

การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย



นายศิริชัย วัฒนาโสภณ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1444-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ELECTRIC POWER LOSSES ESTIMATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS



Mr. Sirichai Wattanasophon

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1444-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย  
โดย    นายศิริชัย วัฒนาโสภณ  
สาขาวิชา                                      วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา                              รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย)

..... กรรมการ  
(นายพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศิริชัย วัฒนาโสภณ : การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย (ELECTRIC POWER LOSSES ESTIMATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา รศ.ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, 140 หน้า. ISBN 974-03-1444-9

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นอยู่ที่ความไม่แน่นอนของข้อมูล เนื่องจากลักษณะและปริมาณการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เป็นระยะๆ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้การพิจารณาครอบคลุมถึงความเป็นไปได้ของผลลัพธ์ที่อาจเกิดขึ้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการประมาณกำลังสูญเสียโดยแยกออกเป็น 2 ส่วนตามระดับแรงดัน โดยในระดับแรงดันปานกลาง (22, 24 kV) นั้น ได้นำหลักการของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสมาใช้ และผลตอบที่ได้จากการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระดับแรงดันปานกลางนี้จะมีค่าตามระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในระบบคือค่ากำลังสูญเสียต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงสุด (Min, Mean, Max) ตามลำดับ ส่วนในระดับแรงดันต่ำ (380 , 400 V) ได้นำทฤษฎีฟัซซีมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลต่างๆที่สามารถทราบค่าได้ โดยกำลังสูญเสียที่ได้จากการประมาณนี้จะอยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซี ซึ่งสามารถทำการ Defuzzification ค่ากำลังสูญเสียเพื่อให้อยู่ในรูปของตัวเลขค่าเดียวได้ จากนั้นจึงนำวิธีที่ได้เสนอนี้ไปทดสอบกับระบบทดสอบสำหรับแต่ละระดับแรงดัน โดยวงจรสายป้อนที่ 2 และ 10 ของสถานีไฟฟ้า อ.เสนา จ.พระนครศรีอยุธยา เป็นระบบทดสอบในระดับแรงดันปานกลาง และใช้วงจรจำหน่ายไฟฟ้าหลังหม้อแปลงตัวอย่างขนาด 250 kVA ของการไฟฟ้าฯ อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา เป็นระบบทดสอบในระดับแรงดันต่ำ จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนออยู่ ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมไฟฟ้า \_\_\_\_\_ ลายมือชื่อนิสิต \_\_\_\_\_  
สาขาวิชา \_\_\_\_\_ วิศวกรรมไฟฟ้า \_\_\_\_\_ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_  
ปีการศึกษา \_\_\_\_\_ 2544 \_\_\_\_\_ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

# # 4370515821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : ELECTRIC POWER LOSSES / FUZZY THEOREM / FUZZY NUMBER /  
DISTRIBUTION SYSTEM

SIRICHAJ WATTANASOPHON : ELECTRIC POWER LOSSES  
ESTIMATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. BUNDHIT EUA-ARPORN, Ph.D.  
140 pp. ISBN 374-03-1444-9

A problem of the electric power loss estimation in distribution system is the uncertainty of the data, since connection and quantity of equipment in the distribution system is normally changed along time. To obtain the loss results covering the true value, the thesis estimates the power losses by separating distribution networks according to voltage level, i.e. medium (22, 24 kV) and low (400 V) voltages. In medium voltage, a three-phase load flow is used to calculate loss. The results of the power loss estimation will be presented as the possibly level of power losses occurred, i.e. minimum, medium and maximum loss respectively. For the low voltage, fuzzy theorem is employed with the available data. This results of estimations is the fuzzy number which is able to defuzzificate the power losses to be a real number. Consequently, this method is tested with test systems, for each voltage level. Feeders 2 and 10 of the substation located at Sena district, Ayuthaya province is the test system for the medium voltage. Then, the circuit behind the sampled transformer rated of 250 kVA in Taruae district, Ayuthaya province is used as the test system for the low voltage. The estimated power losses show that the results of the presented method are in an acceptable range. Therefore this method is suitable to be used in practice.



Department Electrical Engineering Student's signature \_\_\_\_\_

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature \_\_\_\_\_

Academic year 2001 Co-advisor's signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีมาตลอด รวมทั้งได้กรุณา ตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ อาจารย์ไชยะ เข้มช้อย และคุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จน สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อน พี่ น้อง ทุก ๆ คนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นายศิริชัย วัฒนาโสภณ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำทั่วไป.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	3
2. การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟส.....	5
2.1 แบบจำลองอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่าย.....	5
2.1.1 แบบจำลองสายจำหน่าย.....	6
2.1.2 แบบจำลองหม้อแปลงจำหน่าย.....	8
2.1.3 แบบจำลองโหลด.....	9
2.2 ประเภทของบัส.....	10
2.2.1 บัสอ้างอิง.....	10
2.2.2 บัสควบคุมแรงดัน.....	10
2.2.3 โหลดบัส.....	10
2.3 สมการการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส.....	10
3. ทฤษฎีของพีซีเซต ตัวเลขพีซี.....	17
3.1 แนวคิดและลักษณะเบื้องต้นของทฤษฎีพีซี.....	17
3.2 ทฤษฎีพีซีเซต.....	18
3.2.1 การนำเสนอของพีซีเซต.....	21
3.2.2 $\alpha$ -Cut หรือ $\alpha$ -Level ของพีซีเซต.....	22

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2.3 คุณสมบัติความเป็น Convex.....	23
3.2.4 หลักการ Extension.....	24
3.2.5 พีชคณิตบนช่วง.....	26
3.2.6 ตัวเลขฟัซซี่.....	29
3.2.7 พีชคณิตฟัซซี่.....	31
3.2.8 สมการฟัซซี่.....	35
3.2.9 Defuzzification.....	36
4. การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย.....	39
4.1 ระบบแรงดันปานกลาง.....	39
4.1.1 กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบทางด้านแรงดันปานกลาง.....	40
4.1.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันปานกลาง.....	40
4.2 ระบบแรงดันต่ำ.....	46
4.2.1 กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบทางด้านแรงดันต่ำ.....	48
4.2.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันต่ำ.....	48
5. ผลการทดสอบ.....	57
5.1 ระบบทดสอบ.....	57
5.1.1 ระบบทดสอบด้านแรงดันปานกลาง.....	57
5.1.2 ระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำ.....	58
5.2 ระบบทางด้านแรงดันปานกลาง.....	58
5.2.1 กำลังสูญเสียในระบบทดสอบเมื่อเทียบผลการคำนวณ กับโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0.....	58
5.2.2 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบ เมื่อใช้โปรแกรม TPLF.....	61
5.2.3 ผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสที่มีต่อกำลังสูญเสีย...	68
5.2.4 ผลกระทบของตัวประกอบกำลังที่มีต่อกำลังสูญเสีย.....	70
5.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบโหลด.....	74



สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5.3 ระบบทางด้านแรงดันต่ำ.....	77
5.3.1 กำลังสูญเสียในระบบทดสอบเมื่อเทียบผลการคำนวณ กับโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0.....	77
5.3.2 กำลังสูญเสียของการกระจายโหลดในแต่ละกรณีที่คำนวณด้วยวิธีพีชชี ....	78
5.3.3 กำลังสูญเสียในระบบทดสอบที่คำนวณด้วยวิธีพีชชี.....	83
5.4 สรุปผลการทดสอบ.....	86
6. สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	140

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของการดำเนินการบนช่วง.....	28
5.1 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ.....	59
5.2 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 10 ที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ.....	59
5.3 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ โดยกำหนดให้โหลดรวมในระบบมีค่าเท่ากัน.....	60
5.4 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 10 ที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ โดยกำหนดให้โหลดรวมในระบบมีค่าเท่ากัน.....	60
5.5 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 กับวิธีการโหลดโพลาร์แบบสามเฟส.....	78
5.6 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำที่คำนวณด้วยวิธีพีชชี.....	81
ข.1 ค่าพารามิเตอร์สายในวงจรสายป้อนที่ 2 .....	98
ข.2 หม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับบัสในวงจรสายป้อนที่ 2 .....	100
ข.3 ค่าพารามิเตอร์สายในวงจรสายป้อนที่ 10 .....	103
ข.4 หม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับบัสในวงจรสายป้อนที่ 10 .....	106
ข.5 ค่าพารามิเตอร์สายในวงจรแรงดันต่ำ .....	110
ง.1 การประมาณการใช้ไฟของผู้ใช้แต่ละประเภทในเขตภาคกลาง.....	118
จ.1 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบ เมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 2 .....	124
จ.2 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบ เมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 2 .....	126
จ.3 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบ เมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10 .....	127
จ.4 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบ เมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 10 .....	128
จ.5 ผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสในวงจรสายป้อนที่ 2 .....	129
จ.6 ผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสในวงจรสายป้อนที่ 10 .....	132

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.7 ผลกระทบของตัวประกอบกำลังของวงจรสายป้อนที่ 2 .....	135
จ.8 ผลกระทบของตัวประกอบกำลังของวงจรสายป้อนที่ 10 .....	136
จ.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบ โหลดของวงจรสายป้อนที่ 2 .....	137
จ.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบ โหลดของวงจรสายป้อนที่ 10 ...	138
จ.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับ โหลดของหม้อแปลงทดสอบ.....	139



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองสายตัวนำแบบสามเฟส.....	6
2.2 แบบจำลองหม้อแปลงจำหน่าย.....	8
2.3 แบบจำลองโหลด.....	9
3.1 การเปรียบเทียบระหว่างลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม(Crisp set) และฟัซซีเซต.....	20
3.2 ลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม(Crisp set) และฟัซซีเซตตามตัวอย่างที่ 1.....	21
3.3 ลักษณะของความเป็น Convex ของฟัซซีเซต และลักษณะฟัซซีเซตที่ Normalized....	23
3.4 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ.....	30
3.5 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ (ต่อ).....	31
3.6 การบวกระหว่างตัวเลขฟัซซี.....	33
3.7 การลบระหว่างตัวเลขฟัซซี.....	34
3.8 การคูณระหว่างตัวเลขฟัซซี.....	34
3.9 การหารระหว่างตัวเลขฟัซซี.....	35
4.1 ระบบที่พิจารณาในด้านแรงดันปานกลาง.....	40
4.2 แผนผังแสดงหลักการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการปรับเปลี่ยนค่า P, Q ..	43
4.3 การแบ่งโหลดที่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่1.....	44
4.4 การแบ่งโหลดที่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่2.....	45
4.5 การแบ่งโหลดที่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่3.....	45
4.6 วงจรด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง.....	46
4.7 วงจรสมมูลด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง.....	46
4.8 ค่าอัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง ( $U.F.$ ) ที่แทนด้วยตัวเลขฟัซซี.....	49
4.9 ค่าแรงดัน ( $Voltage$ ) ที่แทนด้วยตัวเลขฟัซซี.....	49
4.10 ค่าความยาวสมมูลของวงจร ( $L_{eq}$ ) ที่แทนด้วยตัวเลขฟัซซี.....	50
4.11 แสดงวงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอโดยประมาณ.....	51
4.12 แสดงวงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร.....	52
4.13 แสดงวงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร.....	54
5.1 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 2.....	62
5.2 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 2.....	62
5.3 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 2.....	64

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 2 .....	64
5.5 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10 .....	65
5.6 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 10 .....	66
5.7 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10.....	67
5.8 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 10.....	68
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสีย (%) กับตัวประกอบความไม่สมดุล (%) ในวงจรสายป้อนที่ 2.....	69
5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสีย (%) กับตัวประกอบความไม่สมดุล (%) ในวงจรสายป้อนที่ 10.....	70
5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสีย (%) กับตัวประกอบกำลัง ในวงจรสายป้อนที่ 2.....	72
5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสีย (%) กับตัวประกอบกำลัง ในวงจรสายป้อนที่ 10.....	73
5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสีย ในวงจรสายป้อนที่ 2.....	75
5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสีย ในวงจรสายป้อนที่ 10.....	76
5.15 วงจรจำลองในด้านแรงดันต่ำ.....	79
5.16 ข้อมูลความยาวโดยประมาณของวงจรที่แสดงด้วยตัวเลขพีชชี.....	80
5.17 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณที่เป็นแบบตัวเลขพีชชี.....	80
5.18 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขพีชชีของระบบด้านแรงดันต่ำในกรณี 1...	81
5.19 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขพีชชีของระบบด้านแรงดันต่ำในกรณี 2...	82
5.20 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขพีชชีของระบบด้านแรงดันต่ำในกรณี 3...	82
5.21 แสดงค่าโหลดของหม้อแปลงที่ใช้ในแต่ละชั่วโมง.....	84
5.22 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ระดับ $\alpha$ -cut เท่ากับ 1.....	84
5.23 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขพีชชีในชั่วโมงที่มากที่สุด.....	85
ก.1 แสดงตัวอย่างเริ่มต้นของการรันโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ในกรณีหา ค่ากำลังสูญเสียในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10.....	92

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.2 แสดงตัวอย่างขณะทำการรัน โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ในกรณีหา ค่ากำลังสูญเสียในโรงงานของวงจรสายป้อนที่ 10.....	93
ก.3 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการรัน โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ในกรณีหา ค่ากำลังสูญเสียในโรงงานของวงจรสายป้อนที่ 10.....	94
ก.4 แสดงผลการรัน โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นในด้านแรงดันต่ำ โดยใช้แบบจำลองระบบในกรณี 2 .....	95
ก.5 แสดงกราฟที่ได้จากการรัน โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นในด้านแรงดันต่ำ โดยใช้แบบจำลองระบบในกรณี 2 .....	96
ข.1 แผนภาพเส้นเคี้ยวของวงจรสายป้อนที่ 2 .....	97
ข.2 แผนภาพเส้นเคี้ยวของวงจรสายป้อนที่ 10 .....	102
ข.3 แผนภาพเส้นเคี้ยวของระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำ.....	109
ค.1 วงจรอย่างง่ายของสายป้อน.....	114
ค.2 .....	115
ง.1 รูปร่างโพลครวมของผู้ใช้แต่ละประเภท.....	120
ง.2 ตัวอย่างตัวคูณที่นำมาใช้ถ่วงน้ำหนัก.....	120
ง.3 แผนผังการสร้างโหนดอย่างสุ่มตามตัวประกอบโหนดที่กำหนด.....	123

# บทที่ 1

## บทนำทั่วไป

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ คือ ระบบผลิต (Generator) ระบบส่ง (Transmission Line) และระบบจำหน่าย (Distribution System) ซึ่งในแต่ละระบบจะทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป คือ ระบบผลิตมีหน้าที่รับผิดชอบในการผลิตไฟฟ้าให้มีความมั่นคงและเพียงพอกับความต้องการใช้ไฟฟ้าโดยรวม ระบบส่งมีหน้าที่ดูแลและจัดส่งกำลังไฟฟ้าที่ได้จากระบบผลิตไปสู่สถานีจ่ายไฟฟ้าต่างๆ ให้เหมาะสม และระบบจำหน่ายจะมีหน้าที่กระจายกำลังไฟฟ้าที่ได้จากสถานีจ่ายไฟฟ้าออกไปสู่ผู้ใช้ไฟฟ้าต่างๆ ที่อยู่ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในที่นี้เราจะศึกษาเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังประมาณ 80% นั้นมักเกิดขึ้นในระบบจำหน่าย [1] นอกจากนั้นการที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้น อีกทั้งผู้ใช้ส่วนใหญ่ยังคงมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามากขึ้นก็จะยิ่งส่งผลให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสูงมากขึ้น

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) ในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่จะเริ่มต้นจากการรับไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่ระดับแรงดัน 115-230 kV จากนั้นจะถูกแปลงโดยหม้อแปลงสถานีจ่ายไฟฟ้า (Substation transformer) ให้มีขนาดแรงดันลดลงเป็น 22 หรือ 33 kV ที่สถานีจ่ายไฟฟ้า (Distribution substation) จากนั้นจึงส่งไปยังบริเวณต่างๆ โดยสายป้อนขนาดแรงดัน 22 หรือ 33 kV แล้วจึงแปลงแรงดันให้ต่ำลงเหลือ 220/380 V โดยหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution transformer) และเดินสายแรงต่ำไปสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการจ่ายไฟฟ้าแบบนี้ จำเป็นที่จะต้องมีการติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าเป็นจำนวนมากในระบบจำหน่าย

การจ่ายไฟฟ้าในลักษณะดังกล่าวย่อมก่อให้เกิดกำลังสูญเสียในสายป้อน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จุดเชื่อมต่อของอุปกรณ์ไฟฟ้า และอื่นๆ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายนั้นเราสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีค่าคงที่ (Core Loss) และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการใช้ไฟฟ้า (Copper Loss) [1] โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีค่าคงที่ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสการทำแม่เหล็ก (Magnetization current) ของอุปกรณ์แต่ละตัวในระบบ เช่น หม้อแปลงในสถานีไฟฟ้าย่อย หม้อแปลงลดแรงดัน หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า และรีแอกเตอร์ เป็นต้น ส่วนกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการใช้ไฟฟ้าเกิดจากการ

ไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ซึ่งจะอยู่ในรูปของกำลังสูญเสียในสายซึ่งกำลังสูญเสียนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนและทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามกำลังสูญเสียทางเทคนิคที่เกิดขึ้นที่เราสามารถทำการวิเคราะห์และควบคุมได้โดยตรงนั้น ส่วนใหญ่จะอยู่ที่สายป้อน และหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นหลัก ดังนั้นหากเราสามารถทำการวิเคราะห์เพื่อคำนวณค่ากำลังสูญเสียในส่วนดังกล่าวได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงแล้ว การกำหนดแนวทางการแก้ไขก็จะสามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบจำหน่ายอยู่ที่ความพร้อมและความถูกต้องของข้อมูลที่ต้องการใช้ ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะและปริมาณการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆในระบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เป็นระยะๆ อีกทั้งปัจจัยที่เกี่ยวกับการบันทึกและการจัดเก็บข้อมูลก็มีความสำคัญต่อความถูกต้องของข้อมูลด้วยเช่นกัน ดังนั้นความถูกต้องของข้อมูลที่น่ามาใช้จึงเป็นสิ่งสำคัญมากเพื่อให้การวิเคราะห์ความสูญเสียในระบบมีความน่าเชื่อถือขึ้น

เนื่องจากที่ผ่านมาการเก็บข้อมูลต่างๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทย ยังไม่เพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบมีความถูกต้องและใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากนัก ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอวิธีการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามระดับแรงดัน คือ ในด้านแรงดันสูงจะใช้วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสในการวิเคราะห์ เนื่องจากในด้านแรงดันสูงนั้นเราสามารถทราบข้อมูลที่จำเป็นได้ดีพอสมควร เช่น แผนภาพเส้นเคี้ยวของระบบ ขนาดของโหลดที่จุดต่างๆ เป็นต้น ส่วนในด้านแรงดันต่ำจะนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้ทฤษฎีฟัซซี ซึ่งนำมาใช้ในการจัดการความไม่แน่นอนในส่วนของข้อมูล เช่น ความไม่แน่นอนของความยาวสายไฟที่ใช้ในระบบ ความไม่แน่นอนของโหลด เป็นต้น ผลจากการนำวิธีที่ได้เสนอในข้างต้นมาใช้งานจะทำให้การประเมินความสูญเสียมีความยืดหยุ่นและถูกต้องมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1) นำเสนอวิธีการประมาณค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าทั้งในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางและแรงดันต่ำ โดยอาศัยหลักการของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส และทฤษฎีฟัซซีเซต

2) เพื่อศึกษาผลของการประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory) เนื่องจากความไม่แน่นอน (Uncertainty) และความไม่สมบูรณ์ (Incomplete) ของข้อมูลที่มีผลต่อการประเมินกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทางด้านแรงดันต่ำ

3) เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมาณค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย



### 1.3 ขั้นตอนศึกษาและวิธีดำเนินงาน

- 1) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส
- 2) ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับทฤษฎีฟuzzyเซต และการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ
- 3) รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบที่จะนำมาใช้ทดสอบ
- 4) ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 5) ทำการออกแบบ ปรับปรุงและพัฒนาโปรแกรม
- 6) วิเคราะห์ระบบและสรุปผลงานวิจัย
- 7) เรียบเรียงผลงานวิจัย พิมพ์ผลงาน และจัดเข้ารูปเล่มเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

### 1.4 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย
- 2) ไม่พิจารณาถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (dispersed generators) ที่ต่ออยู่ในระบบ
- 3) ไม่พิจารณากำลังสูญเสียเนื่องจากจุดต่อ กระแสดีสซาร์จเนื่องจากอุปกรณ์ไม่สมบูรณ์ ฯลฯ

### 1.5 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง แบบจำลองอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟส พร้อมทั้งทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟส แบบ Newton Raphson

บทที่ 3 กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่จำเป็นของ ฟuzzyเซต (Fuzzy set) ตัวเลขฟuzzy (Fuzzy number) และพีชคณิตฟuzzy (Fuzzy arithmetic)

บทที่ 4 กล่าวถึง การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย ซึ่งจะแยกระบบออกตามระดับแรงดัน โดยในระดับแรงดันสูงเราจะใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธี Newton Raphson และในระดับแรงดันต่ำ จะนำทฤษฎีฟuzzyมาใช้ในการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ

บทที่ 5 กล่าวถึง ผลการทดสอบที่ได้จากการใช้วิธีที่นำเสนอ โดยทดสอบกับสายป้อนที่ 2 และ 10 ของสถานีไฟฟ้าเสนา จ. พระนครศรีอยุธยา และระบบจำหน่ายตัวอย่าง ของสถานีไฟฟ้า

ทำเรื่อง จ. พระนครศรีอยุธยา และเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากวิธีที่นำเสนอกับวิธีแบบดั้งเดิม รวมถึงการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้

บทที่ 6 กล่าวถึง บทสรุป ประโยชน์ที่ได้ และ ข้อดี-ข้อเสียของวิธีการที่นำเสนอ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่างๆ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟส

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง ในสถานะการทำงานปกติเพื่อหาจุดทำงานที่เหมาะสมให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการจำลองการทำงานของระบบและให้ระบบดำเนินการผลิตและจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

โดยทั่วไประบบจำหน่ายไฟฟ้ามีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากระบบส่งไฟฟ้า เช่น

- มีลักษณะแบบเรเดียลเป็นส่วนใหญ่
- อัตราส่วนระหว่างค่า  $R/X$  สูง
- มีความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสค่อนข้างสูง

ในทางปฏิบัติ การจัดสรรโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้มีความสมดุลนั้นทำได้ยาก เนื่องจากสาเหตุหลายประการทั้งทางเศรษฐศาสตร์และทางกายภาพ ซึ่งผลกระทบที่ตามมาเนื่องจากระบบไม่สมดุลนั้นก่อให้เกิดปัญหาขึ้นโดยจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่างๆเราจำเป็นต้องทำการพิจารณาถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าแยกในแต่ละเฟส ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟสด้วยวิธี Newton Raphson

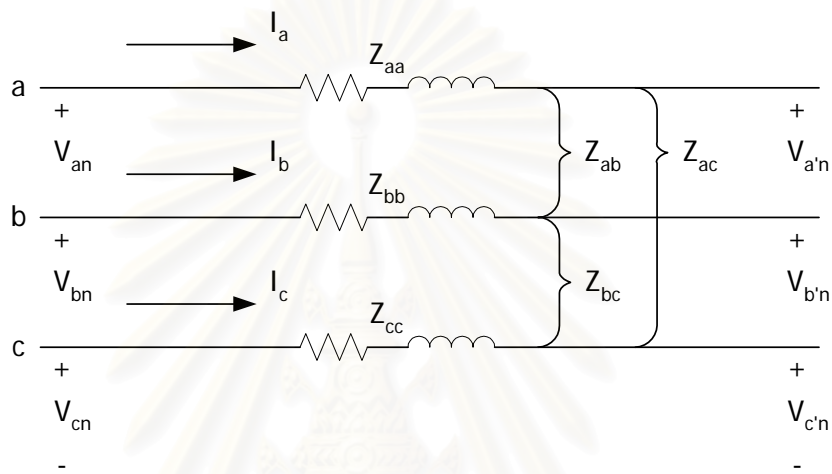
สำหรับการประเมินค่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในระบบก็ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเช่นกัน ดังนั้นเราจึงควรเลือกแบบจำลองอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับวิธีการคำนวณ ซึ่งในบทนี้จะนำเสนอแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่จะนำมาใช้ และทฤษฎีของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟส ตามลำดับ

#### 2.1 แบบจำลองอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำไปใช้ในการคิดคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามเฟสเท่านั้น ซึ่งจะประกอบไปด้วย แบบจำลองของสายจำหน่ายแบบจำลองของหม้อแปลง และแบบจำลองโหลด ตามลำดับ

### 2.1.1 แบบจำลองสายจำหน่าย [2,3,4]

จากที่กล่าวมาในข้างต้น การศึกษาเกี่ยวกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้แบบจำลองของสายจำหน่ายในแต่ละเฟสให้เหมาะสม การสร้างแบบจำลองจะเริ่มต้นด้วยการหาค่า self and mutual impedances ของสาย ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานของสายตัวนำและระยะห่างระหว่างสาย วงจรสมมูลสำหรับสายตัวนำแบบสามเฟสแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองสายตัวนำแบบสามเฟส

พิจารณาถึงสมการแรงดันของแบบจำลองในรูปที่ 2.1 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a'n} \\ V_{b'n} \\ V_{c'n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

โดย

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  คือ แรงดันเฟสที่ต้นสายตัวนำ

$V_{a'n}, V_{b'n}, V_{c'n}$  คือ แรงดันเฟสทางปลายสายตัวนำ

$Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ในแต่ละเฟสของสายตัวนำ

$Z_{ab}, Z_{ac}, Z_{bc}, Z_{ba}, Z_{ca}, Z_{cb}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างเฟสของสายตัวนำ

$I_a, I_b, I_c$  คือ กระแสที่ไหลผ่านสายตัวนำในแต่ละเฟส

สมการที่ 2.1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[V_{abc}] = [V_{abc}'] + [Z_{abc}][I_{abc}] \quad (2.2)$$

โดย  $[Z_{abc}]$  เป็นค่าเฟสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ซึ่งอิมพีแดนซ์ในแต่ละค่าของเมตริกซ์นี้สามารถคำนวณได้จากการประยุกต์สมการของคาร์สัน (Carson's Equation) [5] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$z_{ii} = r_i + 0.0009869f + j0.001257f \left[ \ln \frac{658.4 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{GMR_i} \right] \quad \text{ohms/km} \quad (2.3)$$

$$z_{ij} = 0.0009869f + j0.001257f \left[ \ln \frac{658.4 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{D_{ij}} \right] \quad \text{ohms/km} \quad (2.4)$$

โดย

- $r_i$  คือ ค่าความต้านทานของสายตัวนำ (ohms/km)
- $f$  คือ ความถี่ของระบบ (Hz)
- $\rho$  คือ earth resistivity (100 ohm-meter)
- $GMR_i$  คือ conductor geometric mean radius (m)
- $D_{ij}$  คือ ระยะห่างระหว่างสายตัวนำ i และ j (m)

เมื่อพิจารณาถึงผลของสายนิวทรัลที่มีต่ออิมพีแดนซ์ จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 เมื่อนำไปประยุกต์ใช้จะได้ผลลัพธ์เป็น “primitive impedane matrix” ขนาด  $(4 \times 4)$

$$[Z_{prim}] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

จาก “primitive impedane matrix” ที่แสดงในสมการที่ 2.5 เราจะทำการลดขนาดให้เป็นเฟสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ขนาด  $(3 \times 3)$  โดยใช้วิธี Kron Reduction ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์แต่ละตำแหน่งในเฟสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Z_{ij} = z_{ij} - z_{in}z_{nj} / z_{nn} \quad (2.6)$$

แบบจำลองของสายตัวนำที่กล่าวถึงในข้างต้นเป็นแบบจำลองสายตัวนำแบบสามเฟส ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลองนี้ไปใช้สำหรับระบบ 2 เฟส และ 1 เฟส เราจะกำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของเฟสที่หายไปเท่ากับ 0 ยกตัวอย่างเช่น เฟสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์แบบ 2 เฟส ที่ประกอบด้วยเฟส a และเฟส c สามารถเขียนเมตริกซ์ได้ดังนี้

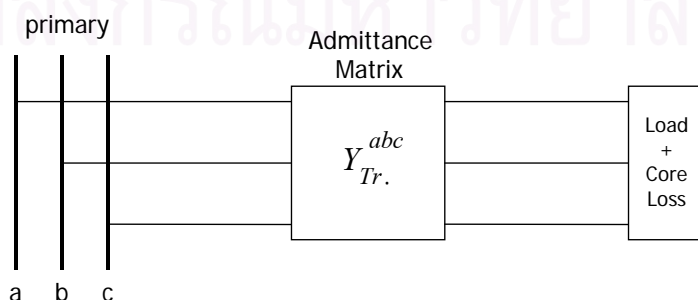
$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & 0 & Z_{ac} \\ 0 & 0 & 0 \\ Z_{ca} & 0 & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

ในลักษณะเดียวกันเฟสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์แบบ 1 เฟส (เฟส b) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 แบบจำลองหม้อแปลงจำหน่าย [2,3,6]

แบบจำลองของหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ที่ต่ออนุกรมกับสายจำหน่าย และเนื่องจากเราต้องการพิจารณากำลังสูญเสียในระบบ ดังนั้น เราจะนำกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็ก (Core Loss) ของหม้อแปลงไปเพิ่มในจุดโหลด เพื่อที่จะทำให้ได้ผลตอบที่มีความถูกต้องมากขึ้นและสะดวกต่อการคำนวณ วงจรสมมูลสำหรับหม้อแปลงจำหน่าย แสดงดังในรูปที่ 2.2



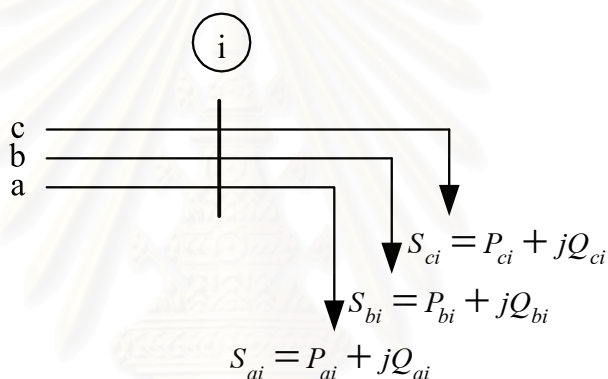
รูปที่ 2.2 แบบจำลองหม้อแปลงจำหน่าย

สามารถเขียนเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ ( $Y_{Tr.}^{abc}$ ) ของแบบจำลองหม้อแปลง ได้ดังนี้

$$Y_{Tr.}^{abc} = \begin{bmatrix} y_T & 0 & 0 \\ 0 & y_T & 0 \\ 0 & 0 & y_T \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

### 2.1.3 แบบจำลองโหลด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราจะใช้แบบจำลองโหลดแบบสามเฟสในการวิเคราะห์โดยแทนด้วยแบบจำลองของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีขนาดคงที่ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองโหลด

จากรูปที่ 2.3 สามารถแสดงโหลดที่บัส  $i$  ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} S_{ai} \\ S_{bi} \\ S_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ai} + jQ_{ai} \\ P_{bi} + jQ_{bi} \\ P_{ci} + jQ_{ci} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

โดย

- $S_{ai}, S_{bi}, S_{ci}$  คือ โหลดรวมในเฟส abc ที่บัส  $i$
- $P_{ai}, P_{bi}, P_{ci}$  คือ โหลดที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริงในเฟส abc ที่บัส  $i$
- $Q_{ai}, Q_{bi}, Q_{ci}$  คือ โหลดที่เป็นกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในเฟส abc ที่บัส  $i$

## 2.2 ประเภทของบัส [2,3,7]

### 2.2.1 บัสอ้างอิง (Slack bus)

บัสอ้างอิงเป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อบัสหนึ่งในระบบ ซึ่งทำหน้าที่ชดเชยค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งค่าจริงและค่ารีแอกทีฟ เพื่อให้ระบบเกิดความสมดุลของกำลังไฟฟ้า ณ บัสอ้างอิงนี้เราจะทำการกำหนดขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้า โดยที่ยังไม่สามารถระบุค่ากำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟได้

### 2.2.2 บัสควบคุมแรงดัน (PV bus)

บัสทุกบัสในระบบที่ต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นบัสควบคุมแรงดันยกเว้นบัสอ้างอิง โดยบัสควบคุมแรงดันเป็นบัสที่เราสามารถกำหนดค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจริงและค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ ส่วนค่ากำลังรีแอกทีฟจะมีลักษณะเป็นตัวแปรอิสระ และมุมของแรงดันไฟฟ้าจะเป็นตัวแปรสถานะของบัส

### 2.2.3 โหลดบัส (PQ bus)

โหลดบัสเป็นบัสในระบบที่ไม่ต่อเชื่อมอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โหลดบัสเราจะทราบค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ ส่วนค่าขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าในบัสนี้จะเป็นตัวแปรสถานะของระบบ

ระบบจำหน่ายโดยทั่วไปเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และมีผู้ใช้ไฟฟ้าต่ออยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นบัสที่อยู่ในระบบจำหน่ายโดยส่วนใหญ่จะเป็นโหลดบัส โดยเรากำหนดให้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยเป็นบัสอ้างอิง เนื่องจากเป็นจุดที่สามารถทำการควบคุมแรงดันได้ สำหรับบัสควบคุมแรงดันนั้นโดยทั่วไปจะไม่มีในระบบจำหน่าย นอกจากระบบจำหน่ายบางระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก(dispersed generators) ติดตั้งอยู่

## 2.3 สมการการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส [4,7,8]

ในที่นี้เราจะพิจารณากรณีที่ระบบเป็นแบบสามเฟส ซึ่งอาจเกิดความไม่สมดุลขึ้นในระบบได้ ดังนั้นเพื่อทำให้ง่ายต่อการคำนวณฟอร์เทสคิว(Fortescue)[8] ได้พิสูจน์ไว้ว่า ในระบบ  $n$  เฟส



เซอร์ ที่ไม่สมดุล สามารถที่จัดให้อยู่ในรูปของระบบที่เฟสเซอร์สมดุลได้  $n$  ระบบ ซึ่งจะเรียกว่า “องค์ประกอบสมมาตร” ของเฟสดั้งเดิม

จากทฤษฎีของฟอร์เทสคิว (Fortescue's theorem) ระบบสามเฟสไม่สมดุลเราสามารถจัดให้อยู่ในรูปของระบบที่เฟสเซอร์สมดุล 3 ระบบได้ ดังนี้

1. องค์ประกอบลำดับบวกประกอบด้วยขนาดที่เท่ากันทั้งสามเฟส แต่ละเฟสมีมุมต่างกัน  $120^\circ$  และมีลำดับเฟสเช่นเดียวกับเฟสดั้งเดิม
2. องค์ประกอบลำดับลบประกอบด้วยขนาดที่เท่ากันทั้งสามเฟส แต่ละเฟสมีมุมต่างกัน  $120^\circ$  และมีลำดับเฟสตรงกันข้ามกับเฟสดั้งเดิม
3. องค์ประกอบลำดับศูนย์ประกอบด้วยขนาดที่เท่ากันทั้งสามเฟสและแต่ละเฟสจะอยู่ในทิศทางเดียวกัน

ดังนั้นจากข้อมูลที่อยู่ในรูปของเฟส abc เราสามารถทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของลำดับเฟสที่สมดุล โดยใช้เมตริกซ์การแปลง (Transformation matrix)[7] ดังนี้

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

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

จากแบบจำลองสายจำหน่ายในหัวข้อที่ 2.1.1 เนื่องจากสายจำหน่ายเป็น “stationary bilateral element” ดังนั้นเมตริกซ์ที่ได้จะสมมาตร ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังนี้

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

โดยที่

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

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

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ลำดับเฟสและอิมพีแดนซ์เฟส abc ได้ดังนี้  
ให้

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 สามารถเขียนได้เป็น

$$[I_{abc}] = [T][I_{012}] \quad (2.14)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$[V_{abc}] = [T][V_{012}] \quad (2.15)$$

จาก

$$\begin{aligned} S &= [V_{abc}]^t [I_{abc}]^* \\ &= [I_{abc}]^t [Z_{abc}] [I_{abc}]^* \\ &= [TI_{012}]^t [Z_{abc}] [TI_{012}]^* \\ &= [I_{012}]^t [T]^t [Z_{abc}] [T]^* [I_{012}]^* \\ &= [I_{012}]^t [Z_{012}] [I_{012}]^* \end{aligned} \quad (2.16)$$

โดย

$S$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน

$[ ]^t$  คือ เมตริกซ์ทรานสโพส

$[ ]^*$  คือ เมตริกซ์คอนจูเกต

จากสมการที่ 2.16 จะได้ว่า

$$[Z_{012}] = [T]^t [Z_{abc}] [T]^* \quad (2.17)$$

$$Z_{012} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - 2Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - 2Z_m \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

จาก

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

โดยที่

- $Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ในลำดับศูนย์ (zero-sequence)  
 $Z_1$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ในลำดับบวก (positive-sequence)  
 $Z_2$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ในลำดับลบ (negative-sequence)

เมื่อเทียบสมการที่ 2.18 และ 2.19 จะได้ว่า

$$Z_0 = Z_s + 2Z_m \quad (2.20)$$

$$Z_1 = Z_s - 2Z_m \quad (2.21)$$

$$Z_2 = Z_s - 2Z_m \quad (2.22)$$

ในระบบไฟฟ้าสามเฟส สามารถเขียนสมการทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$[I]_{BUS} = [Y]_{BUS} [E]_{BUS} \quad (2.17)$$

โดย  $[Y]_{BUS}$  เป็นแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ ซึ่งได้จากการรวมเมตริกซ์ต่างๆ ของแบบจำลองอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อในระบบเข้าด้วยกัน แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$[Y]_{BUS} = [G]_{BUS} + j[B]_{BUS} \quad (2.18)$$

สำหรับทุกๆ โหนดบัส (i) จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนในแต่ละเฟส ดังนี้

$$S_i^p = V_i^p I_i^{p*} = V_i^p \left( \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 Y_{ik}^{pm} V_k^m \right)^* \quad (2.19)$$

แทนค่าแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ในสมการที่ 2.19 ได้ดังนี้

$$S_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left( \cos \theta_{ik}^{pm} + j \sin \theta_{ik}^{pm} \right) \left( G_{ik}^{pm} - j B_{ik}^{pm} \right) \quad (2.20)$$

จากสมการ 2.20 เราสามารถแสดงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ ที่ได้จากการคำนวณ ดังนี้

$$P_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left[ G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right] \quad (2.21)$$

$$Q_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left[ G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right] \quad (2.22)$$

ทั้งนี้ จะพบว่าสมการที่ 2.21 และ 2.22 เป็นสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear)

เราทราบค่าของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังรีแอกทีฟ แต่ไม่ทราบขนาดและมุมของแรงดันไฟฟ้าของทุกๆ บัสยกเว้นบัสอ้างอิงซึ่งได้กำหนดค่าแรงดันไว้ตั้งแต่ต้นแล้ว ดังนั้นจะทำให้มีสมการอยู่ 2(i-1) สมการเพื่อที่จะแก้ปัญหาในการหาคำตอบ โดยเราจะเลือกใช้นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) ในการแก้ปัญหา

พิจารณา ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น  $f_i$  จำนวน  $N$  ฟังก์ชัน

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_N) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_N) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_N) &= y_N \end{aligned} \quad (2.23)$$

โดย

$x_1, x_2, \dots, x_N$  คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

$y_1, y_2, \dots, y_N$  คือ ตัวแปรที่ทราบค่า

จากอนุกรมเทเลอร์ เราสามารถเขียนสมการที่ 2.23 ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \frac{\partial f_N}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \\ f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \\ \vdots \\ f_N(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

จากสมการที่ 2.24 เราสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \\ \vdots \\ y_N - f_N(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_N^{(k)}) \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_N \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

โดย  $[J]$  เป็นจาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian matrix)

จากนั้น เราสามารถหาผลตอบของสมการไม่เชิงเส้นด้วยวิธีของนิวตัน-ราฟสันด้วยวิธีการทำซ้ำ (Iterative method) โดยเริ่มจากการสมมติค่าของคำตอบในครั้งแรกก่อน แล้วจึงคำนวณหาค่าผิดพลาด (Mismatch) เพื่อนำไปปรับเปลี่ยนค่าของคำตอบในรอบถัดไป การปรับแต่งค่าคำตอบสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.26

$$\begin{aligned} X^{(k+1)} &= X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \\ X^{(k+1)} &= X^{(k)} + [J^{(k)}]^{-1} [Y_{spec} - Y^{(k)}] \end{aligned} \quad (2.26)$$

เมื่อเราทำการแก้ปัญหาค่ากำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) จากสมการที่ 2.21, 2.22 และ 2.25 สามารถเขียนสมการโดยเทียบกับตัวแปรที่เราสนใจ ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i^p \\ \Delta Q_i^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i^p \\ \Delta V_i^p \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^p}{\partial \theta_i^p} & \frac{\partial P_i^p}{\partial V_i^p} \\ \frac{\partial Q_i^p}{\partial \theta_i^p} & \frac{\partial Q_i^p}{\partial V_i^p} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ 2.27 เราสามารถเขียนสมการแสดงค่ากำลังไฟฟ้าผิดพลาด ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta P_i^p &= (P_i^p)^{sp} - P_i^p \\ &= (P_i^p)^{sp} - V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left[ G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i^p &= (Q_i^p)^{sp} - Q_i^p \\ &= (Q_i^p)^{sp} - V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left[ G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right] \end{aligned} \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.27 , 2.28 และ 2.29 เมื่อได้จาโคเบียนเมตริกซ์  $[J]$  เราก็สามารถทำการปรับขนาดและมุมของแรงดันเพื่อนำไปคำนวณหาผลตอบใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned} \theta^{(k+1)} &= \theta^{(k)} + \Delta \theta^{(k)} \\ V^{(k+1)} &= V^{(k)} + \Delta V^{(k)} \end{aligned} \quad (2.30)$$

เมื่อได้ค่า  $\theta$  และ  $V$  ใหม่ นำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการที่ 2.21 และ 2.22 เพื่อคำนวณหา ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งค่ากำลังไฟฟ้าผิดพลาดที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงที่เราสามารถยอมรับได้ ซึ่งโดยทั่วไปช่วงที่ยอมรับได้จะอยู่ที่ประมาณ  $10^{-4} - 10^{-6}$

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีของฟัซซีเซต ตัวเลขฟัซซี

ปัญหาที่สำคัญในการวิเคราะห์เกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบจำหน่ายอยู่ที่ความพร้อมและความถูกต้องของข้อมูล ดังนั้น ในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่จำเป็นของฟัซซีเซต ตัวเลขฟัซซี เพื่อที่จะนำไปใช้จัดการความไม่แน่นอนของข้อมูล และนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนของการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจำหน่ายต่อไป

#### 3.1 แนวคิดและลักษณะเบื้องต้นของทฤษฎีฟัซซี (Fuzzy Theory Concept) [1,9,10,11]

แนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีฟัซซีเซต ได้ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกในปี 1965 [1,9,11] โดย "Zadeh" ลักษณะที่สำคัญที่เป็นจุดเด่นของทฤษฎีฟัซซีเซต คือ ทฤษฎีฟัซซีเซตเป็นแนวทางในการอธิบายถึงความคลุมเครือ (Vagueness) ความไม่ชัดเจนของคำพูด คำอธิบายในเชิงภาษา (Linguistic) หรือความไม่ชัดเจนของข้อมูลให้ออกมาอยู่ในรูปของคณิตศาสตร์ได้

โดยการพิจารณาแนวคิดและหลักการพื้นฐานของทฤษฎีฟัซซีเซตจะพบว่า หลักการพื้นฐานที่แตกต่างกันระหว่างความเป็นฟัซซี (Fuzziness) และความน่าจะเป็น (Probability) คือ ความเป็นฟัซซีนั้นเกี่ยวข้องกับความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ที่หาค่าได้หรือกำหนดได้ (Deterministic plausibility) ความเป็นฟัซซีเป็นรูปลักษณะหนึ่งของความไม่แน่นอน เป็นความคลุมเครือที่พบในคำจำกัดความของแนวคิดหรือความหมายของคำ พิจารณาตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับเรื่องไฟฟ้ากำลัง เช่น “โหลดในช่วงเย็นวันจันทร์มีค่าประมาณ 2500 MW” จะเห็นได้ว่าคำกล่าวนี้ ระบุว่าเกิดโหลดค่าๆหนึ่งในตอนเย็นวันจันทร์อย่างแน่นอน และสามารถระบุขอบเขตของค่าๆนั้นได้ คือ ประมาณ 2500 MW แต่ระบุค่าอย่างเจาะจงไม่ได้ ซึ่งคำว่า “ประมาณ” ที่ใช้ไม่ได้บ่งชี้ว่าจะต้องมีช่วงของค่ากว้างหรือแคบเพียงใด ในขณะที่ความน่าจะเป็นจะเกี่ยวข้องกับความน่าจะเป็น (Likelihood) ของเหตุการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์หรือกำหนดได้ (Non-deterministic) และเป็นแบบ Stochastic ความไม่แน่นอนตามแนวคิดของความน่าจะเป็นนั้นจะเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ซึ่งมีลักษณะแบบสุ่ม (Randomness) พิจารณาตัวอย่างเช่น “เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีโอกาสเสีย ถ้าใช้งานติดต่อกันเกิน 4000 ชั่วโมง” จากคำกล่าวนี้ เหตุการณ์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเสียหรือไม่นั้น ไม่สามารถทราบได้ และขึ้นกับสถานะในเวลาปัจจุบันที่พิจารณา บางทีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาจจะเสียก่อนที่มีการใช้งานเป็นเวลาถึง 4000 ชั่วโมงก็ได้

จากตัวอย่างทั้งสองจะพบว่า การกล่าวถึงความไม่แน่นอนในลักษณะของโหลด เทียบกับ ความไม่แน่นอนในสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีความแตกต่างกัน

นอกจากนี้ความเป็นฟัซซี(Fuzziness) และความเป็นเชิงสุ่ม(Randomness) แตกต่างกันในการแสดงความไม่แน่นอน โดยความเป็นฟัซซีจะแสดงความไม่แน่นอนที่เกิดจากความแตกต่างทางความคิดหรือคำจำกัดความที่ขึ้นกับคนแต่ละคนจะคิด(Subjective) ส่วนความเป็นเชิงสุ่มจะแสดง ความไม่แน่นอนทางด้านทฤษฎีหรือรูปธรรม(Objective) ซึ่งเป็นข้อมูลที่อ้างอิงถึงสถิติ(Statistic)

ความแตกต่างระหว่างความเป็นฟัซซีและความน่าจะเป็นนั้น หากพิจารณาจากการสร้างแบบจำลอง(Modeling) แล้วจะพบว่าแบบจำลองฟัซซีและแบบจำลองทางสถิติ(Statistical model) มีชนิดของข้อมูลที่แตกต่างกันในเชิงปรัชญา คือ แบบจำลองฟัซซี จะแสดงในรูปของค่าความเป็นสมาชิก(Membership) ที่แสดงถึงความคล้ายกันของวัตถุต่างๆที่ไม่สามารถระบุคุณสมบัติอย่างชัดเจน โดยค่าความเป็นสมาชิคนั้นจะได้มาจากฟังก์ชันความเป็นสมาชิก(Membership function) ที่กำหนดขึ้น ส่วนแบบจำลองทางสถิติจะแสดงถึงการเกิดขึ้นของข้อมูลในเชิงความถี่สัมพัทธ์

สำหรับความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น(Probability density function: pdf) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก(Membership function) มีดังต่อไปนี้

- pdf แสดงถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้น(likelihood) ของ  $x$  ใดๆ ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแสดงถึงความเป็นสมาชิกของ  $x$  ใดๆในเซต
- ค่ามากที่สุดของ pdf จะเป็นเลขจำนวนจริงบวกค่าหนึ่ง โดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่า 1 ส่วนค่ามากที่สุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยทั่วไปจะเท่ากับ 1
- การอินทิเกรต(Integrate) ฟังก์ชัน pdf จะได้ค่าความน่าจะเป็นสะสม(Cumulative probability) ส่วนการอินทิเกรตฟังก์ชันความเป็นสมาชิกไม่มีนิยาม
- รอยตัดในแต่ละระดับตามแนวนอนของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก(เรียกว่า  $\alpha$ -cut ) จะแสดงถึงความเป็นสมาชิกในเซตที่ระดับความเชื่อหนึ่งๆ ส่วนกรณีของ pdf นั้นไม่มีนิยาม

### 3.2 ทฤษฎีฟัซซีเซต (Fuzzy set theory) [1,9,10,11]

เซตตามความหมายดั้งเดิม(Classical crisp set) คือการจัดกลุ่มของวัตถุ(Object) ที่มีลักษณะเหมือนกันหรือสอดคล้องกันตามคำนิยามของเซตนั้นนำมาไว้รวมเป็นกลุ่มเดียวกัน การกำหนดนิยามของเซตจะเป็นไปในแนวทางเพื่อแยกกลุ่มวัตถุต่างๆในขอบเขตทั้งหมดที่เราสนใจหรือเอกภพสัมพัทธ์(Universe of discourse) ออกเป็นสองกลุ่ม คือเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิก ลักษณะของขอบเขตในการแบ่งแยกการเป็นสมาชิกและไม่เป็นสมาชิกของเซตจะถูกกำหนดอย่างแน่นอน (Crisp) และมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงทันที ณ ตรงเส้นแบ่งขอบเขตนั้น



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

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

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

ฟัซซีเซต(Fuzzy set) จะมีลักษณะที่แตกต่างจากเซตดั้งเดิมตรงที่ได้ขยายหลักการพื้นฐานของเซตดั้งเดิมออกไป และแสดงออกในรูปที่เป็นรูปแบบทั่วไปยิ่งขึ้น(Generalization) โดยฟัซซีเซตจะแสดงลักษณะของความคลุมเครือ ไม่ชัดเจน โดยการกำจัดขอบเขตในการแบ่งความเป็นสมาชิกและ ไม่เป็นสมาชิกอย่างชัดเจนตามหลักการของเซตดั้งเดิมออกไป และกำหนดให้ค่าของความเป็นสมาชิกค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นจากความไม่เป็นสมาชิกเลยไปถึงระดับที่มีความเป็นสมาชิกเต็มที่ หรือในทางตรงกันข้าม ค่าจะค่อยๆลดลงจากระดับที่มีความเป็นสมาชิกเต็มที่ไปจนถึงระดับที่ไม่มีความเป็นสมาชิกเลย

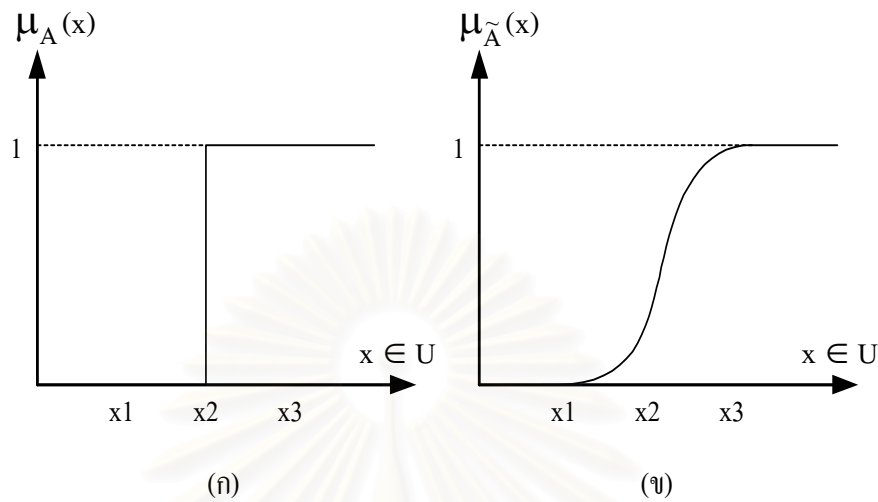
ฟัซซีเซต  $\tilde{A}$  (ใช้สัญลักษณ์  $\sim$  แสดงถึงฟัซซีเซต) ใน เอกภพสัมพัทธ์  $U$  สามารถแสดงได้ในลักษณะของเซตของคู่อันดับ คือ

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

โดย  $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$  คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก(Membership function) ของ  $\tilde{A}$  และ  $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$  จะแสดงถึงระดับความเป็นสมาชิกของ  $x$  ใน  $\tilde{A}$  อาจมองได้ว่า  $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$  แสดงถึงการจัดลำดับของวัตถุต่างๆใน  $\tilde{A}$  โดยเรียงตามระดับของความเป็นสมาชิก ในกรณีนี้

- $\mu_{\tilde{A}}(\cdot) : U \rightarrow M \mid M = \{ 0, 1 \}$  โดย  $M$  คือ ค่าความเป็นสมาชิกที่เป็นไปได้ (Membership space) กรณีนี้เซต  $\tilde{A}$  จะไม่เป็นฟัซซีเซต แต่จะเป็นเซตดั้งเดิม ( $A$ )
- $\mu_{\tilde{A}}(\cdot) : U \rightarrow M \mid M \subset \mathfrak{R}^+, \sup(M) = \infty$  เซต  $\tilde{A}$  จะเป็นฟัซซีเซต ซึ่งโดยปกติทั่วไปจะกำหนดให้  $M = [0, 1]$

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  $\mathcal{R}$  และเซต(Crisp)  $A$  เป็นเซตของ "จำนวนจริงที่มากกว่าหรือเท่ากับ 5" จะได้ว่า

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

โดยฟังก์ชันคุณสมบัติ(Characteristic function) สำหรับเซตนี้ คือ

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & , x < 5 \\ 1 & , x \geq 5 \end{cases}$$

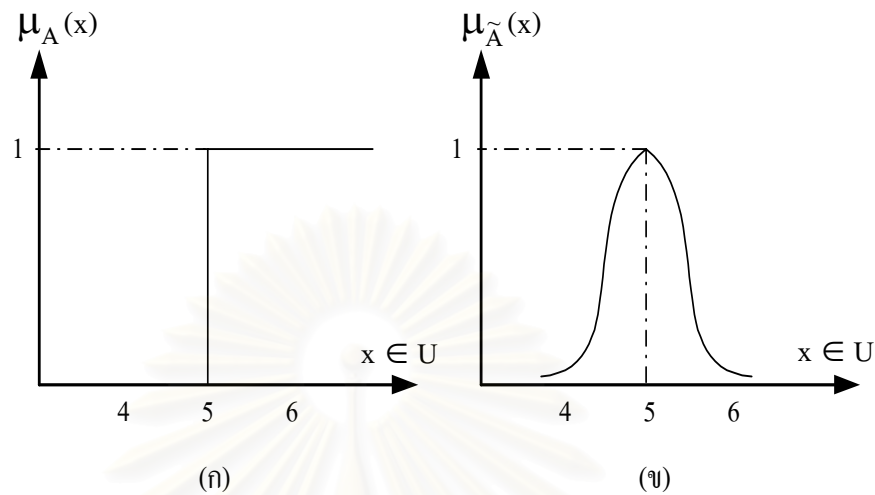
ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ก) ถ้าให้ฟัซซีเซต  $\tilde{A}$  เป็นเซตของ "จำนวนจริงที่ใกล้เคียง 5" จะได้ว่า

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

โดยในกรณีนี้กำหนดให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก(Membership function) คือ

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

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



รูปที่ 3.2 ลักษณะของเซตแบบดั้งเดิม(Crisp set) และฟัซซีเซตตามตัวอย่างที่ 1

ทั้งนี้การกำหนดลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นจะขึ้นอยู่กับการศึกษาว่าลักษณะของฟังก์ชันใดที่จะเหมาะสมที่สุด ที่จะนำมาใช้อธิบายและจัดลำดับองค์ประกอบหรือวัตถุต่างๆ ( $x$ ) ใน  $\tilde{A}$  เพื่อให้สอดคล้องกับค่านิยามของเซต  $\tilde{A}$  นั้น

### 3.2.1 การนำเสนอของฟัซซีเซต (Representation of fuzzy set)

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

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

ฟัซซีเซตที่เป็นเซตว่าง(Empty fuzzy set) จะมี  $\text{supp}(\tilde{A})$  ที่เป็นเซตว่างด้วย นั่นคือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับทุกๆ  $x$  ใน  $U$  ในกรณีทั่วไปถ้ากำหนดให้เอกภพสัมพัทธ์  $U = \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$  คือ  $U$  มีค่าไม่ต่อเนื่อง(Discrete) เราสามารถแสดง  $\tilde{A}$  ในรูปของคู่อันดับดังนี้

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

การนำเสนอของฟัซซีเซตสามารถแสดงได้ในรูปของ “Support ของฟัซซีเซต” ดังนี้ โดยนิยามของ “Support ของฟัซซีเซต” เราสามารถแสดง  $\tilde{A}$  ได้ในรูปที่ง่ายขึ้น คือ

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

โดยสัญลักษณ์ + แสดงถึงการ Union และ  $\mu_i = \mu_{\tilde{A}}(x_i) > 0$  นั่นคือเราสนใจเฉพาะค่า  $x_i$  ( $x_i \in U$ ) ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิกมากกว่าศูนย์ เครื่องหมาย - ระหว่าง  $\mu_i$  และ  $x_i$  จะแสดงถึงการแบ่งแยกระหว่าง  $\mu_i$  และ  $x_i$  ที่สอดคล้องกันซึ่งไม่ใช่การหาร ในกรณีที่  $U$  มีค่าต่อเนื่อง (Continuous) จะเขียนได้ว่า

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

โดยเครื่องหมาย  $\int$  แสดงถึงการ Union ขององค์ประกอบต่างๆใน  $\tilde{A}$  ซึ่งเป็นค่าที่ต่อเนื่อง

### 3.2.2 $\alpha$ -Cut หรือ $\alpha$ -Level ของฟัซซีเซต

$\alpha$ -cut หรือ  $\alpha$ -level set ของฟัซซีเซต  $\tilde{A}$  คือ เซต  $A$  (Crisp set) ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบทุกตัวในเอกภพสัมพัทธ์  $U$  ที่มีค่าความเป็นสมาชิกใน  $\tilde{A}$  มากกว่าหรือเท่ากับ  $\alpha$  คือ

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

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

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

จากสมการที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าถ้า  $\alpha \leq \beta$  แล้ว  $A_\beta \subseteq A_\alpha$

### 3.2.3 คุณสมบัติความเป็น Convex (Convexity)

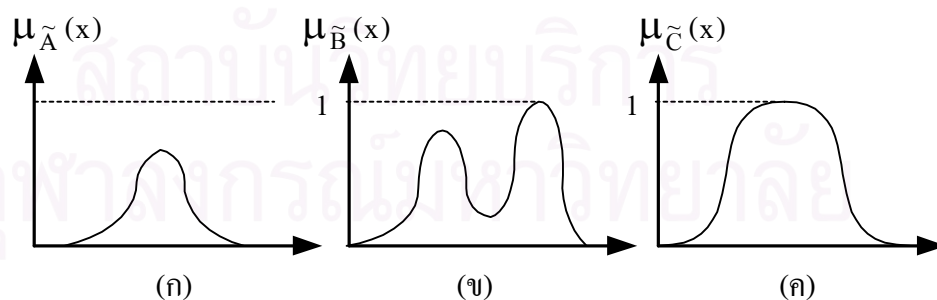
ฟัซซีเซตจะมีคุณสมบัติ Convex ก็ต่อเมื่อแต่ละ  $\alpha$ -cut ของฟัซซีเซตเป็นเซตที่ Convex กล่าวคือ

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

โดย  $x_1, x_2 \in U, \lambda \in (0,1]$  จากสมการที่ 3.9 กล่าวได้ว่า เมื่อเราพิจารณาจุด 2 จุดใดๆ คือ  $x_1, x_2$  ในฟัซซีเซต  $\tilde{A}$  และลากเส้นตรงเชื่อมจุด 2 จุดนั้นแล้ว ค่าความเป็นสมาชิกของทุกๆจุด (x) บนเส้นตรงจะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าความเป็นสมาชิกของ  $x_1$  หรือ  $x_2$  แล้วแต่ค่าใดต่ำกว่ากันนอกจากนี้ พิจารณานิยามของความสูงของฟัซซีเซตดังนี้ นิยามความสูงของฟัซซีเซต (Height of fuzzy set) คือ

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

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



รูปที่ 3.3 ลักษณะของความเป็น Convex ของฟัซซีเซต และลักษณะฟัซซีเซตที่ Normalized

### 3.2.4 หลักการ Extension (Extension Principle)

หลักการ Extension นำเสนอครั้งแรกโดย Zadeh[1978a] ซึ่งเป็นหลักการหนึ่งที่สำคัญมากในทฤษฎีของฟัซซีเซต หลักการนี้ช่วยในการเชื่อมโยงระหว่างแนวคิดทางคณิตศาสตร์แบบดั้งเดิม (Crisp mathematical concepts) กับการคิดคำนวณบนพื้นฐานของฟัซซีเซต โดยนำเสนอแนวทางในการเชื่อมโยงค่า (Mapping) จากฟังก์ชัน  $f$  ใดๆ คือ  $f : (x_1, x_2, \dots, x_n)$  ในเซต (Crisp)  $U$  ไปสู่จุดๆหนึ่งในเซต (Crisp)  $V$  ให้เป็นกรณีทั่วไป คือ เป็นการเชื่อมโยงค่า จาก  $n$  ฟัซซีสับเซต (Fuzzy subset) ใน  $U$  ไปสู่ ฟัซซีสับเซตใน  $V$  ดังนั้นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ใดๆระหว่าง องค์ประกอบที่ไม่ใช่ฟัซซี (Nonfuzzy elements) จะสามารถขยายไปสู่การจัดการกับองค์ประกอบที่เป็นฟัซซีได้

กำหนดให้ฟังก์ชัน  $f : U \rightarrow V$  และฟัซซีเซต  $\tilde{A}$  อยู่ใน  $U$  โดยอาศัยสมการที่ 3.5 หลักการ Extension กล่าวไว้

$$\begin{aligned} f(\tilde{A}) &= f\left(\frac{\mu_1}{x_1} + \frac{\mu_2}{x_2} + \frac{\mu_3}{x_3} + \dots + \frac{\mu_n}{x_n}\right) \\ &= \frac{\mu_1}{f(x_1)} + \frac{\mu_2}{f(x_2)} + \frac{\mu_3}{f(x_3)} + \dots + \frac{\mu_n}{f(x_n)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

ถ้ามีค่า  $x$  มากกว่าหนึ่งค่าใน  $U$  ที่ถูกเชื่อมโยงไปยังค่า  $y$  เดียวกันใน  $V$  โดย  $f$  (many-to-one mapping) จะได้ว่า

$$\mu_{f(\tilde{A})}(y) = \max_{\substack{x_i \in U \\ f(x_i)=y}} (\mu_{\tilde{A}}(x_i)) \quad (3.12)$$

โดย  $x_i$  คือค่าที่ถูกเชื่อมโยงไปสู่ค่า  $y$  เดียวกัน ใน  $U$  คือ ผลคูณคาร์ทีเซียน (Cartesian Product) ของเอกภพสัมพัทธ์  $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$  และ  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$  เป็น  $n$  ฟัซซีเซตใน  $U_1, U_2, \dots, U_n$  ตามลำดับ ฟังก์ชัน  $f$  เชื่อมโยงค่า  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ในเซต (crisp)  $U$  ไปสู่จุด  $y$  จุดหนึ่งในเซต (Crisp)  $V$  นั่นคือ  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  จากหลักการ Extension ฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  จะถูกขยายไปกระทำบน  $n$  ฟัซซีสับเซตของ  $U : \tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$  คือ  $\tilde{B} = f(\tilde{A})$  โดย  $\tilde{B}$  คือ ภาพฉายฟัซซี (Fuzzy image) ซึ่งเป็นฟัซซีเซตของ  $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n$  ผ่าน  $f(\cdot)$  โดยฟัซซีเซต  $\tilde{B}$  สามารถคำนวณได้จาก

$$\tilde{B} = \{ (y, \mu_{\tilde{B}}(y)) \mid y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U \} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \sup_{\substack{(x_1, x_2, \dots, x_n) \in U \\ y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)}} \min[ \mu_{\tilde{A}_1}(x_1), \mu_{\tilde{A}_2}(x_2), \dots, \mu_{\tilde{A}_n}(x_n) ] \quad (3.14)$$

ตัวอย่างที่ 3.2 กำหนดให้  $f$  เป็นฟังก์ชันที่เชื่อมโยงค่าจาก  $U_1 = \{-1, 0, 1\}$  และ  $U_2 = \{-2, 2\}$  ไปยัง  $V = \{-2, -1, 2, 3\}$  โดย  $f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2$  ให้  $\tilde{A}_1$  และ  $\tilde{A}_2$  คือ ฟัซซีเซตที่นิยามบน  $U_1$  และ  $U_2$  ตามลำดับ ที่ซึ่ง  $\tilde{A}_1 = (0.5/-1) + (0.1/0) + (0.9/1)$  และ  $\tilde{A}_2 = (0.4/-2) + (0.1/2)$  โดยการใช้หลักการ Extension จะได้  $f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$  ตามขั้นตอนการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

$X_1$	$\mu_{A_1}$	$X_2$	$\mu_{A_2}$	$\mu_{A_1 \times A_2}(x_1, x_2)$	$y = f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2$
-1	0.5	-2	0.4	$\min(0.5, 0.4)$	-1
-1	0.5	2	1.0	$\min(0.5, 1.0)$	3
0	0.1	-2	0.4	$\min(0.1, 0.4)$	-2
0	0.1	2	1.0	$\min(0.1, 1.0)$	2
1	0.9	-2	0.4	$\min(0.9, 0.4)$	-1
1	0.9	2	1.0	$\min(0.9, 1.0)$	3

จากตารางจะเห็นว่าคู่ลำดับ (-1,-2) และ (1,-2) และคู่ลำดับ (-1,2) และ (1,2) ถูกเชื่อมโยงไปยังจุดเดียวกันคือจุด  $y = -1$  และ  $y = 3$  ตามลำดับ จากสมการที่ 3.14 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{B}}(y = -1) &= \sup [ \min( \mu_{A_1}(x_1 = -1), \mu_{A_2}(x_2 = -2) ), \\ &\quad \min( \mu_{A_1}(x_1 = 1), \mu_{A_2}(x_2 = -2) ) ] \\ &= \sup [ \min(0.5, 0.4), \min(0.9, 0.4) ] = 0.4 \\ \mu_{\tilde{B}}(y = -2) &= \sup [ \min( \mu_{A_1}(x_1 = 0), \mu_{A_2}(x_2 = -2) ) ] \\ &= \sup [ \min(0.1, 0.4) ] = 0.1 \\ \mu_{\tilde{B}}(y = 2) &= \sup [ \min( \mu_{A_1}(x_1 = 0), \mu_{A_2}(x_2 = 2) ) ] \\ &= \sup [ \min(0.1, 1) ] = 0.1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_B(y=3) &= \sup [ \min(\mu_{A_1}(x_1=-1), \mu_{A_2}(x_2=2)), \\ &\quad \min(\mu_{A_1}(x_1=1), \mu_{A_2}(x_2=2)) ] \\ &= \sup [ \min(0.5, 1), \min(0.9, 1) ] = 0.9\end{aligned}$$

ดังนั้น ผลลัพธ์สุดท้าย (ฟัซซีเซต  $\tilde{B}$ ) ที่ได้จากการใช้หลักการ Extension ตามสมการที่ 3.13 และ 3.14 คือ

$$\tilde{B} = (0.1/-2) + (0.4/-1) + (0.1/2) + (0.9/3)$$

### 3.2.5 พีชคณิตบนช่วง (Interval Arithmetic)

ส่วนใหญ่งานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมจะเกี่ยวข้องกับค่าที่ไม่แน่นอนหรือข้อมูลที่ไม่เที่ยงตรงจากเครื่องมือวัด ซึ่งค่าเหล่านี้มักจะถูกระบุในลักษณะเป็นช่วงของค่า(Interval) เราจึงใช้การดำเนินการทางคณิตศาสตร์(Mathematical operation) ในการกระทำบนช่วงเหล่านี้เพื่อที่จะได้ค่าประมาณของการวัดที่เชื่อถือได้ซึ่งอยู่ในรูปของช่วง ดังนั้นการวิเคราะห์ช่วงของค่า(Interval analysis) หรือ พีชคณิตบนช่วง(Interval arithmetic) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณชนิดนี้

พิจารณาค่าหรือข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์ที่มีค่าไม่แน่นอน เราสามารถระบุตำแหน่งค่าที่ไม่แน่นอนนี้บนเส้นจำนวนจริงได้ภายในช่วงปิด(Closed interval) ช่วงหนึ่ง นั่นคือค่าที่ไม่แน่นอนจะอยู่ภายในช่วงของความเชื่อมั่นหนึ่ง(Interval of confidence) ของ  $\mathcal{R}$ ,  $x \in [a_1, a_2]$  โดย  $a_1 \leq a_2$  การกระทำเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าเราแน่ใจว่าค่า  $x$  นั้นมากกว่าหรือเท่ากับ  $a_1$  และ น้อยกว่าหรือเท่ากับ  $a_2$  หรือกล่าวได้ว่าเราจำกัดความไม่แน่นอนของข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่ถูกกำหนดโดย ขอบบนและขอบล่าง ( $a_2$  และ  $a_1$ )

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

$$A = [a_1, a_2] = \{ x \mid a_1 \leq x \leq a_2 \} \quad (3.15)$$

โดยทั่วไปตัวเลข  $a_1$  และ  $a_2$  จะมีค่าจำกัด(finite) ในกรณีที่ค่า  $x$  เป็นค่าที่แน่นอนใน  $\mathcal{R}$  เราก็ยังสามารถแสดงได้ในรูปของช่วงคือ  $x = [x, x]$  การดำเนินการทางคณิตศาสตร์บนช่วงของความเชื่อมั่นได้แก่ การบวก(+), การลบ(-), การคูณ(\*), การหาร(:), การหาค่ามากที่สุด( $\vee$ ) และการหาค่าน้อยที่สุด( $\wedge$ ) สามารถแสดงได้ดังนี้



• การบวก(+) และ การลบ(-) : ให้  $A = [a_1, a_2]$  และ  $B = [b_1, b_2]$  เป็นช่วงความเชื่อมั่นใน  $\mathcal{R}$  ถ้า  $x \in [a_1, a_2]$  และ  $y \in [b_1, b_2]$  แล้ว  $x + y \in [a_1 + b_1, a_2 + b_2]$  นั่นคือ

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

และสำหรับการลบจะได้

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

• ภาพของ A (Image:  $\bar{A}$ ): ถ้า  $x \in [a_1, a_2]$  แล้วภาพของ A :  $\bar{A} = [-a_2, -a_1]$  และสังเกตว่า

$$A (+) \bar{A} = [a_1, a_2] (+) [-a_2, -a_1] = [a_1 - a_2, a_2 - a_1] \neq 0 \quad (3.18)$$

• การคูณ (.) และ การหาร (:): ให้  $A = [a_1, a_2]$  และ  $B = [b_1, b_2]$  เป็นช่วงความเชื่อมั่นใน  $\mathcal{R}$  จะได้

$$A (.) B = [\min(a_1 b_1, a_1 b_2, a_2 b_1, a_2 b_2), \max(a_1 b_1, a_1 b_2, a_2 b_1, a_2 b_2)] \quad (3.19)$$

ในกรณีถ้า  $A, B \subset \mathcal{R}^+$  จะแสดงได้ตามสมการที่ 3.20 คือ

$$A (.) B = [a_1, a_2] (.) [b_1, b_2] = [a_1 b_1, a_2 b_2] \quad (3.20)$$

สำหรับการหารในกรณีที่  $A, B \subset \mathcal{R}$  และ  $0 \notin B$  จะได้ว่า

$$A (:) B = [\min(a_1/b_1, a_1/b_2, a_2/b_1, a_2/b_2), \max(a_1/b_1, a_1/b_2, a_2/b_1, a_2/b_2)] \quad (3.21)$$

ในกรณีถ้า  $A, B \subset \mathcal{R}^+$  และ  $0 \notin B$  จะได้

$$A (:) B = [a_1, a_2] (:) [b_1, b_2] = [a_1/b_2, a_2/b_1] \quad (3.22)$$

- อินเวอร์สของ  $A$  (Inverse :  $A^{-1}$ ) : ถ้า  $x \in [a_1, a_2] \subset \mathfrak{R}^+$ ,  $0 \notin [a_1, a_2]$  จะได้ อินเวอร์สคือ  $A^{-1} = [1/a_2, 1/a_1]$  สังเกตว่าในกรณีนี้

$$A (.) A^{-1} = [a_1/a_2, a_2/a_1] \neq 0 \quad (3.23)$$

- $\text{Max} (\vee)$  และ  $\text{Min} (\wedge)$  : พิจารณาระหว่างของความเชื่อมั่น  $A, B \subset \mathfrak{R}$  จะได้ว่า

$$A (\vee) B = [a_1 \vee b_1, a_2 \vee b_2] \quad (3.24)$$

$$A (\wedge) B = [a_1 \wedge b_1, a_2 \wedge b_2] \quad (3.25)$$

คุณสมบัติทางพีชคณิตของการดำเนินการบนช่วงสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1 สังเกตว่าการลบและการหารไม่มีคุณสมบัติการสลับที่(Commutativity) และการเปลี่ยนกลุ่ม(Associativity)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางพีชคณิตของการดำเนินการบนช่วง

คุณสมบัติ	การบวก (+)	การคูณ (.)
การสลับที่	$A (+) B = B (+) A$	$A (.) B = B (.) A$
การเปลี่ยนกลุ่ม	$(A (+) B) (+) C = A (+) (B (+) C)$	$(A (.) B) (.) C = A (.) (B (.) C)$
เอกลักษณ์	$A (+) 0 = 0 (+) A = A$	$A (.) 1 = 1 (.) A = A$
ภาพและอินเวอร์ส	$A (+) \bar{A} = \bar{A} (+) A \neq 0$ สำหรับ $\forall A, B, C \subset \mathfrak{R}$	$A (.) A^{-1} = A^{-1} (.) A \neq 1$ สำหรับ $\forall A, B, C \subset \mathfrak{R}^+$

ตัวอย่างที่ 3.3 พิจารณาระหว่างของจำนวนจริงที่กำหนดขึ้นดังนี้  $A = [1.23, 4.56]$ ,  $B = [2.45, 6.26]$ ,  $C = [-3.12, 5.64]$ ,  $D = [-4.02, -1.27]$ ,  $E = [2, 4]$ ,  $F = [-4, 6]$  และ  $G = [-6, -2]$  จะได้ว่า

$$A (+) B = [1.23, 4.56] (+) [2.45, 6.26] = [1.23+2.45, 4.56 + 6.26] = [3.68, 10.82]$$

$$A (-) C = [1.23, 4.56] (-) [-3.12, 5.64] = [1.23 - 5.64, 4.56 + 3.12] = [-4.41, 7.68]$$

$$\bar{C} = [-5.64, 3.12]$$

$$C (+) \bar{C} = [-3.12, 5.64] (+) [5.64, -3.12] = [-8.76, 8.76] \neq 0$$

$$(A (+) B) (-) C = [3.68, 10.82] (-) [-3.12, 5.64] = [-1.96, 13.94]$$

$$A (.) B = [1.23, 4.56] (.) [2.45, 6.26] = [3.0135, 28.5456]$$

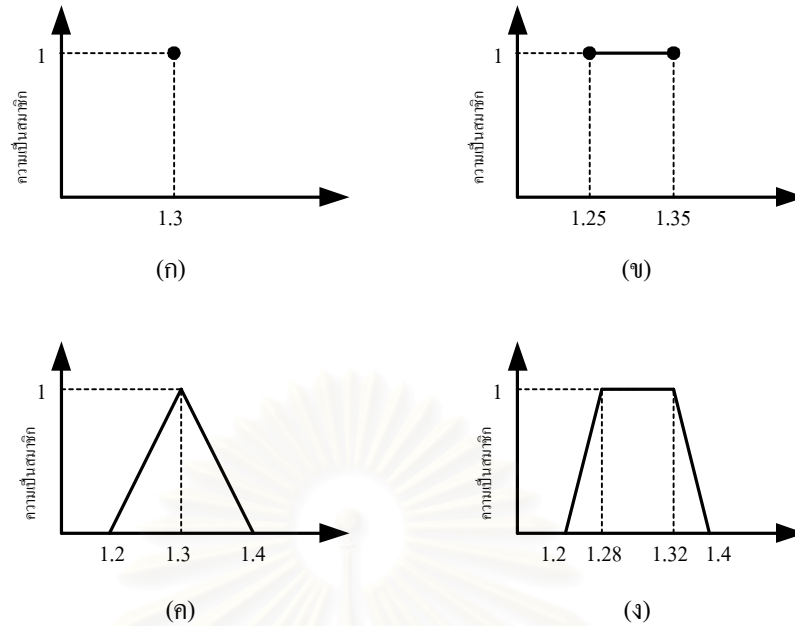
$$\begin{aligned}
A(\cdot)B &= [1.23, 4.56] (\cdot) [2.45, 6.26] = [1.23 / 6.26, 4.56 / 2.45] \\
&= [0.1965, 1.8612] \\
A^{-1} &= [1 / 4.56, 1 / 1.23] = [0.2193, 0.8130] \\
A(\cdot)A^{-1} &= [1.23, 4.56] (\cdot) [0.2193, 0.8130] = [0.2697, 3.7073] \neq 1 \\
E(\wedge)F &= [2, 4] (\wedge) [-4, 6] = [2 \wedge -4, 4 \wedge 6] = [-4, 4] \\
E(\vee)F &= [2 \vee -4, 4 \vee 6] = [2, 6]
\end{aligned}$$

### 3.2.6 ตัวเลขฟัซซี (Fuzzy Number)

ตัวเลขฟัซซีคือ ฟัซซีเซตที่ Convex และ Normalized และถูกนิยามบนเส้นจำนวนจริง  $\mathcal{R}$  ซึ่งมีลักษณะฟังก์ชันความเป็นสมาชิก(Membership function) ที่ต่อเนื่องเชิงท่อน(Piecewise continuous) หรือแต่ละ  $\alpha$ -cut เป็นช่วงปิด(Closed interval)  $\mu_{\tilde{A}}(\cdot) : \mathcal{R} \rightarrow [0, 1]$

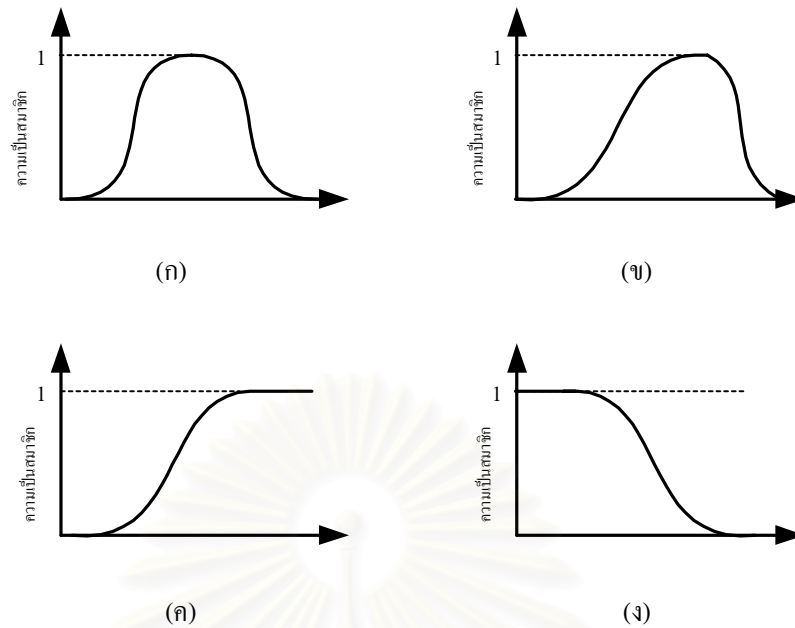
จากคำนิยามของตัวเลขฟัซซี จะพบว่าตัวเลขฟัซซีจะแสดงถึง “ตัวเลข” จากแนวคิดของการประมาณตัวเลขนั้นๆ โดยอาศัยลักษณะการแสดงในเชิงคณิตศาสตร์ในรูปของช่วง(Interval) ตัวเลขฟัซซีจะแสดงค่าของข้อความที่แสดงความไม่แน่นอนของตัวเลข เช่น “มีค่าประมาณ 5” หรือ “มีค่าใกล้เคียงกับ 3.4” โดยอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในการระบุค่าความเป็นสมาชิกให้กับตัวเลขใดๆบนเส้นจำนวนจริงว่ามีคุณสมบัติสอดคล้องหรือใกล้เคียงกับคำนิยามของข้อความนั้นๆ มากหรือน้อยเพียงใด ตัวเลขฟัซซีที่เป็นลบ คือตัวเลขฟัซซีที่ค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับศูนย์ สำหรับทุกค่าของตัวแปรอิสระ  $x$  ที่เป็นลบ นั่นคือ  $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \forall x < 0$  ในทางตรงกันข้าม ตัวเลขฟัซซีที่เป็นลบมีลักษณะคือ  $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0, \forall x > 0$

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



รูปที่ 3.4 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ

ตัวเลขฟัซซีรูปสามเหลี่ยม และตัวเลขฟัซซีรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ซึ่งก็คือตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยมคางหมูตามลำดับ จะเป็นตัวเลขฟัซซีที่นิยมใช้กันมากที่สุด นอกจากนี้ก็ยังมีตัวเลขฟัซซีรูปแบบอื่นๆ ที่ใช้กันในบางกรณี เช่น ตัวเลขฟัซซีที่เป็นรูประฆัง (Bell-shaped) ซึ่งมีทั้งแบบสมมาตร และไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5(ก) และ (ข) ตัวเลขฟัซซีที่มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่เพิ่มขึ้นอย่างเดียว หรือลดลงอย่างเดียว ซึ่งสื่อถึงข้อความที่ว่า "ตัวเลขค่ามาก" (Large number) และ "ตัวเลขค่าน้อย" (Small number) ดังแสดงในรูปที่ 3.5(ค) และ (ง)



รูปที่ 3.5 ตัวเลขฟัซซีแบบต่างๆ (ต่อ)

### 3.2.7 พีชคณิตฟัซซี (Fuzzy Arithmetic)

เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเลขฟัซซี คือ Normal และ Convex บนเส้นจำนวนจริงซึ่งมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ต่อเนื่องเชิงท่อน (Piecewise continuous) นั่นคือทุกๆ  $\alpha$ -cut ( $A_\alpha$ ) ของตัวเลขฟัซซี  $\tilde{A}$  เป็นช่วงปิดบน  $\mathcal{R}$  และค่าสูงที่สุดของ  $\mu_{\tilde{A}}(\cdot)$  มีค่าเป็น 1 ดังนั้นถ้ากำหนดตัวเลขฟัซซี  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  ใน  $\mathcal{R}$  สำหรับค่า  $\alpha$  ค่าหนึ่ง :  $\alpha_1 \in [0, 1]$  เราจะได้ช่วงปิดสองช่วง คือ  $A_{\alpha_1} \equiv [a1^{(\alpha_1)}, a2^{(\alpha_1)}]$  จากตัวเลขฟัซซี  $\tilde{A}$  และ  $B_{\alpha_1} \equiv [b1^{(\alpha_1)}, b2^{(\alpha_1)}]$  จากตัวเลขฟัซซี  $\tilde{B}$  ซึ่งเราสามารถใช้หลักการของพีชคณิตบนช่วงมาประยุกต์ใช้ได้

ดังนั้นเราสามารถมองว่าตัวเลขฟัซซีเป็นการขยายแนวความคิดของช่วงตัวเลข (Interval) คือแทนที่จะพิจารณาช่วงตัวเลขเพียงแค่ระดับเดียว ตัวเลขฟัซซีจะพิจารณาช่วงของตัวเลข ณ หลายๆระดับ ซึ่งแต่ละช่วงเหล่านี้จะสอดคล้องกับแต่ละ  $\alpha$ -cut ของตัวเลขฟัซซี เพื่อแสดงว่าเรากำลังพิจารณาการดำเนินการทางพีชคณิต (Arithmetic operation) บนทุกระดับช่วงปิดของตัวเลขฟัซซี เราจะใช้สัญลักษณ์  $A_\alpha \equiv [a1^{(\alpha)}, a2^{(\alpha)}]$  เพื่อแสดงช่วงปิดของตัวเลขฟัซซี  $\tilde{A}$  ที่ทุกระดับ  $\alpha$  ( $\alpha \in [0,1]$ )

กำหนดให้  $(*)$  หมายถึง การดำเนินการบนตัวเลขฟัซซี เช่น การบวก (+) การลบ (-) การคูณ ( $\cdot$ ) และการหาร ( $:$ ) โดยใช้หลักการ Extension ผลลัพธ์  $\tilde{A} (*) \tilde{B}$  โดย  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  คือตัวเลขฟัซซีจะได้ว่า

$$\mu_{\tilde{A}(*)\tilde{B}}(z) = \sup_{z = x * y} \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)) \quad (3.26)$$

กรณีที่  $x, y \in \mathfrak{R}$  สำหรับ  $\min(\wedge)$  และ  $\max(\vee)$  จะได้ว่า

$$\mu_{\tilde{A}(*)\tilde{B}}(z) = \sup_{z = x * y} (\mu_{\tilde{A}}(x) * \mu_{\tilde{B}}(y)) \quad (3.27)$$

ใช้หลักการของ  $\alpha$ -Cut กับสมการที่ 3.26 และ 3.27 จะได้ผลลัพธ์ตามสมการที่ 3.28 คือ

$$(A(*)B)_\alpha = A_\alpha (*) B_\alpha : \forall \alpha \in [0,1] \quad (3.28)$$

สังเกตว่าสำหรับ  $\alpha_1, \alpha_2 \in [0,1]$  ถ้า  $\alpha_1 > \alpha_2$  ดังนั้น  $A_{\alpha_1} \subset A_{\alpha_2}$  ฟังก์ชันของสมการที่ 3.28 แสดงถึงการดำเนินการเชิงช่วงกับทุกๆ  $\alpha$ -cut ของ  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$A_\alpha (+) B_\alpha = [a_1^\alpha + b_1^\alpha, a_2^\alpha + b_2^\alpha] \quad (3.29)$$

$$A_\alpha (-) B_\alpha = [a_1^\alpha - b_2^\alpha, a_2^\alpha - b_1^\alpha] \quad (3.30)$$

$$A_\alpha (\cdot) B_\alpha = [\min(a_i^\alpha \cdot b_j^\alpha), \max(a_i^\alpha \cdot b_j^\alpha)] \quad (3.31)$$

$$A_\alpha (/) B_\alpha = [\min(a_i^\alpha / b_j^\alpha), \max(a_i^\alpha / b_j^\alpha)] ; 0 \notin B_\alpha \quad (3.32)$$

โดยในสมการที่ 3.31 และ 3.32  $i, j$  มีค่าเท่ากับ 1 และ 2

จากที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถสรุปคุณสมบัติของการดำเนินการ(Operation) บนตัวเลขฟัซซี และ คุณสมบัติการบวกและการคูณเชิงพีชคณิตบนตัวเลขฟัซซี ได้ดังนี้

1. ถ้า  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  เป็นตัวเลขฟัซซี ใน  $\mathfrak{R}$  แล้ว  $\tilde{A} (+) \tilde{B}$  และ  $\tilde{A} (-) \tilde{B}$  ยังคงเป็นตัวเลขฟัซซี
2. ถ้า  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  เป็นตัวเลขฟัซซี ใน  $\mathfrak{R}^+$  แล้ว  $\tilde{A} (\cdot) \tilde{B}$  และ  $\tilde{A} (/) \tilde{B}$  ยังคงเป็นตัวเลขฟัซซี
3. ไม่มีภาพ(Image) และอินเวอร์ส(Inverse) ของตัวเลขฟัซซีที่ทำให้

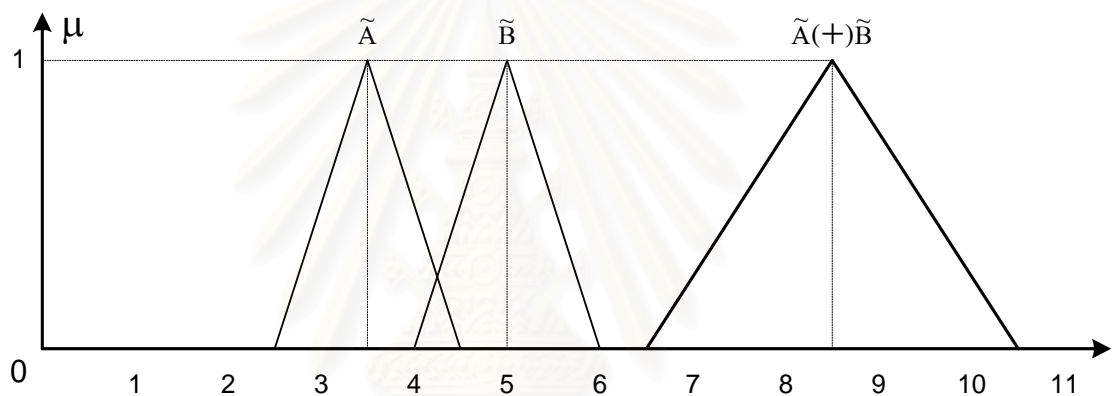
$$\tilde{A} (+) \tilde{A} = 0 \quad \text{และ} \quad \tilde{A} (\cdot) \tilde{A}^{-1} = 1$$

4. อสมการต่อไปนี้จริง

$$(\tilde{A}(-)\tilde{B})(+) \tilde{B} \neq \tilde{A} \quad \text{และ} \quad (\tilde{A}(:)\tilde{B})(.) \tilde{B} \neq \tilde{A}$$

5. ตัวเลขฟัซซีมีคุณสมบัติการสลับที่ และการจัดหมู่

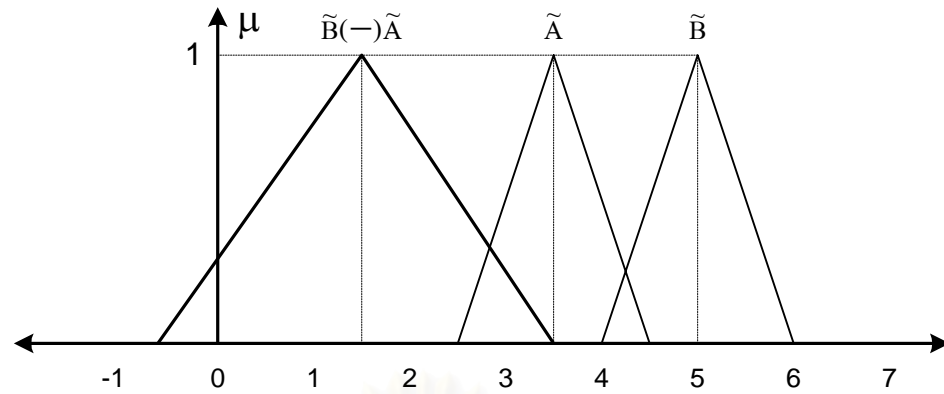
ตัวอย่างที่ 3.4 กำหนดให้ ตัวเลขฟัซซี  $\tilde{A}$  แสดงถึงข้อความ "มีค่าประมาณ 3.5" และ  $\tilde{B}$  แสดงถึงข้อความ "มีค่าประมาณ 5" โดยกำหนดให้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม เราจะได้ผลลัพธ์จากการดำเนินการบนตัวเลขฟัซซีโดยใช้หลักการพีชคณิตฟัซซีดังนี้



รูปที่ 3.6 การบวกระหว่างตัวเลขฟัซซี

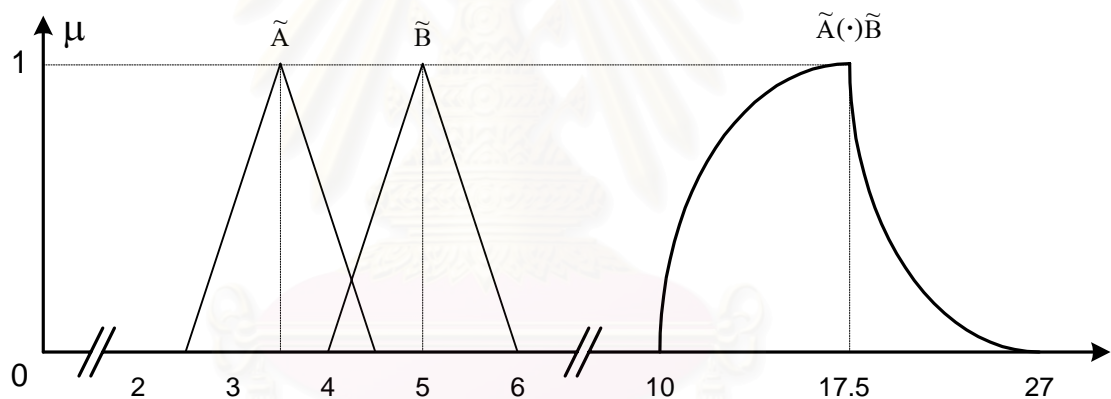
รูปที่ 3.6 แสดงผลที่ได้จากการบวก คือ  $\tilde{A}(+)\tilde{B}$  ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นตัวเลขฟัซซีที่แสดงถึงข้อความ "มีค่าประมาณ 8.5" โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยมเช่นเดียวกับฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 การลบระหว่างตัวเลขฟัซซี่

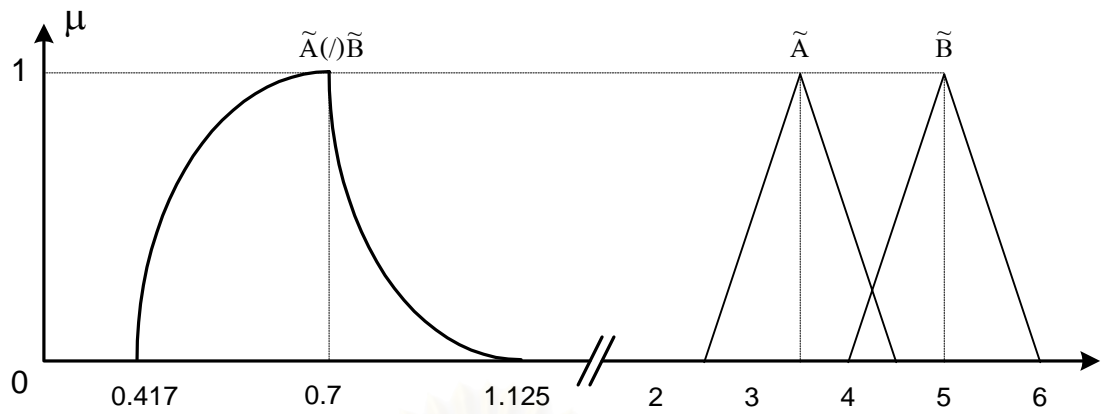
รูปที่ 3.7 แสดงผลที่ได้จากการลบ คือ  $\tilde{B}(-)\tilde{A}$  ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นตัวเลขฟัซซี่ที่แสดงถึงข้อความ "มีค่าประมาณ 1.5" โดยมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ยังคงเป็นรูปสามเหลี่ยมเช่นเดียวกับ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$



รูปที่ 3.8 การคูณระหว่างตัวเลขฟัซซี่

รูปที่ 3.8 แสดงผลที่ได้จากการคูณ คือ  $\tilde{A}(\cdot)\tilde{B}$  ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นตัวเลขฟัซซี่ที่แสดงถึงข้อความ "มีค่าประมาณ 17.5" สังเกตว่าในกรณีนี้ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ที่ได้จะเพี้ยนไปจากของ  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  ที่เป็นรูปสามเหลี่ยม





รูปที่ 3.9 การหารระหว่างตัวเลขฟัซซี่

รูปที่ 3.9 แสดงผลที่ได้จากการหาร คือ  $\tilde{A}(\cap)\tilde{B}$  ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นตัวเลขฟัซซี่ที่แสดงถึงข้อความ "มีค่าประมาณ 0.7" สังเกตว่าในกรณีนี้ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของผลลัพธ์ที่ได้จะเพี้ยนไปจากของ  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  ที่เป็นรูปสามเหลี่ยมเช่นเดียวกับกรณีของการคูณ

### 3.2.8 สมการฟัซซี่ (Fuzzy Equation)

ทฤษฎีฟัซซี่ในเรื่องของตัวเลขฟัซซี่ และการดำเนินการทางพีชคณิตบนตัวเลขฟัซซี่เป็นพื้นฐานที่สำคัญของเรื่องสมการฟัซซี่ สมการฟัซซี่คือสมการที่ตัวสัมประสิทธิ์(Coefficient) หรือตัวแปรเป็นตัวเลขฟัซซี่ และตัวสมการนั้นถูกเขียนขึ้นมาโดยใช้ตัวดำเนินการของพีชคณิตฟัซซี่ ประกอบเข้าด้วยกัน (คือ การบวก ลบ คูณ และ หาร) แม้ว่าสมการฟัซซี่จะเป็นที่รู้จักกันมานานพอสมควรแล้ว แต่ตัวทฤษฎีในเรื่องนี้ยังคงอยู่ในขั้นพัฒนาและยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เป็นสมการฟัซซี่อย่างง่าย เราสามารถอธิบายคุณสมบัติหรือลักษณะ รวมทั้งวิธีการแก้สมการนี้ได้ไม่ยากนัก เช่น สมการ  $\tilde{A} + \tilde{X} = \tilde{B}$  โดยในที่นี้  $\tilde{A}$  และ  $\tilde{B}$  คือตัวเลขฟัซซี่ และ  $\tilde{X}$  คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่เป็นตัวเลขฟัซซี่ ความยากในการแก้สมการฟัซซี่อยู่ที่ข้อเท็จจริงที่ว่า  $\tilde{X} = \tilde{B} - \tilde{A}$  ไม่ใช่คำตอบของการแก้ สมการ เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเลขฟัซซี่ที่ไม่มีอินเวอร์สการบวก

ถ้ากำหนดให้ช่วงปิด 2 ช่วง คือ  $A = [a_1, a_2]$  และ  $B = [b_1, b_2]$  ซึ่งพิจารณาได้ว่าเป็นกรณีพิเศษของตัวเลขฟัซซี่ และกำหนดให้ ตัวแปร  $X = [x_1, x_2]$  จากสมการ  $\tilde{A} + \tilde{X} = \tilde{B}$  แทนค่า  $X$  ลงไป จะได้ผลลัพธ์ตามสมการที่ 3.33 คือ

$$[a_1 + x_1, a_2 + x_2] = [b_1, b_2] \quad (3.33)$$

จากสมการนี้เราสามารถแบ่งปัญหาออกได้เป็น 2 สมการย่อยที่มีองค์ประกอบเป็นตัวเลขปกติ คือสมการ  $a_1 + x_1 = b_1$  และ  $a_2 + x_2 = b_2$  ซึ่งผลเฉลยของ 2 สมการนี้ก็คือ  $x_1 = b_1 - a_1$  และ  $x_2 = b_2 - a_2$  ตามลำดับ และเนื่องจาก  $X$  จะต้องเป็นช่วงปิด จึงจำเป็นที่ค่า  $x_1$  ที่ได้จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า  $x_2$  ( $x_1 \leq x_2$ ) นั่นคือสมการนี้จะมีผลเฉลยก็ต่อเมื่อ  $b_1 - a_1 \leq b_2 - a_2$  ซึ่งจะได้ผลเฉลยคือ  $X = [b_1 - a_1, b_2 - a_2]$  จากวิธีการนี้ โดยการใช้หลักการของ  $\alpha$ -cut เราสามารถหาผลเฉลยของสมการฟัซซีนี้สำหรับตัวเลขฟัซซีใดๆ ได้โดยการพิจารณาค่า ณ  $\alpha$ -cut หนึ่ง ( $\alpha \in [0,1]$ )

กำหนดให้  $A_\alpha = [a_1^\alpha, a_2^\alpha]$ ,  $B_\alpha = [b_1^\alpha, b_2^\alpha]$  และ  $X_\alpha = [x_1^\alpha, x_2^\alpha]$  คือ  $\alpha$ -cut ของ  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$  และ  $\tilde{X}$  ตามลำดับ เราจะได้สมการในรูปของ  $\alpha$ -cut คือ  $A_\alpha + X_\alpha = B_\alpha$  โดยสมการนี้จะมีผลเฉลยก็ต่อเมื่อ

- $b_1^\alpha - a_1^\alpha \leq b_2^\alpha - a_2^\alpha$  สำหรับ  $\forall \alpha \in [0,1]$  และ
- เมื่อ  $\alpha \leq \beta$  จะได้ว่า  $b_1^\alpha - a_1^\alpha \leq b_1^\beta - a_1^\beta \leq b_2^\beta - a_2^\beta \leq b_2^\alpha - a_2^\alpha$

เราจะได้ผลเฉลยในรูปของค่า ณ  $\alpha$ -cut หนึ่ง คือ  $X_\alpha = [b_1^\alpha - a_1^\alpha, b_2^\alpha - a_2^\alpha]$  ดังนั้นผลเฉลยที่เป็นตัวเลขฟัซซีของสมการนี้ คือ  $\tilde{X}$  จะสามารถคำนวณได้โดยการแก้สมการย่อยนี้สำหรับทุกๆค่า  $\alpha$ -cut นั่นเอง

### 3.2.9 Defuzzification

Defuzzification คือ การเปลี่ยนตัวเลขฟัซซีให้เป็นตัวเลขธรรมดาที่มีค่าๆหนึ่ง วิธีการ Defuzzification มีด้วยกันหลายวิธี ในส่วนนี้จะกล่าวถึง เพียง 3 วิธี คือ

#### 1) วิธีจุดศูนย์กลางของพื้นที่ (Center of Area Method)

วิธีนี้อาจจะเรียกว่า Center of gravity method หรือ Centroid method พื้นที่ๆอยู่ใต้กราฟฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จะถูกแบ่งเป็นพื้นที่เท่าๆกัน 2 พื้นที่ ค่าที่ได้จากการ Defuzzification คำนวณได้จากสมการ 3.34

$$d_{CA}(C) = \frac{\int_{-c}^c C(z)z dz}{\int_{-c}^c C(z) dz} \quad (3.34)$$

ในกรณีที่เป็น discrete จะคำนวณได้จากสมการ 3.35 โดยที่  $C$  ถูกนิยามบนเซตเอกภพสัมพัทธ์จำกัด (finite universal set)  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$

$$d_{CA} = \frac{\sum_{k=1}^n C(z_k)z_k}{\sum_{k=1}^n C(z_k)} \quad (3.35)$$

## 2) วิธีศูนย์กลางของค่ามากที่สุด (Center of Maximum Method)

ในวิธีนี้ค่าที่ได้จากการ Defuzzification จะถูกนิยามเหมือนกับค่าเฉลี่ยของค่าที่เล็กที่สุดและค่าที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$d_{CM}(C) = \frac{\inf M + \sup M}{2} \quad (3.36)$$

โดยที่

$$M = \{z \in [-c, c] \mid C(z) = h(C)\} \quad (3.37)$$

ในกรณีที่เป็น discrete จะคำนวณได้จากสมการ

$$d_{CM} = \frac{\min\{z_k \mid z_k \in M\} + \max\{z_k \mid z_k \in M\}}{2} \quad (3.38)$$

โดยที่

$$M = \{z_k \mid C(z) = h(C)\} \quad (3.39)$$

### 3) วิธีค่ากลางของค่ามากที่สุด (Mean of Maximum Method)

โดยทั่วไปวิธีนี้จะใช้กับกรณีที่เป็น discrete ค่าที่ได้จากการ Defuzzification เป็นค่าเฉลี่ยของทุกๆค่าในเซตธรรมดา  $M$  ที่ได้นิยามไว้ในสมการที่ 3.39 ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

$$d_{MM}(C) = \frac{\sum_{z_k \in M} z_k}{|M|} \quad (3.40)$$

ในกรณีที่ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง  $M$  จะนิยามตามสมการที่ 3.37  $d_{MM}(C)$  อาจจะนิยามโดยค่าเฉลี่ยทางตรรกะของค่ากลางของรอบทั้งหมดที่อยู่ใน  $M$  หรือในอีกวิธีหนึ่ง  $d_{MM}(C)$  อาจจะนิยามโดยค่าเฉลี่ยของค่ากลางของรอบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

ในบทนี้จะเป็นการพิจารณากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย โดยเราจะทำการวิเคราะห์ผลโดยแยกระบบออกตามระดับแรงดันไฟฟ้าได้เป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

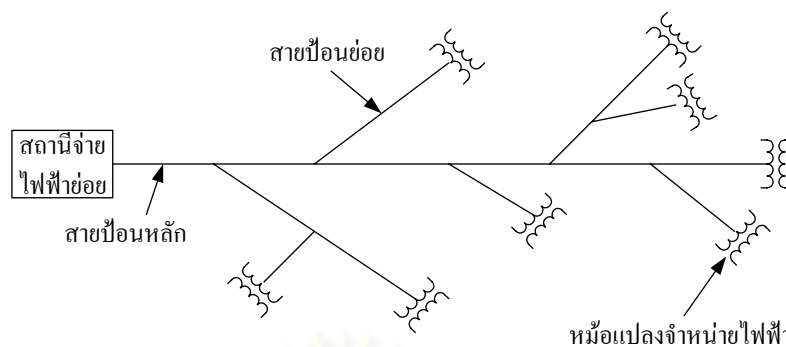
- ระบบแรงดันปานกลาง เช่น 12 , 22 , 24 และ 33 KV เป็นต้น
- ระบบแรงดันต่ำ เช่น 380 , 400 V เป็นต้น

ในการวิเคราะห์หา กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบ เราจะเน้นไปที่กำลังสูญเสียค่าจริง เนื่องจากในทางปฏิบัติ กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจริงเกิดจากการที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆในระบบ ซึ่งกำลังงานนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบเพิ่มสูงขึ้นและสูญเสียกำลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์

จากนี้จะเป็นการนำเสนอถึงวิธีการในการวิเคราะห์หา กำลังสูญเสียในแต่ละระบบ โดยในระบบแรงดันปานกลางเราจะใช้วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสในการวิเคราะห์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าตามระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ คือ กรณีที่กำลังสูญเสียเกิดน้อยที่สุด กรณีที่กำลังสูญเสียน่าจะเกิดมากที่สุด และกรณีที่กำลังสูญเสียเกิดมากที่สุดในระบบ ส่วนในระดับแรงดันต่ำเราจะใช้ทฤษฎีฟัซซีเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อแก้ปัญหาเรื่องความไม่ชัดเจนของข้อมูล และได้นำเอาแบบจำลองอย่างง่ายของระบบมาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งค่ากำลังสูญเสียที่ได้นั้นในขั้นต้นจะอยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซี และสามารถทำให้เป็นเลขจำนวนเดียวได้โดยการ Defuzzification

#### 4.1 ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง [3,7,8]

สำหรับระบบแรงดันปานกลางในที่นี้ หมายถึง ระบบที่เริ่มตั้งแต่สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยจ่ายไฟฟ้าผ่านสายป้อนแรงดันปานกลางที่ระดับแรงดัน 22 – 33 kv สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และที่ระดับแรงดัน 12 – 24 kv สำหรับการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ไปจนถึงสิ้นสุดที่หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ระบบแรงดันปานกลาง

#### 4.1.1 กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง

กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก คือ กำลังสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการใช้ไฟฟ้า และกำลังสูญเสียที่มีค่าคงที่

กำลังสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการใช้ไฟฟ้า เกิดจากการที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านองค์ประกอบทางไฟฟ้าต่างๆในระบบ โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปของกำลังสูญเสียในสาย ( $|I|^2 R$ ) ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นความร้อนทำให้อุณหภูมิขององค์ประกอบทางไฟฟ้าในระบบเพิ่มสูงขึ้น

กำลังสูญเสียที่มีค่าคงที่ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไม่เปลี่ยนแปลงค่าไปตามปริมาณการใช้ไฟฟ้า โดยจะมีค่าคงที่ไม่ว่าในระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการใช้ไฟฟ้าไปอย่างไร เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสการทำแม่เหล็ก (Magnetization current) ของอุปกรณ์ในระบบ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงจำหน่ายเท่านั้น

#### 4.1.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันปานกลาง

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส (Three phase load flow) มาใช้ในการประเมินกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นจึงควรมีข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์อย่างครบถ้วนและแม่นยำ

เมื่อพิจารณาระบบทางด้านแรงดันปานกลางเรายังสามารถทราบข้อมูลแผนภาพเส้นเคเบิลที่แสดงแนวการติดตั้งสายไฟฟ้าของระบบได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ตามปัญหาอยู่ที่ความไม่แน่นอนและไม่สมบูรณ์ของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละจุดโหลด เพราะว่าเป็นทางปฏิบัติเรายังทราบเฉพาะปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่ผ่านทางต้นสายของสายป้อนในสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ( $P, Q$ ) เท่านั้น ซึ่งข้อมูลนี้อาจได้มาจากการบันทึกค่าของระบบ Computer System Control Substation

(CSCS) ซึ่งสามารถทำการบันทึกปริมาณกระแส แรงดัน และตัวประกอบกำลังของสายป้อนไว้ทุกๆ ช่วงเวลาที่กำหนด เช่น ทุกๆ ครึ่งชั่วโมง เป็นต้น

ดังนั้น จากข้อมูลที่มีดังกล่าว เราจะสามารถนำมาใช้ในการปรับเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าเสมือน ( $P, Q$ ) ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสเพื่อหาปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้ โดยในขั้นแรก เรากำหนดให้ปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จาก CSCS โดยกำหนดให้หม้อแปลงแต่ละตัวมีค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization Factor) เท่ากัน จากนั้น จึงทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟส เพื่อหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ เมื่อทราบค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ เราจะนำค่าที่ได้ไปทำการปรับเปลี่ยนโหลดในระบบ และทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง ผลรวมของโหลดที่ทุกๆ จุดโหลดกับค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย (ข้อมูลที่ได้จาก CSCS) ดังสมการ

$$\begin{aligned} P_{Sub} &= P_{Load} + P_{Loss} \\ Q_{Sub} &= Q_{Load} + Q_{Loss} \end{aligned} \quad (4.1)$$

โดย

$P_{Sub}, Q_{Sub}$	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ได้จาก CSCS
$P_{Load}, Q_{Load}$	คือ	ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ทุกๆ จุดโหลด
$P_{Loss}, Q_{Loss}$	คือ	กำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงและกำลังไฟฟ้าสูญเสียเสมือน

จากนั้น เราจะกำหนดสมการที่ใช้สำหรับทำการปรับเปลี่ยนโหลด สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_{Load}^{k+1} &= P_{Load}^k - \lambda_p P_{err} \\ Q_{Load}^{k+1} &= Q_{Load}^k - \lambda_Q Q_{err} \end{aligned} \quad (4.2)$$

โดยที่  $\lambda_p$  และ  $\lambda_Q$  เป็นตัวประกอบอัตราเร่ง (Acceleration factors) และค่า  $P_{err}, Q_{err}$  สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} P_{err} &= P_{Slack} - P_{Sub} \\ Q_{err} &= Q_{Slack} - Q_{Sub} \end{aligned} \quad (4.3)$$

ในการกระจายโหลด ( $P, Q$ ) ของระบบ ไปที่จุดโหลดแต่ละแห่งนั้น เราสามารถทำได้โดย กำหนดให้หม้อแปลงแต่ละตัวในระบบมีค่าตัวประกอบการใช้ประโยชน์ (Utilization Factor) เท่าๆกัน จากนั้นเราจะหาอัตราส่วนระหว่างค่าโหลดรวม ( $P_{Load}, Q_{Load}$ ) ในระบบกับผลรวมของค่าพิกัดหม้อแปลงในระบบ แล้วจึงนำค่าอัตราส่วนที่ได้ไปคูณกับพิกัดหม้อแปลงที่อยู่ในจุดโหลดแต่ละแห่ง ก็จะได้โหลด ( $P, Q$ ) ที่จุดโหลดแต่ละแห่งตามต้องการ ซึ่งหลักการในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียและการปรับค่า  $P, Q$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

หลักการในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียและการปรับค่า  $P, Q$  ที่แสดงในรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายได้เป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 รับข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ เช่น แผนภาพเส้นเคี้ยวของระบบ ข้อมูลสายตัวนำและหม้อแปลงที่ใช้ในระบบ เป็นต้น จากนั้นทำการสร้างบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์และกำหนดแรงดันเริ่มต้นของแต่ละบัส โดยจะกำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 1

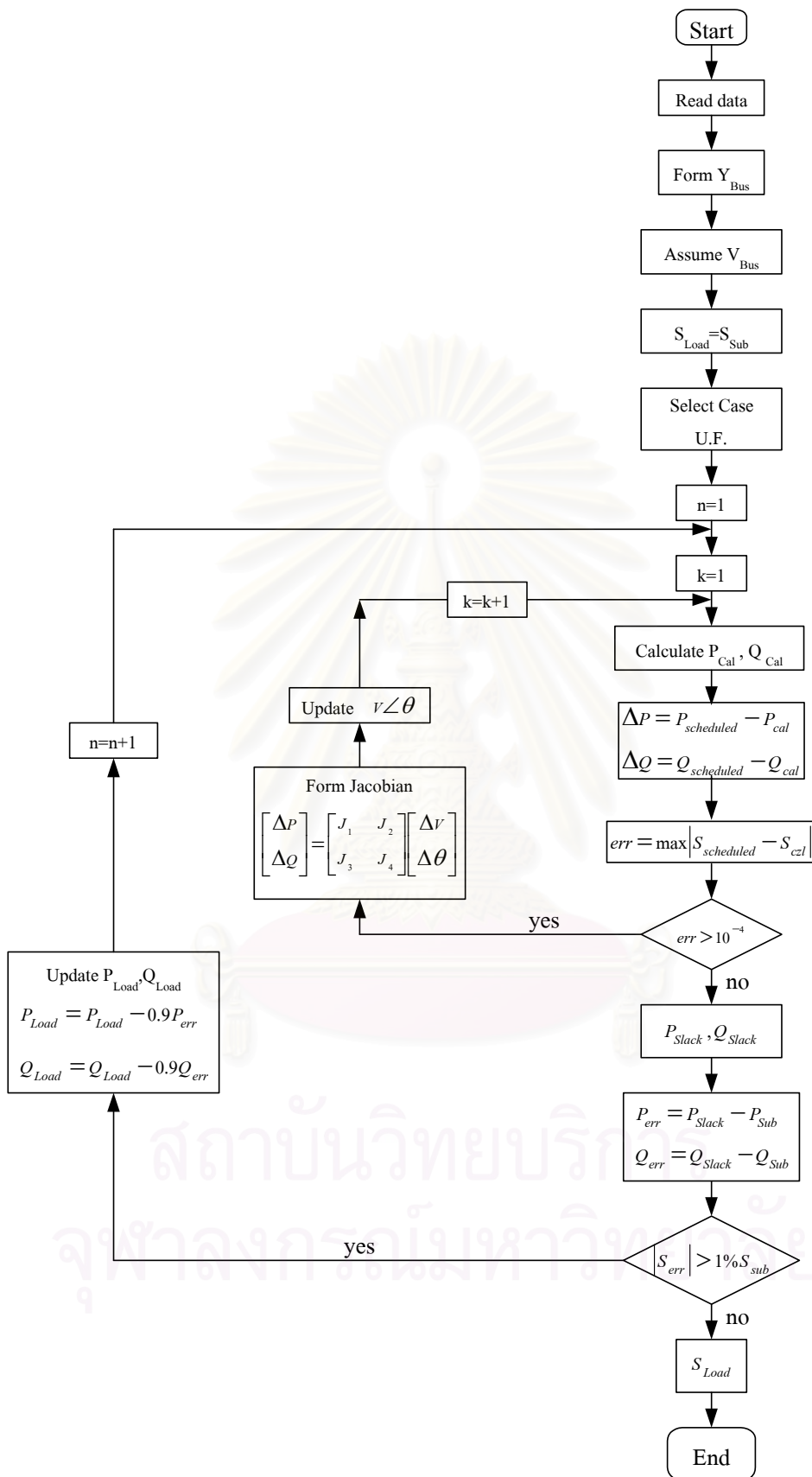
ขั้นที่ 2 กำหนดให้ปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบมีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จาก CSCS จากนั้นทำการแบ่งระบบออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามค่าสัดส่วนของปริมาณโหลดทั้งหมดต่อค่าพิกัดหม้อแปลงรวมในระบบ ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในการแบ่งระบบต่อไป

ขั้นที่ 3 หลังจากทำการแบ่งระบบออกแล้ว เราจะกระจายโหลดไปสู่จุดโหลดแต่ละจุดในระบบ แล้วจึงรันโหลดโฟลว์ตามปกติ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่ตั้งไว้ตามต้องการ

ขั้นที่ 4 เมื่อทำการรันโหลดโฟลว์เรียบร้อยแล้ว เราจะทราบค่ากำลังสูญเสียในระบบที่เกิดขึ้น นำค่ากำลังสูญเสียที่ได้นี้มาทำการปรับค่า  $P_{Load}, Q_{Load}$  ดังแสดงในสมการที่ 4.2 และ 4.3 ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนกระทั่งผลรวมของโหลดกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย ก็จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียตามที่ต้องการ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.2 แผนผังแสดงหลักการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและการปรับเปลี่ยนค่า P, Q

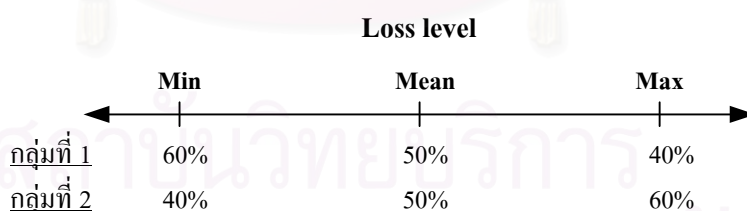
ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จาก CSCS นั้น มีเพียงกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านทางต้นสายป้อนเท่านั้น โดยเรา จะยังไม่ทราบปริมาณการใช้ไฟฟ้า ณ แต่ละจุดโหลด ดังนั้นในการคำนวณหากำลังสูญเสียทาง ไฟฟ้าในระบบจะทำการพิจารณาระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียเป็น 3 ส่วน คือ กำลัง สูญเสียต่ำสุด ค่ากลาง และค่ามากที่สุด (Min , Mean , Max) ตามลำดับ

เนื่องจากการที่พิจารณากำลังสูญเสียตามระดับความเป็นไปได้ จึงจะทำการแบ่งระบบ ออกเป็นส่วนย่อยๆ ออกตามระยะความใกล้ไกลทางไฟฟ้าของส่วนย่อยของวงจรนั้นๆ โดยในขั้น แรกทำการรวมค่าพิกัดของหม้อแปลงทุกๆเครื่องที่ต่ออยู่ในระบบก่อน จากนั้นจึงทำการแบ่งหม้อ แปลงออกเป็นกลุ่มๆตามระยะห่างจากสถานีไฟฟ้าย่อย โดยที่ให้ขนาดพิกัดของหม้อแปลงรวมใน แต่ละกลุ่มย่อยมีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

ในการพิจารณาถึงระดับความแตกต่างของกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าและการแบ่งกลุ่มของ หม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้ไฟฟ้าและการกระจายตัวของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบ ซึ่งสามารถ แบ่งได้ตามสัดส่วนของปริมาณ โหลดทั้งหมดต่อค่าพิกัดหม้อแปลงรวมในระบบ ดังแสดงได้ดังนี้

- กรณีที่ 1 ( $0.6 < U.F._{System} \leq 0.8$ )

ในกรณีที่ 1 อัตราส่วนระหว่างปริมาณโหลดทั้งหมดต่อค่าพิกัดหม้อแปลงรวมใน ระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 ในกรณีนี้จะแบ่งระบบออกเป็นสองส่วน โดยให้กลุ่มที่หนึ่งมี ความใกล้ไกลทางไฟฟ้ากับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยน้อยกว่ากลุ่มที่สอง และทำการแบ่งโหลดในแต่ละ กลุ่มตามระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียทางไฟฟ้า ทั้งนี้คิดว่าปริมาณ โหลดทั้งหมดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถทำการแบ่งโหลดในแต่ละกลุ่มได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การแบ่งโหลดที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 1

- กรณีที่ 2 ( $0.5 < U.F._{System} \leq 0.6$ )

ในกรณีที่ 2 อัตราส่วนระหว่างปริมาณโหลดทั้งหมดต่อค่าพิกัดหม้อแปลงรวมใน ระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 0.6 ในกรณีนี้จะแบ่งระบบออกเป็นสามส่วน โดยให้กลุ่มที่หนึ่งมี ความใกล้ไกลทางไฟฟ้ากับสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยน้อยกว่ากลุ่มที่สอง และกลุ่มที่สองจะมีความใกล้

ไกลทางไฟฟ้าน้อยกว่ากลุ่มที่สามตามลำดับ การแบ่งโหลดในแต่ละกลุ่มตามระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียทางไฟฟ้า สามารถทำการกระจายโหลดได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

	Loss level		
	Min	Mean	Max
กลุ่มที่ 1	50%	33%	10%
กลุ่มที่ 2	40%	33%	40%
กลุ่มที่ 3	10%	33%	50%

รูปที่ 4.4 การแบ่งโหลดที่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 2

- กรณีที่ 3 ( $U.F. System \leq 0.5$ )

ในกรณีที่ 3 อัตราส่วนระหว่างปริมาณโหลดทั้งหมดต่อค่าพิกัดหม้อแปลงรวมในระบบมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 ในกรณีนี้จะแบ่งระบบออกเป็นสี่ส่วน โดยให้กลุ่มที่หนึ่งมีความใกล้เคียงไกลทางไฟฟ้ากับสถานีจ่ายไฟฟ้าอย่างน้อยที่สุด กลุ่มที่สอง สาม และสี่ จะมีความใกล้เคียงไกลทางไฟฟ้าห่างออกไปตามลำดับ การแบ่งโหลดในแต่ละกลุ่มตามระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียทางไฟฟ้า สามารถทำการกระจายโหลดได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

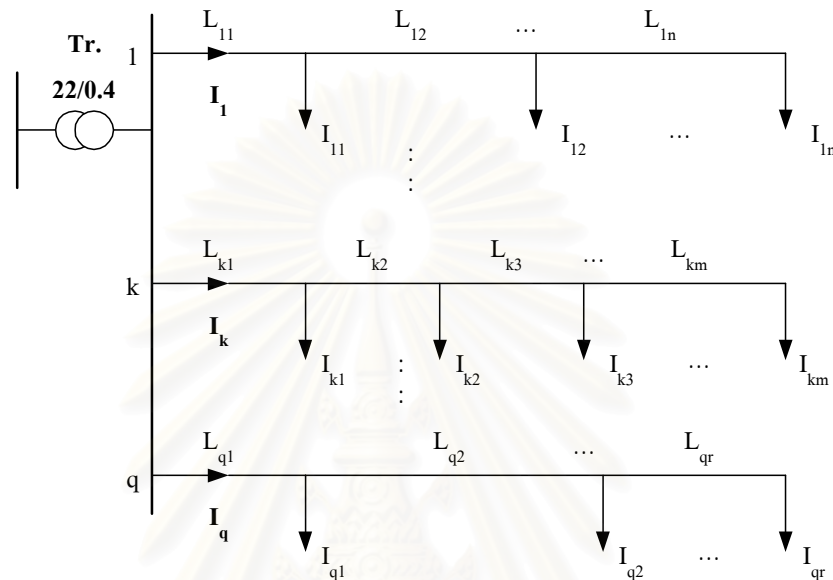
	Loss level		
	Min	Mean	Max
กลุ่มที่ 1	40%	25%	5%
กลุ่มที่ 2	40%	25%	15%
กลุ่มที่ 3	15%	25%	40%
กลุ่มที่ 4	5%	25%	40%

รูปที่ 4.5 การแบ่งโหลดที่มีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในกรณีที่ 3

จากการแบ่งโหลดตามระดับความเป็นไปได้ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น(กรณีที่ 1-3)จะทำให้ได้ผลตอบของกำลังสูญเสียในลักษณะที่มีค่าเป็นช่วงที่ครอบคลุมถึงกำลังสูญเสียที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ ซึ่งเราสามารถนำผลตอบนี้ไปใช้วิเคราะห์เพื่อหาวิธีลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบต่อไป โดยอาจนำผลตอบที่ได้นี้ไปทำการเปรียบเทียบกับกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบอื่นๆ เพื่อที่จะทำการวางแผนในการจ่ายไฟฟ้า หรือขยายระบบได้อย่างเหมาะสม

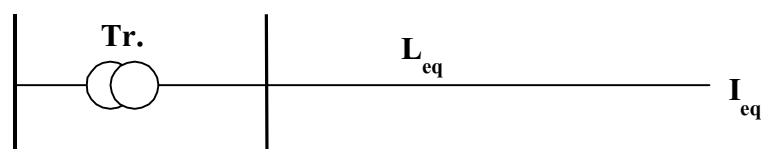
#### 4.2 ระบบแรงดันต่ำ [1,12]

ในระบบแรงดันต่ำ เราจะทำการพิจารณาโดยเริ่มตั้งแต่หลังหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าไปจนกระทั่งถึงมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 วงจรด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง

เนื่องจากถ้าใช้วิธีไหลดโพลว์ในการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นของระบบจำหน่าย ปัญหาสำคัญจะอยู่ที่จำนวนจุดไหลดที่มีอยู่เป็นจำนวนมากและข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัดของจุดไหลดในแต่ละจุด ดังนั้นเพื่อเป็นความสะดวกในการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียในด้านแรงดันต่ำ เราจะทำการแปลงแผนภาพเส้นเดียวที่แสดงวงจรไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลงจำหน่ายดังรูปที่ 4.6 ให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลอย่างง่าย ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ซึ่งผลลัพธ์ที่คำนวณได้นั้นจะมีค่าเท่าเดิม เนื่องจากเราจะกำหนดให้วงจรทั้งสองมีกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากัน



รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลง

เนื่องจากสายตัวนำทางด้านแรงดันต่ำที่ต่อจากหม้อแปลงจำหน่ายไปจนถึงมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายมีขนาดที่แตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเลือกใช้ค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาวของสายไฟฟ้าขนาด 95 mm<sup>2</sup> เป็นค่าความต้านทานพื้นฐานที่ใช้ในวงจรสมมูลทางด้านแรงดันต่ำ เนื่องจากเป็นขนาดสายที่ใช้อยู่ในระบบเป็นส่วนใหญ่ และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานพื้นฐาน ( $R_b$ ) กับความต้านทานของสายตัวนำขนาดอื่นๆ ได้ดังนี้

$$R_i = \alpha_i R_b \quad (4.4)$$

โดย

- $R_i$  คือ ความต้านทานของสายตัวนำขนาดต่างๆ ที่ต่อกับหม้อแปลง
- $R_b$  คือ ความต้านทานในสายขนาด 95 mm<sup>2</sup>
- $\alpha_i$  คือ สัมประสิทธิ์ในการแปลงความต้านทานสาย

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 กำหนดให้

$$I_{eq} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (4.5)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียทางด้านแรงดันต่ำซึ่งเกิดขึ้นหลังหม้อแปลงจำหน่าย ที่จ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวน  $n$  ราย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^n I_i^2 (R_i L_i) = \sum_{i=1}^n I_i^2 (\alpha_i R_b L_i) = \left( \sum_{i=1}^n I_i \right)^2 R_b L_{eq} \quad (4.6)$$

ความยาวสมมูล (Equivalent length) ของวงจรทางด้านแรงดันต่ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \alpha_i L_i}{I_{eq}^2} \quad (4.7)$$

ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียทางด้านแรงดันต่ำสามารถคำนวณหาได้ดังสมการ

$$Loss_{LV} = I_{eq}^2 R_b L_{eq} \quad (4.8)$$

โดย

- $L_{eq}$  คือ ความยาวสมมูลของวงจรทางด้านแรงดันต่ำ  
 $I_{eq}$  คือ กระแสโหลดสมมูล  
 $n$  คือ จำนวนของผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่หลังหม้อแปลงจำหน่าย

#### 4.2.1 กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบทางด้านแรงดันต่ำ

ระบบทางด้านแรงดันต่ำ เริ่มพิจารณาตั้งแต่หลังหม้อแปลงจำหน่ายจนถึงมิเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย ดังนั้นกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเป็นกำลังสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่านั้น

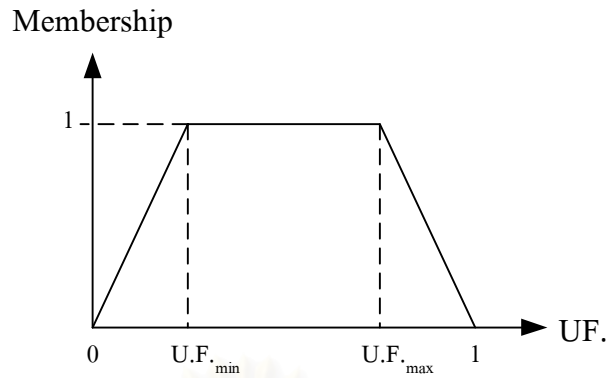
#### 4.2.2 การประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบแรงดันต่ำ

เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับแผนภาพเส้นเคเบิลที่แสดงวงจรทางด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลงแรงดันและข้อมูลแสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายมีอยู่อย่างไม่ชัดเจนและแน่นอนนัก ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาเราจึงนำวิธีพีชชีมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลต่างๆที่สามารถทราบค่าได้ ดังนี้

- อัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง (*Utilization Factor*)

$$U.F. = \frac{S_{Load}}{KVA_{Tr.}} \quad (4.9)$$

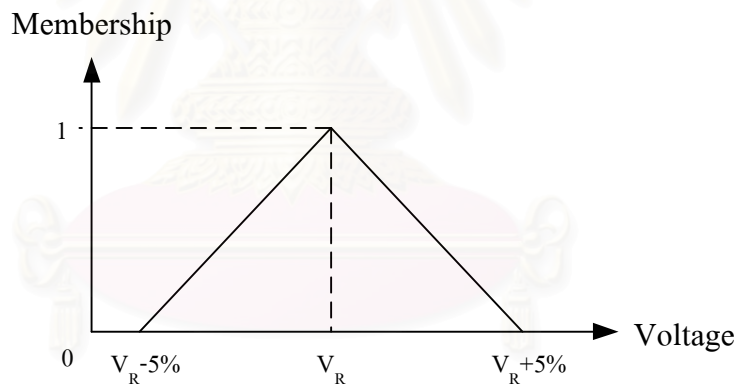
แทนค่าอัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง (*U.F.*) ให้เป็นตัวเลขพีชชี โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู แสดงได้ดังในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง ( $U.F.$ ) ที่แทนด้วยตัวเลขฟัซซี่

- แรงดัน ( $V_R \pm 5\%$ )

แทนค่าแรงดัน ( $Voltage$ ) ให้เป็นตัวเลขฟัซซี่ โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.9

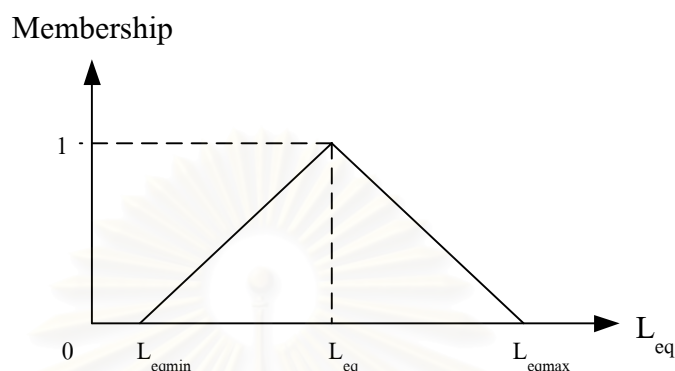


รูปที่ 4.9 ค่าแรงดัน ( $Voltage$ ) ที่แทนด้วยตัวเลขฟัซซี่

จากข้อมูลข้างต้น คือค่าอัตราส่วนโหลดต่อพิกัดหม้อแปลง ( $U.F.$ ) และค่าแรงดัน ( $V_R$ ) ทำให้สามารถทราบค่ากระแสโหลดสมมูล ( $I_{eq}$ ) ของวงจรสมมูลทางด้านแรงดันต่ำที่แสดงในรูปที่ 4.7 ได้ และค่ากระแสโหลดสมมูล ( $I_{eq}$ ) นี้จะอยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซี่เช่นกัน

- ความยาวสมมูลของวงจร ( $L_{eq}$ )

ค่าความยาวสมมูลของวงจร ( $L_{eq}$ ) สามารถแทนด้วยตัวเลขฟัซซี โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ค่าความยาวสมมูลของวงจร ( $L_{eq}$ ) ที่แทนด้วยตัวเลขฟัซซี

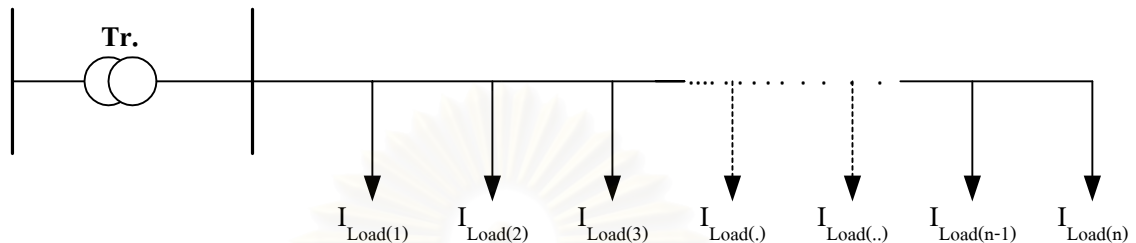
จากข้อมูลข้างต้น สามารถคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในด้านแรงดันต่ำได้ ดังสมการที่ 4.8 โดยผลตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จะแสดงอยู่ในรูปตัวเลขฟัซซีตามระดับค่าความเป็นสมาชิก และผลตอบที่ได้นี้สามารถนำไปทำ Defuzzification ก็จะได้ค่ากำลังสูญเสียที่เป็นตัวเลขค่าเดียวได้

ในทางปฏิบัติ วงจรทางด้านแรงดันต่ำเกิดปัญหาที่การคำนวณหาความยาวสมมูลของวงจร ( $L_{eq}$ ) เนื่องจากเราไม่ทราบแผนภาพเส้นเคเบิลของวงจร แต่จะมีข้อมูลที่เป็นความยาววงจรถิโลเมตรแทน ทำให้เราไม่ทราบว่าจุดโหลดแต่ละจุดอยู่ที่ตำแหน่งไหนบ้างในวงจร ดังนั้น ในที่นี้เราจะทำการสร้างแบบจำลองของแผนภาพเส้นเคเบิลอย่างง่าย(ดังแสดงในรูปที่ 4.7) เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการกระจายตัวของโหลดแต่ละแบบ และสามารถใช้เป็นกรอบอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์หากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยจะสมมติให้ความหนาแน่นของโหลดมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละวงจร ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้



- กรณีที่ 1 โหลดมีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั้งวงจร

ในกรณีนี้เราจะสมมติให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรและมีการใช้ไฟฟ้าโดยประมาณเท่าๆกันทั้งระบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอโดยประมาณ

จากรูปที่ 4.11 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสมมูล ( $L_{eq}$ ) ของวงจรอย่างง่าย ในกรณีที่ 1 ได้ดังนี้

สมมติ ให้มีโหลดกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรจำนวน  $n$  โหลด วงจรมีความยาว  $L$  เมตร โดยที่ความต้านทานสายมีค่าเป็นความต้านทานพื้นฐาน และกระแสโหลด ( $I_{(i)}$ ) =  $a$

จะได้ว่า สายในแต่ละช่วงมีความยาว  $\frac{L}{n}$  เมตร

$$\text{กระแสโหลดรวม } (I_{Total}) = an$$

$$\text{กระแสที่ไหลในแต่ละช่วง } (I_i) = an - a(i-1)$$

$$\text{LOSS}_{\text{ในแต่ละช่วง}} = (I_{\text{ในแต่ละช่วง}})^2 \times R_{\text{ในแต่ละช่วง}}$$

$$= [an - a(i-1)]^2 \frac{L}{n}$$

$$= \frac{a^2 L}{n} [n-i+1]^2$$

(4.10)

ดังนั้น

$$\text{LOSS}_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^n \text{LOSS}_{\text{ในแต่ละช่วง}}$$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{a^2 L}{n} [n-i+1]^2 \quad (4.11)$$

จากรูปวงจรอย่างง่าย (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{LOSS}_{\text{Total}} &= (I_{\text{Total}})^2 \times L_{eq} \\ &= a^2 n^2 L_{eq} \end{aligned} \quad (4.12)$$

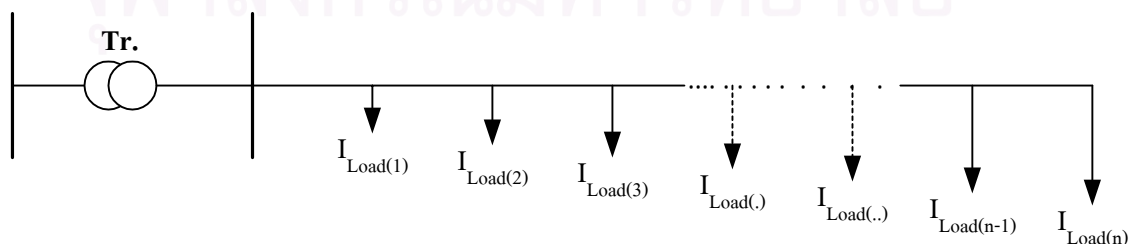
จากการที่สมการที่ 4.11 มีค่าเท่ากับสมการที่ 4.12 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสมมูล ( $L_{eq}$ ) ของวงจรที่มีโหลดกระจายอย่างสม่ำเสมอและมีปริมาณเท่า ๆ กัน ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} a^2 n^2 L_{eq} &= \sum_{i=1}^n \frac{a^2 L}{n} [n-i+1]^2 \\ \therefore L_{eq} &= L \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{2n} + \frac{1}{6n^2} \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ 4.13 เมื่อ  $n \rightarrow \infty$  จะได้ว่าค่าความยาวสมมูลมีค่าเท่ากับ  $0.333L$

- กรณีที่ 2 โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร

ในกรณีนี้เราจะสมมติให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรและโหลดที่ต้นทางจะมีค่าน้อยที่สุด ต่อจากนั้นโหลดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ห่างจากหม้อแปลง จนมาถึงค่ามากที่สุดที่โหลดปลายสาย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงวงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร

จากรูปที่ 4.12 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสมมูล ( $L_{eq}$ ) ของวงจรอย่างง่าย ในกรณีที่ 2 ได้ดังนี้

สมมติ ให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรจำนวน  $n$  โหลด วงจรมีความยาว  $L$  เมตร โดยที่ความต้านทานสายมีค่าเป็นความต้านทานพื้นฐาน และกระแสโหลด ( $I_{(i)}$ ) =  $\frac{ai}{n}$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{สายในแต่ละช่วงมีความยาว } & \frac{L}{n} \text{ เมตร} \\ \text{กระแสโหลดรวม } (I_{Total}) &= \sum_{i=1}^n I_{(i)} = \frac{a(n+1)}{2} \\ \text{กระแสที่ไหลในแต่ละช่วง } (I_l) &= I_{Total} - \sum_{i=1}^l I_{(i-1)} \\ &= \frac{a}{2} \left[ n+1 + \frac{i}{n} - \frac{i^2}{n} \right] \end{aligned}$$

หาค่าของ

$$\begin{aligned} \text{LOSS}_{\text{ในแต่ละช่วง}} &= (I_{\text{ในแต่ละช่วง}})^2 \times R_{\text{ในแต่ละช่วง}} \\ &= \frac{a^2}{4} \left[ n+1 + \frac{i}{n} - \frac{i^2}{n} \right]^2 \frac{L}{n} \\ &= \frac{a^2 L}{4n} \left[ n+1 + \frac{i}{n} - \frac{i^2}{n} \right]^2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{LOSS}_{\text{Total}} &= \sum_{i=1}^n \text{LOSS}_{\text{ในแต่ละช่วง}} \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{a^2 L}{4n} \left[ n+1 + \frac{i}{n} - \frac{i^2}{n} \right]^2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

จากรูปวงจรอย่างง่าย (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{LOSS}_{\text{Total}} &= (I_{\text{Total}})^2 \times L_{eq} \\ &= \frac{a^2 (n+1)^2}{4} L_{eq} \end{aligned} \quad (4.16)$$

จากการที่สมการที่ 4.15 มีค่าเท่ากับสมการที่ 4.16 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสมมูล ( $L_{eq}$ ) ของวงจรที่มีโหลดกระจายอย่างสม่ำเสมอและมีปริมาณเท่า ๆ กัน ได้ดังนี้

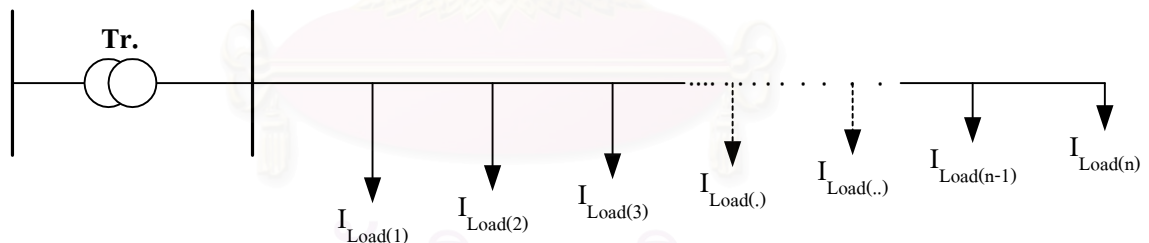
$$\frac{a^2 (n+1)^2}{4} L_{eq} = \sum_{i=1}^n \frac{a^2 L}{4n} \left[ n+1 + \frac{i}{n} - \frac{i^2}{n} \right]^2$$

$$\therefore L_{eq} = L \left[ 1 - \frac{7n^3 + 3n^2 - 8n - 2}{15n^2 (n+1)} \right] \quad (4.17)$$

จากสมการที่ 4.17 เมื่อ  $n \rightarrow \infty$  จะได้ว่าค่าความยาวสมมูลมีค่าเท่ากับ  $0.533L$

### - กรณีที่ 3 โหลดมีความหนาแน่นมากที่ต้นทาง

ในกรณีนี้เราจะสมมติให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรและโหลดที่ต้นทางจะมีค่ามากที่สุด หลังจากนั้น โหลดจะมีค่าลดลงตามระยะทางที่ห่างจากหม้อแปลง จนมีค่าน้อยที่สุดที่โหลดปลายสาย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงวงจรที่สมมติให้โหลดมีความหนาแน่นมากที่ปลายวงจร

จากรูปที่ 4.13 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสมมูล ( $L_{eq}$ ) ของวงจรอย่างง่าย ในกรณีที่ 3 ได้ดังนี้

สมมติ ให้โหลดมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอในวงจรจำนวน  $n$  โหลด วงจรมีความยาว  $L$  เมตร โดยที่ความต้านทานสายมีค่าเป็นความต้านทานพื้นฐาน และกระแสโหลด ( $I_{(i)}$ ) =  $\frac{a(n-i+1)}{n}$

จะได้ว่า สายในแต่ละช่วงมีความยาว  $\frac{L}{n}$  เมตร

$$\text{กระแสไหลรวม } (I_{Total}) = \sum_{i=1}^n I_{(i)} = \frac{a(n+1)}{2}$$

$$\begin{aligned} \text{กระแสที่ไหลในแต่ละช่วง } (I_l) &= I_{Total} - \sum_{i=1}^l I_{(i-1)} \\ &= \frac{a}{2} \left[ n+3-2i + \frac{i^2-3i+2}{n} \right] \end{aligned}$$

หาค่าของ  $\text{LOSS}_{\text{ในแต่ละช่วง}} = (I_{\text{ในแต่ละช่วง}})^2 \times R_{\text{ในแต่ละช่วง}}$

$$\begin{aligned} &= \frac{a^2}{4} \left[ n+3-2i + \frac{i^2-3i+2}{n} \right]^2 \frac{L}{n} \\ &= \frac{a^2 L}{4n} \left[ n+3-2i + \frac{i^2-3i+2}{n} \right]^2 \end{aligned} \quad (4.18)$$

ดังนั้น  $\text{LOSS}_{\text{Total}} = \sum_{i=1}^n \text{LOSS}_{\text{ในแต่ละช่วง}}$

$$= \sum_{i=1}^n \frac{a^2 L}{4n} \left[ n+3-2i + \frac{i^2-3i+2}{n} \right]^2 \quad (4.19)$$

จากรูปวงจรถ่ายง่าย (ดังแสดงในรูปที่ 4.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{LOSS}_{\text{Total}} &= (I_{\text{Total}})^2 \times L_{eq} \\ &= \frac{a^2 (n+1)^2}{4} L_{eq} \end{aligned} \quad (4.20)$$

จากการที่สมการที่ 4.19 มีค่าเท่ากับสมการที่ 4.20 เราสามารถคำนวณหาค่าความยาวสมมูล ( $L_{eq}$ ) ของวงจรที่มีโหลดกระจายอย่างสม่ำเสมอและมีปริมาณเท่า ๆ กัน ได้ดังนี้

$$\frac{a^2(n+1)^2}{4} L_{eq} = \sum_{i=1}^n \frac{a^2 L}{4n} \left[ n+3-2i + \frac{i^2-3i+2}{n} \right]^2$$

$$\therefore L_{eq} = L \left[ \frac{3n^4 + 15n^3 + 25n^2 + 15n + 2}{15n^2(n+1)^2} \right] \quad (4.21)$$

จากสมการที่ 4.21 เมื่อ  $n \rightarrow \infty$  จะได้ว่าค่าความยาวสมมูลมีค่าเท่ากับ  $0.2L$

จากค่าความยาวสมมูล ( $L_{eq}$ ) ที่คำนวณได้ เราสามารถเลือกนำไปใช้ให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในด้านแรงดันต่ำได้ (ดังแสดงในสมการที่ 4.8) โดยผลตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จะเป็นค่าที่ได้จากการจำลองแผนภาพเส้นเคเบิล และลักษณะของโหลดที่มีในระบบ

การนำแบบจำลองที่สร้างขึ้น (กรณีที่ 1 - 3) ไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียนั้น ผลตอบที่ได้อาจมีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงไปบ้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผู้นำไปใช้นั้นเลือกแบบจำลองได้เหมาะสมกับสภาพการกระจายตัวของโหลดในระบบหรือไม่ เนื่องจากค่าความยาวสมมูลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองในกรณีที่ 1 - 3 นี้ เริ่มมาจากการกำหนดการกระจายตัวของโหลดขึ้นก่อนแล้วจึงทำการคำนวณหา ซึ่งถ้าระบบที่เรานำมาทดสอบมีการกระจายตัวของโหลดที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ ผลลัพธ์ที่ได้ย่อมมีความผิดพลาดมากขึ้น

ข้อดีของการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียในระบบโดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้น คือ ทำให้สะดวกต่อการคำนวณค่าความยาวสมมูลของวงจรและง่ายต่อการวิเคราะห์ ส่วนข้อเสีย คือ แบบจำลองนี้ไม่ครอบคลุมถึงการกระจายตัวของโหลดในทางปฏิบัติ ทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นรวมทั้งการที่ในระบบจริงจะมีการใช้สายตัวนำหลายขนาด ซึ่งจะส่งผลให้กำลังสูญเสียเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นด้วยเช่นกัน

กล่าวโดยสรุปจะได้ว่า ในการประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของระบบจำหน่ายตามที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการแยกการประมาณกำลังสูญเสียออกเป็น 2 ส่วนตามระดับแรงดัน โดยในระดับแรงดันปานกลาง (22, 24 KV) ได้นำหลักการของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสามเฟสมาใช้ และผลตอบที่ได้จากการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระดับแรงดันปานกลางนี้จะมีค่าตามระดับของกำลังสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในระบบคือ ค่ากำลังสูญเสียต่ำสุด ค่ากลาง และค่ามากที่สุด (Min, Mean, Max) ตามลำดับ ส่วนในระดับแรงดันต่ำ (380, 400 V) ได้นำทฤษฎีฟัซซีมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลต่างๆที่สามารถทราบค่าได้ โดยกำลังสูญเสียที่ได้จากการประมาณนี้จะอยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซี ซึ่งสามารถทำการ Defuzzification ค่ากำลังสูญเสียเพื่อให้อยู่ในรูปของตัวเลขจำนวนเดียวได้

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

บทที่ 5 ในตอนต้นจะกล่าวถึงระบบทดสอบที่ใช้ ต่อจากนั้นจะเป็นผลการทดสอบที่ได้จากการใช้วิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 และทำการวิเคราะห์ผลกระทบของโหลดที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบ ผลการทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 ระบบตามระดับแรงดันไฟฟ้า ดังนี้

- ระบบทางด้านแรงดันปานกลาง เช่น 12 , 22 , 24 และ 33 KV เป็นต้น
- ระบบทางด้านแรงดันต่ำ เช่น 380 , 400 V เป็นต้น

สำหรับโปรแกรมที่ใช้สำหรับประมาณกำลังสูญเสียในระบบนั้น ได้ทำการพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB 5.3 ตัวอย่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้นำเสนอไว้ในภาคผนวก ก

#### 5.1 ระบบทดสอบ

สามารถแบ่งระบบทดสอบตามระดับแรงดันไฟฟ้าได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบแรงดันปานกลาง และระบบแรงดันต่ำ ซึ่งได้แสดงไว้ดังนี้

##### 5.1.1 ระบบทดสอบด้านแรงดันปานกลาง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้วงจรสายป้อนที่ 2 และ 10 ของสถานีไฟฟ้า อ.เสนา จ. พระนครศรีอยุธยา เป็นระบบทดสอบ โดยวงจรสายป้อนที่ 2 เป็นตัวอย่างของสายป้อนที่ทำการจ่ายโหลดให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าในเขตชนบท วงจรจะมีความยาวของสายป้อนมากทำให้มีการกระจายตัวของโหลดค่อนข้างมาก นอกจากนั้นยังเป็นวงจรที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไม่สูง ส่วนวงจรสายป้อนที่ 10 เป็นตัวอย่างของสายป้อนที่ทำการจ่ายโหลดให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในเขตเมือง ทำให้มีจุดโหลดค่อนข้างหนาแน่นอยู่ในบริเวณที่จำกัด

วงจรสายป้อนที่ 2 เป็นวงจรที่มีขนาดยาวมาก ดังนั้นจึงมีการตัดวงจรออกในบางส่วน ทำให้วงจรสายป้อนที่ 2 มีขนาด 50 บัส มีหม้อแปลงในระบบ 36 เครื่อง และมีจุดที่ทำการตัดวงจรออกอีก 7 จุด เนื่องจากเป็นวงจรที่จ่ายโหลดในเขตชนบท หม้อแปลงในระบบโดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบเฟสเดียว (Single Phase) การจ่ายโหลดเมื่อเทียบกับขนาดของหม้อแปลงในระบบมีค่าค่อนข้างต่ำ ค่าตัวประกอบโหลดมีค่าอยู่ในช่วง 0.6 – 0.8 ส่วนค่ากำลังจริงเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ในช่วง 1.3 – 2 MW

สำหรับลักษณะความไม่สมดุลในแต่ละเฟสของสายป้อนที่ 2 นั้น พบว่ากระแสหรือโหลดในเฟส C มีค่าสูงสุด รองลงมาคือเฟส B และเฟส A โดยโหลดในเฟส A และโหลดในเฟส B มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 75 % ของโหลดในเฟส C

วงจรสายป้อนที่ 10 มีขนาด 80 บัส มีหม้อแปลงในระบบ 63 เครื่อง โดยส่วนใหญ่เป็นหม้อแปลงแบบสามเฟส (Three Phase) สายป้อนที่ 10 เป็นวงจรที่จ่ายโหลดในเขตเมืองซึ่งมีโหลดหนาแน่น การจ่ายโหลดค่ากำลังจริงเฉลี่ยจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.5 – 3.1 MW และตัวประกอบโหลดมีค่าอยู่ในช่วง 0.79 – 0.86

สำหรับลักษณะความไม่สมดุลในแต่ละเฟสของสายป้อนที่ 10 นั้น จะเห็นว่า โหลดในแต่ละเฟสมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ส่วนค่ากำลังรีแอกทีฟในสายป้อนที่ 10 มีลักษณะที่แปรผันตามค่ากำลังจริง

### 5.1.2 ระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำ

ในด้านแรงดันต่ำใช้วงจรด้านแรงดันต่ำหลังหม้อแปลงขนาด 250 kVA ของการไฟฟ้าฯ อ.ท่าเรือ จ.พระนครศรีอยุธยา เป็นระบบทดสอบ โดยวงจรมีขนาด 108 บัส ในระบบมีมิเตอร์ผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณ 250 เครื่อง แบ่งเป็น มิเตอร์สามเฟส 2 เครื่อง และมิเตอร์เฟสเดียว 248 เครื่อง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากมิเตอร์ จะพบว่าโดยส่วนใหญ่โหลดในวงจรจะเป็นแบบที่อยู่อาศัย และได้ทำการติดตั้งมิเตอร์เพื่อดูโหลดจากไฟสาธารณะด้วย

ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของระบบทดสอบทั้ง 2 ระดับแรงดัน ได้นำแสดงไว้ในภาคผนวก ข

## 5.2 ระบบทางด้านแรงดันปานกลาง

### 5.2.1 กำลังสูญเสียในระบบทดสอบเมื่อเทียบผลการคำนวณกับโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0

ในหัวข้อนี้เราจะนำค่ากำลังสูญเสียที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมาเทียบกับกำลังสูญเสียที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ การทดสอบในขั้นต้น เราจะสมมติให้โหลดอยู่ในสถานะสมดุล กล่าวคือ โหลดในแต่ละเฟสมีค่าโดยประมาณเท่ากัน หลังจากกำหนดโหลดแล้วก็ทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียในระบบได้ ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบกับระบบทดสอบในแต่ละวงจรสายป้อนจะได้ผลดังนี้



- วงจรสายป้อนที่ 2

กำหนดให้โหลดรวมในระบบมีค่าเท่ากับ 2.1 MW และ 0.9 MVA<sub>r</sub> (มีค่าประมาณ 2.28 MVA , P.F. = 0.919) เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ

Load (MVA)	PSS/ADEPT 3.0 Total System Loss (kW)	Three Phase Load Flow		
		Pri. Loss (kW)	Copper Loss (kW)	Core Loss (kW)
2.28	18.57	16.45	0.71	8.96

- วงจรสายป้อนที่ 10

กำหนดให้โหลดรวมในระบบมีค่าเท่ากับ 3.0 MW และ 1.2 MVA<sub>r</sub> (มีค่าประมาณ 3.23 MVA , P.F. = 0.928) เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 10 ที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ

Load (MVA)	PSS/ADEPT 3.0 Total System Loss (kW)	Three Phase Load Flow		
		Pri. Loss (kW)	Copper Loss (kW)	Core Loss (kW)
3.23	26.92	11.72	14.05	30.56

จากผลการคำนวณ กำลังสูญเสียที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 จะเป็นค่าที่รวมกำลังสูญเสียจากสายป้อน (Primary Loss) และกำลังสูญเสียที่แปรตามโหลดของหม้อแปลง (Copper Loss) เท่านั้น โดยจะไม่คิดกำลังสูญเสียที่มีค่าคงที่ของหม้อแปลง (Core Loss)

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่ได้ในตารางที่ 5.1 พบว่าค่าที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ สำหรับวงจรสายป้อนที่ 2 และในวงจรสายป้อนที่ 10 จากตารางที่ 5.2 จะพบว่าค่าที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ได้จากโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0 ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์

สาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย นั้น อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของโหลดในวิธีที่นำเสนอ เนื่องจากในการคำนวณแบบสามเฟส (Three Phase Load Flow) นั้น ค่าโหลดที่ป้อนให้กับโปรแกรมจะเป็นค่ารวมระหว่างโหลดที่ใช้จริงกับกำลังสูญเสียใน

ระบบ ดังนั้นจึงทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนขึ้น เพื่อที่จะทดสอบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้ ดังนั้นจะทำการคำนวณค่ากำลังสูญเสียของระบบอีกครั้ง โดยจะกำหนดให้ค่าโหลรวมของระบบมีค่าเท่ากัน สามารถแสดงได้ดังนี้

- วงจรสายป้อนที่ 2

กำหนดให้โหลรวมในระบบมีค่าเท่ากับ 2.1 MW และ 0.9 MVA<sub>r</sub> (มีค่าประมาณ 2.28 MVA , P.F. = 0.919) เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 2 ที่ได้จากโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ โดยกำหนดให้โหลรวมในระบบมีค่าเท่ากัน

Load ( MVA )	PSS/ADEPT 3.0 Total System Loss (kW)	Three Phase Load Flow		
		Pri. Loss (kW)	Copper Loss (kW)	Core Loss (kW)
2.28	18.57	16.95	0.78	8.96

- วงจรสายป้อนที่ 10

กำหนดให้โหลรวมในระบบมีค่าเท่ากับ 3.0 MW และ 1.2 MVA<sub>r</sub> (มีค่าประมาณ 3.23 MVA , P.F. = 0.928) เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.4 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในวงจรสายป้อนที่ 10 ที่ได้จากโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 กับวิธีการที่นำเสนอ โดยกำหนดให้โหลรวมในระบบมีค่าเท่ากัน

Load ( MVA )	PSS/ADEPT 3.0 Total System Loss (kW)	Three Phase Load Flow		
		Pri. Loss (kW)	Copper Loss (kW)	Core Loss (kW)
3.23	26.92	12.22	14.65	30.56

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียที่ได้ในตารางที่ 5.3 พบว่าค่ากำลังสูญเสียมักคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับวงจรสายป้อนที่ 2 และในวงจรสายป้อนที่ 10 จากตารางที่ 5.4 จะพบว่าค่ากำลังสูญเสียมักคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากการใช้แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าในการคำนวณผลตอบที่แตกต่างกัน

## 5.2.2 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบเมื่อใช้โปรแกรม TPLF

ในหัวข้อนี้ เราจะนำข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าใน 1 วันไปทำการคำนวณเพื่อหาค่ากำลังสูญเสียในสายป้อน โดยโหลดที่นำไปใช้คำนวณใน 1 วันนั้นสามารถแยกได้เป็นวันทำงานและวันหยุด โดยจะทำการคำนวณในทุกๆ ชั่วโมง เนื่องจากข้อมูลโหลดที่มีในทางปฏิบัติจะมีเฉพาะโหลดรวมทางต้นสายของระบบ เราจึงทำการกระจายโหลดเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยจะแบ่งระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียเป็น 3 ส่วน คือ กำลังสูญเสียต่ำสุด ค่ากลาง และค่าสูงที่สุด (Min , Mean , Max) ตามลำดับ ดังนี้

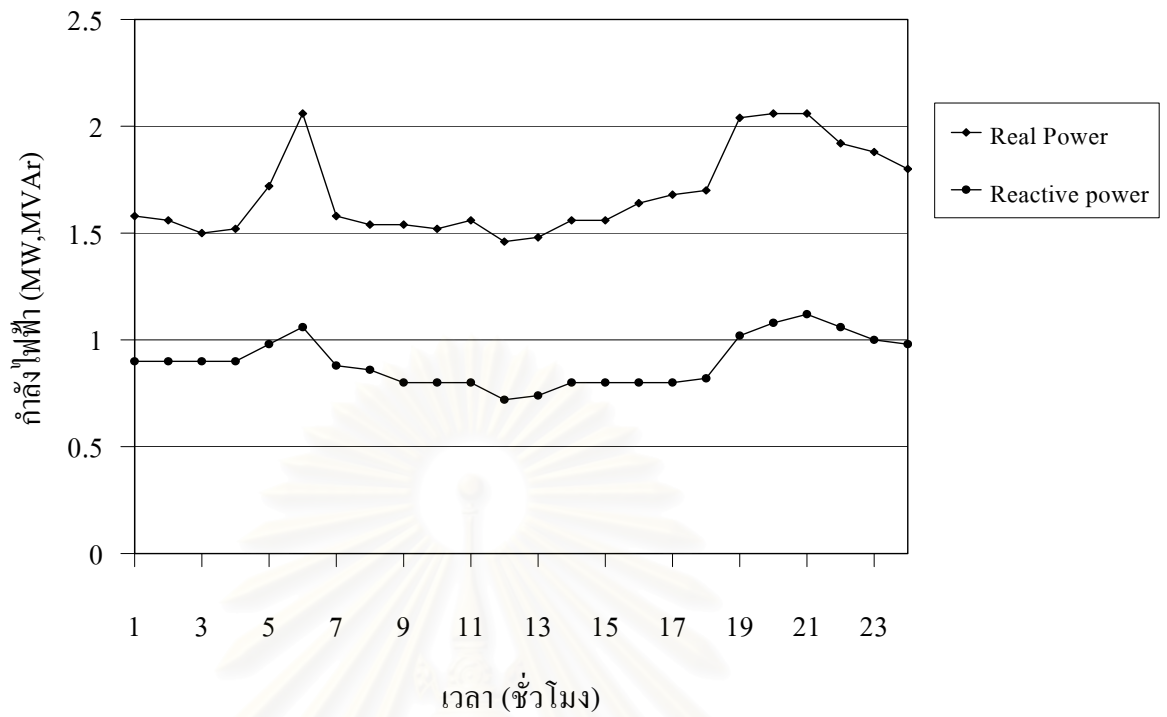
- กรณีกำลังสูญเสียต่ำสุด - กำหนดให้หม้อแปลงที่อยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยมีค่า U.F. สูง และหม้อแปลงที่อยู่ส่วนปลายของระบบมีค่า U.F. ต่ำ
- กรณีกำลังสูญเสียค่ากลาง - กำหนดให้หม้อแปลงทุกเครื่องในระบบมีค่า U.F. เท่ากัน
- กรณีกำลังสูญเสียสูงสุด - กำหนดให้หม้อแปลงที่อยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยมีค่า U.F. ต่ำ และหม้อแปลงที่อยู่ส่วนปลายของระบบมีค่า U.F. สูง

สำหรับรายละเอียดในการกระจายโหลดสู่หม้อแปลงในแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในบทที่ 4 เมื่อทดสอบกับระบบทดสอบในแต่ละวงจรสายป้อนจะได้ผลดังนี้

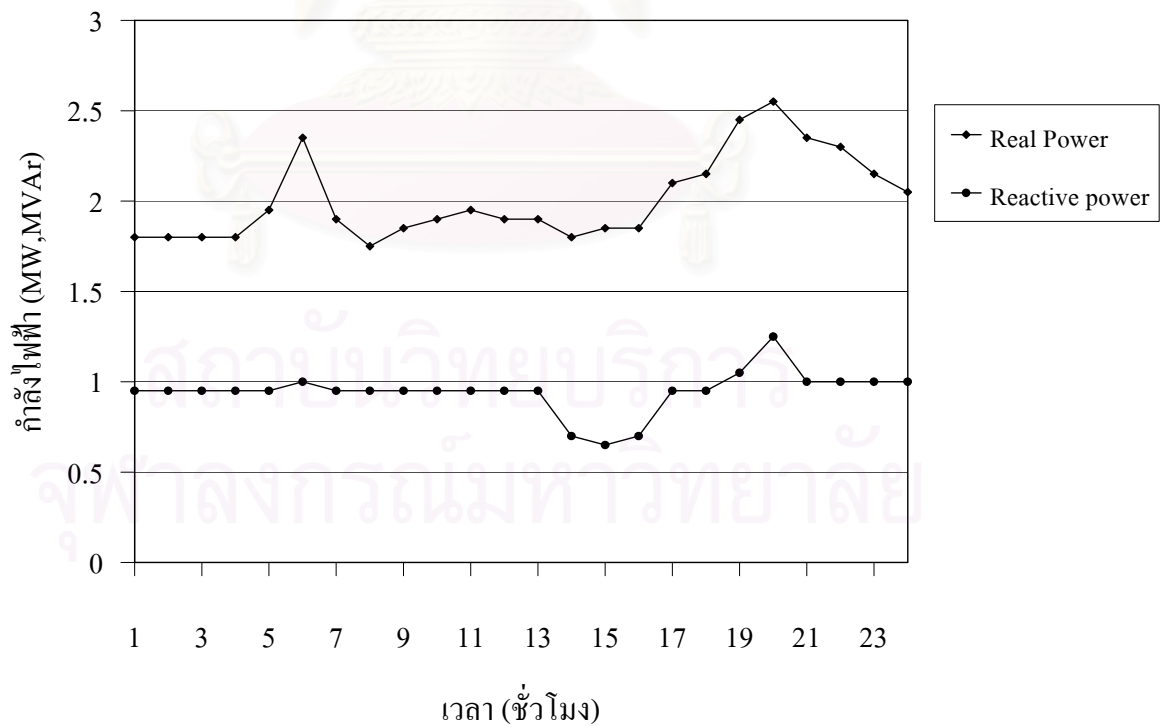
### - วงจรสายป้อนที่ 2

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการทำงานของสายป้อนที่ 2 นั้น สามารถหาได้จากการนำปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตั้งแต่วันจันทร์ – วันศุกร์มาทำการเฉลี่ยกันในแต่ละชั่วโมง ส่วนปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันหยุดของสายป้อนที่ 2 ได้จากการนำข้อมูลโหลดในวันเสาร์และวันอาทิตย์มาทำการเฉลี่ยกันในแต่ละชั่วโมง เราสามารถแสดงลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยรวมของระบบทั้งในวันทำงานและวันหยุด ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.1 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 2



รูปที่ 5.2 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 2

ในที่นี้ เราจะแสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในชั่วโมงที่ 1 ของวันทำงานในวงจรสายป้อนที่ 2 ดังนี้

ในชั่วโมงที่ 1 จะมีโหลดรวมในระบบเท่ากับ 1.82 MVA ขนาดพิกัดหม้อแปลงรวมในระบบเท่ากับ 9.83 MVA จะได้ค่า U.F. รวมของระบบเท่ากับ  $1.82/9.83 = 0.185$  เนื่องจาก U.F. รวมของระบบมีค่าน้อยกว่า 0.5 ดังนั้นเราจะแบ่งวงจรสายป้อนที่ 2 ออกเป็นวงจรย่อยๆ 4 วงจร ตามความใกล้ไกลทางไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย โดยกำหนดให้กลุ่มที่ 1 มีความใกล้ไกลทางไฟฟ้าน้อยที่สุดและกลุ่มที่ 2, 3 และ 4 จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ โดยในแต่ละวงจรเราจะทำการแบ่งให้มีค่าขนาดพิกัดหม้อแปลงรวมใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเราก็จะทำการกระจายโหลดในแต่ละกรณี

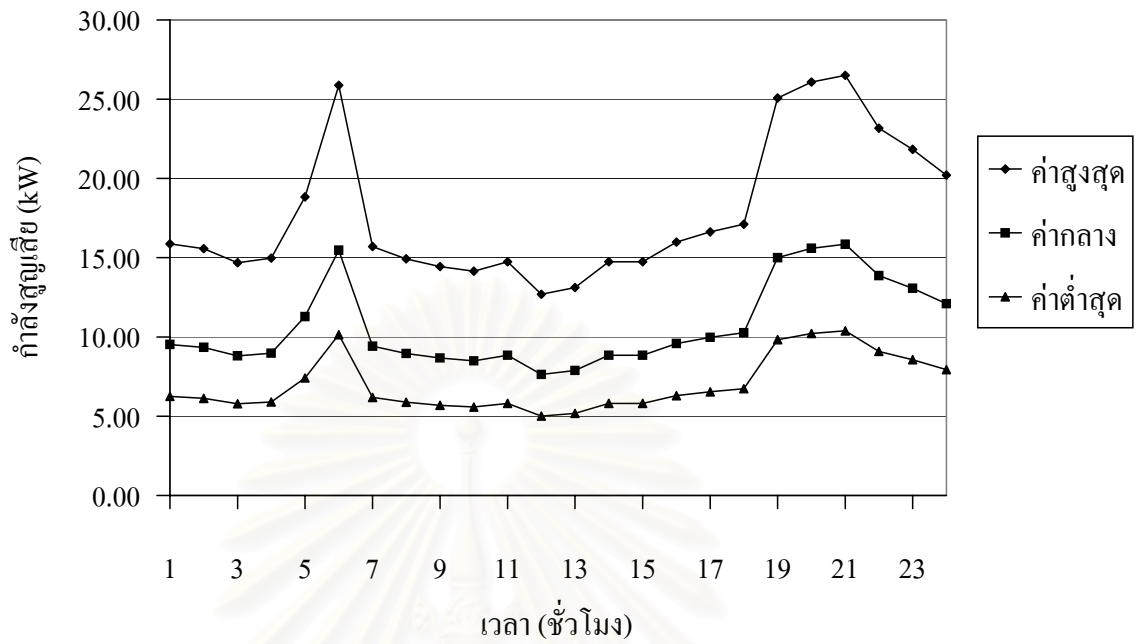
กรณีที่กำลังสูญเสียต่ำสุดเราจะทำการแบ่งโหลดเป็นสัดส่วน 0.4, 0.4, 0.15 และ 0.05 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า กลุ่มที่ 1 มีโหลด 728 kVA, กลุ่มที่ 2 มีโหลด 728 kVA, กลุ่มที่ 3 มีโหลด 273 kVA และกลุ่มที่ 4 มีโหลด 91 kVA หลังจากนั้นก็ทำการกระจายโหลดในแต่ละกลุ่มเข้าสู่หม้อแปลงในกลุ่ม โดยกำหนดให้หม้อแปลงแต่ละเครื่องในกลุ่มมีค่า U.F. ที่เท่ากัน แล้วจึงทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

กรณีที่กำลังสูญเสียค่ากลางเราจะทำการกระจายโหลดโดยกำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายทุกเครื่องในระบบมีค่า U.F. เท่ากัน ดังนั้น ค่า U.F. ของหม้อแปลงแต่ละเครื่องจะมีค่าเท่ากับ U.F. รวมของระบบ แล้วจึงทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

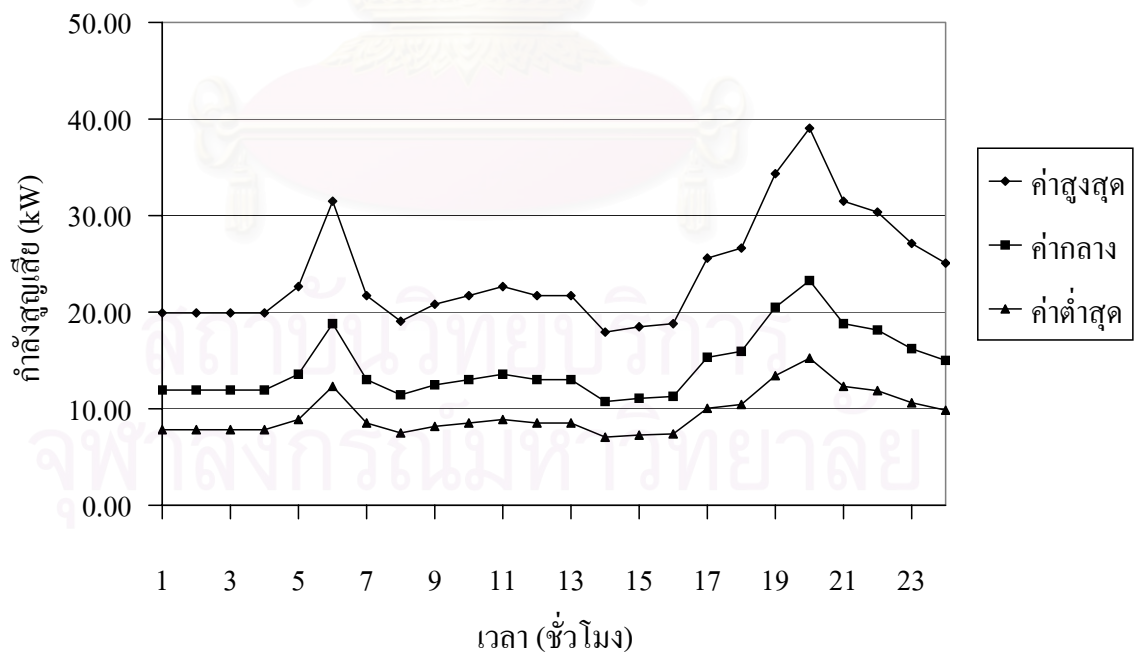
กรณีที่กำลังสูญเสียสูงสุดเราจะทำการแบ่งสัดส่วนโหลดตรงข้ามกับกรณีกำลังสูญเสียต่ำสุดคือ 0.05, 0.15, 0.4 และ 0.4 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า กลุ่มที่ 1 มีโหลด 91 kVA, กลุ่มที่ 2 มีโหลด 273 kVA, กลุ่มที่ 3 มีโหลด 728 kVA และกลุ่มที่ 4 มีโหลด 728 kVA หลังจากนั้นก็ทำเช่นเดียวกับกรณีที่กำลังสูญเสียต่ำสุดคือกระจายโหลดเข้าสู่หม้อแปลงในแต่ละกลุ่มตามที่กำหนด แล้วจึงทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

จากที่ได้กล่าวมา เราจะได้ผลการคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มี 3 ค่าสำหรับในแต่ละกรณี ส่วนในชั่วโมงที่ 2, 3, 4, ..., 24 ก็จะทำกรคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียเช่นเดียวกับในชั่วโมงที่ 1

จากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.1 และ 5.2 นำมาทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายป้อน จะได้กำลังสูญเสียดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4



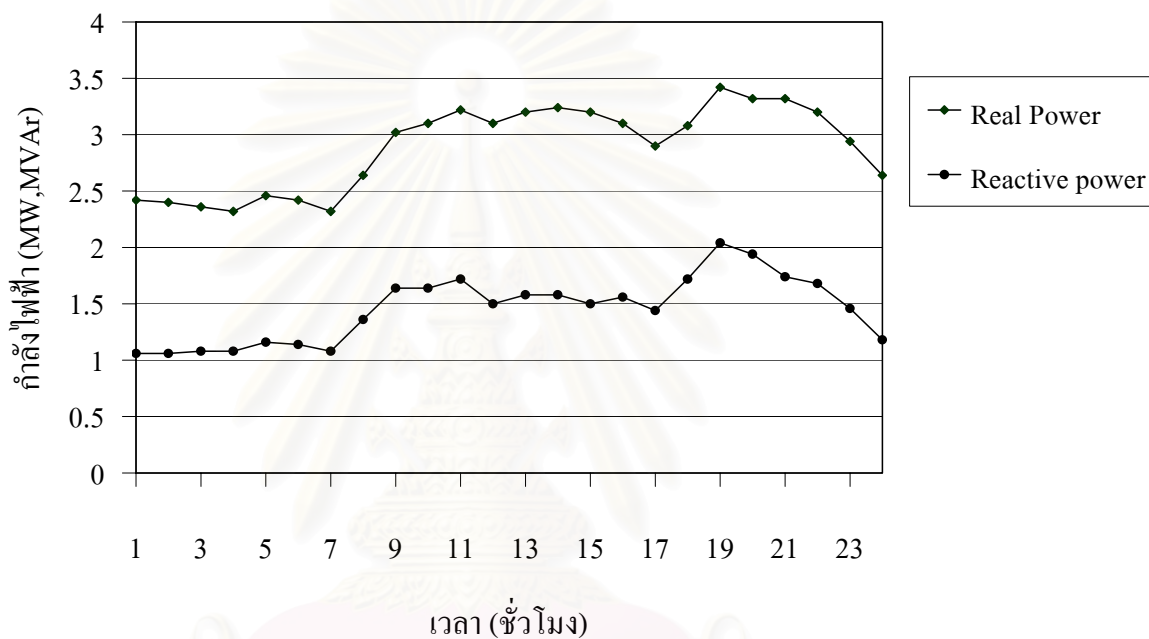
รูปที่ 5.3 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 2



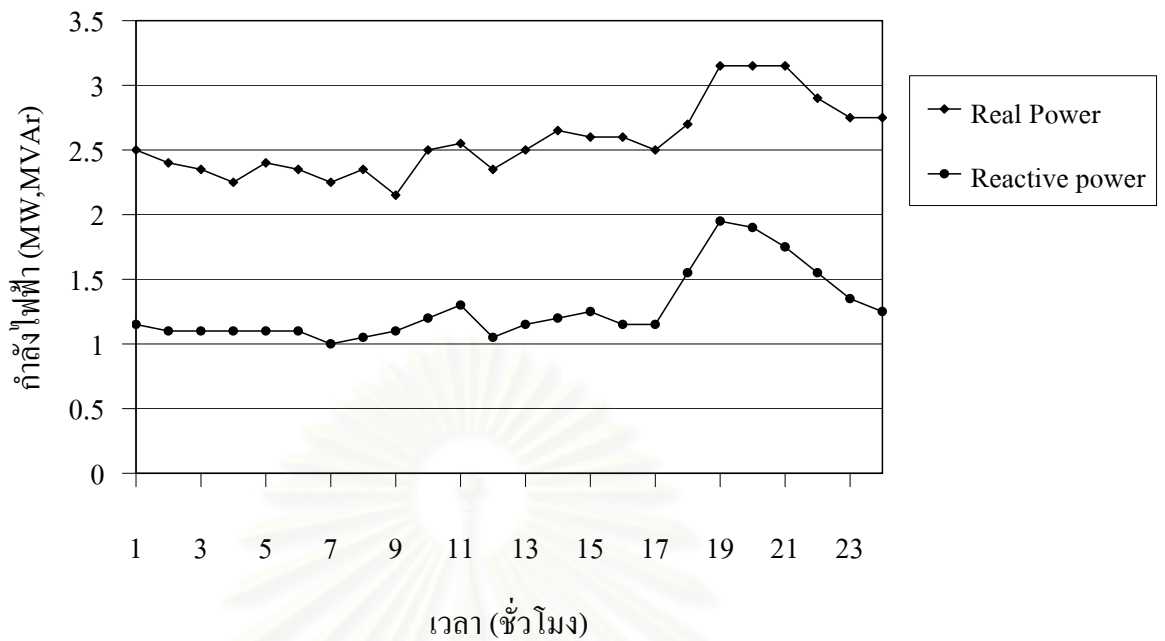
รูปที่ 5.4 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 2

- วงจรสายป้อนที่ 10

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการทำงานของสายป้อนที่ 10 สามารถหาได้จากการนำปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตั้งแต่วันจันทร์ – วันศุกร์มาทำการเฉลี่ยกันในแต่ละชั่วโมง ส่วนปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันหยุดของสายป้อนที่ 10 ได้จากการนำข้อมูลโหลดในวันเสาร์และวันอาทิตย์มาทำการเฉลี่ยกันในแต่ละชั่วโมง ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยรวมของระบบทั้งในวันทำงานและวันหยุด ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6



รูปที่ 5.5 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10



รูปที่ 5.6 แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 10

ในที่นี้ เราจะแสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในชั่วโมงที่ 1 ของวันทำงานในวงจรสายป้อนที่ 10 ดังนี้

ในชั่วโมงที่ 1 จะมีโหลดรวมในระบบเท่ากับ 2.64 MVA ขนาดพิกัดหม้อแปลงรวมในระบบเท่ากับ 10.82 MVA จะได้ค่า U.F. รวมของระบบเท่ากับ  $\frac{2.64}{10.82} = 0.244$  เนื่องจาก U.F. รวมของระบบมีค่าน้อยกว่า 0.5 ดังนั้นเราจะแบ่งวงจรสายป้อนที่ 10 ออกเป็นวงจรย่อยๆ 4 วงจรตามความใกล้ไกลทางไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย โดยกำหนดให้กลุ่มที่ 1 มีความใกล้ไกลทางไฟฟ้าน้อยที่สุดและกลุ่มที่ 2, 3 และ 4 จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ โดยในแต่ละวงจรเราจะทำการแบ่งให้มีค่าขนาดพิกัดหม้อแปลงรวมใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นเราก็จะทำการกระจายโหลดในแต่ละกรณี กรณีที่กำลังสูญเสียต่ำสุดเราจะทำการแบ่งโหลดเป็นสัดส่วน 0.4, 0.4, 0.15 และ 0.05 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า กลุ่มที่ 1 มีโหลด 1,056 kVA, กลุ่มที่ 2 มีโหลด 1,056 kVA, กลุ่มที่ 3 มีโหลด 396 kVA และกลุ่มที่ 4 มีโหลด 132 kVA หลังจากนั้นก็ทำการกระจายโหลดในแต่ละกลุ่มเข้าสู่หม้อแปลงในกลุ่ม โดยกำหนดให้หม้อแปลงแต่ละเครื่องในกลุ่มมีค่า U.F. ที่เท่ากัน แล้วจึงทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

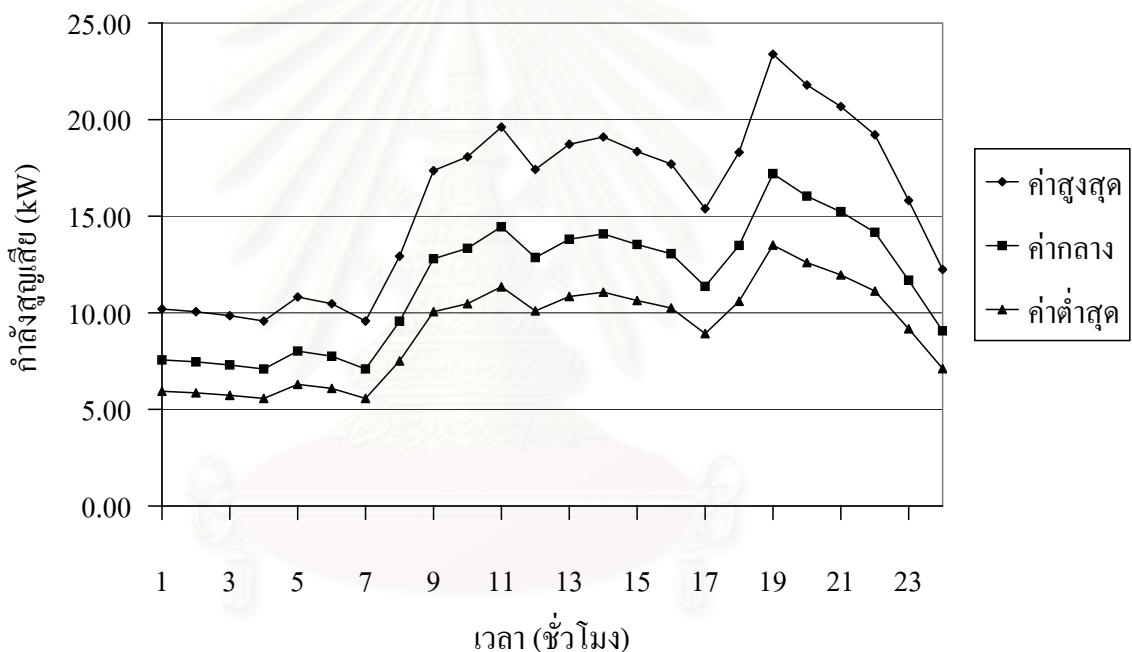
กรณีที่กำลังสูญเสียค่ากลางเราจะทำการกระจายโหลดโดยกำหนดให้หม้อแปลงจำหน่ายทุกเครื่องในระบบมีค่า U.F. เท่ากัน ดังนั้น ค่า U.F. ของหม้อแปลงแต่ละเครื่องจะมีค่าเท่ากับ U.F. รวมของระบบ แล้วจึงทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียโดยใช้วิธีที่นำเสนอ



กรณีที่กำลังสูญเสียสูงสุดเราจะทำการแบ่งสัดส่วนโหลดตรงข้ามกับกรณีกำลังสูญเสียต่ำสุดคือ 0.05, 0.15, 0.4 และ 0.4 ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า กลุ่มที่ 1 มีโหลด 132 kVA, กลุ่มที่ 2 มีโหลด 396 kVA, กลุ่มที่ 3 มีโหลด 1,056 kVA และกลุ่มที่ 4 มีโหลด 1,056 kVA หลังจากนั้นก็ทำเช่นเดียวกับกรณีที่กำลังสูญเสียต่ำสุดคือกระจายโหลดเข้าสู่หม้อแปลงในแต่ละกลุ่มตามที่กำหนดแล้วจึงทำการคำนวณหากำลังสูญเสียโดยใช้วิธีที่นำเสนอ

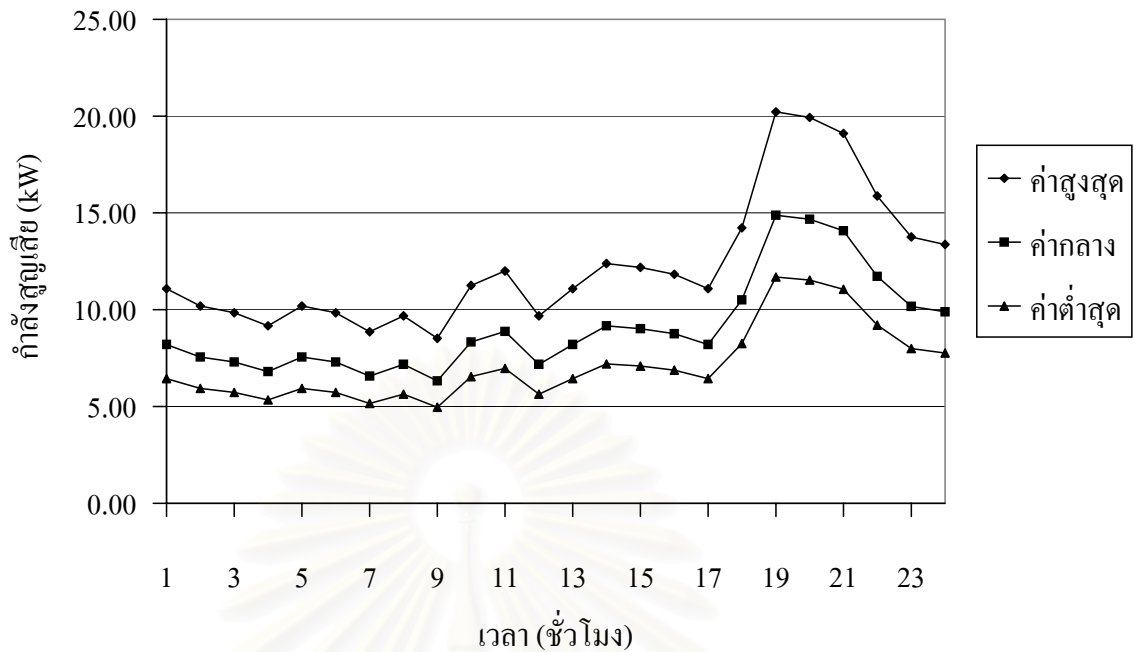
จากที่ได้กล่าวมา เราจะได้ผลการคำนวณเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มี 3 ค่าสำหรับในแต่ละกรณี ส่วนในช่วงที่ 2, 3, 4, ..., 24 ก็จะทำการคำนวณหากำลังสูญเสียเช่นเดียวกับในช่วงที่ 1

จากปริมาณกำลังไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 5.5 และ 5.6 นำมาทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายป้อน จะได้กำลังสูญเสียดังแสดงในรูปที่ 5.7 และ 5.8



รูปที่ 5.7 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 แสดงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 10

ทั้งนี้เนื่องจากเราไม่ทราบข้อมูลการกระจายตัวของโหลดในวงจรจึงทำการกระจายโหลดเพื่อให้เกิดค่ากำลังสูญเสียต่ำสุด ค่ากลาง และค่ามากที่สุด (Min , Mean , Max) ตามลำดับ เพื่อหาขอบเขตของกำลังสูญเสียที่สามารถเกิดขึ้นในระบบ จากกราฟที่แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าในแต่ละสายป้อนและกราฟแสดงกำลังสูญเสียที่สามารถเกิดขึ้นในระบบจะแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามปริมาณโหลดที่ใช้ โดยถ้าในชั่วโมงไหนที่มีปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นกำลังสูญเสียที่เกิดในชั่วโมงนั้นก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าในชั่วโมงที่มีปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าลดน้อยลงกำลังสูญเสียในชั่วโมงนั้นก็จะมีค่าน้อยลงเช่นกัน

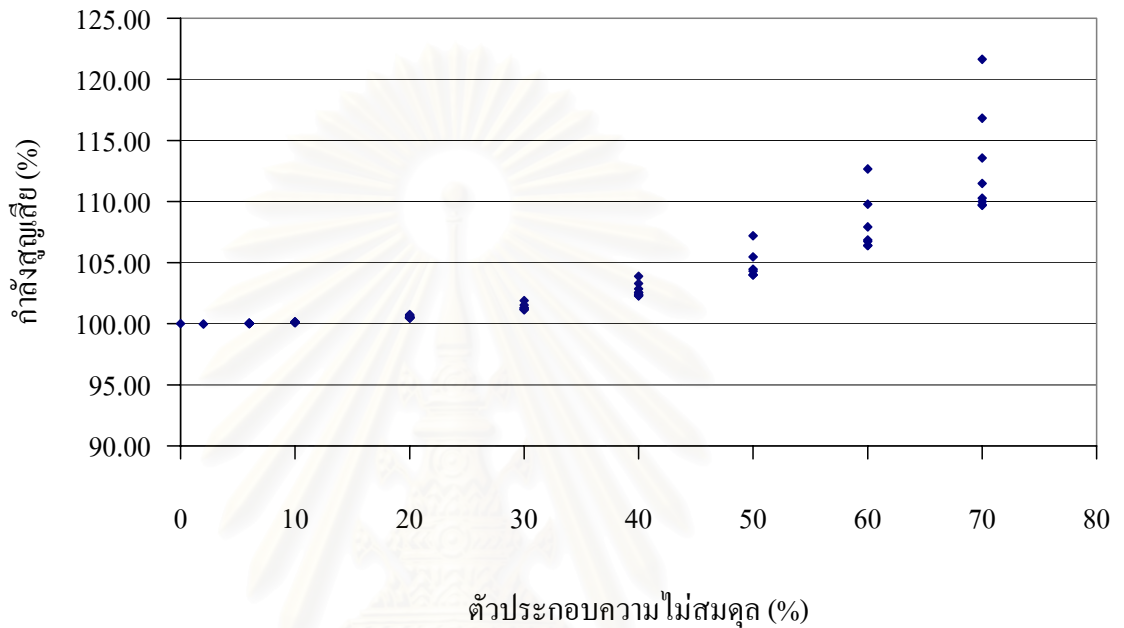
ในหัวข้อต่อจากนี้ไป จะเป็นการวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียในสายป้อน ดังนั้น กำลังสูญเสียที่จะกล่าวถึงต่อไปจากนี้จะเป็นกำลังสูญเสียในสายป้อนเท่านั้น

### 5.2.3 ผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสที่มีต่อกำลังสูญเสีย

ในหัวข้อที่ผ่านมานั้น เราทำการคำนวณหา กำลังสูญเสียโดยสมมติให้โหลดในแต่ละเฟสมีความสมดุลกัน แต่ในทางปฏิบัติแล้ว โหลดในแต่ละเฟสมักจะมีความไม่สมดุลกันอยู่ ซึ่งอาจทำให้ค่ากำลังสูญเสียที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ดังนั้นเราจึงควรที่จะพิจารณาถึงผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดที่มีต่อกำลังสูญเสียในสายป้อนด้วย

- วงจรสายป้อนที่ 2

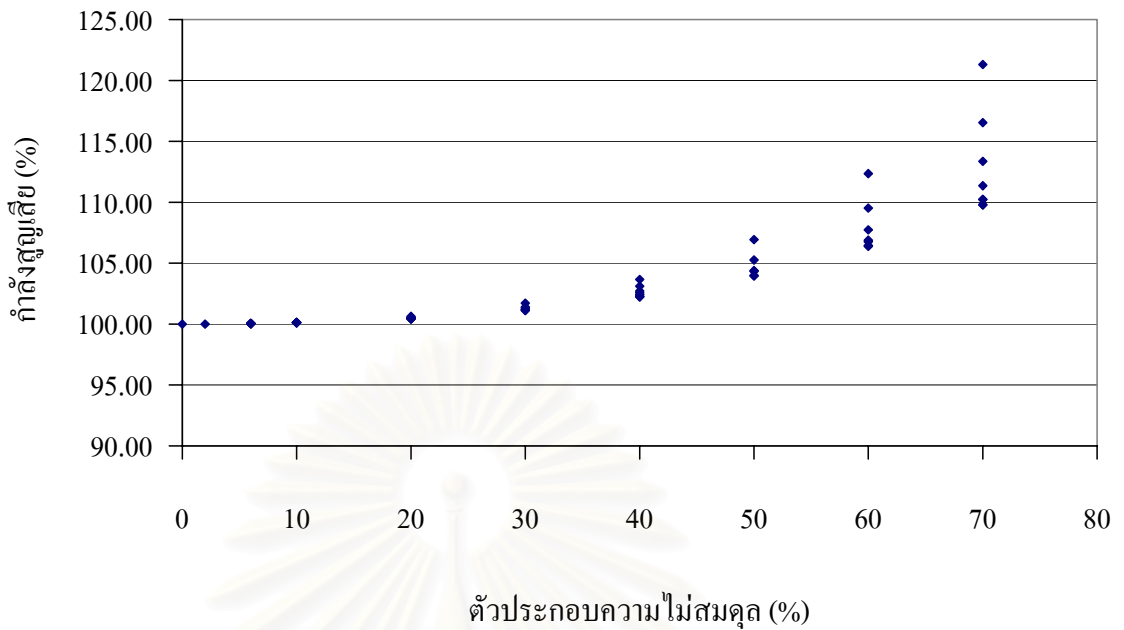
กำหนดให้โหลดรวมในระบบมีค่าเท่ากับ 2.1 MW และ 0.9 MVA<sub>r</sub> (มีค่าประมาณ 2.28 MVA , P.F. = 0.919) เมื่อทำการกระจายโหลดทำให้เกิดความไม่สมดุลในแต่ละเฟสของวงจร และวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสีย (%) กับตัวประกอบความไม่สมดุล (%) ในวงจรสายป้อนที่ 2

- วงจรสายป้อนที่ 10

กำหนดให้โหลดรวมในระบบมีค่าเท่ากับ 3.0 MW และ 1.2 MVA<sub>r</sub> (มีค่าประมาณ 3.23 MVA , P.F. = 0.928) เมื่อทำการกระจายโหลดทำให้เกิดความไม่สมดุลในแต่ละเฟสของวงจร และวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสีย (%) กับตัวประกอบความไม่สมดุล (%) ในวงจรสายป้อนที่ 10

ในที่นี้เราได้นิยามตัวประกอบความไม่สมดุลว่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าโหลดในเฟสที่มากที่สุดกับโหลดที่น้อยที่สุดในระบบหนึ่งหน่วย(per unit) และในการเปรียบเทียบกำลังสูญเสียที่เป็นเปอร์เซ็นต์นั้น เราใช้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในกรณีโหลดสมดุลเป็นตัวเปรียบเทียบ (กรณีที่ตัวประกอบความไม่สมดุลเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเกิดความไม่สมดุลในแต่ละเฟสมากขึ้น(ตัวประกอบความไม่สมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น)ก็จะทำให้กำลังสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แม้ว่าโหลดโดยรวมของระบบจะมีปริมาณเท่าเดิมก็ตาม

จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า แม้ว่าปริมาณโหลดในระบบไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันแต่หากมีความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสเกิดขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียที่เพิ่มมากขึ้น โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าแปรผันตามความไม่สมดุล ดังนั้นจึงควรจัดโหลดในแต่ละเฟสของระบบให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อช่วยลดกำลังสูญเสียที่เกิดจากความไม่สมดุลของโหลด

#### 5.2.4 ผลกระทบของตัวประกอบกำลังที่มีต่อกำลังสูญเสีย

เนื่องจากกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้เป็น  $P_{Loss} = |I|^2 R$  จากสมการกำลังสูญเสียจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นว่ากำลังสูญเสียนอกจากจะเกิดจากค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) แล้วยังขึ้นอยู่กับค่ากำลังรีแอกทีฟด้วย

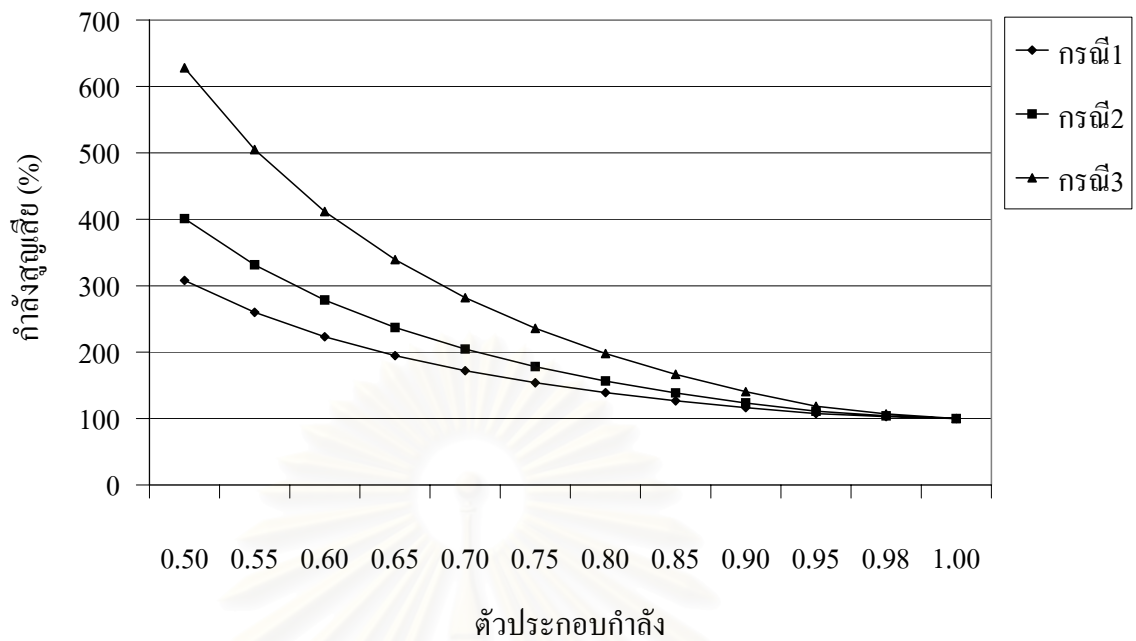
ดังนั้นค่าตัวประกอบกำลังซึ่งเป็นอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังปรากฏย่อมส่งผลต่อกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบโดยเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไปตามค่าตัวประกอบกำลัง โดยแยกเป็น 3 กรณี คือ

- กรณี1 กรณีที่ค่าตัวประกอบกำลังของหม้อแปลงที่อยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อมมีค่าต่ำ และหม้อแปลงที่อยู่ปลายระบบมีค่าตัวประกอบกำลังสูง โดยเราจะแยกระบบออกเป็นวงจรย่อยๆ 4 วงจร แล้วทำการแบ่งค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับวงจรย่อยแต่ละวงจร โดยมีสัดส่วนเป็น 0.5, 0.3, 0.15 และ 0.05 ตามลำดับความใกล้ไกลทางไฟฟ้าของวงจรย่อยแต่ละวงจร ส่วนกำลังไฟฟ้าค่าจริงจะทำการเฉลี่ยให้มีค่าเท่าๆ กันในทุกวงจรย่อย
- กรณี2 กรณีที่ค่าตัวประกอบกำลังของหม้อแปลงทุกเครื่องในระบบมีค่าเท่ากัน โดยทำการเฉลี่ยสัดส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของหม้อแปลงในระบบให้มีค่าเท่าๆ กัน
- กรณี3 กรณีที่ค่าตัวประกอบกำลังของหม้อแปลงที่อยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อมมีค่าสูง และหม้อแปลงที่อยู่ปลายระบบมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำ กรณีนี้คล้ายกับกรณี1 โดยเราจะแยกระบบออกเป็นวงจรย่อยๆ 4 วงจร แล้วทำการกระจายค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้วงจรย่อยแต่ละวงจร แต่จะให้มีส่วนเท่ากันกับ 0.05, 0.15, 0.3 และ 0.5 ตามลำดับความใกล้ไกลทางไฟฟ้าของวงจรย่อยแต่ละวงจร และกำลังไฟฟ้าค่าจริงจะทำการเฉลี่ยให้มีค่าเท่าๆ กันในทุกวงจรย่อย

ค่าตัวประกอบกำลังที่เปลี่ยนไปนี้ จะเป็นค่าตัวประกอบกำลังของโหลดในระบบ ดังนั้นที่ค่าตัวประกอบกำลังค่าเดียวกันจะมีโหลดรวมในระบบเท่ากันทั้ง 3 กรณี เมื่อทำการทดสอบจะได้ผลดังนี้

#### - วงจรสายป้อนที่ 2

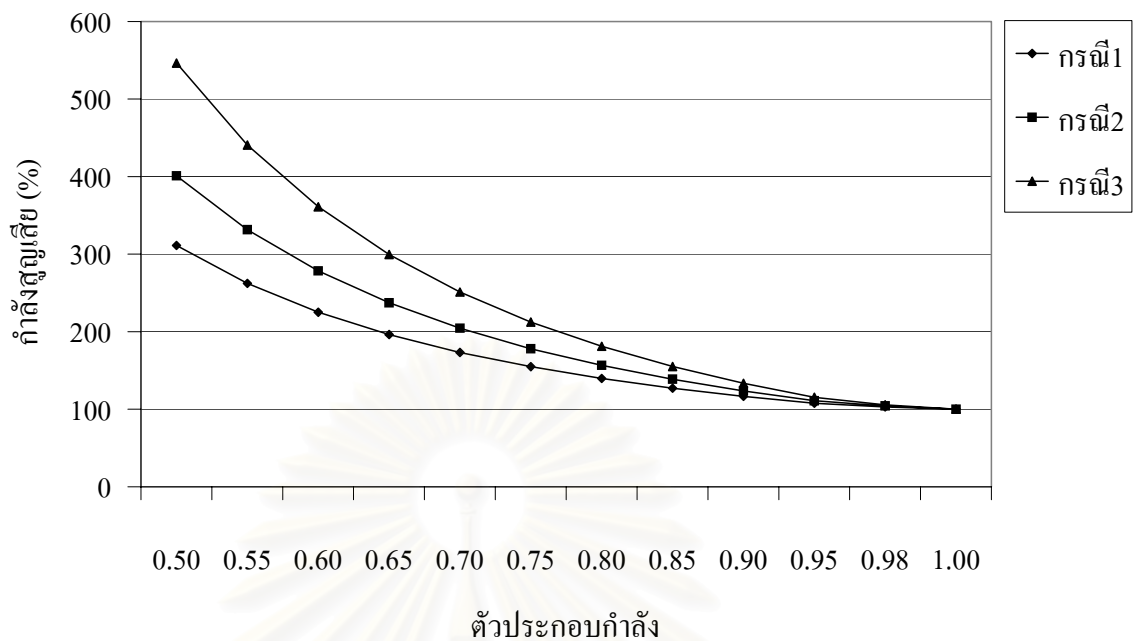
กำหนดให้โหลดรวมของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบมีค่าเท่ากับ 2.1 MW และสมมติให้โหลดสมดุลกันในแต่ละเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าของตัวประกอบกำลังตั้งแต่ 0.5 – 1.0 แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าล้งสูญเสีย (%) กับตัวประกอบกำลัง  
ในวงจรสายป้อนที่ 2

- วงจรสายป้อนที่ 10

กำหนดให้โหลดรวมของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบมีค่าเท่ากับ 3.0 MW และสมมติให้โหลดสมดุลกันในแต่ละเฟส เมื่อเปลี่ยนค่าของตัวประกอบกำลังตั้งแต่ 0.5 – 1.0 แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าค่าล้งสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังสูญเสีย (%) กับตัวประกอบกำลัง  
ในวงจรสายป้อนที่ 10

ค่าพลังสูญเสียที่เราเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์นั้น จะใช้ค่าค่าพลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีค่ากำลังไฟรีแอกทีฟเท่ากับ 0 เป็นตัวเปรียบเทียบ (กรณีที่ตัวประกอบกำลังมีค่าเท่ากับ 1.00) ซึ่งจากผลการทดสอบจะพบว่า เมื่อตัวประกอบกำลังมีค่ามากขึ้นค่าพลังสูญเสียก็จะมีค่าลดลง โดยกล่าวได้ว่าค่าพลังสูญเสียจะแปรผกผันกับค่าตัวประกอบกำลัง

การที่ค่าพลังสูญเสียมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าตัวประกอบกำลังลดลงนั้น เนื่องจากเรากำหนดให้ค่ากำลังจริงมีค่าคงที่ ดังนั้นค่ากำลังรีแอกทีฟจะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำ จะทำให้เกิดกระแสไหลในสายส่งมากขึ้นจึงทำให้ค่าพลังสูญเสียมีค่ามาก แต่เมื่อค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้นกำลังรีแอกทีฟก็จะมีค่าลดลง กระแสที่ไหลในสายส่งก็จะมีค่าลดลงด้วย ทำให้ค่าพลังสูญเสียมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.11 และ 5.12 จะพบว่าที่ค่าตัวประกอบกำลังเดียวกัน เมื่อมีการกระจายตัวของตัวประกอบกำลังในระบบที่แตกต่างกันก็ทำให้ค่าพลังสูญเสียที่ได้มีค่าเปลี่ยนไป ดังที่แสดงในแต่ละกรณี โดยในกรณีที่ 1 จะมีค่าพลังสูญเสียน้อยกว่ากรณีที่ 2 และ 3 เนื่องจากในกรณีที่ 1 เมื่อเรากระจายค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าน้อยๆ ในหม้อแปลงที่อยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้า แสดงว่าค่ากำลังรีแอกทีฟโดยส่วนใหญ่จะอยู่ที่ต้นทางหรืออาจกล่าวได้ว่าไหลคอยู่ที่ต้นสายมาก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลมากอยู่ที่ต้นทาง ทำให้ค่าพลังสูญเสียน้อยกว่าในกรณีที่ 2 และ 3 ที่เรา

กำหนดให้กำลังรีแอกทีฟกระจายตัวสม่ำเสมอ และกำลังรีแอกทีฟโดยส่วนใหญ่ไปอยู่ที่ปลายระบบตามลำดับ

จากผลการทดสอบจะพบว่า ค่าตัวประกอบกำลังจะมีผลต่อกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งและหม้อแปลง ดังนั้น จึงควรรักษาค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่ามากไว้ เพื่อช่วยลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

### 5.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบโหลด

ในการหาค่าพลังงานสูญเสีย เราจำเป็นต้องทำการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในแต่ละช่วงเวลา เพื่อนำมาคำนวณเป็นค่าพลังงานสูญเสีย โดยการหาค่าพลังงานสูญเสียใน 1 วันนั้นเราต้องทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (TPLF) สำหรับโหลดทุกๆ ชั่วโมง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการคำนวณและจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก อีกทั้งหากเป็นการประเมินค่ากำลังสูญเสียในอนาคต การประมาณโหลดให้แม่นยำนั้นสามารถทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการประเมินค่ากำลังสูญเสียโดยอาศัยดัชนีประเภทอื่น

จากหลักความจริงโดยทั่วไปที่ว่าเมื่อโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังสูญเสียในระบบก็ย่อมมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสียได้ดังแสดงในภาคผนวก ก [13] ดังนั้นหากเราทราบค่าตัวประกอบโหลดแล้วก็จะสามารถประมาณหาค่าพลังงานสูญเสียตลอดช่วงเวลาที่พิจารณาได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

ในการหาความสัมพันธ์ของตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสียนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้ Load Duration Curve ที่แตกต่างกันเป็นจำนวนมาก เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบโหลดค่าต่างๆ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการสมมุติ Load Duration Curve ขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยให้ตัวประกอบโหลดมีค่าที่แตกต่างกันโดยการนำ Load Duration Curve ของผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละประเภทมาทำการรวมกันให้เกิดเป็น Load Duration Curve ขึ้น

การสร้าง Load Duration Curve ขึ้นเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบโหลดตามที่กำหนดนั้น เราจะอาศัยค่าโหลดจากผู้ใช้ไฟฟ้า 6 ประเภท ตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าซึ่งยกเว้นผู้ใช้ประเภทสูบน้ำเพื่อการเกษตร มาทำการรวมแบบถ่วงน้ำหนัก โดยตัวคูณที่นำมาใช้ในการถ่วงน้ำหนักทั้ง 6 ตัวนั้นจะเป็นค่าที่ได้จากการสุ่มซึ่งมีค่าได้ตั้งแต่ 0 – 1 ดังนั้นค่าโหลดรวมที่ได้ในแต่ละครั้งจะมีรูปร่างที่แตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับผลการสุ่มในครั้งนั้น ๆ

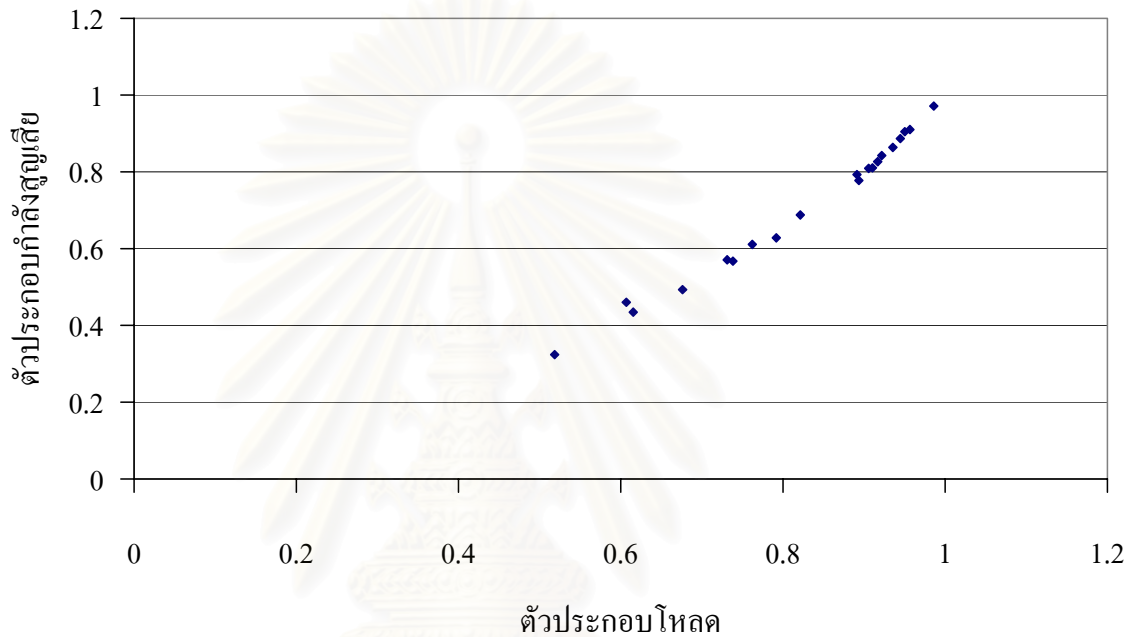
สำหรับข้อมูลโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้ง 6 ประเภทนั้นนำมาจากรายงานลักษณะการใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยประจำปี พ.ศ. 2539 ซึ่งจัดทำโดยสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลการประมาณการใช้ไฟของผู้ใช้ในเขตภาคกลางที่เป็นลูกค้าของ กฟภ.

จากค่าโหลดรวมที่ได้เราจะปรับโหลดเพื่อให้ได้ค่าโหลดสูงสุดตามที่ต้องการ ต่อจากนั้นนำโหลดที่ได้มาคำนวณหาค่าตัวประกอบโหลด แล้วจึงปรับค่าโหลด ณ เวลาต่างๆ เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบโหลดตามต้องการ โดยรายละเอียดของการปรับโหลดได้นำมาแสดงไว้ในภาคผนวก ง



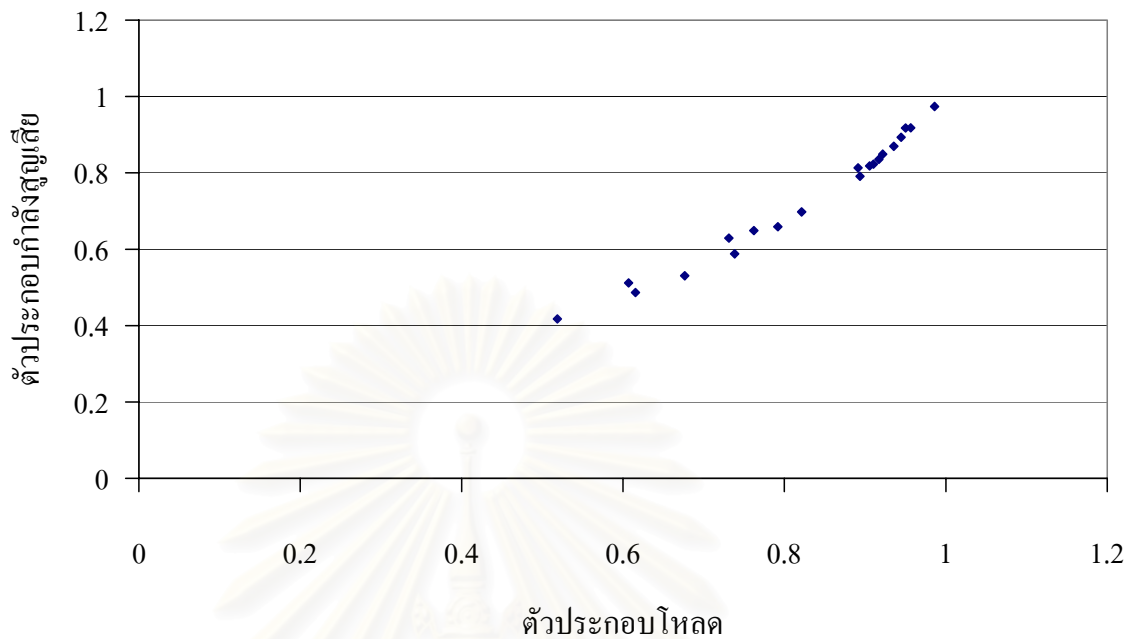
เมื่อได้ Load Duration Curve ที่มีตัวประกอบโหลดตามที่ต้องการแล้ว เราจะนำผลที่ได้ไปคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อหาค่ากำลังสูญเสีย หลังจากนั้นนำค่าตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสียมาเขียนกราฟ แสดงได้ดังนี้

- วงจรสายป้อนที่ 2



รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสีย  
ในวงจรสายป้อนที่ 2

- วงจรสายป้อนที่ 10



รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสีย  
ในวงจรสายป้อนที่ 10

โดยทั่วไปเราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสียได้ด้วยสมการกำลังสอง สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_{LS} = aF_{LD} + bF_{LD}^2 \quad (5.1)$$

โดยที่  $F_{LS}$  คือ ตัวประกอบกำลังสูญเสีย

$F_{LD}$  คือ ตัวประกอบโหลด

โดยที่  $a, b > 0$  และ  $a + b = 1$  ซึ่งจากการศึกษาของ Buller และ Woodrow [14] พบว่าในระบบจำหน่ายโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมจะอยู่ประมาณ  $a = 0.3$ ,  $b = 0.7$  อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบทดสอบนั้นอาจจะมีค่าที่แตกต่างออกไป

จากผลการทดสอบ เมื่อทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลดและตัวประกอบกำลังสูญเสีย โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

- วงจรสายป้อนที่ 2

$$LS = 0.90LF^2 + 0.10LF \quad (5.2)$$

- วงจรสายป้อนที่ 10

$$LS = 0.71LF^2 + 0.29LF \quad (5.3)$$

จากความสัมพันธ์ที่ได้ในสมการที่ 5.2 และ 5.3 จะเห็นได้ว่า ในวงจรสายป้อนที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับสมการที่ 5.1 ซึ่งแสดงให้เห็นในขั้นต้นว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถที่จะนำมาใช้ในการประมาณหาค่าพลังงานสูญเสียในระบบได้

แต่สำหรับวงจรสายป้อนที่ 2 นั้น จะพบว่าในสมการที่ 5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้นั้น มีค่าแตกต่างจากสมการที่ 5.1 มาก ซึ่งความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุเนื่องจากในวงจรสายป้อนที่ 2 มีหม้อแปลงหรือโหลดหนึ่งเฟสเป็นจำนวนมาก สมการที่ได้จึงมีค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างออกไป

รายละเอียดของข้อมูลดิบต่างๆ ที่นำมาเขียนกราฟตั้งแต่หัวข้อที่ 5.2.2 – 5.2.5 ได้นำเสนอไว้ใน ภาคผนวก จ

## 5.3 ระบบทางด้านแรงดันต่ำ

### 5.3.1 กำลังสูญเสียในระบบทดสอบเมื่อเทียบผลการคำนวณกับโปรแกรม PSS\ADEPT 3.0

ระบบที่ใช้ทดสอบมีหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าที่ต้นทางขนาด 250 kVA ในการวิเคราะห์เรา จะกำหนดให้โหลดรวมของระบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 171.60 kVA (U.F. = 0.6864 ) โดยสมมติให้ โหลดทุกจุดมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ซึ่งในการทดสอบนี้เราจำเป็นที่จะต้อง มีข้อมูล แผนภาพเส้นเคี้ยวของวงจร และข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับจุดโหลดที่มีอยู่ในระบบ เมื่อทำการคำนวณหา กำลังสูญเสีย ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำที่ได้จากโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 กับวิธีการ โหลดโพล์แบบสามเฟส

Load ( kVA )	PSS/ADEPT 3.0		Three Phase Load Flow	
	Real Power Loss (kW)	Reactive Power Loss (kvar)	Real Power Loss (kW)	Reactive Power Loss (kvar)
171.60	19.23	15.28	19.23	15.28

จากผลการคำนวณ พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบทดสอบที่ได้จากโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณโหลดโพล์สามเฟส แต่การคำนวณเช่นนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลจำนวนมาก ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้อย่างไรก็ตามหากเราสามารถรู้ค่าข้อมูลเหล่านี้ได้อย่างชัดเจนเราจะได้ผลตอบดังแสดง ซึ่งในที่นี้จะใช้เป็นค่าอ้างอิงกับกรณีที่คำนวณด้วยวิธีพีชชี ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

### 5.3.2 กำลังสูญเสียของการกระจายโหลดในแต่ละกรณีที่คำนวณด้วยวิธีพีชชี

ในหัวข้อนี้ เราจะทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบด้วยค่าความยาวสมมุทธ์ของวงจร โดยสมมติให้ระบบทดสอบมีการกระจายตัวของโหลดเป็นไปตามกรณีต่าง ๆ และใช้ข้อมูลที่สามารถหาได้ในทางปฏิบัติ (ขนาดหม้อแปลง, U.F., ผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ในระบบ, ความยาวโดยประมาณของวงจร และการกระจายตัวของโหลดอย่างคร่าวๆ) มาใช้ในการคำนวณ การกระจายตัวของโหลดตามกรณีต่าง ๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้

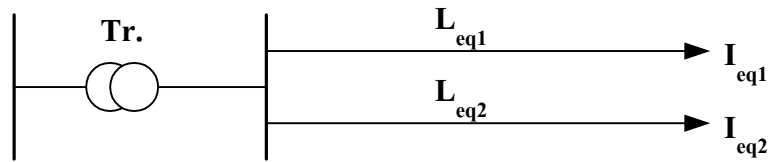
- กรณี 1 โหลดมีความหนาแน่นสม่ำเสมอทั้งวงจร
- กรณี 2 โหลดมีความหนาแน่นมากที่ส่วนปลายของวงจร
- กรณี 3 โหลดมีความหนาแน่นมากที่ต้นระบบ

ซึ่งในแต่ละกรณี ค่าความยาวสมมุทธ์ของวงจร ( $L_{eq}$ ) ที่ใช้ก็จะมีค่าที่แตกต่างกันไปดังแสดงในบทที่ 4 ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียโดยวิธีนี้เราจะทำการวิเคราะห์และใช้สมมติฐานตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดให้โหลดในแต่ละเฟสมีความสมดุลกัน และโหลดรวมในระบบมีค่าเท่ากับ 171.60 kVA (ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8)

ขั้นที่ 2 กำหนดให้ค่าความต้านทานพื้นฐานที่ใช้ในวงจรเป็นความต้านทานของสายขนาด 95 mm<sup>2</sup>

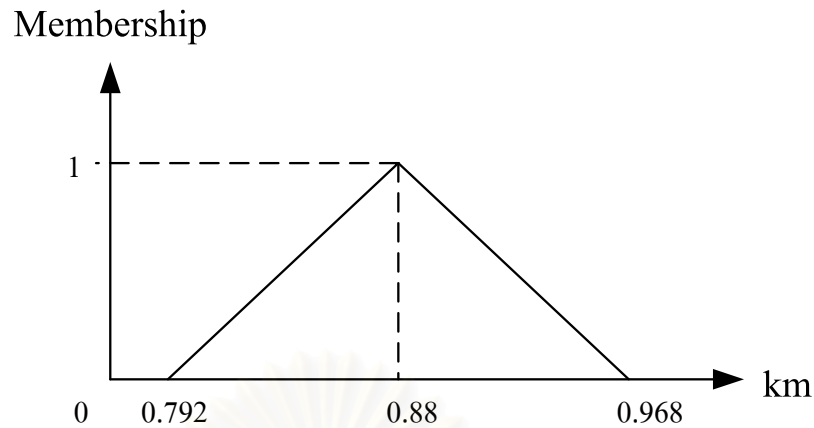
ขั้นที่ 3 เนื่องจากวงจรในด้านแรงดันต่ำโดยทั่วไป วงจรจะเป็นแบบเรเดียลและสายไฟจะเดินแยกออกเป็นสองเส้นทางหลัก ดังนั้นสามารถจำลองระบบได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 วงจรจำลองในด้านแรงดันต่ำ

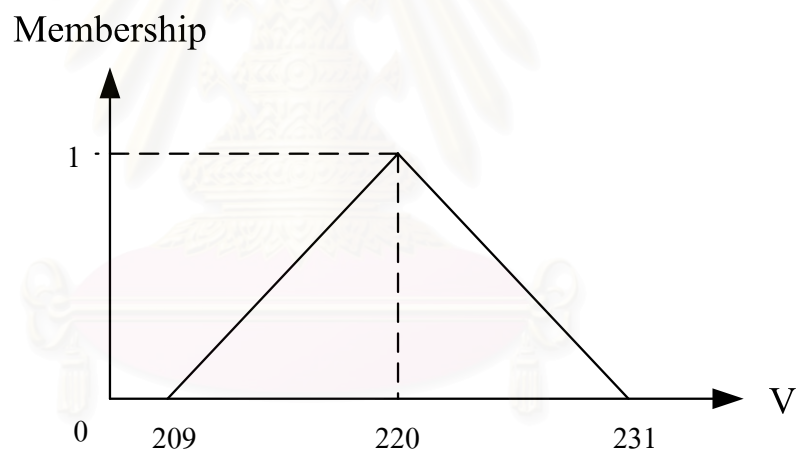
การใช้งานตัวโปรแกรมเราจำเป็นต้องใส่ค่าตัวแปรอินพุตต่างๆ ดังนี้

- ค่า  $U.F.$  เป็นตัวแปรที่นำมาใช้สำหรับคำนวณโหลดในหม้อแปลง ซึ่งโดยปกติจะเป็นตัวเลขพีชชี แต่ในกรณีนี้ศึกษาเพื่อให้โหลดเท่ากับการทดสอบในหัวข้อที่ 5.3.1 เราจะใส่ค่า  $U.F.$  เป็นเลขจำนวนเดียว ซึ่งเท่ากับ 0.6864
- ขนาดพิกัดและเฟสของหม้อแปลง จะใส่เป็นตัวเลขจำนวนเดียว โดยเฟสของหม้อแปลงจะกำหนดดังนี้
  - 1) หม้อแปลงสามเฟส (Three Phase Transformer) เฟส ABC จะกำหนดให้เป็นเลข 0
  - 2) หม้อแปลงเฟสเดียว (Single Phase) เฟส AC, BC หรือ CA จะกำหนดให้เป็นเลข 1
 ในที่นี้ เราจะกำหนดให้ขนาดพิกัดหม้อแปลงเป็น 250 kVA และเฟสเป็น 0
- จำนวนวงจรย่อยหลักหลังหม้อแปลง ดังที่กล่าวในข้างต้นว่าวงจรในด้านแรงดันต่ำโดยทั่วไป จะเป็นแบบเรเดียลและสายไฟจะเดินแยกออกเป็นสองเส้นทางหลัก ดังนั้นเราจะกำหนดให้ตัวแปรนี้มีค่าเท่ากับ 2
- ความยาวโดยประมาณของวงจร จะใช้ข้อมูลเป็นวงจร-กิโลเมตร ในที่นี้เราพิจารณาจากวงจรด้านแรงดันต่ำที่แสดงในรูปที่ ข.3 จะได้ความยาวเท่ากับ 0.88 กม. ซึ่งในการคำนวณเราจะกำหนดให้ใช้ข้อมูลนี้เป็นตัวเลขพีชชี โดยจะกำหนดให้มีค่า  $\pm 10\%$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 ข้อมูลความยาวโดยประมาณของวงจรที่แสดงด้วยตัวเลขฟัซซี

- แรงดัน ในที่นี้จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 220 V และเป็นตัวเลขฟัซซีที่มีค่า  $\pm 5\%$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณที่เป็นแบบตัวเลขฟัซซี

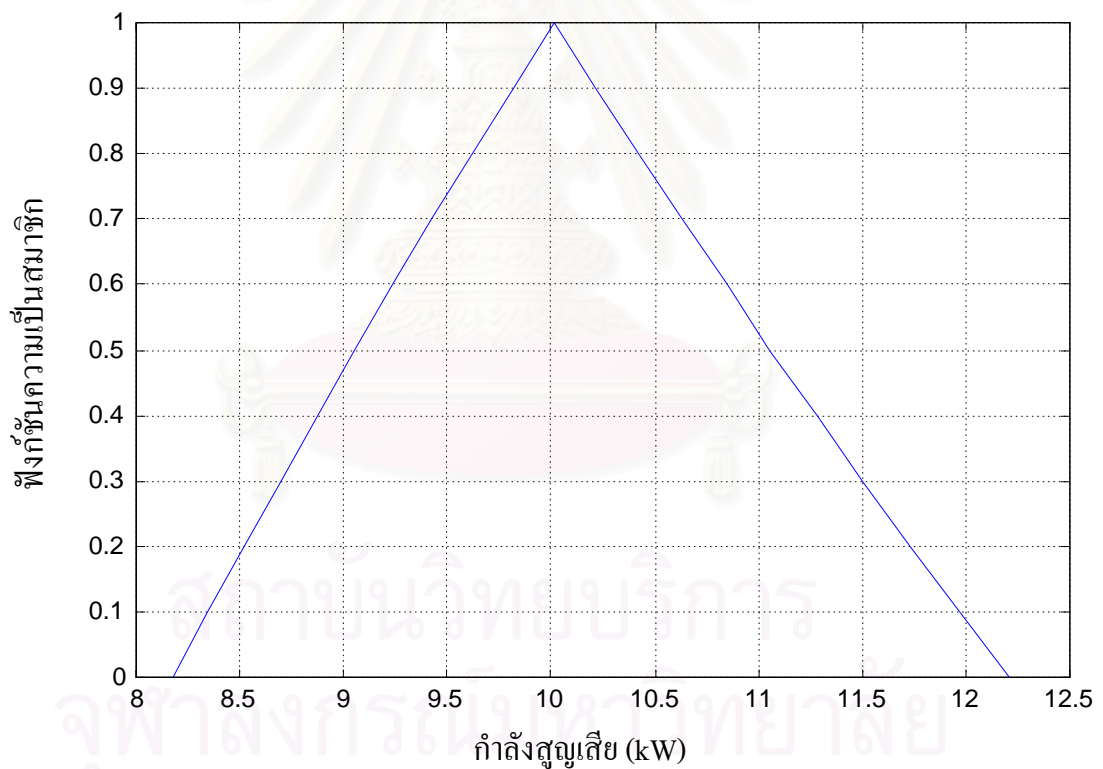
สรุปในการคำนวณหาค่าลัษณูเสี่ยทางด้านระบบแรงดันต่ำ จะมีตัวแปรที่เป็นตัวเลขฟัซซี 2 ตัวแปร คือ ความยาวสายโดยประมาณของวงจร และ แรงดัน ดังแสดงในข้างต้น

เมื่อได้ค่าตัวแปรต่างๆ สามารถนำไปคำนวณหาค่าลัษณูเสี่ยได้ตามสมการที่ 4.8 ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.6

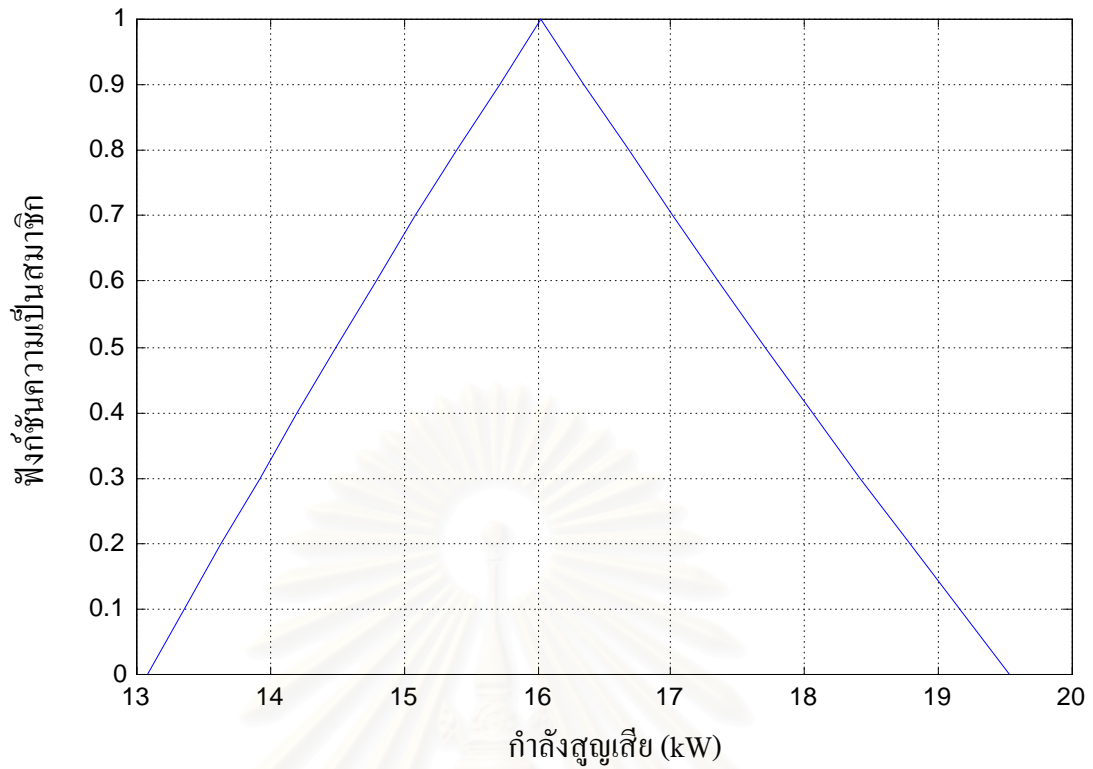
ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงกำลังสูญเสียในระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำที่คำนวณด้วยวิธีฟัซซี่

การทดสอบ ในแต่ละกรณี	Load (kVA)	Power Loss (kW)	
		Fuzzy Number	Defuzzy Number
กรณี 1	171.60	[8.17 ; 10.01 ; 12.20]	10.04
กรณี 2	171.60	[13.08 ; 16.03 ; 19.53]	16.07
กรณี 3	171.60	[4.91 ; 6.01 ; 7.33]	6.03

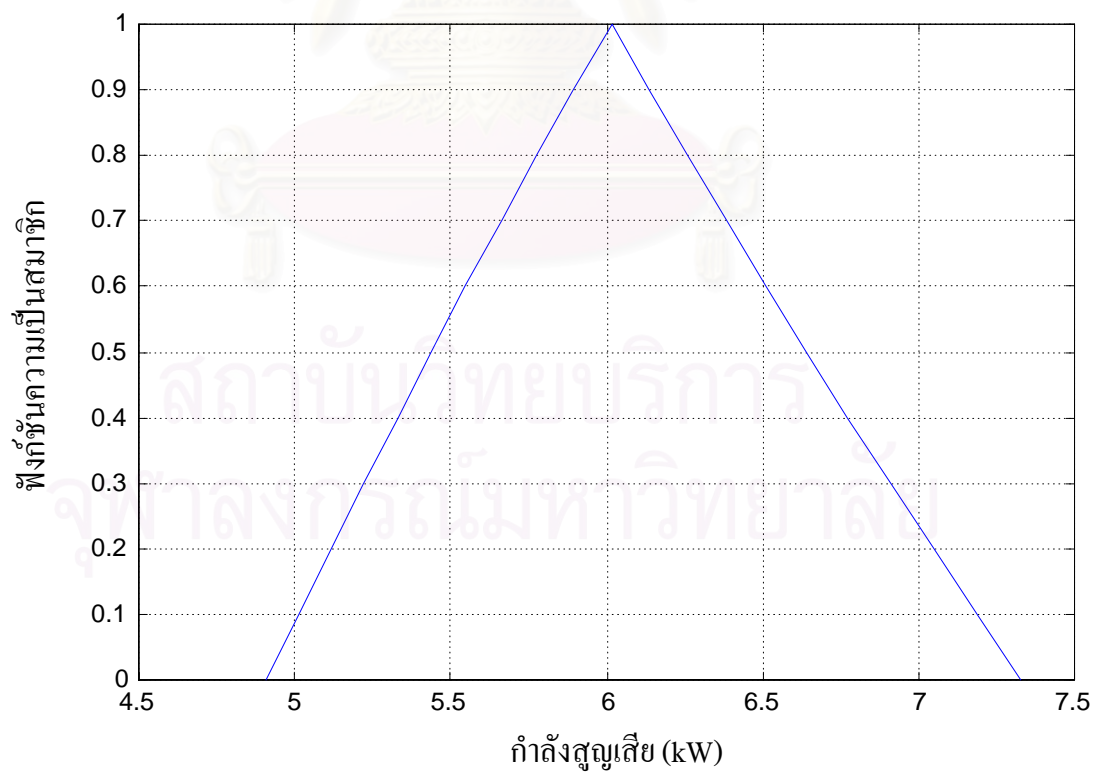
จากตารางที่ 5.6 เราสามารถเขียนกราฟระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิกกับค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซี่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.18 – 5.20



รูปที่ 5.18 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซี่ของระบบด้านแรงดันต่ำในกรณี 1



รูปที่ 5.19 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซีของระบบด้านแรงดันต่ำในกรณี 2



รูปที่ 5.20 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซีของระบบด้านแรงดันต่ำในกรณี 3



จากผลการทดสอบจะพบว่าค่ากำลังสูญเสียที่ได้เป็นตัวเลขแบบฟัซซี ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีค่าที่แตกต่างกันไป เนื่องจากความแตกต่างของการกระจายตัวของโหลดในระบบ โดยถ้าโหลดมีความหนาแน่นมากอยู่ที่ปลายวงจร(กรณี 2) ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดจะมากกว่าในกรณี 1 และ 3

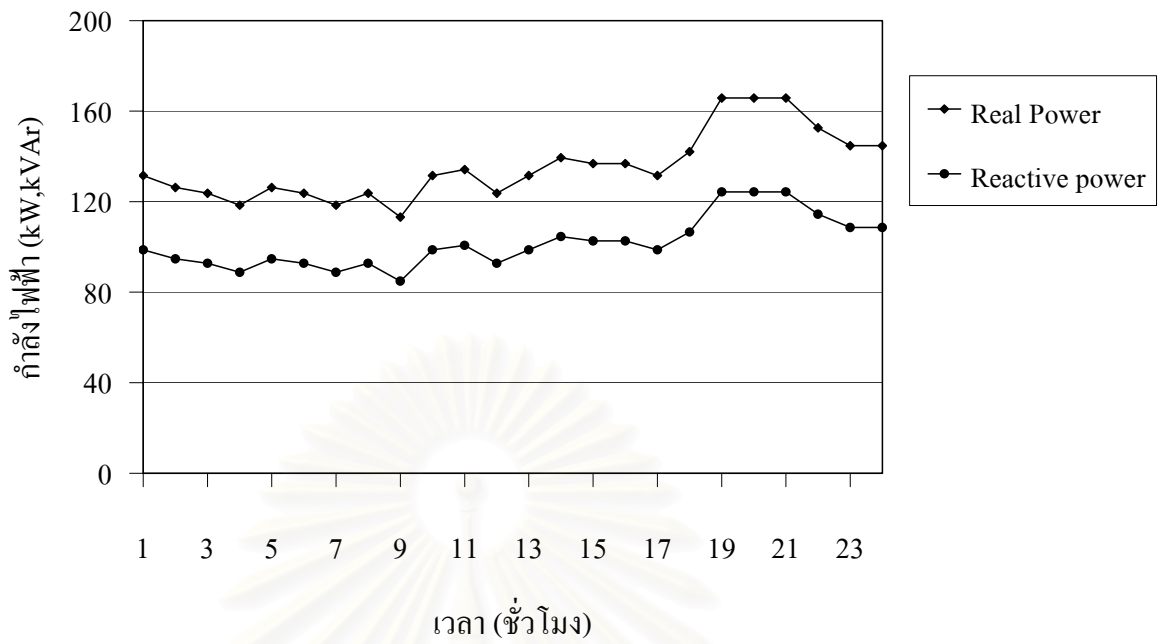
เมื่อเราทำการ Defuzzification ค่ากำลังสูญเสียที่เป็นตัวเลขฟัซซีในแต่ละกรณี จะได้ผลลัพธ์เป็นเลขค่าเดียวเท่ากับ 10.04, 16.07 และ 6.03 kW ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าค่าที่ได้มีคลาดเคลื่อนจากค่ากำลังสูญเสียที่ได้จากโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 และจากการใช้โหลดโพลีแบบสามเฟสที่มีค่าเท่ากับ 19.23 kW โดยในกรณี 2 จะมีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด(ประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์) แสดงว่าในวงจรทดสอบด้านแรงดันต่ำจะมีโหลดส่วนใหญ่อยู่ที่ปลายวงจร

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่เราทำการจำลองและประมาณ โหลดของระบบอย่างง่ายเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นเรื่องปกติที่ว่าเมื่อเรามีความละเอียดของข้อมูลที่ต้องการน้อยลง ความถูกต้องในการคำนวณและผลการคำนวณที่ได้ย่อมมีค่าที่คลาดเคลื่อนไป

### 5.3.3 กำลังสูญเสียในระบบทดสอบที่คำนวณด้วยวิธีฟัซซี

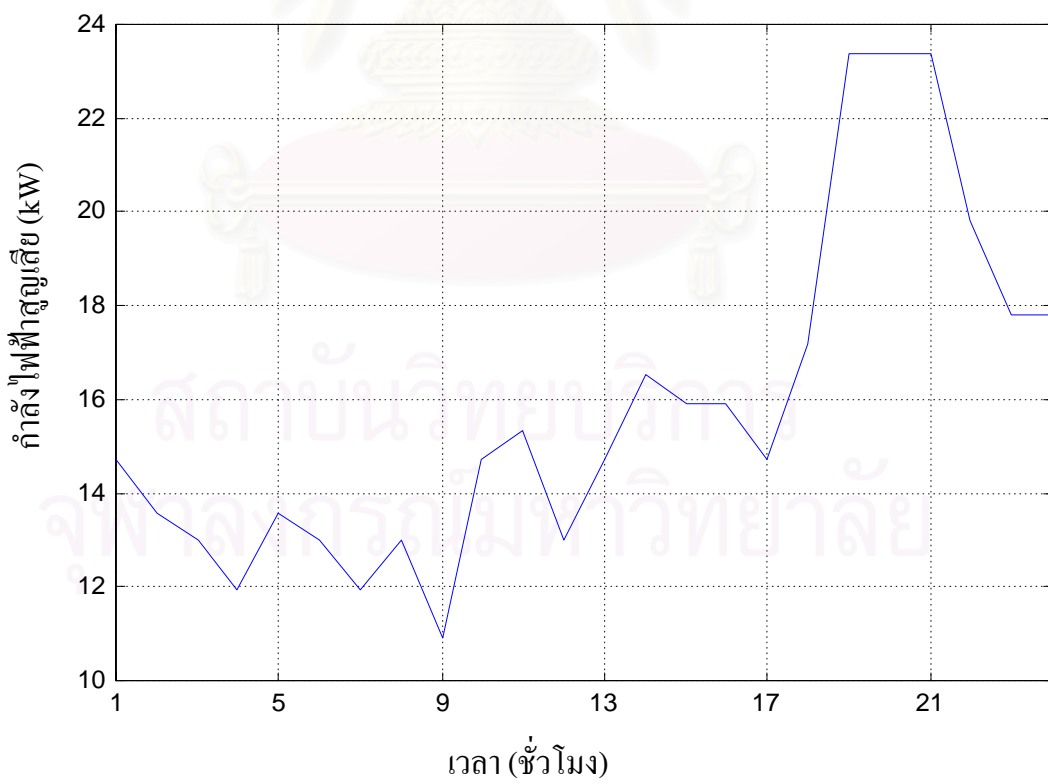
ในหัวข้อนี้ เราจะทำการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียใน 1 วัน เนื่องจากในหัวข้อที่ 5.3.2 จะพบว่าแบบจำลองระบบในกรณี 2 มีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองระบบในกรณีอื่นๆ ดังนั้นในที่นี้จะเลือกใช้แบบจำลองระบบในกรณี 2 ทำการทดสอบ โดยข้อมูลที่จำเป็นอื่นๆจะใช้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.3.2 ค่าโหลดของหม้อแปลงที่ใช้ในแต่ละชั่วโมงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.21

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.21 แสดงค่าโหลดของหม้อแปลงที่ใช้ในแต่ละชั่วโมง

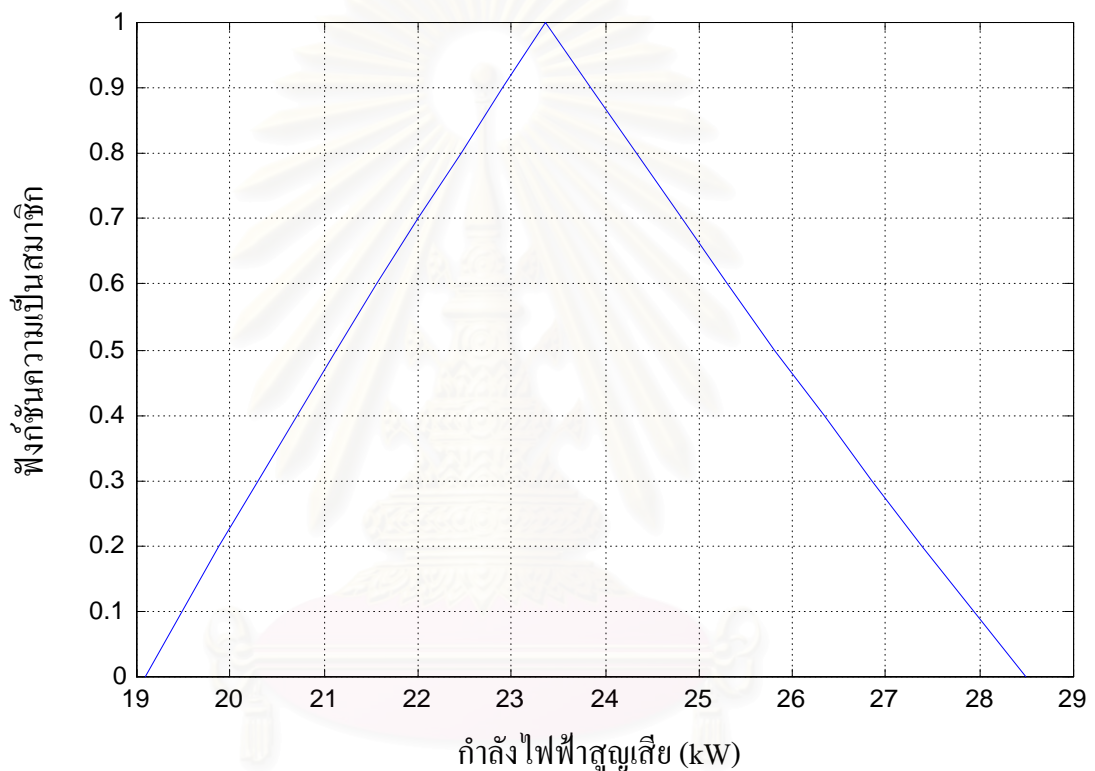
เมื่อทำการทดสอบจะได้ผลดังนี้



รูปที่ 5.22 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ระดับ  $\alpha$ -cut เท่ากับ 1

จากกราฟที่แสดงปริมาณการใช้ไฟฟ้าของหม้อแปลงและกราฟแสดงกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจะแสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามปริมาณโหลดที่ใช้ โดยถ้าในชั่วโมงไหนที่มีปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชั่วโมงนั้นก็จะมีความสูงขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าในชั่วโมงที่มีปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยลงกำลังสูญเสียในชั่วโมงนั้นก็จะมีค่าน้อยลงเช่นกัน

สำหรับรายละเอียดของกำลังสูญเสียแบบพีชชี ได้นำเสนอไว้ใน ภาคผนวก จ ซึ่งในที่นี้เราจะนำค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชั่วโมงที่มากที่สุด ( ชั่วโมงที่ 19 ) มาแสดงในดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.23 แสดงค่ากำลังสูญเสียที่อยู่ในรูปของตัวเลขพีชชีในชั่วโมงที่มากที่สุด

จากรูปที่ 5.21 ค่ากำลังสูญเสียที่เป็นตัวเลขพีชชีจะมีค่าอยู่ในช่วง  $[19.08 ; 23.38 ; 28.49]$  โดยที่ค่า 19.08 และ 28.49 จะมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 และที่ค่า 23.38 จะมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 แสดงว่า ค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในชั่วโมงที่ 19 จะมีค่าประมาณ 23.38 และจะอยู่ในช่วง 19.08 ถึง 28.49

#### 5.4 สรุปผลการทดสอบ

การประมาณกำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่นำเสนอในบทนี้ ได้แยกการวิเคราะห์ระบบออกเป็น 2 ส่วนตามระดับแรงดัน คือ ระดับแรงดันปานกลาง และ ระดับแรงดันต่ำ โดยในระดับแรงดันปานกลางใช้วิธีการคำนวณโหลดโพล์แบบสามเฟสในการวิเคราะห์ โดยเหตุที่ในทางปฏิบัติของระบบไฟฟ้าของ กฟภ. ในปัจจุบันเราทราบเฉพาะข้อมูลโหลดที่แหล่งจ่ายต้นทาง ดังนั้นผลที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าตามระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งแยกออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ค่ากำลังสูญเสียต่ำสุด ค่ากำลังสูญเสียค่ากลาง และค่ากำลังสูญเสียสูงสุด ตามลำดับ

ในระดับแรงดันต่ำได้นำเอาทฤษฎีฟัซซีเข้ามาประยุกต์ใช้กับข้อมูลต่างๆที่สามารถทราบค่าได้ รวมถึงการสร้างแบบจำลองระบบสำหรับการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียด้วย ค่ากำลังสูญเสียที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีฟัซซีนี ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวเลขฟัซซีซึ่งแสดงถึงการกระจายของกำลังสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในระบบ และสามารถนำค่ากำลังสูญเสียที่ได้นี้มาทำการ Defuzzificaton เพื่อแปลงตัวเลขฟัซซีให้อยู่ในรูปของตัวเลขค่าเดียวได้

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาถึงการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ระบบออกเป็น 2 ส่วนตามระดับแรงดัน คือ แรงดันปานกลางและแรงดันต่ำ ในระดับแรงดันปานกลางใช้วิธีการคำนวณโหลดโพล์แบบสามเฟสในการวิเคราะห์ผล โดยจะเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับโปรแกรม PSS/ADEPT 3.0 ซึ่งในการใช้โปรแกรมโหลดโพล์นั้นเราพัฒนาให้ใช้งานโดยอ้างอิงกับข้อมูลที่สามารถหาได้ในทางปฏิบัติดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณทำให้ทราบถึงระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นและยังได้ทำการวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียด้วย

จากผลการวิเคราะห์จะพบว่าที่ปริมาณโหลดเท่าๆกันในระบบไฟฟ้า แต่โหลดมีความไม่สมดุลก็จะส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสียเพิ่มมากขึ้นกว่าในกรณีที่โหลดสมดุล โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าแปรผันตามความไม่สมดุล และในกรณีที่โหลดมีค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่ากัน กำลังสูญเสียจะมีค่าลดลงเมื่อตัวประกอบกำลังมีค่ามากขึ้น เนื่องจากกำลังรีแอกทีฟจะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อตัวประกอบกำลังมีค่าต่ำจะทำให้เกิดกระแสไหลในสายส่งมากขึ้นจึงทำให้กำลังสูญเสียมีค่ามาก แต่เมื่อค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูงขึ้นกำลังรีแอกทีฟก็จะมีค่าลดลง กระแสที่ไหลในสายส่งก็จะมีค่าลดลงด้วย ทำให้กำลังสูญเสียมีค่าลดลง และในกรณีสุดท้ายได้กล่าวถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบโหลด ซึ่งจะช่วยให้สามารถประมาณค่ากำลังสูญเสียได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

เนื่องจากในทางปฏิบัติเราไม่สามารถหาข้อมูลที่เป็นต่างๆได้อย่างครบถ้วน ดังนั้นในระบบด้านแรงดันต่ำจึงใช้วิธีการจำลองระบบสำหรับทำการคำนวณหา กำลังสูญเสีย โดยได้นำเอาวิธีพีชซีเข้ามาประยุกต์ใช้ด้วย จากผลที่ได้จากการคำนวณค่ากำลังสูญเสียจะอยู่ในรูปของตัวเลขพีชซีซึ่งสามารถแสดงถึงการกระจายของกำลังสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นในระบบได้

ในการประมาณกำลังสูญเสียด้วยวิธีที่นำเสนอมีข้อดีในด้านความเร็วและสามารถที่จะนำไปใช้งานได้จริง แต่มีข้อเสียคือค่ากำลังสูญเสียที่คำนวณได้อาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องและความเหมาะสมของข้อมูลที่มีอยู่จริงในขณะนั้น โดยอาจหาได้จากการสอบถามจากเจ้าหน้าที่ที่อยู่หน้างาน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการคำนวณและผลที่ได้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ ดังนี้

- 1) ควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังสูญเสียเพิ่มเติม เนื่องจากการวิเคราะห์ โดยทั่วไปเราจะกำหนดให้โหลดมีความสมดุลอยู่เสมอ
- 2) ควรพิจารณาเพิ่มเติมถึงผลกระทบจากการที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (dispersed generators) ต่ออยู่ในระบบเพิ่มขึ้น
- 3) ควรจะพัฒนาตัวโปรแกรมให้มีส่วนของการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ (Graphic user interface) เพื่อที่จะทำให้บุคคลทั่วไปสามารถใช้ได้อย่างสะดวกขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] Joanicjusz Nazarko , Zbigniew Styczynski and Mirosław Poplawski. The Fuzzy Approach to Energy Losses Calculations in Low Voltage Distribution Netwok. IEEE. 2000.
- [2] M.S. Srinivas. Distribution Load Flows: A brief review . IEEE. 2000.
- [3] J. Arrillaga, C.P. Arnold, and B.J. Harker. Computer Modelling of Electrical Power Systems. A Wiley-Interscience publication. 1983.
- [4] W.H. Kersting and W.H. Phillips. Distribution Feeder Line Model. IEEE Conference Paper. 1994.
- [5] Paul M. Anderson. Analysis Of Faulted Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 1995.
- [6] Tsai-Hsiang Chen, Mo-Shing Chen, Toshio Inoue, Paul Kotus and Elie A. Chebli. Three-Phase Cogenerator And Transformer Models For Distribution System Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 6, No. 4, October 1991.
- [7] Glenn W. Stagg and Ahemed H. El-Abiad. Computer Methods in Power System Analysis. McGraw-Hill INC. 1968.
- [8] William D. Stevenson, Jr. Elements Of Power System Analysis. Fourth Edition. McGraw-Hill INC. 1982.
- [9] Chin-Teng Lin and C.S. George Lee. Neural Fuzzy Systems : A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems. Prentice Hall P T R.1996.
- [10] George,J.KLIR and BoYuan. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications. Prentice-Hall Inc. 1995.
- [11] อรรถกร กรุณานนท์. การประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัซซีในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ และกำลังผลิตสำรองที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. 2542.
- [12] C.S. Chen, M.Y. Cho and Y.W. Chen . Development Of Simplified Loss Models For Distribution System Analysis. IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 9, No. 3, July 1994.

- [13] Turan Gonen. Electric Power Distribution System Engineering. McGraw-Hill INC. 1986.
- [14] Buller F.H., C.A. Woodrow. Load Factor-Equivalent Hour Values Compared. *Electr World*. Vol. 92, NO. 2, July 14. 1982 : 59-60.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





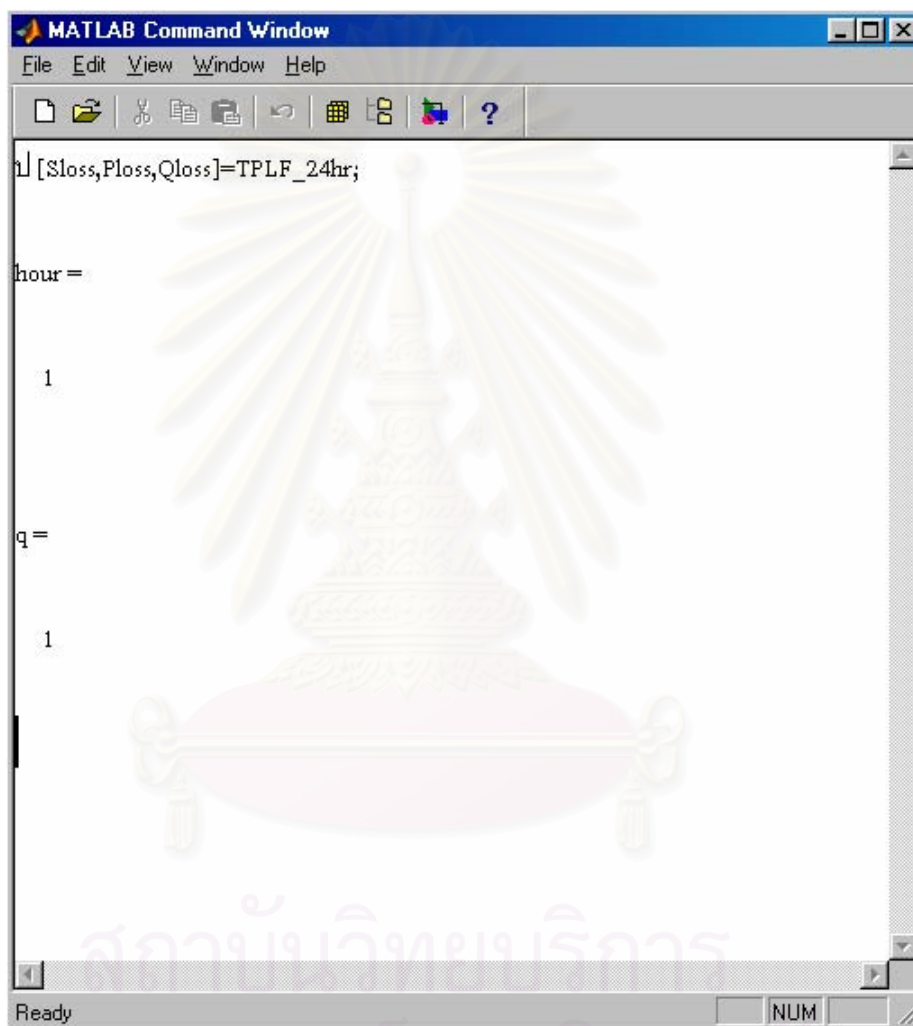
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ตัวอย่างผลที่ได้จากโปรแกรมการคำนวณกำลังสูญเสีย

ก.1 ตัวอย่างการรันโปรแกรมคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้านแรงดันปานกลางในวงจรสายป้อนที่ 10

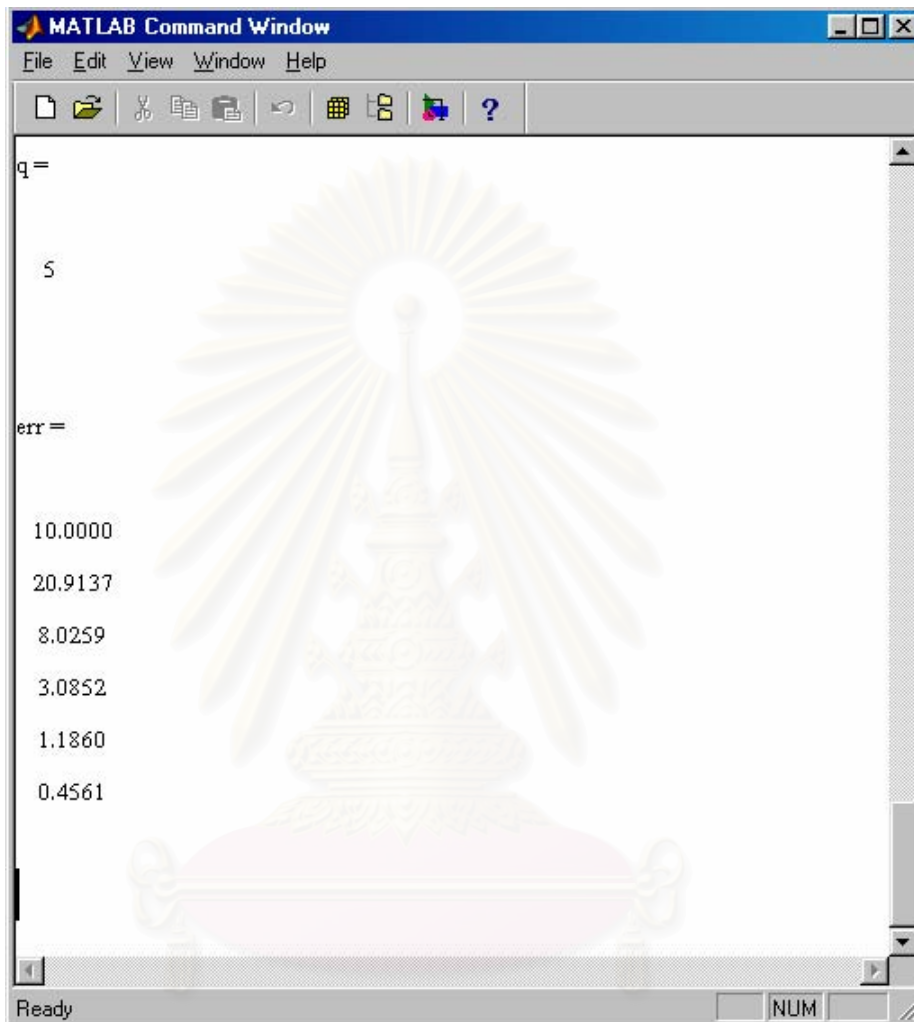


```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
[Sloss,Ploss,Qloss]=TPLF_24hr;
hour =
    1
q =
    1
Ready
NUM

```

รูปที่ ก.1 แสดงตัวอย่างเริ่มต้นของการรันโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ในกรณีหาค่ากำลังสูญเสียในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10



รูปที่ ก.2 แสดงตัวอย่างขณะทำการรันโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ในกรณีหาค่ากำลังสูญเสียใน วันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10

Power Loss (kW)

Time (hour)	Mean	Min	Max
1	8.20	6.44	11.08
2	7.55	5.93	10.19
3	7.29	5.73	9.84
4	6.80	5.34	9.17
5	7.55	5.93	10.19
6	7.29	5.73	9.84
7	6.57	5.16	8.85
8	7.18	5.64	9.68
9	6.32	4.96	8.52
10	8.33	6.54	11.25

รูปที่ ก.3 แสดงผลการคำนวณที่ได้จากการรัน โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น ในกรณีหาค่ากำลังสูญเสียในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10

ก.2 ตัวอย่างการรันโปรแกรมคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้านแรงดันต่ำ

```

MATLAB Command Window
File Edit View Window Help
[Loss_f, Loss_cr]=LV

Loss_f=

Columns 1 through 7
    4.9093    5.0115    5.1154    5.2210    5.3285    5.4379    5.5491

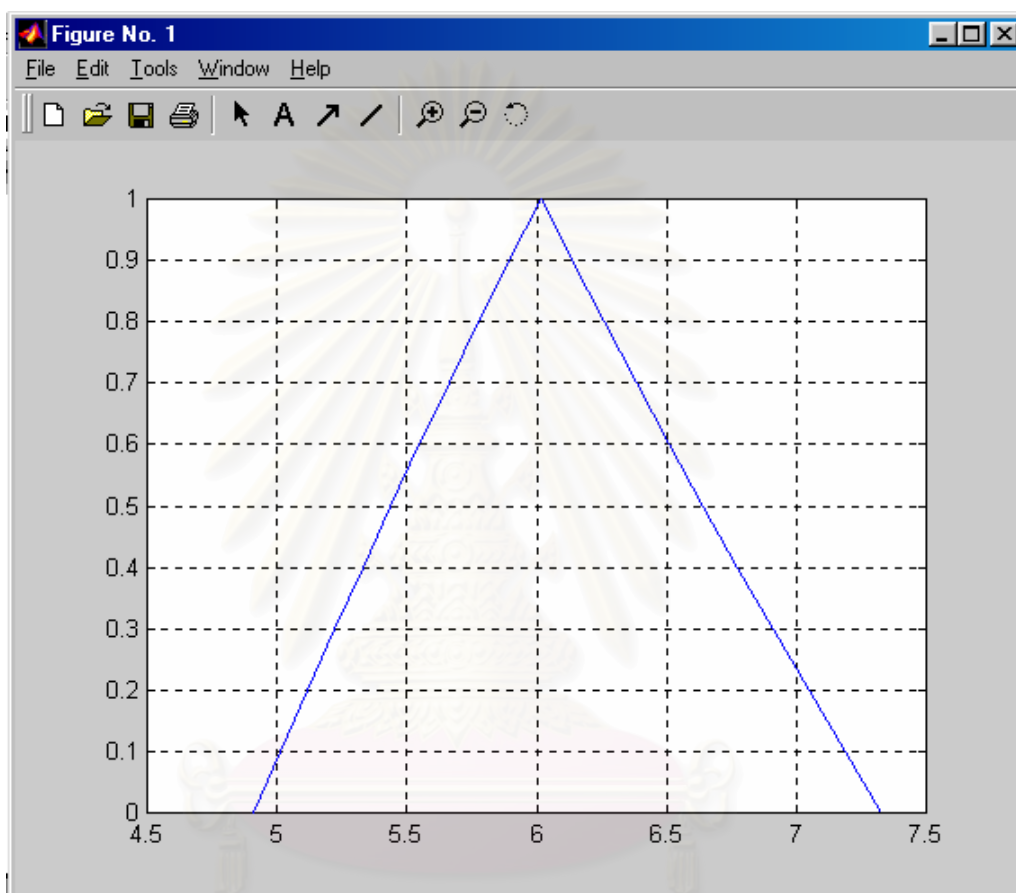
Columns 8 through 14
    5.6623    5.7775    5.8946    6.0139    6.0139    6.1352    6.2587

Columns 15 through 21
    6.3844    6.5123    6.6425    6.7751    6.9101    7.0475    7.1874
  
```

รูปที่ ก.4 แสดงผลการรันโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นในด้านแรงดันต่ำ

โดยใช้แบบจำลองระบบในกรณี 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



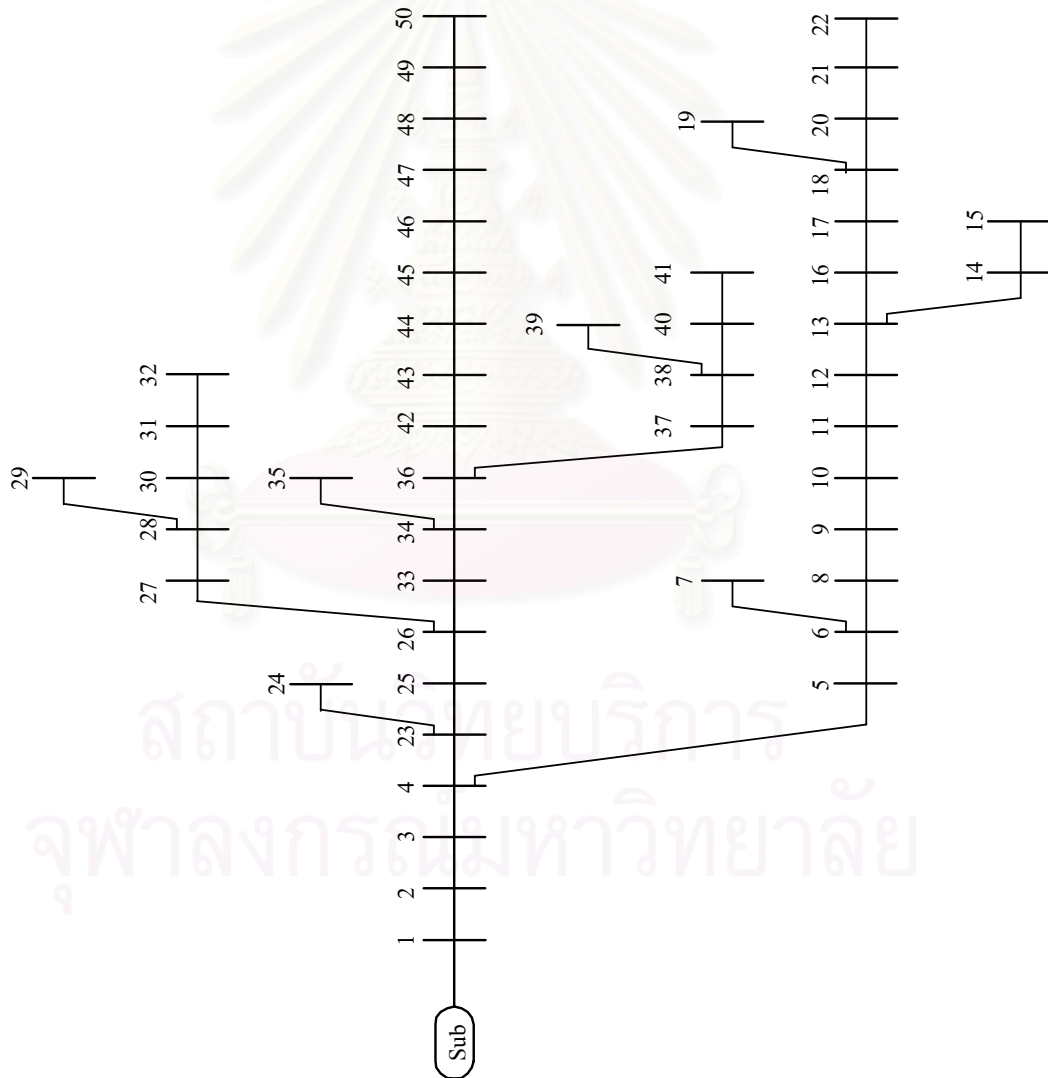
รูปที่ ก.5 แสดงกราฟที่ได้จากการรัน โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นในด้านแรงดันต่ำ  
โดยใช้แบบจำลองระบบในกรณี 2

ภาคผนวก ข

ระบบทดสอบ

ข.1 ระบบทดสอบด้านแรงดันปานกลาง

ข.1.1 วงจรสายป้อนที่ 2



รูปที่ ข.1 แผนภาพเส้นเดี่ยวของวงจรสายป้อนที่ 2

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์สายในวงจรสายป้อนที่ 2

From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
SA	1	ABC	185PIC	2.2
1	2	ABC	185PIC	0.3
2	3	ABC	185PIC	0.3
3	4	ABC	185PIC	0.2
4	5	ABC	50ACSR	0.6
5	6	ABC	50ACSR	0.3
6	7	ABC	50ACSR	0.01
6	8	ABC	50ACSR	1
8	9	ABC	50ACSR	1.1
9	10	ABC	50ACSR	1
10	11	ABC	50ACSR	1.2
11	12	ABC	50ACSR	0.4
12	13	ABC	50ACSR	1.1
13	14	ABC	50ACSR	0.2
14	15	ABC	50ACSR	0.01
13	16	ABC	50ACSR	0.1
16	17	ABC	50ACSR	0.9
17	18	ABC	50ACSR	0.4
18	19	ABC	50ACSR	0.01
18	20	ABC	50ACSR	1
20	21	ABC	50ACSR	0.6
21	22	ABC	50ACSR	0.01
4	23	ABC	185PIC	1.8
23	24	ABC	185PIC	0.3
23	25	ABC	185PIC	0.3
25	26	ABC	185PIC	1.3
26	27	ABC	50ACSR	0.5
27	28	ABC	50ACSR	0.8
28	29	ABC	50ACSR	0.2



From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
28	30	ABC	50ACSR	0.25
30	31	ABC	50ACSR	1.2
31	32	ABC	50ACSR	0.01
26	33	ABC	185PIC	1.75
33	34	ABC	185PIC	2.2
34	35	ABC	185PIC	0.01
34	36	ABC	185PIC	0.9
36	37	ABC	185PIC	0.05
37	38	ABC	185PIC	0.6
38	39	ABC	185PIC	1.25
38	40	ABC	50ACSR	0.8
40	41	ABC	50ACSR	1.25
36	42	ABC	50ACSR	0.001
42	43	ABC	50ACSR	0.001
43	44	ABC	50ACSR	0.2
44	45	ABC	50ACSR	0.1
44	46	ABC	50ACSR	0.3
46	47	ABC	50ACSR	1.6
47	48	ABC	50ACSR	0.7
48	49	ABC	50ACSR	1.4
49	50	ABC	50ACSR	0.01

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

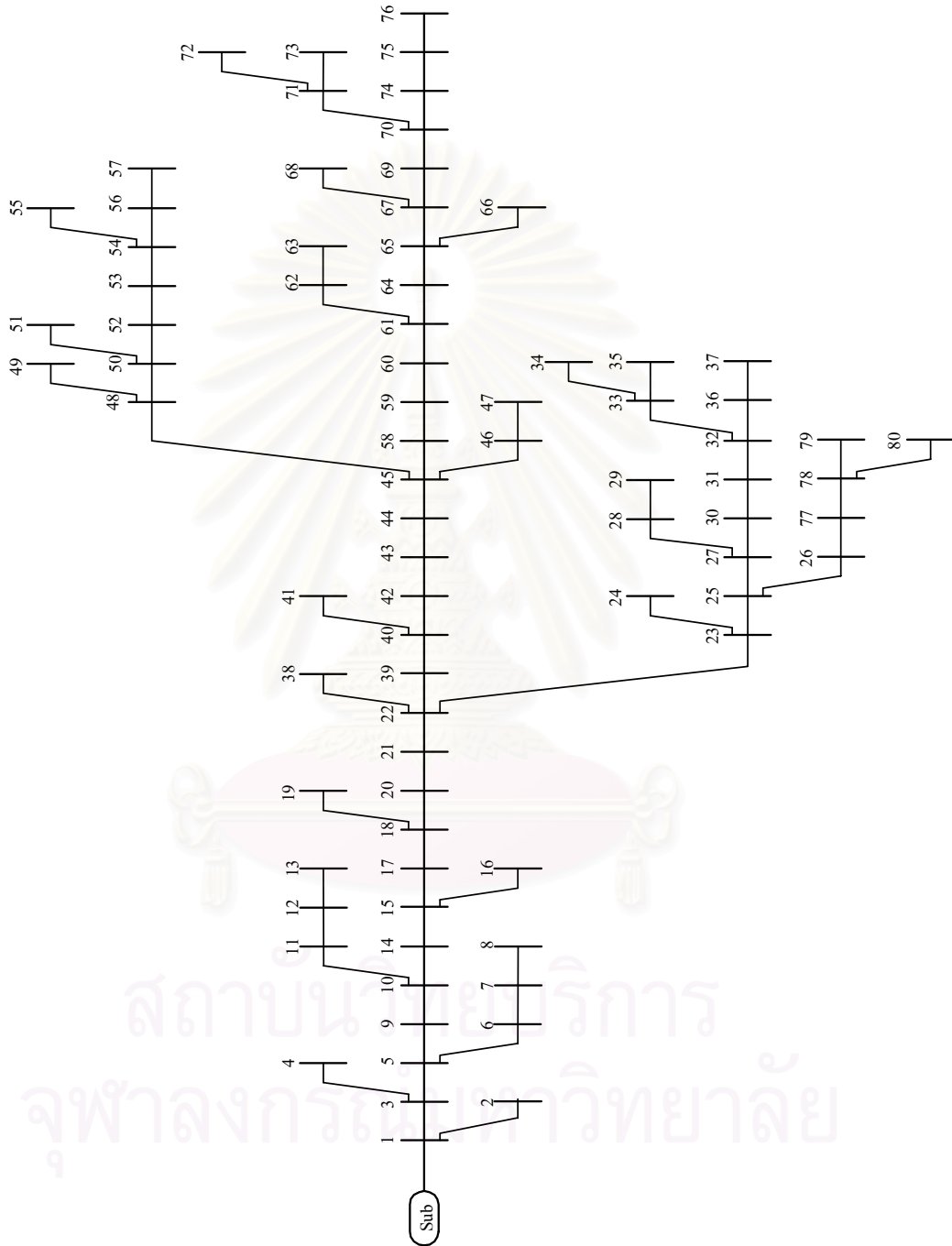
ตารางที่ ข.2 หม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับบัสในวงจรสายป้อนที่ 2

Bus	Phase	Transformer size (kVA)
1	ABC	50
2	BC	30
3	ABC	100
5	BC	30
7	-	1050
8	BC	20
9	BC	30
10	ABC	100
11	ABC	50
12	AC	30
12	AC	30
14	ABC	250
15	-	1050
16	ABC	100
17	AC	30
19	-	1050
20	ABC	50
21	AC	30
22	-	1050
23	ABC	100
24	ABC	50
25	ABC	250
26	ABC	400
27	BC	30
29	BC	20
30	AC	20
31	AC	20
32	-	1050
33	AB	30

Bus	Phase	Transformer size (kVA)
35	-	1050
37	ABC	100
39	-	1050
40	AC	30
41	AC	20
42	AB	30
43	AC	20
44	BC	20
45	ABC	100
46	ABC	160
47	AC	30
48	AC	20
49	ABC	50
50	ABC	50

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ข.1.2 วงจรสายป้อนที่ 10



รูปที่ ข.2 แผนภาพเส้นเดียวของวงจรสายป้อนที่ 10

ตารางที่ ข.3 ค่าพารามิเตอร์สายในวงจรสายป้อนที่ 10

From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
SA	1	ABC	95A	1
1	2	ABC	95A	0.01
1	3	ABC	95A	0.15
3	4	ABC	50PIC	0.02
3	5	ABC	95A	0.15
5	6	ABC	50ACSR	0.026
6	7	ABC	50ACSR	0.09
7	8	ABC	50ACSR	0.05
5	9	ABC	95A	0.15
9	10	ABC	95A	0.14
10	11	ABC	95A	0.026
11	12	ABC	95A	0.234
12	13	ABC	50PIC	0.036
10	14	ABC	50ACSR	0.056
14	15	ABC	50ACSR	0.17
15	16	ABC	50PIC	0.04
15	17	ABC	50ACSR	0.08
17	18	ABC	50ACSR	0.12
18	19	ABC	50ACSR	0.16
18	20	ABC	50ACSR	0.04
20	21	ABC	50ACSR	0.03
21	22	ABC	50ACSR	0.09
22	23	ABC	50ACSR	0.03
23	24	ABC	50ACSR	0.04
23	25	ABC	50PIC	0.04
25	26	ABC	50ACSR	0.06
25	27	ABC	50ACSR	0.12
27	28	ABC	50PIC	0.1
28	29	ABC	50PIC	0.03

From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
27	30	ABC	50ACSR	0.08
30	31	ABC	50ACSR	0.06
31	32	ABC	50ACSR	0.16
32	33	ABC	50ACSR	0.14
33	34	ABC	50PIC	0.3
33	35	ABC	50ACSR	0.16
32	36	ABC	50ACSR	0.14
36	37	ABC	50ACSR	0.16
22	38	ABC	50PIC	0.02
22	39	ABC	50ACSR	0.05
39	40	ABC	50ACSR	0.07
40	41	ABC	50ACSR	0.04
40	42	ABC	50ACSR	0.064
42	43	ABC	50ACSR	0.032
43	44	ABC	50ACSR	0.05
44	45	ABC	50ACSR	0.04
45	46	ABC	95A	0.074
46	47	ABC	95A	0.08
45	48	ABC	95A	0.27
48	49	ABC	50PIC	0.1
48	50	ABC	95A	0.07
50	51	ABC	95A	0.36
50	52	ABC	95A	0.4
52	53	ABC	95A	0.08
53	54	ABC	95A	0.14
54	55	ABC	95A	0.06
54	56	ABC	95A	0.59
56	57	ABC	95A	0.06
45	58	ABC	95A	0.104
58	59	ABC	95A	0.07

From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
59	60	ABC	95A	0.2
60	61	ABC	50ACSR	0.02
61	62	ABC	50ACSR	0.03
62	63	ABC	50ACSR	0.24
61	64	ABC	50ACSR	0.07
64	65	ABC	50ACSR	0.12
65	66	ABC	50ACSR	0.1
65	67	ABC	95A	0.16
67	68	ABC	50ACSR	0.09
67	69	ABC	95A	0.48
69	70	ABC	95A	0.34
70	71	ABC	50ACSR	0.03
71	72	ABC	50ACSR	0.02
71	73	ABC	50ACSR	0.15
70	74	ABC	95A	0.09
74	75	ABC	95A	0.11
75	76	AC	95A	0.18
26	77	ABC	50ACSR	0.14
77	78	ABC	50ACSR	0.14
78	79	ABC	50PIC	0.18
78	80	ABC	50ACSR	0.14

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 หม้อแปลงที่เชื่อมต่อกับบัสในวงจรสายป้อนที่ 10

Bus	Phase	Transformer size (kVA)
2	ABC	80
4	ABC	160
6	ABC	160
7	ABC	100
8	ABC	100
9	ABC	100
11	ABC	100
12	ABC	160
13	ABC	100
14	ABC	250
16	ABC	100
17	ABC	250
19	ABC	100
20	ABC	160
21	ABC	400
22	ABC	160
23	ABC	100
24	ABC	400
28	ABC	160
29	ABC	100
30	ABC	100
31	ABC	250
34	ABC	50
35	AC	30
36	ABC	400
36	ABC	500
37	ABC	100
38	ABC	100
39	ABC	50



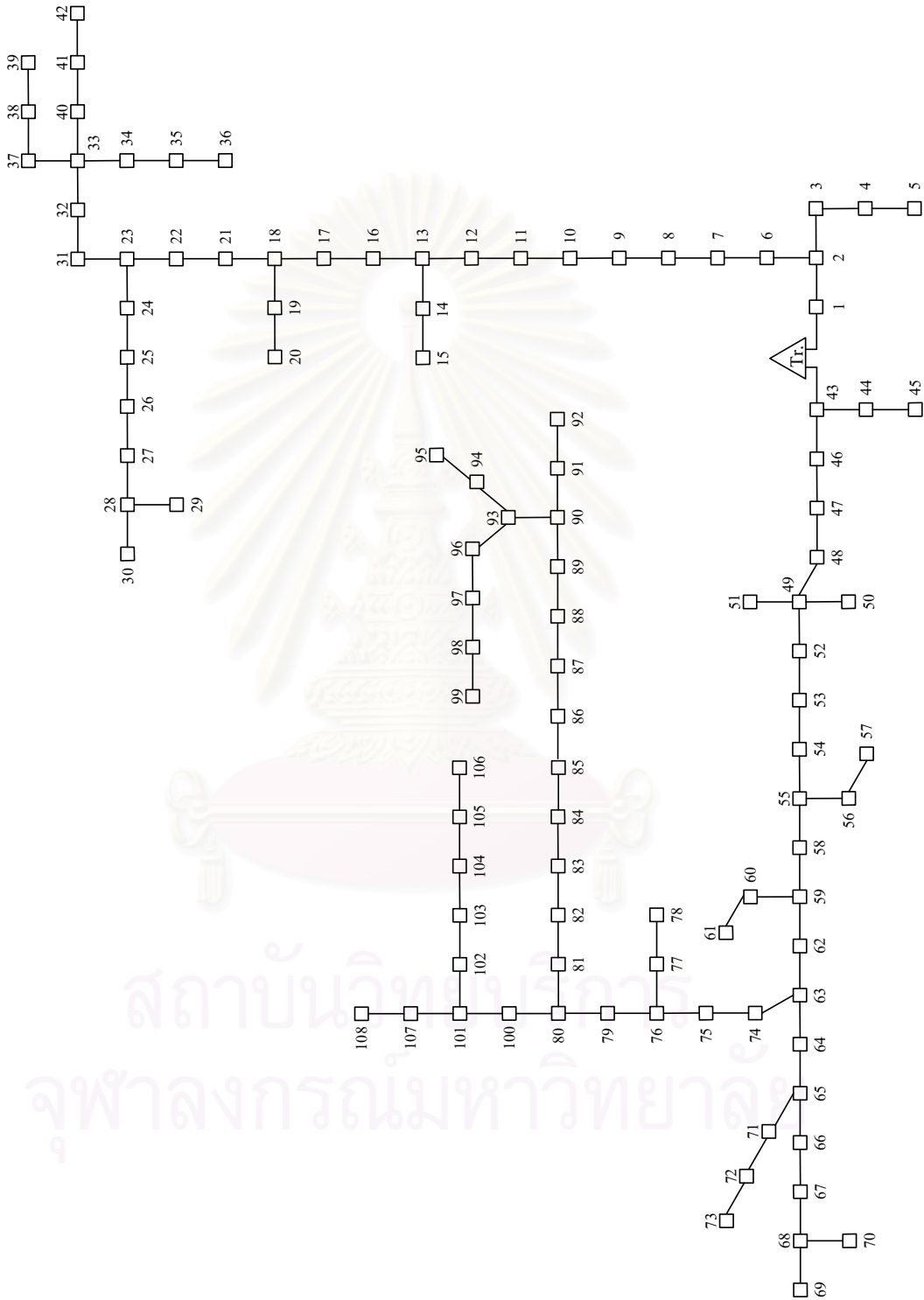
Bus	Phase	Transformer size (kVA)
41	ABC	50
42	ABC	160
43	ABC	100
44	ABC	50
46	ABC	250
47	ABC	100
48	ABC	250
49	ABC	250
51	ABC	400
52	ABC	100
53	ABC	160
55	ABC	100
56	ABC	160
57	ABC	400
59	ABC	250
60	ABC	160
62	ABC	250
63	ABC	100
64	ABC	160
66	ABC	100
68	ABC	160
69	ABC	100
72	ABC	100
73	ABC	100
73	ABC	100
74	ABC	250
75	ABC	160
75	ABC	500
75	ABC	500
76	AC	30

Bus	Phase	Transformer size (kVA)
77	ABC	50
78	ABC	250
79	ABC	50
80	ABC	100



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.2 ระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำ



รูปที่ ข.3 แผนภาพเส้นเคเบิลของระบบทดสอบด้านแรงดันต่ำ

ตารางที่ ข.5 ค่าพารามิเตอร์สายในวงจรแรงดันต่ำ

From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
TR	1	ABC	95AW	0.04
1	2	ABC	95AW	0.04
2	3	ABC	95AW	0.04
3	4	ABC	95AW	0.04
4	5	ABC	95AW	0.04
2	6	ABC	95AW	0.04
6	7	ABC	95AW	0.04
7	8	ABC	95AW	0.04
8	9	ABC	95AW	0.04
9	10	ABC	95AW	0.04
10	11	ABC	95AW	0.04
11	12	ABC	95AW	0.04
12	13	ABC	95AW	0.04
13	14	ABC	95AW	0.04
14	15	ABC	95AW	0.04
13	16	ABC	95AW	0.04
16	17	ABC	95AW	0.04
17	18	ABC	95AW	0.04
18	19	ABC	95AW	0.04
19	20	ABC	95AW	0.04
18	21	ABC	95AW	0.04
21	22	ABC	95AW	0.04
22	23	ABC	95AW	0.04
23	24	ABC	95AW	0.04
24	25	ABC	95AW	0.04
25	26	ABC	95AW	0.04
26	27	ABC	95AW	0.04
27	28	ABC	95AW	0.04
28	29	ABC	50AW	0.04

From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
28	30	ABC	95AW	0.04
23	31	ABC	95AW	0.04
31	32	ABC	95AW	0.04
32	33	ABC	95AW	0.04
33	34	ABC	95AW	0.04
34	35	ABC	95AW	0.04
35	36	ABC	95AW	0.04
33	37	ABC	95AW	0.04
37	38	ABC	95AW	0.04
38	39	ABC	95AW	0.04
33	40	ABC	95AW	0.04
40	41	ABC	95AW	0.04
41	42	ABC	50AW	0.04
TR	43	ABC	95AW	0.04
43	44	ABC	95AW	0.04
44	45	ABC	95AW	0.04
43	46	ABC	95AW	0.04
46	47	ABC	95AW	0.04
47	48	ABC	95AW	0.04
48	49	ABC	95AW	0.04
49	50	ABC	95AW	0.04
49	51	ABC	95AW	0.04
49	52	ABC	95AW	0.04
52	53	ABC	95AW	0.04
53	54	ABC	95AW	0.04
54	55	ABC	95AW	0.04
55	56	ABC	95AW	0.04
56	57	ABC	95AW	0.04
55	58	ABC	95AW	0.04
58	59	ABC	95AW	0.04

From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
59	60	ABC	95AW	0.04
60	61	ABC	95AW	0.04
59	62	ABC	95AW	0.04
62	63	ABC	95AW	0.04
63	64	ABC	95AW	0.04
64	65	ABC	95AW	0.04
65	66	ABC	95AW	0.04
66	67	ABC	95AW	0.04
67	68	ABC	95AW	0.04
68	69	ABC	95AW	0.04
68	70	ABC	50AW	0.04
65	71	ABC	95AW	0.04
71	72	ABC	95AW	0.04
72	73	ABC	95AW	0.04
63	74	ABC	95AW	0.04
74	75	ABC	95AW	0.04
75	76	ABC	95AW	0.04
76	77	ABC	50AW	0.04
77	78	ABC	50AW	0.04
76	79	ABC	95AW	0.04
79	80	ABC	95AW	0.04
80	81	ABC	95AW	0.04
81	82	ABC	95AW	0.04
82	83	ABC	95AW	0.04
83	84	ABC	95AW	0.04
84	85	ABC	95AW	0.04
85	86	ABC	95AW	0.04
86	87	ABC	95AW	0.04
87	88	ABC	95AW	0.04
88	89	ABC	95AW	0.04

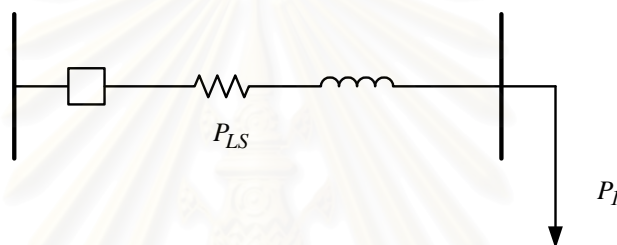
From bus	To bus	Phase	Line Type	Line length (km)
89	90	ABC	95AW	0.04
90	91	ABC	95AW	0.04
91	92	ABC	95AW	0.04
90	93	ABC	95AW	0.04
93	94	ABC	50AW	0.04
94	95	ABC	50AW	0.04
93	96	ABC	95AW	0.04
96	97	ABC	95AW	0.04
97	98	ABC	95AW	0.04
98	99	ABC	95AW	0.04
80	100	ABC	95AW	0.04
100	101	ABC	95AW	0.04
101	102	ABC	95AW	0.04
102	103	ABC	95AW	0.04
103	104	ABC	95AW	0.04
104	105	ABC	95AW	0.04
105	106	ABC	95AW	0.04
101	107	ABC	95AW	0.04
107	108	ABC	95AW	0.04

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

## ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบโหลด และตัวประกอบกำลังสูญเสีย

โดยปกติแล้วเราไม่สามารถหาค่าตัวประกอบกำลังสูญเสียที่แท้จริงจากตัวประกอบโหลดได้ อย่างไรก็ตามเราสามารถหาช่วงสูงสุด-ต่ำสุดของความสัมพันธ์ได้ หากเราสมมติให้สายป้อนในรูปที่ ข.1 ต่ออยู่กับโหลดที่แปรตามเวลาดังรูปที่ ข.2 จากรูปเรากำหนดให้ในช่วงโหลดต่ำ (off-peak) มีค่าโหลด  $P_1$  ซึ่งมีค่ากำลังสูญเสียเป็น  $P_{LS,1}$  และในช่วงโหลดสูง (peak) มีค่าโหลด  $P_2$  ซึ่งมีค่ากำลังสูญเสียเป็น  $P_{LS,2}$  ดังนั้น ตัวประกอบโหลด คือ



รูปที่ ค.1 วงจรอย่างง่ายของสายป้อน

$$F_{LD} = \frac{P_{avg}}{P_{max}} = \frac{P_{avg}}{P_2} \quad (\text{ค.1})$$

จากรูปที่ ค.2

$$P_{avg} = \frac{P_2 \times t + P_1 \times (T-t)}{T} \quad (\text{ค.2})$$

แทนค่าสมการ (ค.2) ลงใน (ค.1)

$$F_{LD} = \frac{P_2 \times t + P_1 \times (T-t)}{P_2 \times T} = \frac{t}{T} + \frac{P_1}{P_2} \times \frac{T-t}{T} \quad (\text{ค.3})$$



สำหรับตัวประกอบกำลังสูญเสียคือ

$$F_{LS} = \frac{P_{LS,avg}}{P_{LS,max}} \quad (ค.4)$$

$$= \frac{P_{LS,avg}}{P_{LS,2}}$$

โดยที่  $P_{LS,avg}$  คือ กำลังสูญเสียเฉลี่ย

$P_{LS,max}$  คือ กำลังสูญเสียสูงสุด

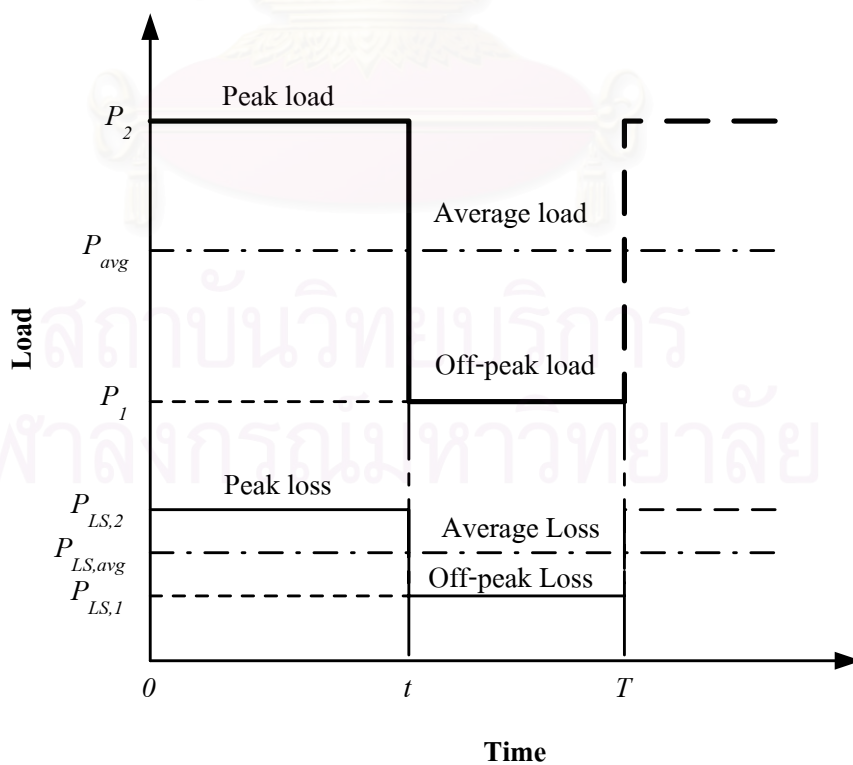
$P_{LS,2}$  คือ กำลังสูญเสียในช่วงโหลดสูงสุด

จากรูปที่ ค.2

$$P_{LS} = \frac{P_{LS,2} \times t + P_{LS,1} \times (T - t)}{T} \quad (ค.5)$$

แทนค่าสมการ (ค.5) ลงในสมการ (ค.4)

$$F_{LS} = \frac{P_{LS,2} \times t + P_{LS,1} \times (T - t)}{P_{LS,2} \times T} \quad (ค.6)$$



รูปที่ ค.2

โดยที่  $P_{LS,1}$  คือ กำลังสูญเสียในช่วงโหลดต่ำสุด  
 $t$  คือ ระยะเวลาในช่วงโหลดสูงสุด  
 $T-t$  คือ ระยะเวลาในช่วงโหลดต่ำสุด

โดยทั่วไปกำลังสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลง และในสายป้อนจะเป็นฟังก์ชันที่แปรตามโหลด ดังนั้นกำลังสูญเสียในช่วงโหลดสูงสุดและช่วงโหลดต่ำสุดจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_{LS,1} = k \times P_1^2 \quad (\text{ค.7})$$

และ

$$P_{LS,2} = k \times P_2^2 \quad (\text{ค.8})$$

โดย  $k$  เป็นค่าคงที่ เมื่อแทนสมการ (ค.7) และ (ค.8) ลงในสมการ (ค.6) จะได้ว่า

$$F_{LS} = \frac{(k \times P_2^2) \times t + (k \times P_1^2) \times (T-t)}{(k \times P_2^2) \times T} \quad (\text{ค.9})$$

นั่นคือ

$$F_{LS} = \frac{t}{T} + \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^2 \frac{T-t}{t} \quad (\text{ค.10})$$

จากสมการ (ค.3) และ (ค.10) เราสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบกำลังสูญเสียและตัวประกอบโหลดได้เป็น 3 กรณีดังนี้

- กรณีที่ 1 โหลดต่ำสุดมีค่าเป็นศูนย์

ดังนั้น

$$P_{LS,1} = 0$$

และเนื่องจาก  $P_1 = 0$  ดังนั้น

$$F_{LD} = F_{LS} = \frac{t}{T} \quad (\text{ค.11})$$

นั่นคือ ตัวประกอบโหลด มีค่าเท่ากับ ตัวประกอบกำลังสูญเสีย ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $t/T$

- กรณีที่ 2 ช่วงโหนดสูงสุดมีเวลาน้อยมาก

นั่นคือ

$$t \rightarrow 0$$

ซึ่งจากสมการ (ค.3) และ (ค.10) จะได้ว่า

$$\frac{T-t}{T} \rightarrow 1.0$$

ดังนั้น

$$F_{LS} \rightarrow (F_{LD})^2 \quad (\text{ค.12})$$

แสดงว่า ตัวประกอบกำลังสูญเสีย มีค่าใกล้เคียงกับ ตัวประกอบโหนด

- กรณีที่ 3 โหนดมีค่าคงที่

$$t \rightarrow T$$

นั่นแสดงว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าโหนดสูงสุดและโหนดต่ำสุดซึ่งจากสมการ (ค.3) และ (ค.10) จะได้ว่า

$$F_{LS} \rightarrow F_{LD} \quad (\text{ค.13})$$

จากทั้งสามกรณีเราสามารถสรุปได้ว่า

$$F_{LD}^2 < F_{LS} < F_{LD} \quad (\text{ค.14})$$

จากสมการ (ค.10) จะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถหาตัวประกอบกำลังสูญเสียจากตัวประกอบโหนดได้โดยตรงเพราะต้องพิจารณาระยะเวลาด้วย อย่างไรก็ตามเราสามารถประมาณความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองได้ดังนี้

$$F_{LS} = aF_{LD} + bF_{LD}^2 \quad (\text{ค.15})$$

โดยมีข้อกำหนดว่า  $a, b > 0$  และ  $a + b = 1$

## ภาคผนวก ง

## การสร้างโหลดอย่างสุ่มตามตัวประกอบโหลดที่กำหนด

โดยปกติแล้ว โหลดรายวันในสายป้อนที่มีเส้นโค้งโหลด-เวลาต่างกันถึงแม้ตัวประกอบโหลดและพลังงานรวมจะเท่ากัน แต่เมื่อคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในแต่ละเวลาและทำการรวมค่ากำลังสูญเสียจากทุกเวลาเข้าด้วยกันแล้วจะพบว่า กำลังสูญเสียในสายป้อนจะมีค่าต่างกันด้วย ดังนั้นถ้าหากวิธีการกำหนดโหลดของเรากำหนดให้โหลดที่มีค่าตัวประกอบโหลดเท่ากัน มีเส้นโค้งโหลด-เวลาเหมือนกันด้วยนั้น ผลที่ได้ก็อาจจะไม่ครอบคลุมความเป็นจริงที่อาจจะเกิดขึ้นได้เท่าที่ควร จากสาเหตุดังกล่าวเราจึงได้พัฒนาวิธีการสร้างโหลดรายวันตามตัวประกอบโหลดที่กำหนดให้มีลักษณะอย่างสุ่ม นั่นคือ ในกระบวนการทำงานแต่ละครั้งถึงแม้เราจะกำหนดค่าตัวประกอบโหลดให้มีค่าเท่ากันแต่เส้นโค้งโหลด-เวลาที่ได้ในแต่ละครั้งจะมีค่าแตกต่างกัน

ในการสร้างโหลดอย่างสุ่มดังกล่าวนี้เราสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

## ง.1 การรวมโหลดอย่างสุ่ม

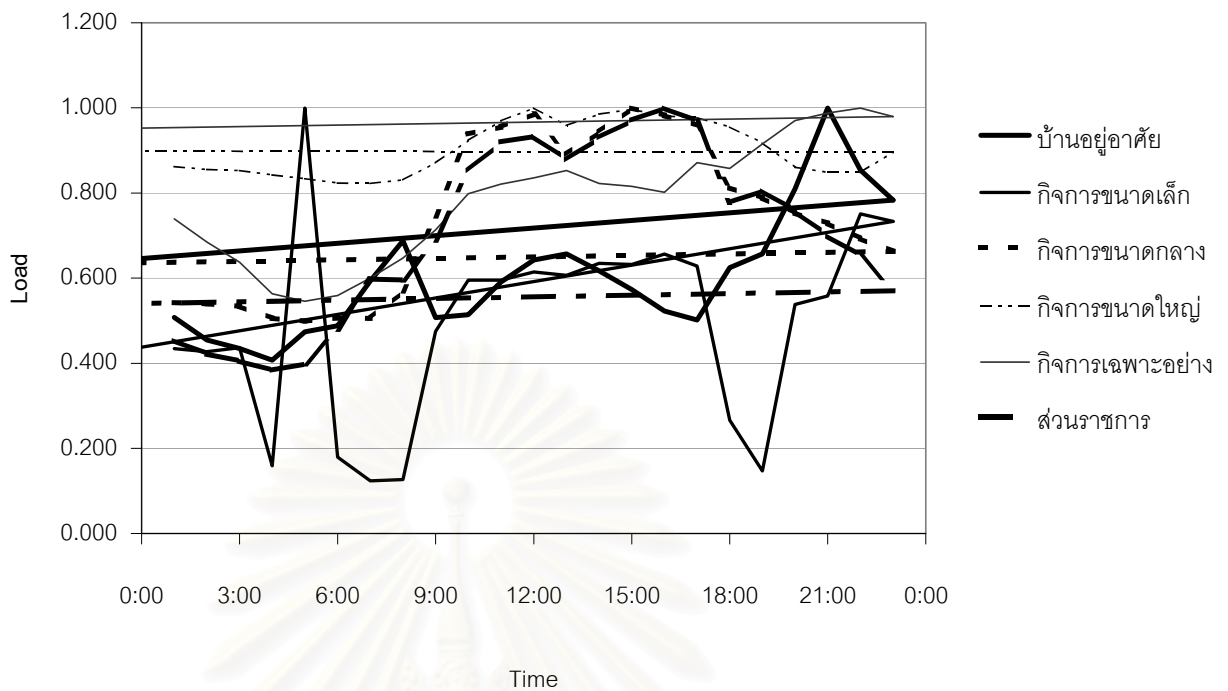
ในขั้นตอนนี้เราจะใช้ข้อมูลจากรายงานลักษณะการใช้ไฟฟ้าในประเทศไทยประจำปี พ.ศ. 2539 ซึ่งจัดทำโดยสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ โดยข้อมูลดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลการประมาณการใช้ไฟของผู้ใช้ในเขตภาคกลางที่เป็นลูกค้าของ กฟภ. ซึ่งได้แบ่งประเภทของผู้ใช้ไฟออกเป็น 7 ประเภท แต่ได้ทำการประมาณการใช้ไฟของผู้ใช้ไว้เพียง 6 ประเภทเท่านั้น โดยผลการประมาณการใช้ไฟของผู้ใช้ทั้ง 6 ประเภทนั้นมีดังนี้

ตาราง ง.1 การประมาณการใช้ไฟของผู้ใช้แต่ละประเภทในเขตภาคกลาง (หน่วย : kW)

เวลา	บ้านอยู่อาศัย	กิจการขนาดเล็ก	กิจการขนาดกลาง	กิจการขนาดใหญ่	กิจการเฉพาะอย่าง	ส่วนราชการ
1:00	317,600	210,124	683,338	1,253,420	51,385	37,144
2:00	284,409	206,920	680,199	1,243,261	47,624	34,581
3:00	271,928	211,341	673,194	1,239,445	44,312	33,250
4:00	254,876	76,899	636,955	1,224,860	39,178	31,447
5:00	296,550	483,898	628,453	1,211,969	37,943	32,684

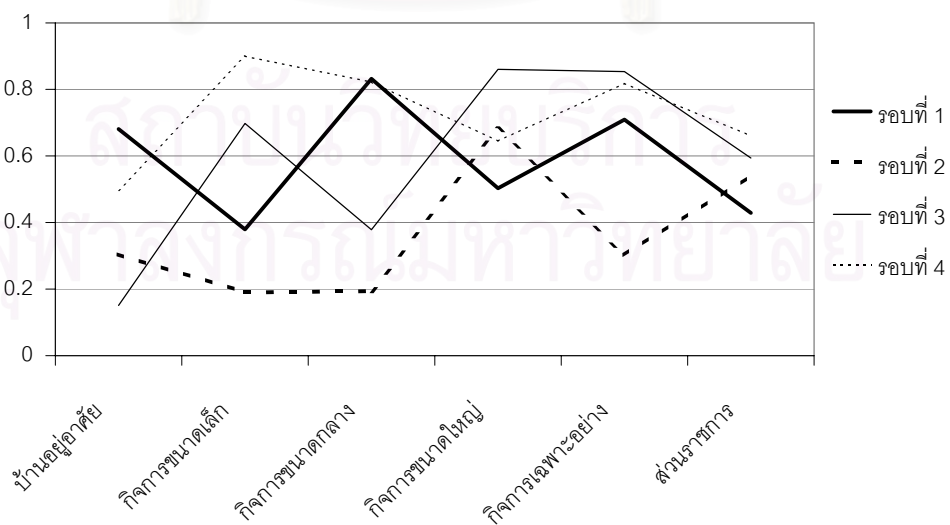
เวลา	บ้านอยู่ อาศัย	กิจการขนาด เล็ก	กิจการขนาด กลาง	กิจการขนาด ใหญ่	กิจการเฉพาะ อย่าง	ส่วน ราชการ
6:00	305,258	86,994	638,206	1,197,091	38,860	39,337
7:00	371,165	59,857	636,543	1,195,208	41,715	49,016
8:00	430,229	61,297	717,432	1,207,368	44,981	48,846
9:00	317,190	229,879	939,269	1,265,889	49,587	56,452
10:00	321,622	287,991	1,182,490	1,342,813	55,501	69,907
11:00	369,621	288,004	1,203,571	1,409,166	57,077	75,422
12:00	402,072	297,280	1,241,586	1,453,497	58,093	76,488
13:00	411,062	293,648	1,122,651	1,393,714	59,288	71,991
14:00	386,144	307,373	1,188,888	1,432,842	57,176	76,253
15:00	358,659	305,900	1,259,998	1,448,172	56,702	79,600
16:00	327,081	317,610	1,238,327	1,425,846	55,727	81,972
17:00	313,857	304,209	1,207,977	1,420,283	60,563	79,448
18:00	390,730	128,936	1,023,746	1,388,481	59,623	63,735
19:00	411,034	71,417	993,992	1,334,333	63,638	66,035
20:00	506,471	260,384	948,666	1,250,716	67,445	62,167
21:00	625,452	269,999	918,813	1,233,344	68,689	57,367
22:00	534,053	363,409	873,246	1,233,375	69,507	53,478
23:00	489,981	354,990	835,068	1,303,261	68,094	46,753
0:00	404,330	211,846	801,414	1,306,058	66,234	44,303

จากค่าโหลดผู้ใช้แต่ละประเภทดังกล่าว เราจะนำค่าโหลดในแต่ละชั่วโมงมาหารด้วย  
ค่าโหลดสูงสุดของผู้ใช้ในประเภทเดียวกัน นั่นคือปรับให้ค่าโหลดของผู้ใช้แต่ละประเภทมี  
ค่าสูงสุดเท่ากัน เราสามารถนำผลที่ได้มาเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้



รูปที่ ๑.๑ รูปร่างโหลดรวมของผู้ใช้แต่ละประเภท

จากโหลดของผู้ใช้แต่ละประเภทที่มีค่าโหลดสูงสุดเท่ากัน เราจะนำผลที่ได้มารวมกันแบบถ่วงน้ำหนัก โดยตัวคูณที่จะนำมาใช้ในการถ่วงน้ำหนักสำหรับผู้ใช้แต่ละประเภคนั้นจะมีค่าไม่เท่ากันและในแต่ละครั้งตัวคูณก็มีค่าไม่เท่ากันด้วยซึ่งเราสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับช่วงที่เป็นไปได้ของตัวคูณดังกล่าวจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 – 1 เท่านั้น ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างที่เป็นไปได้ของตัวคูณที่จะนำมาใช้ในแต่ละรอบ



รูปที่ ๑.๒ ตัวอย่างตัวคูณที่นำมาใช้ถ่วงน้ำหนัก

จากตัวอย่างตัวคุณจะเห็นได้ว่า เมื่อนำตัวคุณกับค่าโหลดของผู้ใช้แต่ละประเภทแล้วนำผลคูณมารวมกัน ค่าโหลดรวมที่ได้ในแต่ละรอบย่อมมีลักษณะแตกต่างกันและเป็นไปได้หลายแบบ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนสุดท้ายนั้นเราจะทำการปรับค่าโหลดรวมที่ได้โดยการหารด้วยค่าโหลดสูงสุด ซึ่งจะทำให้ค่าโหลดสูงสุดเป็น 1

## ง.2 การปรับโหลดให้มีตัวประกอบโหลดตามต้องการ

จากขั้นตอนที่ผ่านมาถึงแม้เราจะสามารถสร้างค่าโหลดให้มีหลายรูปแบบได้ แต่ค่าตัวประกอบโหลดยังมีค่าอย่างสุ่ม ดังนั้นเราจึงต้องปรับโหลดดังกล่าวให้มีตัวประกอบโหลดตามต้องการ โดยวิธีการก็คือ กำหนดโหลดสูงสุดซึ่งมีค่าเป็น 1 ให้มีค่าเท่าเดิม แต่ปรับค่าโหลดในช่วงอื่นๆ ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่ตัวประกอบโหลดที่ได้มีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการ เราจะปรับให้ตัวประกอบโหลดมีค่าน้อยลง โดยการลดโหลดให้มีย่าน้อยลง แต่ถ้าตัวประกอบโหลดที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ต้องการ เราต้องปรับให้ตัวประกอบโหลดมีค่าสูงขึ้น โดยการเพิ่มโหลดให้มีย่าน้อยลง

$L_O(t); t=1, \dots, T$	คือ	โหลดที่ได้ก่อนการปรับ
$L_S(t); t=1, \dots, T$	คือ	โหลดที่ได้หลังการปรับ
$LF_O$	คือ	ตัวประกอบโหลดก่อนการปรับ
$LF_S$	คือ	ตัวประกอบโหลดที่ต้องการ

เนื่องจากค่าโหลดสูงสุดมีค่าเป็น 1 ดังนั้น

$$\sum_{t=1}^{24} L_O(t) = 24 \times LF_O \quad (ง.1)$$

### ง.2.1 การปรับตัวประกอบโหลดให้สูงขึ้น

ในที่นี้เราต้องการปรับค่าของ  $L_O(t)$  ให้เป็น  $L_S(t)$  ซึ่งมีค่าสูงขึ้น วิธีการปรับนั้นเราจะปรับ  $L_O(t)$  ในช่วงที่มีค่าน้อยให้มีค่าสูงขึ้น ส่วน  $L_O(t)$  ในช่วงที่มีค่ามากจะปรับให้มีค่าสูงขึ้นน้อยกว่า จากแนวคิดดังกล่าวเราสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$L_S(t) = L_O(t) + \frac{(1 - L_O(t)) \times (LF_S - LF_O)}{1 - LF_O} \quad (ง.2)$$

จากสมการ (ง.1) และ (ง.2) จะพิสูจน์ได้ว่า

$$\sum_{t=1}^{24} L_S(t) = 24 \times LF_S \quad (ง.3)$$

$$LF_S(t) \leq 1; \quad t = 1, \dots, T \quad (จ.4)$$

### จ.2.2 การปรับตัวประกอบโหลดให้มีค่าน้อยลง

ในที่นี้เราต้องการปรับค่าของ  $L_O(t)$  ให้เป็น  $L_S(t)$  ซึ่งมีค่าน้อยลง วิธีการปรับเราจะยกกำลังค่าโหลดในแต่ละชั่วโมงเพื่อให้โหลดมีค่าลดลง นั่นคือ

$$L_S(t) = L_O^k(t); \quad k > 1 \quad (จ.5)$$

ในการหาค่า  $k$  นั้นเราจะเพิ่มค่า  $k$  ไปจนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสมซึ่งจะสอดคล้องกับสมการต่อไปนี

$$\sum_{t=1}^{24} L_O^k(t) = 24 \times LF_S \quad (จ.6)$$

จากสมการ (จ.6) สามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$0 \leq LF_S(t) \leq 1; \quad t = 1, \dots, T \quad (จ.7)$$

### จ.3 การปรับโหลดให้มีค่าสูงสุดตามต้องการ

จากขั้นตอนที่ผ่านมาเมื่อได้โหลดที่มีตัวประกอบโหลดตามที่กำหนดแล้ว เราจะทำการปรับโหลดให้มีค่าสูงสุดตามที่เราต้องการต่อ โดยการคูณค่าโหลดในทุกๆ ชั่วโมงด้วยค่าโหลดสูงสุดที่เราต้องการ ดังนี้

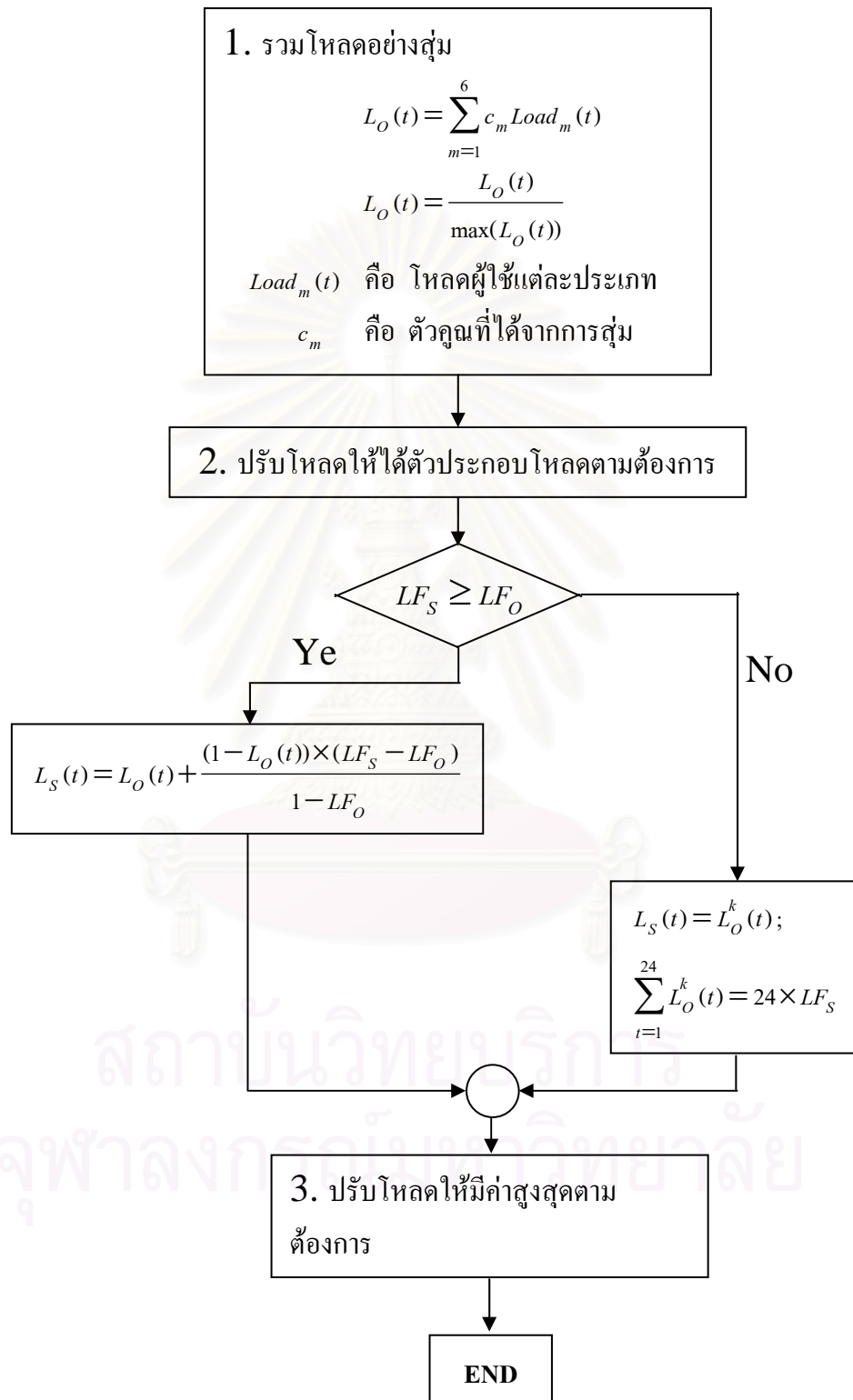
$$L_S(t) = L_S(t) \times Peak; \quad t = 1, \dots, T \quad (จ.8)$$

โดยที่  $Peak$  คือ ค่าโหลดสูงสุดที่ต้องการ



#### ง.4 สรุปขั้นตอน

จากขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมด เราสามารถนำมาเขียนแผนผังแสดงการทำงานได้ดังนี้



รูปที่ ง.3 แผนผังการสร้างโหลดอย่างสุ่มตามตัวประกอบโหลดที่กำหนด

## ภาคผนวก จ

## ผลการวิเคราะห์ระบบ

## จ.1 ผลการทดสอบของระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อน

ตารางที่ จ.1 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบเมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้		กำลังสูญเสีย (kW)		
	P (MW)	Q (MVar)	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
1	1.58	0.9	6.25	9.52	15.87
2	1.56	0.9	6.13	9.34	15.57
3	1.5	0.9	5.79	8.81	14.68
4	1.52	0.9	5.90	8.99	14.97
5	1.72	0.98	7.41	11.29	18.84
6	2.06	1.06	10.14	15.47	25.87
7	1.58	0.88	6.18	9.42	15.70
8	1.54	0.86	5.88	8.96	14.93
9	1.54	0.8	5.69	8.67	14.45
10	1.52	0.8	5.58	8.50	14.15
11	1.56	0.8	5.81	8.85	14.75
12	1.46	0.72	5.01	7.63	12.70
13	1.48	0.74	5.18	7.88	13.12
14	1.56	0.8	5.81	8.85	14.75
15	1.56	0.8	5.81	8.85	14.75
16	1.64	0.8	6.30	9.59	15.98
17	1.68	0.8	6.55	9.97	16.63
18	1.7	0.82	6.74	10.26	17.11
19	2.04	1.02	9.83	15.00	25.08
20	2.06	1.08	10.22	15.59	26.08
21	2.06	1.12	10.39	15.85	26.51

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้		กำลังสูญเสีย (kW)		
	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
22	1.92	1.06	9.09	13.87	23.17
23	1.88	1	8.57	13.07	21.83
24	1.8	0.98	7.94	12.10	20.21

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.2 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบเมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้		กำลังสูญเสีย (kW)		
	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
1	1.8	0.95	7.83	11.94	19.93
2	1.8	0.95	7.83	11.94	19.93
3	1.8	0.95	7.83	11.94	19.93
4	1.8	0.95	7.83	11.94	19.93
5	1.95	0.95	8.89	13.56	22.66
6	2.35	1	12.32	18.81	31.50
7	1.9	0.95	8.53	13.01	21.72
8	1.75	0.95	7.50	11.42	19.06
9	1.85	0.95	8.18	12.46	20.81
10	1.9	0.95	8.53	13.01	21.72
11	1.95	0.95	8.89	13.56	22.66
12	1.9	0.95	8.53	13.01	21.72
13	1.9	0.95	8.53	13.01	21.72
14	1.8	0.7	7.05	10.75	17.92
15	1.85	0.65	7.27	11.08	18.48
16	1.85	0.7	7.39	11.27	18.80
17	2.1	0.95	10.04	15.31	25.60
18	2.15	0.95	10.44	15.93	26.64
19	2.45	1.05	13.42	20.49	34.35
20	2.55	1.25	15.23	23.27	39.05
21	2.35	1	12.32	18.81	31.50
22	2.3	1	11.88	18.14	30.37
23	2.15	1	10.62	16.21	27.11
24	2.05	1	9.83	15.00	25.08

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu

ตารางที่ จ.3 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบเมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันทำงานของวงจรสายป้อนที่ 10

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้		กำลังสูญเสีย (kW)		
	P (MW)	Q (MVar)	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
1	2.42	1.06	5.94	7.56	10.20
2	2.4	1.06	5.86	7.46	10.06
3	2.36	1.08	5.73	7.30	9.85
4	2.32	1.08	5.57	7.10	9.57
5	2.46	1.16	6.29	8.01	10.82
6	2.42	1.14	6.09	7.75	10.47
7	2.32	1.08	5.57	7.10	9.57
8	2.64	1.36	7.51	9.56	12.92
9	3.02	1.64	10.06	12.80	17.36
10	3.1	1.64	10.47	13.33	18.08
11	3.22	1.72	11.35	14.45	19.61
12	3.1	1.5	10.10	12.86	17.42
13	3.2	1.58	10.84	13.81	18.72
14	3.24	1.58	11.06	14.09	19.10
15	3.2	1.5	10.63	13.54	18.35
16	3.1	1.56	10.25	13.05	17.70
17	2.9	1.44	8.92	11.36	15.38
18	3.08	1.72	10.60	13.49	18.30
19	3.42	2.04	13.51	17.20	23.39
20	3.32	1.94	12.59	16.03	21.79
21	3.32	1.74	11.96	15.23	20.68
22	3.2	1.68	11.12	14.16	19.21
23	2.94	1.46	9.17	11.68	15.82
24	2.64	1.18	7.12	9.06	12.24

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu

ตารางที่ จ.4 ระดับความเป็นไปได้ของกำลังสูญเสียในสายป้อนของระบบทดสอบเมื่อใช้โปรแกรม TPLF ในวันหยุดของวงจรสายป้อนที่ 10

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้		กำลังสูญเสีย (kW)		
	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )	ค่าต่ำสุด	ค่ากลาง	ค่าสูงสุด
1	2.5	1.15	6.44	8.20	11.08
2	2.4	1.1	5.93	7.55	10.19
3	2.35	1.1	5.73	7.29	9.84
4	2.25	1.1	5.34	6.80	9.17
5	2.4	1.1	5.93	7.55	10.19
6	2.35	1.1	5.73	7.29	9.84
7	2.25	1	5.16	6.57	8.85
8	2.35	1.05	5.64	7.18	9.68
9	2.15	1.1	4.96	6.32	8.52
10	2.5	1.2	6.54	8.33	11.25
11	2.55	1.3	6.97	8.88	12.00
12	2.35	1.05	5.64	7.18	9.68
13	2.5	1.15	6.44	8.20	11.08
14	2.65	1.2	7.20	9.17	12.39
15	2.6	1.25	7.08	9.02	12.19
16	2.6	1.15	6.88	8.76	11.83
17	2.5	1.15	6.44	8.20	11.08
18	2.7	1.55	8.25	10.50	14.22
19	3.15	1.95	11.69	14.88	20.22
20	3.15	1.9	11.53	14.67	19.93
21	3.15	1.75	11.06	14.08	19.10
22	2.9	1.55	9.20	11.72	15.88
23	2.75	1.35	7.99	10.17	13.76
24	2.75	1.25	7.77	9.89	13.37

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu

## จ.2 ผลการทดสอบของผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสที่มีต่อกำลังสูญเสีย

ตารางที่ จ.5 ผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสในวงจรสายป้อนที่ 2

ตัวประกอบความ ไม่สมดุล (%)	เฟส A		เฟส B		เฟส C		กำลังสูญเสีย	
	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(kW)	(%)
0	0.70	1.00	0.70	1.00	0.70	1.00	15.05	100.00
2	0.71	1.00	0.70	0.99	0.69	0.98	15.05	99.97
6	0.71	1.00	0.71	1.00	0.67	0.94	15.05	100.01
6	0.72	1.00	0.71	0.99	0.67	0.94	15.05	100.01
6	0.72	1.00	0.70	0.98	0.68	0.94	15.05	100.01
6	0.72	1.00	0.70	0.97	0.68	0.94	15.05	100.02
6	0.72	1.00	0.70	0.96	0.68	0.94	15.05	100.02
6	0.73	1.00	0.69	0.95	0.68	0.94	15.06	100.03
6	0.73	1.00	0.69	0.94	0.69	0.94	15.06	100.05
10	0.72	1.00	0.72	1.00	0.65	0.90	15.07	100.10
10	0.73	1.00	0.71	0.98	0.66	0.90	15.06	100.09
10	0.73	1.00	0.70	0.96	0.66	0.90	15.06	100.09
10	0.74	1.00	0.70	0.94	0.67	0.90	15.07	100.10
10	0.74	1.00	0.69	0.92	0.67	0.90	15.07	100.13
10	0.75	1.00	0.68	0.90	0.68	0.90	15.08	100.16
20	0.75	1.00	0.75	1.00	0.60	0.80	15.13	100.53
20	0.76	1.00	0.74	0.98	0.60	0.80	15.13	100.50
20	0.76	1.00	0.73	0.96	0.61	0.80	15.12	100.48
20	0.77	1.00	0.72	0.94	0.61	0.80	15.12	100.47
20	0.77	1.00	0.71	0.92	0.62	0.80	15.12	100.47
20	0.78	1.00	0.70	0.90	0.62	0.80	15.12	100.48
20	0.78	1.00	0.69	0.88	0.63	0.80	15.13	100.51
20	0.79	1.00	0.68	0.86	0.63	0.80	15.13	100.55
20	0.80	1.00	0.67	0.84	0.64	0.80	15.14	100.60
20	0.80	1.00	0.66	0.82	0.64	0.80	15.15	100.66
20	0.81	1.00	0.65	0.80	0.65	0.80	15.16	100.74

ตัวประกอบความ ไม่สมดุล (%)	เฟส A		เฟส B		เฟส C		กำลังสูญเสีย	
	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(kW)	(%)
30	0.78	1.00	0.78	1.00	0.54	0.70	15.25	101.29
30	0.79	1.00	0.75	0.95	0.55	0.70	15.23	101.18
30	0.81	1.00	0.73	0.90	0.57	0.70	15.22	101.14
30	0.82	1.00	0.70	0.85	0.58	0.70	15.23	101.18
30	0.84	1.00	0.67	0.80	0.59	0.70	15.25	101.30
30	0.86	1.00	0.64	0.75	0.60	0.70	15.28	101.53
30	0.88	1.00	0.61	0.70	0.61	0.70	15.34	101.89
40	0.81	1.00	0.81	1.00	0.48	0.60	15.43	102.54
40	0.82	1.00	0.78	0.95	0.49	0.60	15.41	102.38
40	0.84	1.00	0.76	0.90	0.50	0.60	15.40	102.29
40	0.86	1.00	0.73	0.85	0.51	0.60	15.39	102.28
40	0.88	1.00	0.70	0.80	0.53	0.60	15.41	102.37
40	0.89	1.00	0.67	0.75	0.54	0.60	15.44	102.56
40	0.91	1.00	0.64	0.70	0.55	0.60	15.48	102.86
40	0.93	1.00	0.61	0.65	0.56	0.60	15.55	103.29
40	0.95	1.00	0.57	0.60	0.57	0.60	15.63	103.87
50	0.84	1.00	0.84	1.00	0.42	0.50	15.70	104.30
50	0.88	1.00	0.79	0.90	0.44	0.50	15.65	103.98
50	0.91	1.00	0.73	0.80	0.46	0.50	15.65	104.01
50	0.95	1.00	0.67	0.70	0.48	0.50	15.72	104.46
50	1.00	1.00	0.60	0.60	0.50	0.50	15.87	105.47
50	1.05	1.00	0.53	0.50	0.53	0.50	16.13	107.19
60	0.88	1.00	0.88	1.00	0.35	0.40	16.07	106.74
60	0.91	1.00	0.82	0.90	0.37	0.40	16.01	106.39
60	0.95	1.00	0.76	0.80	0.38	0.40	16.01	106.39
60	1.00	1.00	0.70	0.70	0.40	0.40	16.08	106.86
60	1.05	1.00	0.63	0.60	0.42	0.40	16.24	107.92
60	1.11	1.00	0.55	0.50	0.44	0.40	16.52	109.79
60	1.17	1.00	0.47	0.40	0.47	0.40	16.96	112.67



ตัวประกอบความ ไม่สมดุล (%)	เฟส A		เฟส B		เฟส C		กำลังสูญเสีย	
	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(kW)	(%)
70	0.91	1.00	0.91	1.00	0.27	0.30	16.56	110.01
70	0.95	1.00	0.86	0.90	0.29	0.30	16.51	109.68
70	1.00	1.00	0.80	0.80	0.30	0.30	16.52	109.73
70	1.05	1.00	0.74	0.70	0.32	0.30	16.60	110.28
70	1.11	1.00	0.66	0.60	0.33	0.30	16.78	111.48
70	1.17	1.00	0.58	0.50	0.35	0.30	17.09	113.56
70	1.24	1.00	0.49	0.40	0.37	0.30	17.58	116.82
70	1.31	1.00	0.39	0.30	0.39	0.30	18.31	121.64

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.6 ผลกระทบจากความไม่สมดุลของโหลดในแต่ละเฟสในวงจรสายป้อนที่ 10

ตัวประกอบความ ไม่สมดุล (%)	เฟส A		เฟส B		เฟส C		กำลังสูญเสีย	
	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(kW)	(%)
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	11.316	100.00
2	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	11.316	100.00
6	1.02	1.00	1.02	1.00	0.96	0.94	11.321	100.05
6	1.02	1.00	1.01	0.99	0.96	0.94	11.320	100.04
6	1.03	1.00	1.01	0.98	0.97	0.94	11.320	100.04
6	1.03	1.00	1.00	0.97	0.97	0.94	11.320	100.04
6	1.03	1.00	0.99	0.96	0.97	0.94	11.320	100.04
6	1.04	1.00	0.99	0.95	0.98	0.94	11.320	100.04
6	1.04	1.00	0.98	0.94	0.98	0.94	11.321	100.05
10	1.03	1.00	1.03	1.00	0.93	0.90	11.331	100.13
10	1.04	1.00	1.02	0.98	0.94	0.90	11.329	100.11
10	1.05	1.00	1.01	0.96	0.94	0.90	11.328	100.10
10	1.06	1.00	0.99	0.94	0.95	0.90	11.328	100.11
10	1.06	1.00	0.98	0.92	0.96	0.90	11.329	100.12
10	1.07	1.00	0.96	0.90	0.96	0.90	11.332	100.14
20	1.07	1.00	1.07	1.00	0.86	0.80	11.376	100.54
20	1.08	1.00	1.06	0.98	0.86	0.80	11.371	100.49
20	1.09	1.00	1.04	0.96	0.87	0.80	11.368	100.46
20	1.09	1.00	1.03	0.94	0.88	0.80	11.365	100.44
20	1.10	1.00	1.01	0.92	0.88	0.80	11.364	100.42
20	1.11	1.00	1.00	0.90	0.89	0.80	11.364	100.43
20	1.12	1.00	0.99	0.88	0.90	0.80	11.365	100.44
20	1.13	1.00	0.97	0.86	0.90	0.80	11.368	100.46
20	1.14	1.00	0.95	0.84	0.91	0.80	11.373	100.50
20	1.15	1.00	0.94	0.82	0.92	0.80	11.379	100.56
20	1.15	1.00	0.92	0.80	0.92	0.80	11.387	100.63
30	1.11	1.00	1.11	1.00	0.78	0.70	11.468	101.35
30	1.13	1.00	1.08	0.95	0.79	0.70	11.451	101.20

ตัวประกอบความ ไม่สมดุล (%)	เฟส A		เฟส B		เฟส C		กำลังสูญเสีย	
	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(kW)	(%)
30	1.15	1.00	1.04	0.90	0.81	0.70	11.443	101.12
30	1.18	1.00	1.00	0.85	0.82	0.70	11.443	101.13
30	1.20	1.00	0.96	0.80	0.84	0.70	11.454	101.22
30	1.22	1.00	0.92	0.75	0.86	0.70	11.475	101.41
30	1.25	1.00	0.88	0.70	0.88	0.70	11.510	101.71
40	1.15	1.00	1.15	1.00	0.69	0.60	11.608	102.58
40	1.18	1.00	1.12	0.95	0.71	0.60	11.586	102.39
40	1.20	1.00	1.08	0.90	0.72	0.60	11.572	102.26
40	1.22	1.00	1.04	0.85	0.73	0.60	11.567	102.22
40	1.25	1.00	1.00	0.80	0.75	0.60	11.572	102.27
40	1.28	1.00	0.96	0.75	0.77	0.60	11.593	102.45
40	1.30	1.00	0.91	0.70	0.78	0.60	11.623	102.71
40	1.33	1.00	0.87	0.65	0.80	0.60	11.668	103.11
40	1.36	1.00	0.82	0.60	0.82	0.60	11.730	103.66
50	1.20	1.00	1.20	1.00	0.60	0.50	11.812	104.39
50	1.25	1.00	1.13	0.90	0.63	0.50	11.767	103.99
50	1.30	1.00	1.04	0.80	0.65	0.50	11.763	103.95
50	1.36	1.00	0.95	0.70	0.68	0.50	11.805	104.33
50	1.43	1.00	0.86	0.60	0.71	0.50	11.911	105.26
50	1.50	1.00	0.75	0.50	0.75	0.50	12.100	106.93
60	1.25	1.00	1.25	1.00	0.50	0.40	12.095	106.88
60	1.30	1.00	1.17	0.90	0.52	0.40	12.045	106.45
60	1.36	1.00	1.09	0.80	0.55	0.40	12.038	106.38
60	1.43	1.00	1.00	0.70	0.57	0.40	12.081	106.76
60	1.50	1.00	0.90	0.60	0.60	0.40	12.192	107.74
60	1.58	1.00	0.79	0.50	0.63	0.40	12.393	109.52
60	1.67	1.00	0.67	0.40	0.67	0.40	12.712	112.34
70	1.30	1.00	1.30	1.00	0.39	0.30	12.474	110.24
70	1.36	1.00	1.23	0.90	0.41	0.30	12.426	109.81

ตัวประกอบความ ไม่สมดุล (%)	เฟส A		เฟส B		เฟส C		กำลังสูญเสีย	
	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(MW)	(P.U.)	(kW)	(%)
70	1.43	1.00	1.14	0.80	0.43	0.30	12.421	109.77
70	1.50	1.00	1.05	0.70	0.45	0.30	12.474	110.24
70	1.58	1.00	0.95	0.60	0.47	0.30	12.601	111.36
70	1.67	1.00	0.83	0.50	0.50	0.30	12.827	113.36
70	1.76	1.00	0.71	0.40	0.53	0.30	13.187	116.54
70	1.88	1.00	0.56	0.30	0.56	0.30	13.726	121.30

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### จ.3 ผลการทดสอบของผลกระทบของตัวประกอบกำลังที่มีต่อกำลังสูญเสีย

ตารางที่ จ.7 ผลกระทบของตัวประกอบกำลังของวงจรสายป้อนที่ 2

ตัวประกอบ กำลัง	กำลังสูญเสีย					
	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	(kW)	(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)
0.50	37.38	307.90	55.68	400.94	76.24	628.00
0.55	31.54	259.80	46.02	331.39	61.33	505.15
0.60	27.09	223.17	38.66	278.38	49.99	411.77
0.65	23.64	194.69	32.93	237.13	41.19	339.27
0.70	20.90	172.11	28.39	204.41	34.22	281.86
0.75	18.69	153.97	24.73	178.09	28.62	235.74
0.80	16.88	139.07	21.73	156.48	24.04	197.97
0.85	15.38	126.72	19.25	138.57	20.24	166.74
0.90	14.13	116.36	17.16	123.57	17.07	140.63
0.95	13.06	107.59	15.40	110.87	14.40	118.60
0.98	12.50	102.94	14.47	104.16	12.99	107.03
1.00	12.14	100.00	13.89	100.00	12.14	100.00

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.0 pu

ตารางที่ จ.8 ผลกระทบของตัวประกอบกำลังของวงจรสายป้อนที่ 10

ตัวประกอบ กำลัง	กำลังสูญเสีย					
	กรณี 1		กรณี 2		กรณี 3	
	(kW)	(%)	(kW)	(%)	(kW)	(%)
0.50	33.03	311.21	42.71	401.09	57.99	546.39
0.55	27.85	262.35	35.30	331.47	46.77	440.61
0.60	23.90	225.14	29.65	278.42	38.31	360.94
0.65	20.82	196.20	25.26	237.15	31.79	299.52
0.70	18.39	173.26	21.77	204.42	26.66	251.19
0.75	16.43	154.76	18.96	178.03	22.55	212.47
0.80	14.83	139.68	16.67	156.49	19.22	181.06
0.85	13.49	127.14	14.76	138.59	16.46	155.11
0.90	12.38	116.62	13.16	123.58	14.17	133.49
0.95	11.43	107.70	11.81	110.88	12.24	115.32
0.98	10.93	102.98	11.09	104.17	11.23	105.80
1.00	10.61	100.00	10.65	100.00	10.61	100.00

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.0 pu

#### จ.4 ผลการทดสอบของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบโหลด

ตารางที่ จ.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบโหลดของวงจรสายป้อนที่ 2

ตัวประกอบโหลด (%)	ตัวประกอบกำลังสูญเสีย (%)
0.9501	0.905
0.7311	0.5708
0.6068	0.4602
0.986	0.9713
0.8913	0.7932
0.7621	0.611
0.9565	0.9104
0.5185	0.3239
0.8214	0.6876
0.9447	0.8867
0.6154	0.4347
0.7919	0.6279
0.9218	0.8424
0.7382	0.5676
0.6763	0.4933
0.9057	0.8091
0.9355	0.8636
0.9169	0.8265
0.9103	0.8104
0.8936	0.7775

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu

ตารางที่ จ.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับตัวประกอบโหลดของวงจรสายป้อนที่ 10

ตัวประกอบโหลด (%)	ตัวประกอบกำลังสูญเสีย (%)
0.9501	0.9174
0.7311	0.6294
0.6068	0.5119
0.986	0.974
0.8913	0.8132
0.7621	0.6487
0.9565	0.918
0.5185	0.4178
0.8214	0.6976
0.9447	0.8932
0.6154	0.4868
0.7919	0.6591
0.9218	0.8491
0.7382	0.5881
0.6763	0.5304
0.9057	0.8179
0.9355	0.8697
0.9169	0.8353
0.9103	0.8226
0.8936	0.7907

หมายเหตุ : กำหนดให้แรงดันเริ่มต้นที่ Slack Bus เป็น 1.05 pu



### จ.5 ผลการทดสอบกำลังสูญเสียในระบบทดสอบที่คำนวณด้วยวิธีพีชชี

ตารางที่ จ.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับ โหลดของหม้อแปลงทดสอบ

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าที่ใช้		กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW)	
	P (kW)	Q (kVAr)	ตัวเลขพีชชี	ตัวเลขค่าเดียว
1	131.58	98.68	[12.02 ; 14.72 ; 17.95]	14.77
2	126.32	94.74	[11.08 ; 13.57 ; 16.54]	13.61
3	123.68	92.76	[10.62 ; 13.01 ; 15.86]	13.05
4	118.42	88.82	[9.74 ; 11.93 ; 14.54]	11.96
5	126.32	94.74	[11.08 ; 13.57 ; 16.54]	13.61
6	123.68	92.76	[10.62 ; 13.01 ; 15.86]	13.05
7	118.42	88.82	[9.74 ; 11.93 ; 14.54]	11.96
8	123.68	92.76	[10.62 ; 13.01 ; 15.86]	13.05
9	113.16	84.87	[8.89 ; 10.89 ; 13.27]	10.92
10	131.58	98.68	[12.02 ; 14.72 ; 17.95]	14.77
11	134.21	100.66	[12.50 ; 15.32 ; 18.67]	15.36
12	123.68	92.76	[10.62 ; 13.01 ; 15.86]	13.05
13	131.58	98.68	[12.02 ; 14.72 ; 17.95]	14.77
14	139.47	104.61	[13.50 ; 16.54 ; 20.16]	16.59
15	136.84	102.63	[13.00 ; 15.92 ; 19.41]	15.97
16	136.84	102.63	[13.00 ; 15.92 ; 19.41]	15.97
17	131.58	98.68	[12.02 ; 14.72 ; 17.95]	14.77
18	142.11	106.58	[14.02 ; 17.17 ; 20.93]	17.22
19	165.79	124.34	[19.08 ; 23.38 ; 28.49]	23.44
20	165.79	124.34	[19.08 ; 23.38 ; 28.49]	23.44
21	165.79	124.34	[19.08 ; 23.38 ; 28.49]	23.44
22	152.63	114.47	[16.17 ; 19.81 ; 24.15]	19.87
23	144.74	108.55	[14.54 ; 17.82 ; 21.71]	17.87
24	144.74	108.55	[14.54 ; 17.82 ; 21.71]	17.87

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิริชัย วัฒนโสภณ เกิดวันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2543 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย