภูมิศาสตร์ (GIS) การไฟฟ้านครหลวง



ภาคผนวก

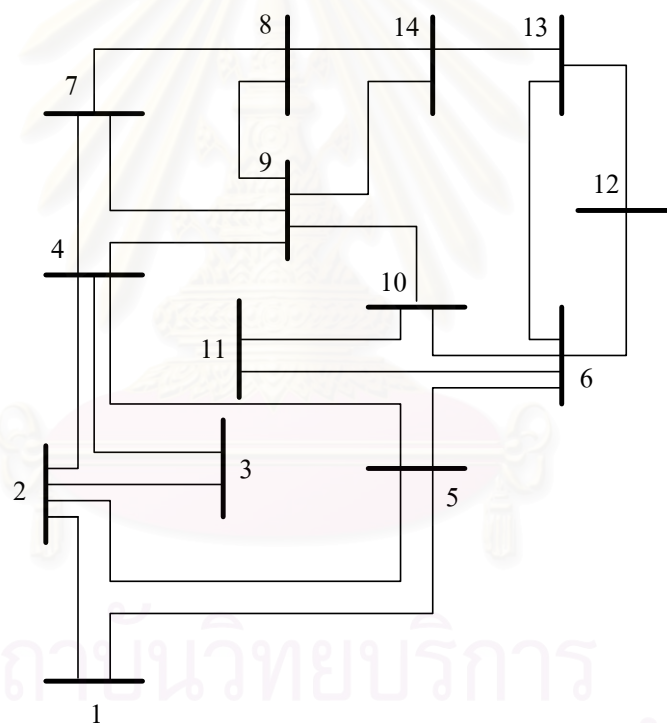
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ระบบทดสอบ

ก.1 ระบบทดสอบของระบบส่ง [17]

ก.1.1 วงจรทดสอบขนาด 14 บัส



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.1 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบขนาด 14 บัส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบขนาด 14 บัส

Bus#	Pgen (MW)	Pload (MW)	Qload (MVar)	V (pu)	ประเภท
1	-	-	-	1.06	SA
2	40	21.7	12.7	1.045	PV
3	-	94.2	19	1.01	PV
4	-	47.8	3.9	-	PQ
5	-	7.6	1.6	-	PQ
6	-	11.2	7.5	1.07	PV
7	-	0	0	-	PQ
8	-	0	0	1.09	PV
9	-	29.5	16.6	-	PQ
10	-	9	5.8	-	PQ
11	-	3.5	1.8	-	PQ
12	-	6.1	1.6	-	PQ
13	-	13.5	5.8	-	PQ
14	-	14.9	5	-	PQ

โดย

SA คือ Slack bus

PV คือ บัสควบคุมแรงดัน

PQ คือ โหลดบัส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

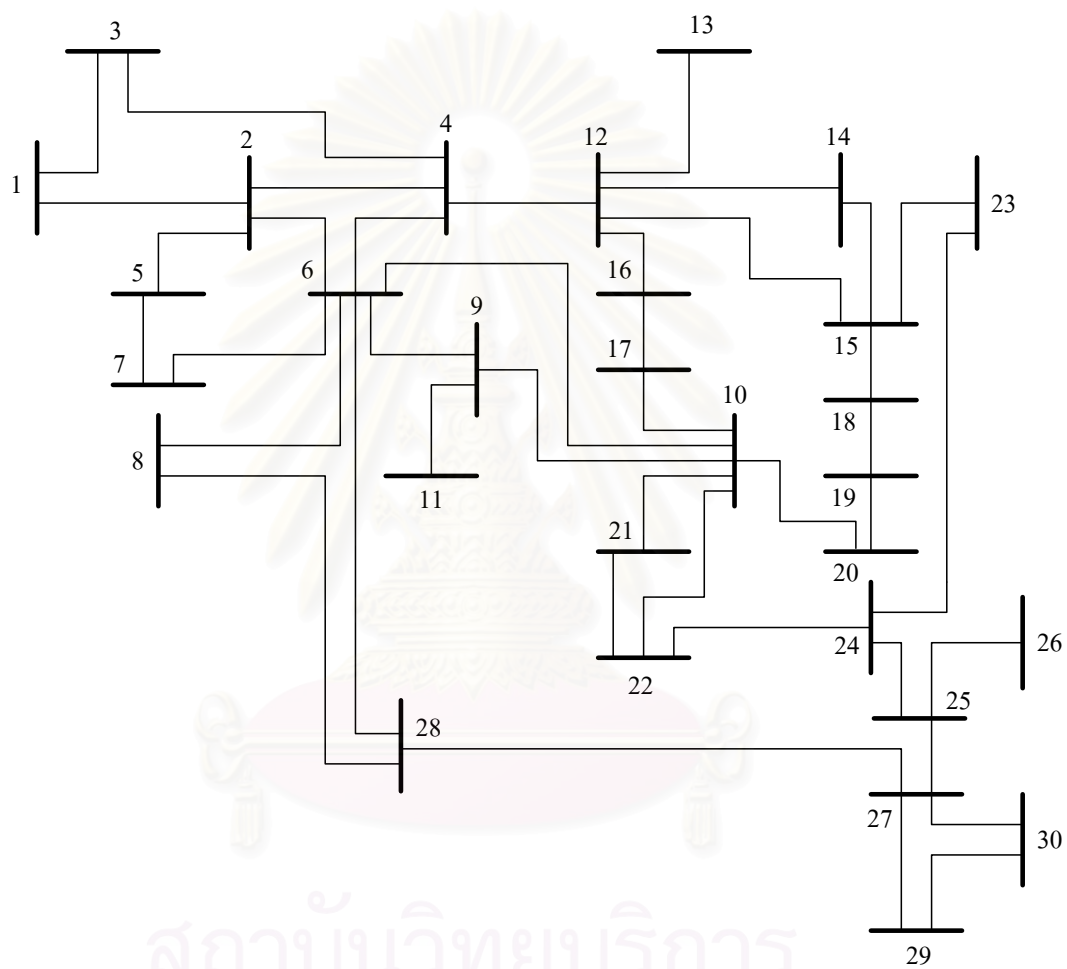
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 14 บัส

From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap (pu)
1	2	0.0194	0.0592	0.0528	-
1	5	0.054	0.223	0.0492	-
2	3	0.047	0.198	0.0438	-
2	4	0.0581	0.1763	0.034	-
2	5	0.057	0.1739	0.0346	-
3	4	0.067	0.171	0.0128	-
4	5	0.0134	0.0421	0	-
4	7	0	0.2091	0	0.978
4	9	0	0.5562	0	0.969
5	6	0	0.252	0	0.932
6	11	0.095	0.1989	0	-
6	12	0.1229	0.2558	0	-
6	13	0.0662	0.1303	0	-
7	8	0	0.1762	0	-
7	9	0	0.11	0	-
9	10	0.0318	0.0845	0	-
9	14	0.1271	0.2704	0	-
10	11	0.082	0.1921	0	-
12	13	0.2209	0.1999	0	-
13	14	0.1709	0.348	0	-

หมายเหตุ กำลังไฟฟ้าฐาน (S_{base}) เท่ากับ 100 MVA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1.2 วงจรทดสอบขนาด 30 บัส



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.2 แผนภาพเส้นเดี่ยวระบบทดสอบขนาด 30 บัส

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบขนาด 30 บัส

Bus#	Pgen (MW)	Pload (MW)	Qload (MVAr)	V (pu)	ประเภท
1	-	-	-	1	SA
2	60.97	21.7	12.7	1	PV
3	-	2.4	1.2	-	PQ
4	-	7.6	1.6	-	PQ
5	-	-	-	-	PQ
6	-	-	-	-	PQ
7	-	22.8	10.9	-	PQ
8	-	30	30	-	PQ
9	-	-	-	-	PQ
10	-	5.8	2	-	PQ
11	-	-	-	-	PQ
12	-	11.2	7.5	-	PQ
13	37	-	-	1	PV
14	-	6.2	1.6	-	PQ
15	-	8.2	2.5	-	PQ
16	-	3.5	1.8	-	PQ
17	-	9	5.8	-	PQ
18	-	3.2	0.9	-	PQ
19	-	9.5	3.4	-	PQ
20	-	2.2	0.7	-	PQ
21	-	17.5	11.2	-	PQ
22	21.59	-	-	1	PV
23	19.2	3.2	1.6	1	PV
24	-	8.7	6.7	-	PQ
25	-	-	-	-	PQ
26	-	3.5	2.3	-	PQ
27	26.91	-	-	1	PV
28	-	-	-	-	PQ
29	-	2.4	0.9	-	PQ
30	-	10.6	1.9	-	PQ

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 30 บัส

From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap (pu)
1	2	0.02	0.06	-	-
1	3	0.05	0.19	-	-
2	4	0.06	0.17	-	-
3	4	0.01	0.04	-	-
2	5	0.05	0.2	-	-
2	6	0.06	0.18	0.02	-
4	6	0.01	0.04	-	-
5	7	0.05	0.12	0.01	-
6	7	0.03	0.08	0.01	-
6	8	0.01	0.04	-	-
6	9	0	0.21	-	-
6	10	0	0.56	-	-
9	11	0	0.21	-	-
9	10	0	0.11	-	-
4	12	0	0.26	-	-
12	13	0	0.14	-	-
12	14	0.12	0.26	-	-
12	15	0.07	0.13	-	-
12	16	0.09	0.2	-	-
14	15	0.22	0.2	-	-
16	17	0.08	0.19	-	-
15	18	0.11	0.22	-	-
18	19	0.06	0.13	-	-
19	20	0.03	0.07	-	-
10	20	0.09	0.21	-	-
10	17	0.03	0.08	-	-
10	21	0.03	0.07	-	-
10	22	0.07	0.15	-	-
21	22	0.01	0.02	-	-
15	23	0.1	0.2	-	-
22	24	0.12	0.18	-	-
23	24	0.13	0.27	-	-
24	25	0.19	0.33	-	-

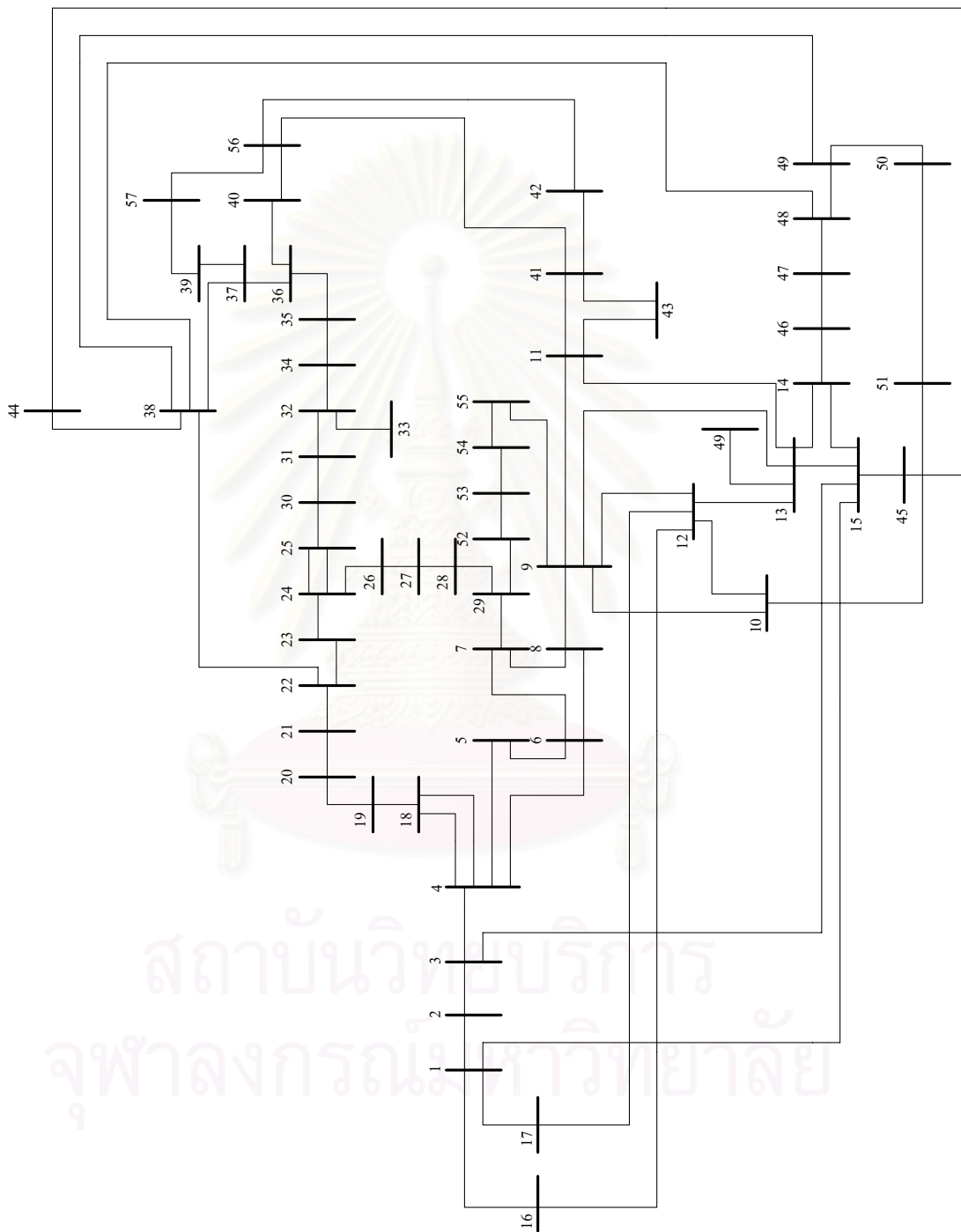
ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 30 บัส

From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap (pu)
25	26	0.25	0.38	-	-
25	27	0.11	0.21	-	-
28	27	0	0.4	-	-
27	29	0.22	0.42	-	-
27	30	0.32	0.6	-	-
29	30	0.24	0.45	-	-
8	28	0.06	0.2	0.02	-
6	28	0.03	0.06	0.01	-



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1.3 วงจรทดสอบขนาด 57 บัส



รูปที่ ก.3 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบขนาด 57บัส

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบขนาด 57 บัส

Bus#	Pgen (MW)	Pload (MW)	Qload (MVar)	V (pu)	ประเภท
1	-	-	-	1.04	SA
2	-	3	88	1.01	PV
3	40	41	21	0.985	PV
4	-	-	-	-	PQ
5	-	13	4	-	PQ
6	-	75	2	0.98	PV
7	-	-	-	-	PQ
8	450	150	22	1.005	PV
9	-	121	26	0.98	PV
10	-	5	2	-	PQ
11	-	-	-	-	PQ
12	310	377	24	1.015	PV
13	-	18	2.3	-	PQ
14	-	10.5	5.3	-	PQ
15	-	22	5	-	PQ
16	-	43	3	-	PQ
17	-	42	8	-	PQ
18	-	27.2	9.8	-	PQ
19	-	3.3	0.6	-	PQ
20	-	2.3	1	-	PQ
21	-	-	-	-	PQ
22	-	-	-	-	PQ
23	-	6.3	2.1	-	PQ
24	-	-	-	-	PQ
25	-	6.3	3.2	-	PQ
26	-	-	-	-	PQ
27	-	9.3	0.5	-	PQ
28	-	4.6	2.3	-	PQ
29	-	17	2.6	-	PQ
30	-	3.6	1.8	-	PQ
31	-	5.8	2.9	-	PQ
32	-	1.6	0.8	-	PQ
33	-	3.8	1.9	-	PQ

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบขนาด 57 บัส

Bus#	Pgen (MW)	Pload (MW)	Qload (MVar)	V (pu)	ประเภท
34	-	-	-	-	PQ
35	-	6	3	-	PQ
36	-	-	-	-	PQ
37	-	-	-	-	PQ
38	-	14	7	-	PQ
39	-	-	-	-	PQ
40	-	-	-	-	PQ
41	-	6.3	3	-	PQ
42	-	7.1	4.4	-	PQ
43	-	2	1	-	PQ
44	-	12	1.8	-	PQ
45	-	-	-	-	PQ
46	-	-	-	-	PQ
47	-	29.7	11.6	-	PQ
48	-	-	-	-	PQ
49	-	18	8.5	-	PQ
50	-	21	10.5	-	PQ
51	-	18	5.3	-	PQ
52	-	4.9	2.2	-	PQ
53	-	20	10	-	PQ
54	-	4.1	1.4	-	PQ
55	-	6.8	3.4	-	PQ
56	-	7.6	2.2	-	PQ
57	-	6.7	2	-	PQ

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 57 บัส

From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap (pu)
1	2	0.0083	0.028	0.129	-
2	3	0.0298	0.085	0.0818	-
3	4	0.0112	0.0366	0.038	-
4	5	0.0625	0.132	0.0258	-
4	6	0.043	0.148	0.0348	-
6	7	0.02	0.102	0.0276	-
6	8	0.0339	0.173	0.047	-
8	9	0.0099	0.0505	0.0548	-
9	10	0.0369	0.1679	0.044	-
9	11	0.0258	0.0848	0.0218	-
9	12	0.0648	0.295	0.0772	-
9	13	0.0481	0.158	0.0406	-
13	14	0.0132	0.0434	0.011	-
13	15	0.0269	0.0869	0.023	-
1	15	0.0178	0.091	0.0988	-
1	16	0.0454	0.206	0.0546	-
1	17	0.0238	0.108	0.0286	-
3	15	0.0162	0.053	0.0544	-
4	18	0	0.555	0	0.97
4	18	0	0.43	0	0.978
5	6	0.0302	0.0641	0.0124	-
7	8	0.0139	0.0712	0.0194	-
10	12	0.0277	0.1262	0.0328	-
11	13	0.0223	0.0732	0.0188	-
12	13	0.0178	0.058	0.0604	-
12	16	0.018	0.0813	0.0216	-
12	17	0.0397	0.179	0.0476	-
14	15	0.0171	0.0547	0.0148	-
18	19	0.461	0.685	0	-
19	20	0.283	0.434	0	-
21	20	0	0.7767	0	1.043
21	22	0.0736	0.117	0	-
22	23	0.0099	0.0152	0	-

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 57 บัส

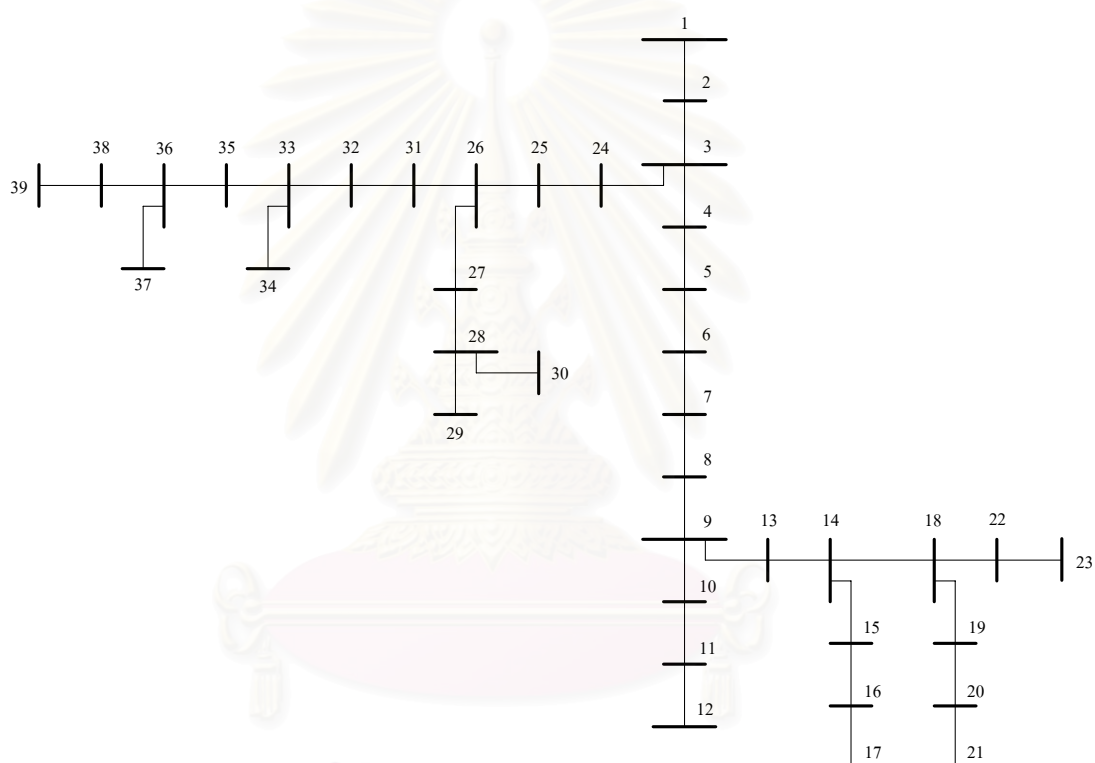
From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap (pu)
23	24	0.166	0.256	0.0084	-
24	25	0	1.182	0	1
24	25	0	1.23	0	1
24	26	0	0.0473	0	1.043
26	27	0.165	0.254	0	-
27	28	0.0618	0.0954	0	-
28	29	0.0418	0.0587	0	-
7	29	0	0.0648	0	0.967
25	30	0.135	0.202	0	-
30	31	0.326	0.497	0	-
31	32	0.507	0.755	0	-
32	33	0.0392	0.036	0	-
34	32	0	0.953	0	0.975
34	35	0.052	0.078	0.0032	-
35	36	0.043	0.0537	0.0016	-
36	37	0.029	0.0366	0	-
37	38	0.0651	0.1009	0.002	-
37	39	0.0239	0.0379	0	-
36	40	0.03	0.0466	0	-
22	38	0.0192	0.0295	0	-
11	41	0	0.749	0	0.955
41	42	0.207	0.352	0	-
41	43	0	0.412	0	-
38	44	0.0289	0.0585	0.002	-
15	45	0	0.1042	0	0.955
14	46	0	0.0735	0	0.9
46	47	0.023	0.068	0.0032	-
47	48	0.0182	0.0233	0	-
48	49	0.0834	0.129	0.0048	-
49	50	0.0801	0.128	0	-
50	51	0.1386	0.22	0	-
10	51	0	0.0712	0	0.93
13	49	0	0.191	0	0.895

ตารางที่ ก.6 (ต่อ) ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงในวงจรทดสอบขนาด 57 บัส

From	To	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap (pu)
29	52	0.1442	0.187	0	-
52	53	0.0762	0.0984	0	-
53	54	0.1878	0.232	0	-
54	55	0.1732	0.2265	0	-
11	43	0	0.153	0	0.958
44	45	0.0624	0.1242	0.004	-
40	56	0	1.195	0	0.958
56	41	0.553	0.549	0	-
56	42	0.2125	0.354	0	-
39	57	0	1.355	0	0.98
57	56	0.174	0.26	0	-
38	49	0.115	0.177	0.006	-
38	48	0.0312	0.0482	0	-
9	55	0	0.1205	0	0.94

ก.2 ระบบทดสอบของระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง [19-20]

ก.2.1 วงจรทดสอบสายป้อนที่ 2 อำเภอ เสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา



รูปที่ ก.4 แผนภาพเส้นเดียวระบบทดสอบสายป้อนที่ 2 อำเภอ เสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบสายป้อนที่ 2

Bus#	Transformer size (kVA)	Transformer type
2	100	3-phase
4	30	1-phase
5	30	1-phase
6	100	3-phase
7	50	3-phase
8	60	1-phase
10	100	3-phase
11	50	1-phase
12*	-	-
13	250	3-phase
15	20	1-phase
16	30	1-phase
17	20	1-phase
19	30	1-phase
20	30	1-phase
21	30	1-phase
22	20	1-phase
23	20	1-phase
24	30	1-phase
25	30	1-phase
27	30	1-phase
29	30	1-phase
30	30	1-phase
31	100	3-phase
32	10	1-phase
34	10	1-phase
35	20	1-phase
37	10	1-phase
38	50	3-phase
39	10	1-phase

* หมายเหตุ จุดโหลดที่รับไฟแรงดันสูงจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลสายในวงจรทดสอบสายป้อนที่ 2

From	To	Type	Length (km)	Phase
1	2	95A	0.4	ABC
2	3	95A	0.3	ABC
3	4	95A	1	ABC
4	5	95A	1.1	ABC
5	6	95A	1	ABC
6	7	95A	1.2	ABC
7	8	95A	0.4	ABC
8	9	95A	1	ABC
9	10	95A	0.05	ABC
10	11	95A	0.75	ABC
11	12	95A	0.2	ABC
9	13	95A	0.3	ABC
13	14	95A	0.6	ABC
14	15	95A	0.1	ABC
15	16	95A	1.3	ABC
16	17	95A	2.1	ABC
14	18	95A	1.2	ABC
18	19	95A	0.1	ABC
19	20	95A	1.5	ABC
20	21	95A	1	ABC
18	22	95A	1.1	ABC
22	23	95A	0.9	ABC
3	24	95A	2.5	ABC
24	25	95A	0.6	ABC
25	26	95A	0.4	ABC
26	27	95A	1.4	ABC
27	28	95A	0.3	ABC
28	29	95A	2	ABC
28	30	95A	1.3	ABC
26	31	95A	1.8	ABC
31	32	95A	0.8	ABC
32	33	95A	0.6	ABC
33	34	95A	0.5	ABC

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) ข้อมูลสายในวงจรทดสอบสายป้อนที่ 2

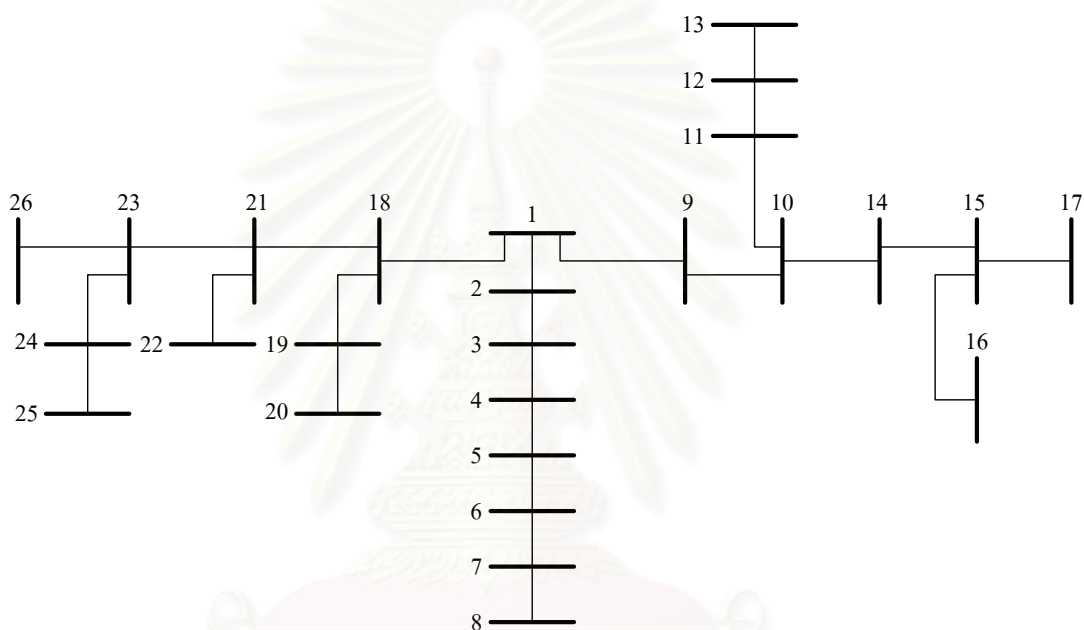
From	To	Type	Length (km)	Phase
33	35	95A	0.3	ABC
35	36	95A	0.2	ABC
36	37	95A	0.5	ABC
36	38	95A	0.1	ABC
38	39	95A	0.1	ABC



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.3 ระบบทดสอบของระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ [21]

ก.3.1 วงจรทดสอบแรงดันต่ำของการไฟฟ้านครหลวง เขตบางกะปิ



รูปที่ ก.5 แผนภาพเส้นเดี่ยวระบบทดสอบแรงดันต่ำของการไฟฟ้านครหลวง เขตบางกะปิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบแรงดันต่ำ

Bus#	หมายเลขมิเตอร์	ประเภท	พิกัดกระแส (A)
2	78280	1-phase	50
2	78284	1-phase	30
3	78282	1-phase	15
3	78283	1-phase	50
4	78281	1-phase	15
4	78285	1-phase	15
5	78279	1-phase	15
6	78274	1-phase	15
6	126918	1-phase	30
7	127146	1-phase	15
7	185083	1-phase	15
8	78275	1-phase	15
8	78278	1-phase	15
9	130844	1-phase	30
10	183103	1-phase	15
11	183099	1-phase	15
11	183105	1-phase	15
11	183106	1-phase	30
12	183100	1-phase	30
12	183108	1-phase	31
13	183102	1-phase	15
13	183104	1-phase	15
14	183098	1-phase	30
14	183101	1-phase	15
16	82230	1-phase	5
17	126797	1-phase	30
17	1647	1-phase	50
17	1648	1-phase	15
17	186892	1-phase	30
17	158544	1-phase	30
19	191055	1-phase	15
19	197606	1-phase	15
20	115395	1-phase	15

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) ข้อมูลบัสในวงจรทดสอบแรงดันต่ำ

Bus#	หมายเลขมิเตอร์	ประเภท	พิกัดกระแส (A)
20	115396	1-phase	15
22	183452	3-phase	30
23	164059	1-phase	30
24	196618	1-phase	30
24	196619	1-phase	30
24	196620	1-phase	30
24	196621	1-phase	30
25	196622	1-phase	30
25	196623	1-phase	30
25	196624	1-phase	30
25	196625	1-phase	30
26	1611	3-phase	30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายในวงจรทดสอบแรงดันต่ำ

From	To	Type	Length (m)	Phase
1	2	70AW	12	ABC
2	3	70AW	9	ABC
3	4	70AW	9	ABC
4	5	70AW	9	ABC
5	6	70AW	9	ABC
6	7	70AW	9	ABC
7	8	70AW	9	ABC
1	9	70AW	45	ABC
9	10	70AW	49.5	ABC
10	11	70AW	33	ABC
11	12	70AW	15	ABC
12	13	70AW	16.5	ABC
10	14	70AW	24	ABC
14	15	70AW	93	AC
15	16	70AW	7.5	A
15	17	70AW	33	AC
1	18	185AW	39	ABC
18	19	70AW	16.5	ABC
19	20	70AW	10.5	ABC
18	21	185AW	42	ABC
21	22	70AW	30	ABC
21	23	185AW	45	ABC
23	24	70AW	7.5	ABC
24	25	70AW	1.5	ABC
23	26	185AW	40.5	ABC

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากระบบ CSCS

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันจันทร์ที่ 23 พ.ค. 2548

Time	PCSCS (W)	QCSCS (VAr)	PF
0:00	498290.72	206760.96	0.92
1:00	457691.16	187321.36	0.93
2:00	439004.2	181730.32	0.92
3:00	425779.2	171881.48	0.93
4:00	421908.52	185923.6	0.92
5:00	512784.44	218695.72	0.92
6:00	815431.76	301357.08	0.94
7:00	549405.76	206545.92	0.94
8:00	477797.4	202481.68	0.92
9:00	508827.68	298002.48	0.86
10:00	534202.44	288755.72	0.88
11:00	520375.36	285164.56	0.88
12:00	526998.56	296002.6	0.87
13:00	490527.8	227856.4	0.91
14:00	534697	291873.8	0.88
15:00	514741.28	299851.8	0.86
16:00	570823.76	301013	0.88
17:00	632669.24	310173.72	0.90
18:00	613401.64	284906.52	0.91
19:00	702643.24	417607.72	0.86
20:00	900222	607014.92	0.83
21:00	815109.2	512590.88	0.85
22:00	695439.44	369180.68	0.88
23:00	570221.64	264649.76	0.91

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันอังคารที่ 24 พ.ค. 2548

Time	PCSCS(W)	QCSCS(VAr)	PF
0:00	489388.08	201772.04	0.92
1:00	457605.16	180547.6	0.93
2:00	447842.36	173709.32	0.93
3:00	438337.56	187794.44	0.92
4:00	435111.96	186117.16	0.92
5:00	570157.12	224716.8	0.93
6:00	885384.24	329656.36	0.94
7:00	515644.48	233705.48	0.91
8:00	436982.8	211792.92	0.90
9:00	493903.92	303292.44	0.85
10:00	494247.96	298303.52	0.86
11:00	474378.28	303916.08	0.84
12:00	456702	311184.4	0.83
13:00	431864.88	230737.92	0.88
14:00	465690.64	275380.24	0.86
15:00	481324.08	269058.08	0.87
16:00	513085.48	300518.44	0.86
17:00	563748.92	299486.2	0.88
18:00	555835.44	262348.8	0.90
19:00	653807.68	396619.8	0.85
20:00	889986.12	606412.88	0.83
21:00	820829.24	521945.12	0.84
22:00	684966.92	366256.16	0.88
23:00	555921.44	271681.56	0.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันพุธที่ 25 พ.ค. 2548

Time	PCSCS(W)	QCSCS(VAr)	PF
0:00	471991.36	216652.8	0.91
1:00	439133.2	194009.12	0.91
2:00	410231.84	173988.88	0.92
3:00	409715.76	179128.32	0.92
4:00	428252.2	177601.56	0.92
5:00	584371.24	242866.2	0.92
6:00	899856.44	344107.04	0.93
7:00	513322.04	237511.72	0.91
8:00	434316.32	207900.68	0.90
9:00	460981.28	237683.72	0.89
10:00	425994.28	231060.52	0.88
11:00	429757.48	240436.24	0.87
12:00	402726.92	223104	0.87
13:00	427843.64	221125.64	0.89
14:00	478249	252112.92	0.88
15:00	476120.08	264843.28	0.87
16:00	519235.64	255080.48	0.90
17:00	570501.2	265466.92	0.91
18:00	588349.52	262886.4	0.91
19:00	589424.68	412253.2	0.82
20:00	857644.12	586199.08	0.83
21:00	738533.44	459583.52	0.85
22:00	602456.12	327161.88	0.88
23:00	504677.4	234845.2	0.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันพฤหัสบดีที่ 26 พ.ค. 2548

Time	PCSCS(W)	QCSCS(VAr)	PF
0:00	451885.08	198804.52	0.92
1:00	411242.52	168311.84	0.93
2:00	412919.84	164226.08	0.93
3:00	400060.44	161151	0.93
4:00	399931.44	166311.96	0.92
5:00	549126.2	215749.64	0.93
6:00	818055.24	308754.48	0.94
7:00	489775.16	199385.12	0.93
8:00	406060.08	199707.64	0.90
9:00	406554.64	217620.52	0.88
10:00	433735.72	250521.64	0.87
11:00	425048.08	248048.64	0.86
12:00	401931.28	237232.16	0.86
13:00	406941.72	201557	0.90
14:00	428359.72	217233.44	0.89
15:00	484872.2	244457.48	0.89
16:00	499451.92	245167.12	0.90
17:00	603918.36	249231.36	0.92
18:00	583296.08	253510.68	0.92
19:00	628454.44	337354.8	0.88
20:00	920693.8	591102	0.84
21:00	818506.8	503709.72	0.85
22:00	679268.36	351913	0.89
23:00	572802.08	251682.84	0.92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันศุกร์ที่ 27 พ.ค. 2548

Time	PCSCS(W)	QCSCS(VAr)	PF
0:00	514999.36	216609.8	0.92
1:00	466808.88	193385.48	0.92
2:00	444337.2	175752.2	0.93
3:00	428252.2	179988.52	0.92
4:00	439283.76	177236	0.93
5:00	571060.24	228200.48	0.93
6:00	834806.88	300518.44	0.94
7:00	521687.08	212007.96	0.93
8:00	437369.88	200460.28	0.91
9:00	444810.28	227254.28	0.89
10:00	424940.56	230802.44	0.88
11:00	384534.56	239662.08	0.85
12:00	394490.92	239339.52	0.85
13:00	391200.8	200417.28	0.89
14:00	522224.68	268305.44	0.89
15:00	501838.88	256693.28	0.89
16:00	554803.24	270111.76	0.90
17:00	587575.32	273960.96	0.91
18:00	618885.2	274391.08	0.91
19:00	654130.24	345096.2	0.88
20:00	961271.88	630153.24	0.84
21:00	870008.88	539449.36	0.85
22:00	741694.52	398340.12	0.88
23:00	622347.32	298282	0.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันเสาร์ที่ 28 พ.ค. 2548

Time	PCSCS(W)	QCSCS(VAr)	PF
0:00	521278.52	227576.84	0.92
1:00	488355.88	200094.72	0.93
2:00	465518.64	187837.44	0.93
3:00	451928.08	192826.36	0.92
4:00	451282.96	193622.04	0.92
5:00	563985.44	223555.6	0.93
6:00	810593.32	285938.72	0.94
7:00	576027.68	215964.68	0.94
8:00	513193	222394.4	0.92
9:00	545685.56	254263.32	0.91
10:00	482420.8	236931.08	0.90
11:00	481431.6	235855.88	0.90
12:00	464529.44	233425.92	0.89
13:00	461712.4	212932.64	0.91
14:00	483603.52	228308	0.90
15:00	500591.64	241253.4	0.90
16:00	550566.92	245876.76	0.91
17:00	589016.12	278089.76	0.90
18:00	595381.32	290992.16	0.90
19:00	760489	491387.92	0.84
20:00	854117.44	573146.12	0.83
21:00	772746.32	472743.96	0.85
22:00	664731.68	337784.84	0.89
23:00	577210.44	272584.72	0.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลจากระบบ CSCS ของสถานีไฟฟ้าย่อยเสนาในวันอาทิตย์ที่ 29 พ.ค. 2548

Time	PCSCS(W)	QCSCS(VAr)	PF
0:00	497581.08	211706.88	0.92
1:00	470916.12	200868.88	0.92
2:00	436187.16	180977.68	0.92
3:00	419005.48	186934.28	0.91
4:00	438552.6	181235.72	0.92
5:00	537514	217878.56	0.93
6:00	751349.8	262047.76	0.94
7:00	564609.08	204202	0.94
8:00	515536.92	191536.16	0.94
9:00	524418.08	230243.36	0.92
10:00	483151.92	200094.72	0.92
11:00	480485.4	227856.4	0.90
12:00	485216.28	222480.4	0.91
13:00	483538.96	214738.96	0.91
14:00	521601.08	226910.2	0.92
15:00	509924.36	213878.8	0.92
16:00	583855.12	260951.08	0.91
17:00	628024.36	259359.76	0.92
18:00	655528	268606.48	0.93
19:00	779262	507537.44	0.84
20:00	846784.56	576629.8	0.83
21:00	725286.92	447476.8	0.85
22:00	615165	317442.08	0.89
23:00	518698.04	235038.72	0.91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ฉัฐวุฒิ แผ่นสุวรรณ เกิดวันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดสมุทรสาคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2546 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย