


กำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก  
เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยแนวทางเชิงกำหนด



นางสาวชรินทร์ พานิชชาติ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1413-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMAL GENERATED POWER AND LOCATIONS OF DISTRIBUTED GENERATION  
FOR REDUCING DISTRIBUTION LOSS BASED ON DETERMINISTIC APPROACH

Miss. Charinrat Panitchart

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 2004

ISBN 974-53-1413-7



ชรินรัตน์ พานิชชาติ : กำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยแนวทางเชิงกำหนด (OPTIMAL GENERATED POWER AND LOCATIONS OF DISRIBUTED GENERATION FOR REDUCING DISTRIBUTION LOSS BASED ON DETERMINISTIC APPROACH) อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 116 หน้า. ISBN 974-53-1413-7.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ในกรณีที่มีการระบุจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะทำการติดตั้งไว้แล้ว เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้แนวทางเชิงกำหนด โดยแบ่งโครงสร้างของวิทยานิพนธ์ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกอธิบายให้เห็นถึงบทบาทความสำคัญและผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อระบบจำหน่าย ส่วนที่สองเป็นการนำหลักการแก้ปัญหาที่เหมาะสมแบบกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้นมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และส่วนที่สามนำเสนอผลการทดสอบโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นกับระบบจำหน่ายทดสอบจำนวน 4 ระบบซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันไป ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้กำลังสูญเสียในระบบลดลงได้มากกว่า 70% เทียบกับกรณีฐานก่อนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ในทุกกรณีศึกษา แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิติ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา 2547.....

## 4570272421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: DISTRIBUTED GENERATION / DISTRIBUTION LOSS / DETERMINISTIC APPROACH

CHARINRAT PANITCHART : OPTIMAL GENERATED POWER AND LOCATIONS OF DISTRIBUTED GENERATION FOR REDUCING DISTRIBUTION LOSS BASED ON DETERMINISTIC APPROACH. THESIS ADVISOR : NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 116 pp. ISBN 974-53-1413-7.

This thesis presents a method to determine optimal generated power and locations of distributed generation in the case when the total number of units to be installed has been specified for reducing distribution loss based on deterministic approach. The contents are divided into three parts. Firstly, the roles and impacts of distributed generation on the distribution systems have been described. Following which solution methods to mixed-integer nonlinear programming which can be applied to the formulated distribution loss reduction problem has been proposed. Lastly, numerical test results from various case studies using four different distribution test systems have been presented. The results obtained confirm the effectiveness of the proposed algorithm in which power losses in the distribution systems in all case studies can be reduced by more than 70% compared to losses obtained from the respective base cases before the distributed generations have been installed. The computational technique presented here can readily be deployed in practice.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Electrical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year..2004.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ดิฉันใคร่ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ พร้อมทั้งแรงกระตุ้นและแรงบันดาลใจในการทำวิจัย ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ และ คุณ พงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ซึ่งได้กรุณาสละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบ และได้ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้ความรู้ในการศึกษาและการนำไปใช้เกี่ยวกับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อน ๆ และคนรอบตัวผู้วิจัยทุก ๆ คน ในห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้ากำลังทุก ๆ คน สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา ขอขอบคุณที่ทำให้วันและเวลาของผู้วิจัยผ่านไปอย่างมีความหมาย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติ ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ .....	4
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	6
2.1 คำจำกัดความของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	6
2.2 เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก .....	7
2.3 ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย.....	8
2.3.1 ผลกระทบเนื่องจากขนาดกำลังการผลิต.....	8
2.3.2 ผลกระทบเนื่องจากตำแหน่ง .....	10
2.4 ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อสมรรถนะการทำงานของระบบจำหน่าย	12
2.4.1 ผลกระทบต่อการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า .....	12
2.4.2 ผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า.....	14
2.4.3 ผลกระทบต่อระดับกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า .....	16
2.4.4 ผลกระทบต่อความปลอดภัยในการทำงาน .....	17
2.4.5 ผลกระทบต่อระดับความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่าย .....	17
2.5 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ .....	18

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 3 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้น 20	
3.1 ปัญหาการกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้น .....	20
3.2 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหา MINLP .....	21
3.3 แนวทางการแก้ปัญหา MINLP .....	22
3.4 วิธีบรันซ์แอนด์บาร์ด .....	24
3.4.1 การวนซ้ำของอัลกอริทึม .....	29
3.5 กำหนดการเชิงกำลังสองสี่บเนื่อง .....	38
บทที่ 4 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งและขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย.....	44
4.1 นิยามตัวแปร .....	44
4.2 รูปแบบของปัญหา.....	45
4.2 การประยุกต์ใช้หลักการของวิธีบรันซ์แอนด์บาร์ดร่วมกับวิธี SQP .....	47
4.2.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร .....	48
4.2.2 กระบวนการแก้ปัญหา.....	49
บทที่ 5 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม .....	51
5.1 ขอบเขตของระบบทดสอบและโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ.....	51
5.2 โครงสร้างของระบบทดสอบ .....	51
5.2.1 ระบบจำหน่ายที่ 1 .....	52
5.2.2 ระบบจำหน่ายที่ 2 .....	52
5.2.3 ระบบจำหน่ายที่ 3 .....	53
5.2.4 ระบบจำหน่ายที่ 4 .....	54
5.3 ขั้นตอนในการทดสอบ .....	54
5.4 ผลการทดสอบโปรแกรม .....	55
5.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึม .....	58
5.5.1 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรม.....	58
5.5.2 วิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของอัลกอริทึม .....	61
5.6 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับผลลัพธ์จากงานวิจัยในอดีต .....	62
บทที่ 6 บทสรุป และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม .....	64



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6.1 สรุป.....	64
6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไปในอนาคต .....	65
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก .....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	116



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ญ

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระดับกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่อนุญาตให้เกิดขึ้นได้ ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992.....	15
ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 1.....	56
ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 2.....	56
ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 3.....	57
ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 4.....	57



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

๗

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 แบบจำลองอย่างง่ายของระบบจำหน่าย.....	8
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ SPP กับกำลังสูญเสียรวม (เทียบกับกรณีไม่มี SPP) ในระบบจำหน่าย.....	10
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ SPP กับกำลังสูญเสียรวม (เทียบกับกรณีไม่มี SPP) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	11
รูปที่ 2.4 การรบกวนประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดันบนสายป้อนของระบบจำหน่ายเมื่อมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อจากหม้อแปลงปรับแก้ได้.....	13
รูปที่ 2.5 การเพิ่มระดับกระแสลัดวงจรเนื่องจากกระแสผิดพ่วงสมทบจาก DG ยูนิตที่ 1 2 และ 3 ทำให้การประสานงานระหว่างฟิวส์และเบรกเกอร์ผิดพลาด.....	16
รูปที่ 3.1 ปัญหาในโหนดแรกของแผนภาพต้นไม้.....	25
รูปที่ 3.2 การหาขอบเขตล่างของปัญหาตั้งต้นโดยการแก้ปัญหา $P_0$ .....	26
รูปที่ 3.3 การแตกกิ่งของปัญหา $P_0$ .....	28
รูปที่ 3.4 การหาขอบเขตล่างของปัญหาย่อย $P_1$ และ $P_2$ .....	29
รูปที่ 3.5 การแตกกิ่งปัญหา $P_1$ ออกเป็นปัญหาย่อย $P_{11}$ และ $P_{12}$ .....	30
รูปที่ 3.6 การตัดปัญหา $P_1$ และ $P_2$ ออกจากการพิจารณาเมื่อปัญหาทั้งสองเป็นเฟรอมหรือไม่สามารถหาผลเฉลยได้.....	31
รูปที่ 3.7 ปัญหา $P_1$ เป็นเฟรอมและปัญหา $P_2$ ไม่เป็นเฟรอมและสามารถหาผลเฉลยได้.....	32
รูปที่ 3.8 การตัดปัญหา $P_1$ ออกจากการพิจารณาเมื่อเป็นเฟรอมและการแตกกิ่งปัญหา $P_2$ ออกเป็นปัญหาย่อยเมื่อไม่เป็นเฟรอมและสามารถหาผลเฉลยได้.....	33
รูปที่ 3.9 การตัดปัญหา $P_{21}$ และ $P_{22}$ ออกจากการพิจารณาเมื่อปัญหาทั้งสองเป็นเฟรอม.....	34
รูปที่ 3.10 การตัดปัญหา $P_1$ ออกจากการพิจารณาเนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยได้และการแตกกิ่งปัญหา $P_2$ ออกเป็นปัญหาย่อยเนื่องจากไม่เป็นเฟรอมและสามารถหาผลเฉลยได้.....	34
รูปที่ 3.11 ทั้งปัญหา $P_1$ และ $P_2$ ถูกวิเคราะห์ว่าไม่เป็นเฟรอมและสามารถหาผลเฉลยได้.....	35
รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงการทำงานของวิธีbranch and bound.....	37
รูปที่ 3.13 การหาจุดตัดศูนย์ของฟังก์ชันไม่เชิงเส้นโดยใช้วิธีนิวตัน.....	38
รูปที่ 3.14 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธี SQP.....	42

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายที่ 1.....	52
รูปที่ 5.2 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายที่ 2.....	52
รูปที่ 5.3 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายที่ 3.....	53
รูปที่ 5.4 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบจำหน่ายที่ 4.....	54
รูปที่ 5.7 ระบบจำหน่ายที่ 1 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 ตัว .....	59
รูปที่ 5.8 ระบบจำหน่ายที่ 2 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว .....	59
รูปที่ 5.9 ระบบจำหน่ายที่ 3 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว .....	60
รูปที่ 5.10 ระบบจำหน่ายที่ 4 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว .....	61



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีอัตราความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อรองรับการเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมและการพาณิชย์เพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ประกอบกับความยากลำบากในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ที่จำเป็นต้องใช้พื้นที่จำนวนมากในการก่อสร้าง อีกทั้งยังต้องการการวางแผนล่วงหน้าเป็นระยะเวลานาน และต้องใช้งบประมาณในการลงทุนสูง ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้กระบวนการผลิตพลังงานโดยการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Distributed Generation, DG) กลายเป็นที่ยอมรับ และมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากความได้เปรียบในทุกประเด็นที่กล่าวมาข้างต้น รวมถึงคุณประโยชน์ที่จะได้รับจากการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอื่น ๆ ทั้งโดยทางตรงและทางอ้อม เช่น การเป็นแหล่งพลังงานสำรองในกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นภายในระบบผลิตหรือระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าหลัก การช่วยลดต้นทุนในการเชื่อมโยงสายส่งไปยังพื้นที่ที่ห่างไกลจากสถานีไฟฟ้า และที่สำคัญคือการช่วยลดพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายซึ่งเป็นการช่วยให้ภาครัฐสามารถลดค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในส่วนของการบำรุงรักษาสายส่งและสายจำหน่าย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดตำแหน่งที่จะทำการติดตั้ง และขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม ซึ่งเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้

ตลอดขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการที่จะนำมาใช้ในการกำหนดขนาดและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย จำเป็นจะต้องศึกษาถึงรายละเอียดของวิธีการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการศึกษา คือ สามารถประยุกต์เอาวิธีการทางคณิตศาสตร์มาพัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยในการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เมื่อระบุจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาใช้งานในระบบ ซึ่งสามารถนำไปใช้ได้กับระบบจำหน่ายจริงในประเทศไทย

นอกเหนือจากประเด็นในเรื่องของการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย การพิจารณาเลือกขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายยัง

ต้องคำนึงถึงเรื่องของการออกแบบระบบป้องกันเพิ่มเติม ระดับความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่าย ปัญหาเรื่องขนาดแรงดัน และคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งคาดว่าวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นแนวทางที่จะนำไปสู่การศึกษาเพิ่มเติมในการกำหนดขนาดและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. กำหนดวิธีการตามแนวทางเชิงกำหนด (Deterministic Approach) ที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ในกรณีที่มีการระบุจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่าย
2. พัฒนาโปรแกรมการคำนวณขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตามวิธีการที่ได้กำหนดไว้ เพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานในการวิเคราะห์และวางแผนการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจริง

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบเรเดียลและแบบลูปเป็นหลัก
2. พิจารณาเฉพาะผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อการลดกำลังสูญเสียจริงในระบบจำหน่ายเท่านั้น
3. วิเคราะห์หาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งติดตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ณ สถานะอยู่ตัว โดยสมมติให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยในแต่ละบัสประมาณได้ด้วยค่าคงที่ที่เหมาะสม
4. กำหนดให้จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะติดตั้งในระบบจำหน่ายเป็นหนึ่งในข้อมูลป้อนเข้า

## 1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาบทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
  - 1.1 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่าย
  - 1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดขนาดและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับของระบบ รวมถึงพิจารณาข้อดีข้อเสียของแต่ละวิธีการที่นำมาใช้ในการหาคำตอบ
  - 1.3 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคและวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบมีเงื่อนไขบังคับที่มีคำตอบเป็นทั้งตัวแปรต่อเนื่องและตัวแปรจำนวนเต็มที่เป็นเลขฐานสอง
2. ระบุปัญหาที่จะทำการศึกษาในรูปของปัญหาการหาค่าเหมาะสมภายใต้เงื่อนไขบังคับ
3. ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ทำการกำหนดขึ้น
4. พัฒนาโปรแกรมที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายให้มีค่าต่ำที่สุด
5. ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณและเปรียบเทียบกับวิธีการที่ได้มีการนำเสนอในบทความทางวิชาการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง
6. สรุปผลและนำเสนอรายงานในวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. โปรแกรมคำนวณขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย
2. สามารถนำโปรแกรมที่ได้ไปประยุกต์ใช้จริงกับระบบจำหน่ายของประเทศไทย ในการกำหนดขนาดกำลังการผลิต และตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสม เมื่อทำการระบุจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะทำการติดตั้งเข้าสู่ระบบไว้ล่วงหน้า

3. เป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในทางลบต่อระบบจำหน่าย ทั้งในเรื่องของการออกแบบระบบป้องกันเพิ่มเติม ระดับความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่าย ปัญหาเรื่องขนาดแรงดัน และคุณภาพไฟฟ้า

## 1.6 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วย

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วย คำจำกัดความของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อระบบจำหน่าย ทั้งในด้านการช่วยลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย และผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ ในตอนท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการกำหนดรูปแบบของปัญหาการหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย และแนวทางการแก้ปัญหา ที่มีผู้นำเสนอไว้ในอดีต

บทที่ 3 จะอธิบายถึงทฤษฎีบทการหาค่าเหมาะสมสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้น (Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP) โดยจะนำเสนอหลักการของวิธีbranch and bound (Branch and Bound, BB) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบกำหนดการเชิงผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Programming, MIP) และหลักการของวิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง (Sequential Quadratic Programming, SQP) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะเชิงเส้น (Nonlinear Programming, NLP) รวมทั้งการนำสองวิธีข้างต้นมาประยุกต์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 4 จะแสดงให้เห็นถึงวิธีการกำหนดรูปแบบของปัญหาการหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และการประยุกต์ใช้แนวทางการแก้ปัญหาที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 กับปัญหาที่กำหนดขึ้น



บทที่ 5 กล่าวถึงการพัฒนาและการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากแนวทางการแก้ปัญหาที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 4 โดยอาศัยแบบจำลองของระบบจำหน่ายที่มีการใช้งานจริงจำนวน 4 ระบบ เพื่อเป็นระบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยจะนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรม พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลลัพธ์และข้อดีข้อเสียของอัลกอริทึมที่นำมาใช้

บทที่ 6 จะเป็นการสรุปผลการทำวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาทั้งหมด รวมทั้งเสนอแนะแนวทางการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการศึกษางานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ โดยในหัวข้อ 2.1 จะอธิบายถึงคำจำกัดความของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ในหัวข้อ 2.2 จะอธิบายถึงเทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ในหัวข้อ 2.3 จะอธิบายถึงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ในหัวข้อ 2.4 จะอธิบายถึงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบจำหน่าย ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก รวมถึงผลการศึกษางานวิจัยอื่น และในหัวข้อ 2.5 จะอธิบายถึงผลการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

#### 2.1 คำจำกัดความของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [8] [13] [28] พบว่ามีผู้ที่ได้ให้คำจำกัดความของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไว้แตกต่างกัน ตามมาตรฐาน IEEE1547-2003 [29] ได้ให้คำจำกัดความของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไว้ว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหมายถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อเข้ากับพื้นที่ของระบบไฟฟ้ากำลังผ่านจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) ซึ่งสำหรับในประเทศไทย ก็ได้มีการให้คำจำกัดความของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหรืออีกนัยหนึ่งคือ ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer, SPP) ไว้ดังนี้

“ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก หมายถึง หน่วยงาน หรือ องค์กร ทั้งจากภาครัฐบาล เอกชน และ รัฐวิสาหกิจ ที่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 60 เมกะวัตต์ (หรือไม่เกิน 90 เมกะวัตต์ ในกรณีพิเศษเมื่อคำนึงถึงความมั่นคงและความสามารถในการมีโหลดได้ของระบบ)” [31]

## 2.2 เทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

เราสามารถจำแนกเทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) และเทคโนโลยีที่ไม่ใช้พลังงานหมุนเวียน (Non-Renewable Energy) สำหรับเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนนั้นเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็น เทคโนโลยีที่ใช้พลังงานสะอาด (Clean Energy) เนื่องจากเทคโนโลยีประเภทนี้จะผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ตามธรรมชาติและมีการหมุนเวียนเกิดขึ้นใหม่อยู่ตลอดเวลา และเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วไม่มีวันหมดไป ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar, Photovoltaic) พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal) พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass) และพลังงานจากคลื่นใต้ทะเล (Ocean) ข้อดีของเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน คือ เป็นเทคโนโลยีที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ และไม่ทำลายสภาพแวดล้อม แต่เทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนมีข้อจำกัดในเรื่องของภูมิศาสตร์ เนื่องจากต้องอาศัยแหล่งพลังงานตามธรรมชาติ ดังนั้นสถานที่ก่อสร้างจะต้องอยู่ในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศ หรือมีปัจจัยที่เป็นแหล่งพลังงานที่เอื้ออำนวย เช่น ประเทศที่อยู่ในแถบเส้นศูนย์สูตรอย่างประเทศไทย มีสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมกับการใช้เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากได้รับแสงแดดตลอดปี

ในส่วนของเทคโนโลยีที่ไม่ใช้พลังงานหมุนเวียนนั้น จะทำการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานจากเครื่องจักรกล หรือโดยการนำเอาทรัพยากรธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน หรือ ก๊าซธรรมชาติ มาทำการเผาไหม้เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีประเภทนี้จะประกอบด้วย พลังงานจากเชื้อเพลิง (Fuel Cell) กังหันไอน้ำขนาดเล็กและกังหันไอน้ำขนาดใหญ่ (Small and Micro Turbine) เครื่องจักรที่มีการเผาผลาญภายใน (Internal Combustion Engine) คอมไบน์ไซเคิล (Combined Cycle) และคอมบัสชันเทอร์ไบน์ (Combustion Turbine) ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีที่ไม่ใช้พลังงานหมุนเวียนจะอยู่ที่ความเชื่อถือได้ (Reliability) และไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่เหมือนเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียน (ยกเว้นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ซึ่งอาจจะต้องอยู่ใกล้แหล่งถ่านหิน หรือ ก๊าซธรรมชาติ) แต่ข้อเสียของเทคโนโลยีประเภทนี้ คือ สามารถก่อให้เกิดมลภาวะ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันเทคโนโลยีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้พัฒนาไปจากเดิมมาก ทำให้สามารถที่จะนำเอาทรัพยากรที่ใช้แล้ว หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นการช่วยลดมลภาวะ และเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณาเป็นอันดับแรก ก่อนที่จะทำการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ ประเด็นในเรื่องผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อระบบจำหน่าย ซึ่งในที่นี้จะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มี

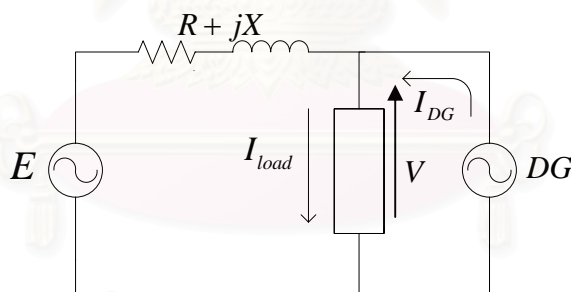
ต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย และผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบจำหน่าย

## 2.3 ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยจะแบ่งย่อยออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก คือ ผลกระทบเนื่องจากขนาดกำลังการผลิต และผลกระทบเนื่องจากตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

### 2.3.1 ผลกระทบเนื่องจากขนาดกำลังการผลิต

ในกรณีที่สมมติให้ตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายอยู่ที่จุดโหลด โดยจะใช้แบบจำลองอย่างง่ายของระบบจำหน่ายในรูปที่ 2.1 เพื่อประกอบการอธิบาย



รูปที่ 2.1 แบบจำลองอย่างง่ายของระบบจำหน่าย

แบบจำลองในรูปที่ 2.1 แสดงถึงระบบจำหน่ายที่มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเพียงแหล่งเดียว ซึ่งจ่ายแรงดันเท่ากับ  $E$  โวลต์ ผ่านสายส่งที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ  $R + jX$  โอห์ม มายังโหลด ซึ่งจะทำให้มีขนาดแรงดันที่หัวของโหลดเท่ากับ  $V$  โวลต์ และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่ออยู่

ในกรณีที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเราจะสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังสูญเสียปรากฏที่เกิดขึ้นในสายส่งได้ดังนี้

$$S_{loss} = (E - V)I^* = (E - V)(I_{load,real} - jI_{load,imag}) \quad (2.1)$$

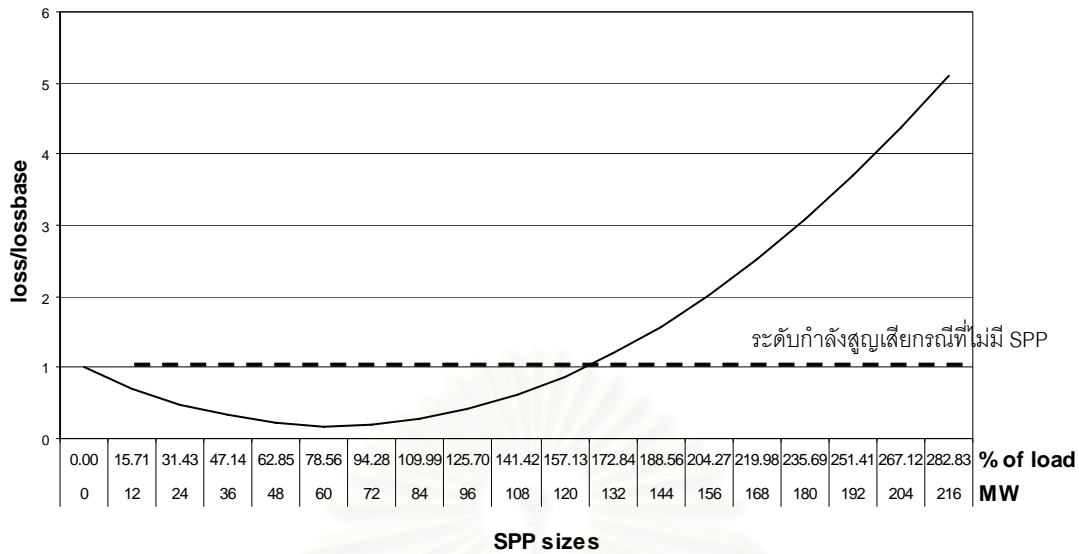
ในกรณีที่มิมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายและสมมติให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียว กำลังสูญเสียปรากฏในสายส่งจะสามารถประมาณใหม่ได้เป็น

$$S_{loss}^{DG} = (E - V)(I_{load,real} - I_{DG,real} - jI_{load,imag}) \quad (2.2)$$

ดังที่แสดงในสมการที่ (2.2) จะพบว่ากรณีที่มิมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ามาในระบบจำหน่ายจะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าเปลี่ยนไป เท่ากับ  $S_{loss} - S_{loss}^{DG} = (E - V)I_{DG}$  และจากความสัมพันธ์นี้ ทำให้เราสามารถสรุปได้ว่า กำลังสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบจำหน่ายจะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งในกรณีของแบบจำลองนี้ จะสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 สถานะ คือสถานะที่กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดของโหลด จะช่วยให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าต่ำลง ในทางกลับกัน ถ้ากำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากกว่าขนาดของโหลดประมาณ 2 เท่าจะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าสูงขึ้น

ผลลัพธ์จากการศึกษาผลกระทบของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [30] ในส่วนของการศึกษาผลกระทบเนื่องจากขนาดของ SPP แสดงอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ SPP กับกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายทดสอบ ดังในรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าระดับเส้นประ เป็นระดับที่แสดงถึงกำลังสูญเสียในกรณีที่มิมี SPP (กรณีฐาน) ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดของ SPP มีค่ามากกว่าขนาดของโหลดมาก จะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเริ่มมีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่มิมี SPP ซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

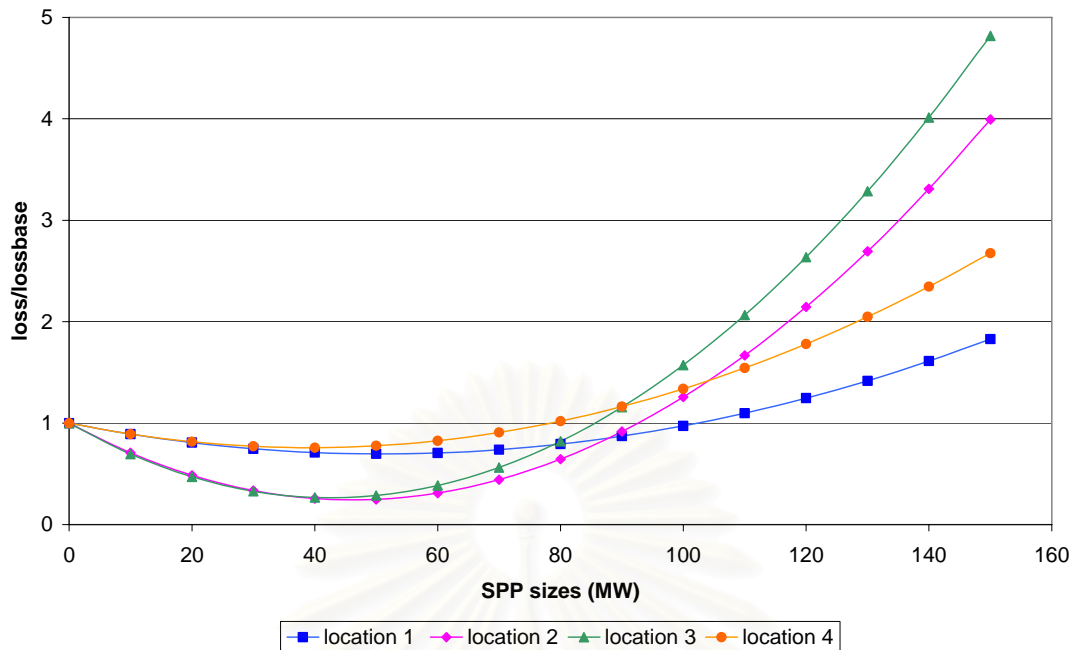


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ SPP กับกำลังสูญเสียรวม (เทียบกับกรณีไม่มี SPP) ในระบบจำหน่าย [31]

### 2.3.2 ผลกระทบเนื่องจากตำแหน่ง

ในหัวข้อที่แล้วเราได้อธิบายถึงผลกระทบเนื่องจากขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยอาศัยแบบจำลองอย่างง่ายที่แสดงในรูปที่ 2.1 ประกอบคำอธิบาย แต่ในทางปฏิบัติ ระบบจำหน่ายจริงไม่ได้มีโหลดเพียงแค่จุดเดียวดังเช่นในแบบจำลอง และลักษณะการกระจายตัวของโหลดในแต่ละระบบก็มีผลกับกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเช่นเดียวกัน ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยในเรื่องของตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กควบคู่ไปกับการพิจารณาในเรื่องของขนาดกำลังการผลิตด้วย

ถ้าต้องการแบ่งพื้นที่ของระบบจำหน่ายตามลักษณะการกระจายตัวของโหลด จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ พื้นที่ที่โหลดมีการกระจุกตัวกันอย่างหนาแน่น ซึ่งเราจะเรียกตำแหน่งนั้นว่าเป็นจุดศูนย์กลางโหลด (Load Center) และพื้นที่ที่โหลดมีการกระจายตัวอย่างเบาบาง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย จะแปรตามระยะห่างระหว่างตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางโหลด และเพื่อให้เห็นภาพชัดเจน เราจะพิจารณารูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ SPP กับกำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่าย ในกรณีที่ตำแหน่งของ SPP มีการเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ SPP กับกำลังสูญเสียรวม (เทียบกับกรณีไม่มี SPP) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ กันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อ SPP มีขนาดเท่ากัน ตำแหน่งของ SPP จะเป็นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดขนาดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาข้างต้นจะพบว่า ทั้งสองปัจจัย คือ ขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ดังนั้นในการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดขนาดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายนั้น จำเป็นจะต้องนำทั้งสองปัจจัยมาพิจารณาควบคู่กัน และเมื่อพิจารณากราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.2 และ 2.3 จะพบข้อสังเกตที่น่าสนใจประการหนึ่ง คือ หากเราสามารถกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมจะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าลดลงเกินร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในทางเศรษฐศาสตร์อย่างมากในการทำงานของระบบจำหน่าย

ประเด็นสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาควบคู่ไปกับการช่วยลดกำลังสูญเสีย คือ เรื่องของผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบจำหน่ายเนื่องจากการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ซึ่งจะได้อธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

## 2.4 ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อสมรรถนะการทำงานของระบบจำหน่าย

ระบบจำหน่ายโดยเดิมโดยทั่วไป มักจะถูกออกแบบมาให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งก็คือ จุดรับซื้อไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบส่ง ดังนั้นเมื่อมีการนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ามาประยุกต์ใช้งานในระบบจำหน่าย จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบเป็นอย่างมาก [24], [28] ซึ่งผลกระทบนี้จะเป็นไปในทางบวกหรือทางลบ ก็ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของทั้งระบบจำหน่ายเอง และของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ผลกระทบจากการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในทางบวก ได้แก่ ช่วยคงค่าระดับแรงดัน ช่วยปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า ช่วยลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ช่วยลดความจุของสายส่งและสายจำหน่าย ช่วยเพิ่มระดับความน่าเชื่อถือให้กับระบบจำหน่าย และช่วยยืดระยะเวลาในการปรับปรุงโครงสร้างของระบบส่งและระบบจำหน่าย อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ การกำหนดเงื่อนไขในการปฏิบัติการของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก มักจะถูกดำเนินการโดยบริษัทเอกชนผู้ที่มีกรรมสิทธิ์เป็นเจ้าของ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ยากที่หน่วยงานหรือองค์กรของรัฐบาลผู้ที่มีหน้าที่รับผิดชอบในการดูแลระบบส่งหรือระบบจำหน่าย จะเข้าไปควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กให้สอดคล้องสัมพันธ์กันกับการปฏิบัติการของระบบจำหน่าย ทำให้ระบบจำหน่ายไม่ได้รับประโยชน์จากการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเท่าที่ควร และบางครั้งก็อาจส่งผลกระทบในด้านลบต่อสมรรถนะการทำงานของระบบจำหน่ายด้วย ดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.4.1 ผลกระทบต่อการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

ในสภาวะการทำงานปกติของระบบจำหน่าย จำเป็นจะต้องมีการควบคุมระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงพิคัดที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อสมรรถนะการทำงานของทั้งระบบจำหน่ายและอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่ ซึ่งโดยทั่วไป การควบคุมระดับแรงดันในระบบจำหน่ายสามารถทำได้สองวิธี คือ การควบคุมแหล่งกำเนิดแรงดันที่สถานีไฟฟ้าต้นทางโดยใช้หม้อแปลงแบบปรับระดับแรงดันได้ และอีกวิธีหนึ่ง คือ การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Power) ในระบบจำหน่าย โดยใช้ตัวเก็บประจุ รีแอกเตอร์ ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser) หรือ ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟแบบสถิตย์ (Static Var Compensator, SVC)

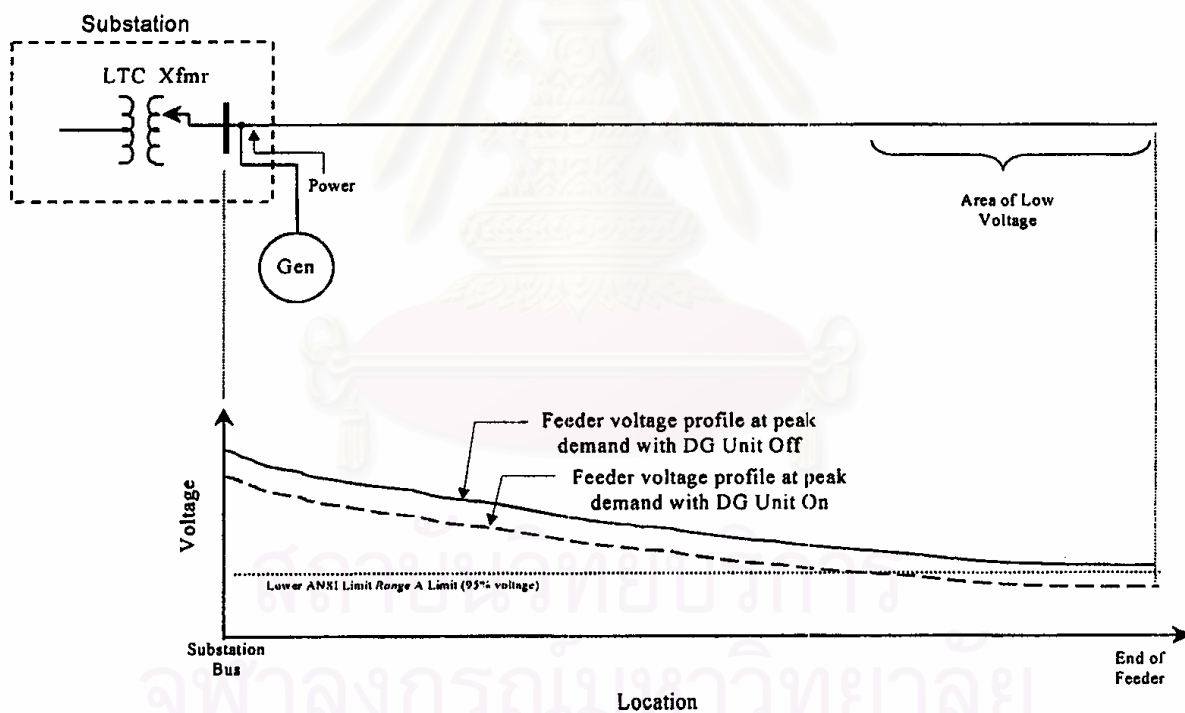
โดยทั่วไปการควบคุมแรงดันในระบบจำหน่ายจะกระทำอยู่บนพื้นฐานที่กำลังไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวจากสถานีไฟฟ้าต้นทางไปยังโหลดที่กระจายอยู่ตามจุดต่าง ๆ ซึ่งหากมีการติดตั้ง



เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอยู่ในระบบจำหน่ายจะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลมากกว่าหนึ่งทิศทาง (Mesh Power Flow) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการควบคุมระดับแรงดันที่พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเดิม

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาในกรณีนี้ ก่อนที่จะทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่าย ควรจะใช้ซอฟต์แวร์ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่าย ว่าจะมีผลกระทบต่อการควบคุมแรงดันในระบบจำหน่ายหรือไม่ อย่างไร เพื่อทำการปรับตั้งหรือแก้ไขให้เหมาะสม

ตัวอย่างผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบเบเรเดียล เช่น เมื่อมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อจากอุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดัน หรือหม้อแปลงแบบปรับแท็ปได้ (Load Tap Changing Transformer) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 จะทำให้อุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดันไม่สามารถวัดความต้องการที่ปลายสายป้อนได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.4 การรบกวนประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดันบนสายป้อนของระบบจำหน่ายเมื่อมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อจากหม้อแปลงปรับแท็ปได้ [24]

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของแรงดันที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขที่มีและไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จะสังเกตได้ว่าเมื่อมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ระดับแรงดันบนสายป้อนจะต่ำลง

เนื่องจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะลดโหลดที่สังเกตได้จากอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกคร่อมสายส่ง ทำให้อุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดันปรับตั้งค่าแรงดันต่ำกว่าที่ต้องการที่จะสามารถคงไว้ซึ่งระดับการบริการที่เพียงพอที่บริเวณปลายของสายบ่อน การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการย้ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไปไว้ก่อนอุปกรณ์ควบคุมระดับแรงดัน หรือเพิ่มอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

#### 2.4.2 ผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า

เมื่อก้าวถึงผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อคุณภาพไฟฟ้า โดยทั่วไปมักจะหมายถึงปัญหาหลัก 2 ด้าน คือ ปัญหาแรงดันกระพริบ (Voltage Flicker) และ ปัญหาฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

การเกิดแรงดันกระพริบในระบบจำหน่าย ส่วนมากมักจะมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสโหลดอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม การมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอยู่ในระบบจำหน่ายก็อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดแรงดันกระพริบได้เช่นเดียวกัน โดยเฉพาะในช่วงการเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงทันที หรือการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอย่างมีนัยสำคัญ [24] ถ้าการเริ่มเดินเครื่องหรือการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทำให้เกิดการแกว่งของความถี่มากพอ อาจทำให้เกิดการกระพริบของโหลดแสงสว่างจนเป็นที่สังเกตได้จากลูกค้าผู้ใช้ไฟ วิธีหนึ่งคือการวิเคราะห์หาขนาดและจำนวนการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อหน่วยเวลา และพิจารณาว่าอยู่เหนือระดับการมองเห็นหรือระดับการรบกวนตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 [30] หรือไม่ หากมีการรบกวนลูกค้าผู้ใช้ไฟ อาจต้องมีมาตรการแก้ปัญหาแรงดันกระพริบ วิธีหนึ่งคือการลดระดับแรงดันขณะเริ่มเดินเครื่องสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งต้องทำไปพร้อมกับ การปรับความเร็วรอบของเครื่องจักร ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสอาจต้องอาศัยการซิงโครไนซ์ที่แน่นอนขึ้น การนำอินเวอร์เตอร์มาช่วยจำกัดกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) และการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังไฟฟ้าขาออกก็อาจช่วยแก้ปัญหาได้อีกทางหนึ่ง วิธีที่ง่ายกว่านั้นคือการตั้งเงื่อนไขในเรื่องของเวลาและความถี่ในการเดินเครื่องและการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งชนิดและความรุนแรงของฮาร์โมนิกจะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของพาวเวอร์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งเป็น

องค์ประกอบและลักษณะการเชื่อมต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับระบบจำหน่าย ในกรณีของอินเวอร์เตอร์แบบเก่าชนิด SCR ซึ่งใช้วิธีไลน์คอมมิวเตท (Line Commutated) ในการสร้างรูปคลื่นไซน์ จะมีกระแสฮาร์โมนิกปะปนสูง แต่ในยุคปัจจุบัน เกือบทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์แบบใหม่ถูกออกแบบมาบนพื้นฐานของ IGBTs ซึ่งใช้วิธีพัลส์วิตด์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) ในการสร้างรูปคลื่นไซน์ที่มีกระแสฮาร์โมนิกปะปนน้อยมาก และสอดคล้องตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 (ดูตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 ระดับกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่อนุญาตให้เกิดขึ้นได้ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 [30]

Harmonic Order	Allowed Level Relative to Fundamental
<11 <sup>th</sup>	(odd harmonics)*
<11 <sup>th</sup> to <17 <sup>th</sup>	4%
<17 <sup>th</sup> to <23 <sup>rd</sup>	2%
<23 <sup>rd</sup> to <35 <sup>th</sup>	1.50%
<35 <sup>th</sup> or greater	0.60%
Total Harmonic Distortion	5%

\*Even harmonics are limited to 25% of odd values

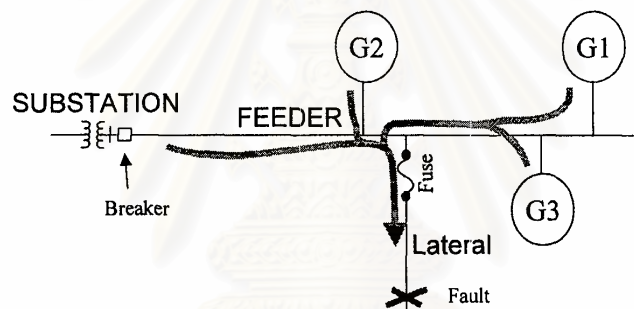
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีส่วนประกอบที่หมุนได้เช่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกได้อีกทางหนึ่ง ขึ้นอยู่กับการออกแบบขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความเป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก การต่อลงดินและปัจจัยอื่น ๆ การต่อลงดินของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงยกกระดานจะมึบทบาทสำคัญในการจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่สามที่จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

#### 2.4.3 ผลกระทบต่อระดับกระแสลัดวงจรและอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบจำหน่ายที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่ออยู่ จะมีกระแสผิดพลาดร่วม (Fault Contribution) ที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ส่งผลทำให้ระดับกระแสลัดวงจรของระบบจำหน่ายเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งอาจทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด

ของอุปกรณ์ป้องกันได้ ขนาดของกระแสผิดพลาดที่เกิเกิดขึ้นนั้นจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โหลดการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ระยะห่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กกับจุดที่เกิดการลัดวงจร เป็นต้น

กระแสผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีกำลังการผลิตไม่สูงอาจไม่มากนัก อย่างไรก็ตามการรวมกันของกระแสผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลาย ๆ ตัวอาจมีค่ามากจนทำให้ระดับกระแสลัดวงจรเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดการประสานงานระหว่างฟิวส์และเบรกเกอร์ผิดพลาดได้ ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 2.5 ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กถูกเพิ่มเข้ามาในระบบ กระแสผิดพลาดอาจมีค่ามากพอที่จะทำให้ฟิวส์ที่สายป้อนย่อยและเบรกเกอร์ที่สายป้อนหลักประสานงานผิดพลาดได้ในระหว่างที่เกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบจำหน่าย



รูปที่ 2.5 การเพิ่มระดับกระแสลัดวงจรเนื่องจากกระแสผิดพลาดจาก DG ยูนิตที่ 1 2 และ 3 ทำให้การประสานงานระหว่างฟิวส์และเบรกเกอร์ผิดพลาด [24]

วิธีการแก้ปัญหาในกรณีนี้ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรในระบบที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเชื่อมต่ออยู่โดยใช้ซอฟต์แวร์ในการจำลองเหตุการณ์เพื่อศึกษาการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน ซึ่งหากพบปัญหาก็อาจจะต้องมีการปรับตั้งค่าของอุปกรณ์ป้องกันใหม่ หรือทำการประสานการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในแต่ละส่วน

#### 2.4.4 ผลกระทบต่อความปลอดภัยในการทำงาน

ไอซ์แลนด์ (Islanding) คือ สภาวะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กยังคงดำเนินการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบจำหน่ายบางส่วนที่ถูกตัดตอนออกจากระบบจำหน่ายหลัก โดยการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในขณะที่เกิดสภาวะผิดปกติขึ้นในระบบจำหน่าย ไอซ์แลนด์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ด้วยตนเอง (Self Excite) และสามารถรองรับโหลดในส่วนที่ถูกตัดตอนออกจากระบบไฟฟ้าหลักได้ ซึ่งในกรณีนี้อาจจะทำให้เกิดปัญหาในด้านความปลอดภัยต่อทั้งระบบไฟฟ้าและลูกค้าผู้ใช้ไฟ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดไอซ์แลนด์ขึ้นในสายป้อน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะหลุดออกจากเฟส (Out of Phase) ของระบบจำหน่ายหลักอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อมีการรีโคลส (Reclose) อุปกรณ์ป้องกันกลับคืนตามขั้นตอนปกติ ระบบจำหน่ายหลักจะถูกเชื่อมต่อกับระบบที่ไม่อินเฟสกัน ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบจำหน่าย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และโหลดของลูกค้าผู้ใช้ไฟ และการเกิดไอซ์แลนด์ยังเป็นสภาวะที่เสี่ยงต่อการทำงานของผู้ที่ทำหน้าที่กู้ระบบ หากในระหว่างการปฏิบัติงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไม่ถูกดีเอนเนอร์จี้ (De-Energize) วงจรบางส่วนจะยังคงได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยอยู่ นอกจากนี้ยังเป็นการทำให้เสียเวลาในการกู้ระบบให้กลับคืนมาอยู่ในสภาวะปกติ

เพื่อป้องกันการเกิดไอซ์แลนด์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะต้องมีความไวมากพอที่จะรับรู้ถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย และจะต้องถูกตัดตอนออกไปจากระบบด้วยเมื่อเกิดสภาวะผิดปกติขึ้นในระบบจำหน่าย เพื่อให้การรีโคลสของอุปกรณ์ป้องกันสามารถทำได้ตามปกติ ทั้งนี้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 1547-2003

#### 2.4.5 ผลกระทบต่อระดับความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่าย

ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีต่อระดับความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายสามารถมองได้สองด้าน ในด้านบวก คือ การใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อให้เป็นแหล่งกำลังการผลิตสำรองในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าหลักในระบบ อย่างไรก็ตามหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทำงานไม่สัมพันธ์กันกับการปฏิบัติการของระบบจำหน่ายดังที่ได้กล่าวมาตั้งแต่หัวข้อ 2.2.1-2.2.4 โดยเฉพาะการทำงานที่บกพร่องของระบบป้องกันเดิมก็จะส่งผลทำให้ระดับความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายลดลงได้เช่นกัน

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สิ่งหนึ่งที่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน คือ ก่อนที่จะทำการประยุกต์ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวิเคราะห์ผลกระทบของการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ได้ถูกออกแบบไว้ในประเด็นต่าง ๆ ที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.4.1-2.4.5 และหากมีความจำเป็นที่จะต้องใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ก็ควรที่จะศึกษาถึงวิธีการในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กอย่างถูกต้อง ซึ่งอาจจะดูได้จากมาตรฐานต่าง ๆ ที่แนะนำวิธีในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ากับระบบจำหน่าย เช่น มาตรฐาน IEEE 1547-2003 เพื่อให้สามารถที่จะใช้ประโยชน์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และก่อให้เกิดผลกระทบในด้านลบกับระบบจำหน่ายน้อยที่สุด

## 2.5 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย สามารถแยกพิจารณาออกกเป็น 2 ประเด็น คือ การกำหนดรูปแบบของปัญหาและข้อจำกัด และแนวทางที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

การกำหนดรูปแบบของปัญหาและข้อจำกัด คือ การกำหนดฟังก์ชันประสงค์และเงื่อนไขบังคับของระบบให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ จะมีความแตกต่างกันที่การเลือกค่าที่จะมาเป็นดัชนีชี้วัดถึงการลดลงของกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย เช่น งานวิจัย [14] เลือกใช้ราคาที่เป็นตัวชี้วัดได้จากการแปลงพลังงานสูญเสียให้เป็นค่าเงินมาเป็นตัวชี้วัด โดยการคิดราคาในหน่วยดอลลาร์ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (\$/kWh) ของพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลา 1 ปี (8760 ชั่วโมง) บวกกับราคาในการลงทุนก่อสร้างสายส่ง ซึ่งจะได้ออกมาเป็นราคารวม แล้วทำการหาค่าต่ำสุดของราคารวมนั้น โดยไม่มีการกำหนดเงื่อนไขบังคับ ในขณะที่งานวิจัย [19] เลือกใช้วิธีการหาค่าต่ำสุดของกำลังสูญเสียที่คำนวณได้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งโดยตรง ทั้งนี้สูตรในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียและการกำหนดเงื่อนไขบังคับจะมีความแตกต่างกันออกไป บางงานวิจัยจะใช้วิธีการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในสายส่งแต่ละเส้นและนำค่ากำลังสูญเสียของสายส่งทุกเส้นมาคิดรวมกัน [11] และบางงานวิจัยก็จะมีวิธีการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยคิดจากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัสลบกับความต้องการพลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งระบบจำหน่าย [9] [23]

ในส่วนของการกำหนดเงื่อนไขบังคับจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยแต่ละอัน เช่น บางงานวิจัยกำหนดเงื่อนไขบังคับในเรื่องของกำลังการผลิตรวมสูงสุด

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่อนุญาตให้จ่ายเข้าสู่ระบบได้ [19] ในขณะที่บางงานวิจัยจะทำการกำหนดเงื่อนไขบังคับโดยคำนึงถึงกำลังการผลิตสูงสุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแต่ละตัวสามารถจ่ายได้ [9] [23]

ประเด็นที่ 2 ในส่วนของกรรมวิธีในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์จะแบ่งออกเป็นสองแนวทางหลัก คือ แนวทางสโตคาสติก (Stochastic Approach) และแนวทางเชิงกำหนด (Deterministic Approach) ตัวอย่างวิธีการตามแนวทางสโตคาสติกที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ได้แก่ เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) [14] วิธีการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search Method) [19] เฮียร์ฟอร์ดแรนจ์อัลกอริทึม [9] ส่วนตัวอย่างของวิธีแก้ปัญหาตามแนวทางเชิงกำหนด ได้แก่ วิธีเจเนรัลไลเซิร์ดิวซ์เกรเดียนท์ (Generalized Reduced Gradient Method) [23]

จากงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการตามแนวทางสโตคาสติกจะสามารถหาทั้งตำแหน่งติดตั้งและขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้ในเวลาเดียวกัน ในขณะที่การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการตามแนวทางเชิงกำหนดจะสามารถหาได้เฉพาะขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมเมื่อทราบตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายแล้วเท่านั้น เนื่องจากปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย จะมีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปร 2 ตัว คือ ขนาดและตำแหน่ง ซึ่งการประยุกต์ใช้วิธีแก้ปัญหาตามแนวทางสโตคาสติกจะทำได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้จะไม่สามารถแน่ใจได้ว่าวิธีแก้ปัญหาสโตคาสติกจะสามารถนำไปสู่คำตอบที่ดีที่สุดได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ เราจึงนำเสนอวิธีแก้ปัญหาตามแนวทางเชิงกำหนดที่สามารถหาได้ทั้งขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้พร้อมกัน โดยได้นำเสนอหลักการของวิธีดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 และนำเสนอผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง 2 แนวทางไว้ในบทที่ 5

### บทที่ 3

## ปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้น

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นทฤษฎีที่เรานำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็นสองส่วนหลัก คือ การแก้ปัญหาการกำหนดการเชิงผสมจำนวนเต็มโดยใช้วิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ และการแก้ปัญหาการกำหนดการไม่เชิงเส้น โดยใช้วิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสี่บเนื่อง

### 3.1 ปัญหาการกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้น

ในโลกความเป็นจริงมีปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากมายที่ต้องเกี่ยวข้องกับทั้งตัวแปรต่อเนื่อง (Continuous Variable) และตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (Discrete Variable) หรือตัวแปรจำนวนเต็ม (Integer Variable) ปัญหาการหาค่าเหมาะสมประเภทนี้มีชื่อว่า ปัญหาการกำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการไม่เชิงเส้น (Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP Problem)

ธรรมชาติความไม่เป็นเชิงเส้นของปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบผสมจำนวนเต็ม เกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ 1) ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างตัวแปรจำนวนเต็มแต่เพียงอย่างเดียว 2) ความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างตัวแปรต่อเนื่องแต่เพียงอย่างเดียว และ 3) ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างตัวแปรต่อเนื่องและตัวแปรจำนวนเต็ม

การควบกันระหว่างโดเมนของตัวแปรจำนวนเต็มและโดเมนของตัวแปรต่อเนื่องผนวกกับความไม่เป็นเชิงเส้นทำให้ปัญหา MINLP มีความท้าทายทั้งในทางทฤษฎี วิธีการแก้ปัญหา และในมุมมองของการคำนวณ



ในช่วงระยะเวลา 3 ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำเอาปัญหา MINLP ไปประยุกต์ใช้กับศาสตร์ในหลาย ๆ ด้าน ยกตัวอย่างเช่น กรรมวิธีในอุตสาหกรรมการผลิต การเงินและการบัญชี งานทางด้านวิศวกรรม วิทยาศาสตร์การจัดการและการปฏิบัติการวิจัย ซึ่งตัวอย่างของการประยุกต์ใช้แบบจำลองของปัญหา MINLP ในทางปฏิบัติสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [17]

### 3.2 รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหา MINLP

รูปแบบทั่วไปของปัญหา MINLP สามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 & \underset{x,y}{\text{minimize}} && f(x,y) \\
 & \text{subject to} && h(x,y) = 0 \\
 & && g(x,y) \leq 0 \\
 & && x \in X \subseteq \mathbb{R}^n \\
 & && y \in Y \subseteq \mathbb{I}^q
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

เมื่อ  $x$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรจำนวนจริงที่มีขนาดเท่ากับ  $n$  และ  $y$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรจำนวนเต็มที่มีขนาดเท่ากับ  $q$   $h(x,y) = 0$  แทนสมการเงื่อนไขบังคับ และ  $g(x,y) \leq 0$  แทนสมการเงื่อนไขบังคับ ซึ่งการนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ โอกาส  $y$  จะถูกกำหนดให้เป็นตัวแปรไบนารี กล่าวคือ มีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 & \underset{x,y}{\text{minimize}} && f(x,y) \\
 & \text{subject to} && h(x,y) = 0 \\
 & && g(x,y) \leq 0 \\
 & && x \in X \subseteq \mathbb{R}^n \\
 & && y \in Y = \{0,1\}^q
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

เมื่อ  $y$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปร 0-1 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $q$

การจัดการกับปัญหา MINLP นับว่าเป็นงานที่ยากและท้าทาย เนื่องจากปัญหา MINLP ได้รวมเอาความยากของปัญหาในคลาสย่อยของมันเอาไว้ด้วยกันได้แก่ ปัญหากำหนดการเชิงผสม

จำนวนเต็ม (Mixed-Integer Programming, MIP) และ ปัญหากำหนดการไม่เชิงเส้น (Non-Linear Programming, NLP) ซึ่งทั้งสองปัญหานี้จัดอยู่ในประเภทของปัญหา NP-complete ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาที่แก้ได้ยากในทางทฤษฎี ยิ่งตัวแปรจำนวนเต็มมีมาก ยิ่งเป็นการเพิ่มความซับซ้อนให้กับปัญหา ในขณะเดียวกัน เกี่ยวเนื่องมาจากคุณลักษณะความไม่เชิงเส้น ปัญหา MINLP ซึ่งโดยทั่วไปไม่เป็นคอนเวกซ์ จึงมีความเป็นไปได้ในการที่จะมีผลเฉลยเฉพาะที่ (Local Solution) จำนวนหลายค่า

ถึงแม้ปัญหา MINLP จะเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนและจัดว่าเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมประเภทที่แก้ยากมากที่สุด แต่อย่างไรก็ดี ในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีความพยายามที่จะคิดค้นวิธีการที่จะนำมาแก้ปัญหา MINLP อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการนำเสนออัลกอริทึมใหม่ ๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหา มีการสืบค้นคุณสมบัติในการลู่ออกของแต่ละอัลกอริทึม และได้มีการนำเอาวิธีแก้ปัญหาไปประยุกต์ใช้ในงานหลาย ๆ ด้าน

### 3.3 แนวทางการแก้ปัญหา MINLP

อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบเชิงผสมจำนวนเต็มเพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่ครอบคลุมผลเฉลยทั้งหมด (Global Optimum) จะแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่ แนวทางเชิงกำหนด (Deterministic Approach) และแนวทางสโตคาสติก (Stochastic Approach) ทั้งสองแนวทางนี้มีแนวคิดในการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน แนวคิดสำหรับแนวทางเชิงกำหนดคือการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเป็นค่าประมาณที่มีความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ( $\epsilon$ -Global Optimum) ภายในจำนวนรอบที่จำกัด ในขณะที่แนวคิดสำหรับแนวทางสโตคาสติกคือ เมื่อไม่มีการจำกัดเวลา ความพยายามในการค้นหาคำตอบจะทำให้สามารถเข้าถึงผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ เมื่อมองในนัยของความน่าจะเป็น (Probabilistic Sense)

เทคนิคในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมตามแนวทางสโตคาสติกจะเป็นเทคนิคแบบสุ่ม (Random Technique) เช่น การจำลองแบบมอนติคาโร (Monte-Carlo Simulation) อัลกอริทึมในการหาคำตอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การสุ่มระบุตำแหน่งของจุดเริ่มต้น และการค้นหาผลเฉลยเฉพาะที่ ส่วนอัลกอริทึมในการหาคำตอบของวิธีแก้ปัญหาตามแนวทางเชิงกำหนดจะใช้เทคนิคการแจงนับโดยปริยาย (Implicit Enumeration) และอาศัยวิธีการค้นหาตามกิ่ง (Tree Search) เพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเทคนิคของวิธีแก้ปัญหาตามแนวทางเชิงกำหนดที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์จะถูกอธิบายอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 3.4

จุดเด่นของวิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางสโทคาสติก คือ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมทั่วไปที่ไม่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้ ในขณะที่วิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนด จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่สามารถเขียนออกมาให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ได้อย่างชัดเจนเท่านั้น ทำให้วิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางสโทคาสติกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับปัญหาในวงกว้างมากกว่า ในขณะที่จุดเด่นของวิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนด คือ การที่ตัวอัลกอริทึมเองสามารถตัดสินใจว่าผลเฉลยที่หามาได้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดหรือไม่ ซึ่งคุณสมบัติข้อนี้จะไม่มีในอัลกอริทึมของวิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางสโทคาสติก และเป็นเหตุผลที่ทำให้เราเลือกวิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดมาประยุกต์ใช้กับปัญหาในวิทยานิพนธ์

วิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดที่ง่ายที่สุด คือ การแจกแจงรายการขององค์ประกอบของตัวแปรไม่ต่อเนื่องทั้งหมดออกมา ตัวแปรไม่ต่อเนื่องที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่แต่ละค่าจะสามารถสร้างปัญหา NLP ที่อยู่ในพจน์ของตัวแปรไม่ต่อเนื่องขึ้นมาได้ 1 ปัญหา แต่ละปัญหาจะให้ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของตัวเองออกมา หลังจากเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา NLP ทั้งหมด จะสามารถสรุปได้ว่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา MINLP มีค่าเท่าใด วิธีแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดนี้จะใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่มีตัวแปรไม่ต่อเนื่องจำนวนจำกัด และปัญหา NLP ที่เกิดขึ้นต้องเป็นปัญหาที่สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่ครอบคลุมผลเฉลยทั้งหมดได้เท่านั้น แต่สำหรับปัญหาทั่วไปในทางปฏิบัติ จะไม่สามารถนำวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้งานได้ เพราะจะทำให้เสียเวลาและสิ้นเปลืองทรัพยากรในการคำนวณเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้มีความพยายามที่จะคิดค้นวิธีการใหม่ ๆ ที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดได้ โดยไม่ต้องแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดทั้งหมด ผลลัพธ์ที่ได้ คือ มีการนำเสนอวิธีการแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดหลายวิธี แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่ได้รับความนิยมสูงสุด 3 วิธี ได้แก่ วิธีเอาต์เตอร์แอฟพรอกซิ-เมชัน (Outer Approximation, OA) [25] วิธีเจเนอรัลไลซ์เบนเดอร์สดีคอมโพสิชัน (Generalized Benders Decomposition, GBD) [6] และวิธีบริงแอนด์บาวด์ (Branch and Bound, B&B) [5] [27] ซึ่งทั้ง 3 วิธีนี้เป็นวิธีใหม่ที่เพิ่งถูกนำเสนอขึ้นมาไม่นาน (ช่วงต้นทศวรรษที่ 70-ปลายทศวรรษที่ 80) และมีหลักการในการแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดที่คล้ายคลึงกัน

หลักการแก้ปัญหามาตามแนวทางเชิงกำหนดสำหรับวิธี GBD และวิธี OA คือ การสร้างลำดับของขอบเขตบนและขอบเขตล่างของผลเฉลยของปัญหา MINLP โดยการแยก (Decomposition) ปัญหา MINLP ออกเป็น 2 ปัญหาย่อย และใช้ข้อมูลของทั้ง 2 ปัญหาย่อยนั้นมาปรับปรุงลำดับของขอบเขตบนและขอบเขตล่างในแต่ละรอบของการทำซ้ำ และเมื่อการวนรอบดำเนินไป จะแสดงให้เห็นว่าลำดับของค่าขอบเขตบนและขอบเขตล่างจะลู่เข้าสู่ค่าเดียวกัน ภายในจำนวนรอบที่จำกัด

หลักการแก้ปัญหาของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์จะเริ่มต้นจากการแก้ปัญหา NLP ที่เกิดจากการผ่อนคลาย (Relax) ปัญหา MINLP และทำการแก้ปัญหาค่า NLP อย่างเป็นลำดับ ซึ่งปัญหา NLP แต่ละปัญหาจะถูกเรียกว่าเป็นโหนด ๆ หนึ่งของแผนภาพต้นไม้ ในแต่ละโหนด เซตย่อยของตัวแปร  $y$  จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ ค่าขอบเขตล่างของปัญหา MINLP สามารถหาได้จากผลเฉลยของปัญหา NLP ในแต่ละโหนด ถ้าผลเฉลยของปัญหา NLP มีค่าเป็นจำนวนเต็มสำหรับตัวแปร  $y$  (หรือมีค่าเป็น 0-1 สำหรับปัญหา MINLP ที่มีตัวแปรจำนวนเต็มเป็นตัวแปรไบนารี) อัลกอริทึมของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์จะสิ้นสุดที่โหนดนั้น

ถึงแม้ในปัจจุบันจะยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของวิธีแก้ปัญหา MINLP ทั้ง 3 วิธี แต่จากการศึกษาเพิ่มเติม เราพบว่าวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ได้ถูกนำไปพัฒนาเป็นซอฟต์แวร์สำหรับแก้ปัญหา MINLP ที่เป็นคอนเวกซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [16] และยังคงถูกนำไปขยายผลเพื่อพัฒนาเป็นอัลกอริทึมที่สามารถแก้ปัญหาที่ไม่เป็นคอนเวกซ์เพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่ครอบคลุมผลเฉลยทั้งหมด [3] [7] [15] [22] มากกว่าอีก 2 วิธีที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้เราจึงเลือกที่จะใช้วิธีบรานซ์แอนด์บาวด์มาแก้ปัญหาคำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

### 3.4 วิธีบรานซ์แอนด์บาวด์

หลักการแก้ปัญหาของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ถูกนำเสนอขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1965 [26] ซึ่งในขณะนั้น หลักการของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาคำหนดการเชิงจำนวนเต็มผสมกับกำหนดการเชิงเส้น (Mixed-Integer Linear Programming, MILP Problem) ต่อมาจึงได้มีผู้นำหลักการนี้มาพัฒนาเป็นอัลกอริทึมสำหรับแก้ปัญหา MINLP ที่เป็นคอนเวกซ์ เพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่ครอบคลุมผลเฉลยทั้งหมด [5] [27] โดยอัลกอริทึมในการหาคำตอบของวิธี บรานซ์แอนด์บาวด์จะแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 การผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับของปัญหาดั้งต้น

จากปัญหา MINLP ซึ่งเป็นปัญหาดั้งต้น ในขั้นตอนแรกจะต้องทำการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับทั้งหมดที่เป็นตัวแปรจำนวนเต็มให้กลายเป็นตัวแปรต่อเนื่อง เพื่อเป็นการแปลงจากปัญหา MINLP ที่ไม่สามารถแก้ได้โดยตรงให้กลายเป็นปัญหา NLP ซึ่งสามารถแก้ได้ง่ายกว่าโดยใช้เทคนิคในการแก้ปัญหา NLP ที่มีอยู่เดิม ซึ่งในที่นี้จะทำการอธิบายถึงภาพรวมในการแก้ปัญหา

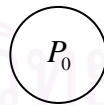
ของวิธีbranch-and-bound ก่อน ส่วนเทคนิคที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหา NLP นั้นจะอธิบายต่อไปในภายหลัง

จากปัญหา MINLP ที่มีเงื่อนไขบังคับเป็นตัวแปรไบนารี ซึ่งมีรูปแบบของสมการทั่วไปดังสมการที่ 3.2 เมื่อเราทำการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับที่เป็นตัวแปรไบนารีให้กลายเป็นตัวแปรต่อเนื่อง จะทำให้เราได้ปัญหา NLP ที่มีรูปแบบของสมการทั่วไปดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 & \underset{x,y}{\text{minimize}} && f(x,y) \\
 & \text{subject to} && h(x,y) = 0 \\
 & && g(x,y) \leq 0 \\
 & && x \in X \subseteq \{0,1\} \\
 & && 0 \leq y \leq 1
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างสมการที่ 3.2 และ สมการที่ 3.3 จะเห็นว่าคุณลักษณะหนึ่งของการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับก็คือ จะทำให้เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) ของปัญหาตั้งต้นกลายเป็นเซตย่อยของเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหา NLP ที่เกิดจากการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น

เราจะอธิบายลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธีbranch-and-bound โดยใช้แผนภาพต้นไม้ (Search Tree) โดยจะเปรียบเทียบปัญหา NLP เป็นเสมือนกิ่งหนึ่งของต้นไม้ ซึ่งสามารถแตกสาขาออกเป็นกิ่งย่อย ๆ ได้ โดยในขั้นตอนเริ่มต้น ปัญหา NLP ปัญหาแรกหรือกิ่งแรกที่เกิดขึ้นในแผนภาพต้นไม้ ก็คือปัญหาที่เกิดจากการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้นตามสมการที่ 3.3 ซึ่งเราจะกำหนดให้เป็นปัญหา  $P_0$



รูปที่ 3.1 ปัญหาในโหนดแรกของแผนภาพต้นไม้

## ขั้นตอนที่ 2 สร้างรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา

ตลอดกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranch-and-bound ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ จะมีปัญหา NLP ถูกสร้างขึ้นใหม่ตลอดเวลา ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะต้องได้รับการวิเคราะห์และถูกตัดออกจากการพิจารณา รายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณาเป็นรายการที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อบรรจุปัญหาที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ เพื่อช่วยในการตรวจสอบว่าปัญหานั้นได้รับ

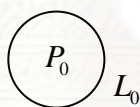
การวิเคราะห์แล้วหรือยัง หากได้รับการวิเคราะห์แล้วปัญหาจะต้องถูกตัดออกจากรายการ และเมื่อทุกปัญหาที่ถูกบรรจุเข้ามาในรายการถูกตัดออกไป กระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีโบราณซ์ แอนด์บาวด์จะสิ้นสุด

### ขั้นตอนที่ 3 การหาขอบเขตล่าง

การหาขอบเขตล่าง คือ การแก้ปัญหา NLP ที่ถูกบรรจุเข้ามาอยู่ในรายการของปัญหา เพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด

จากรูปที่ 3.1 ขณะนี้ปัญหา NLP ปัญหาแรกที่ถูกบรรจุเข้ามาอยู่ในรายการ คือ ปัญหา  $P_0$  ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดจากการผ่อนปรนเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น และเนื่องจากเซตผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาตั้งต้นจะเป็นเซตย่อยของเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหา  $P_0$  เพราะฉะนั้น หากเราแทนค่าตัวแปรในฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_0$  ด้วยผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Value) ของปัญหา  $P_0$  จะเป็นขอบเขตล่างของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาตั้งต้น

ในรูปที่ 3.2 จะให้  $L_0$  แทนค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_0$  เมื่อแทนค่าตัวแปรในฟังก์ชันจุดประสงค์ด้วยผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 3.2 การหาขอบเขตล่างของปัญหาตั้งต้นโดยการแก้ปัญหา  $P_0$

### ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหา คือ การจำแนกประเภทของปัญหา NLP ที่ถูกบรรจุเข้ามาอยู่ในรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา โดยอ้างอิงจากผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนการหาขอบเขตล่าง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ปัญหาจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ปัญหา NLP เป็นแฟธอม (Fathomed) หมายถึง ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา NLP ที่คำนวณได้จากขั้นตอนการหาขอบเขตล่าง จะเป็นผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหาตั้งต้น กล่าวคือ ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา NLP จะสอดคล้องตามเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น ซึ่งจะทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาตั้งต้นเท่ากับค่าขอบเขตล่าง

กรณีที่ 2 ปัญหา NLP เป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ (Infeasible) หมายความว่าไม่มีผลเฉลยค่าใดที่จะสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับของปัญหา NLP ดังกล่าว

กรณีที่ 3 ปัญหา NLP เป็นปัญหาที่สามารถหาผลเฉลยได้แต่ไม่เป็นแฟรอม หมายความว่า ในการแก้ปัญหา NLP สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ แต่ผลเฉลยค่านั้นไม่สอดคล้องตามเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น ดังนั้น ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา NLP เมื่อแทนค่าตัวแปรในฟังก์ชันจุดประสงค์ด้วยผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาตั้งต้น

### ขั้นตอนที่ 5 การแตกกิ่ง (Branching) และการตัดกิ่ง (Pruning)

จากผลการวิเคราะห์ปัญหาในขั้นตอนที่ 4 เราจะสามารถดำเนินการกับปัญหาที่ได้รับการวิเคราะห์แล้วได้ 2 วิธี คือ ตัดออกจากรายการของปัญหา ซึ่งจะเรียกว่าการตัดกิ่ง หรือแตกปัญหาดังกล่าวออกเป็นปัญหาย่อย ซึ่งจะเรียกว่าการแตกกิ่ง

จากรูปที่ 3.2 เมื่อเราทำการวิเคราะห์ปัญหา  $P_0$  ซึ่งเป็นปัญหาเดียวที่มีอยู่ในรายการขณะนี้ ผลการวิเคราะห์ปัญหา จะตรงตามกรณีใดกรณีหนึ่งในทั้งหมด 3 กรณีที่ได้กล่าวมาข้างต้น

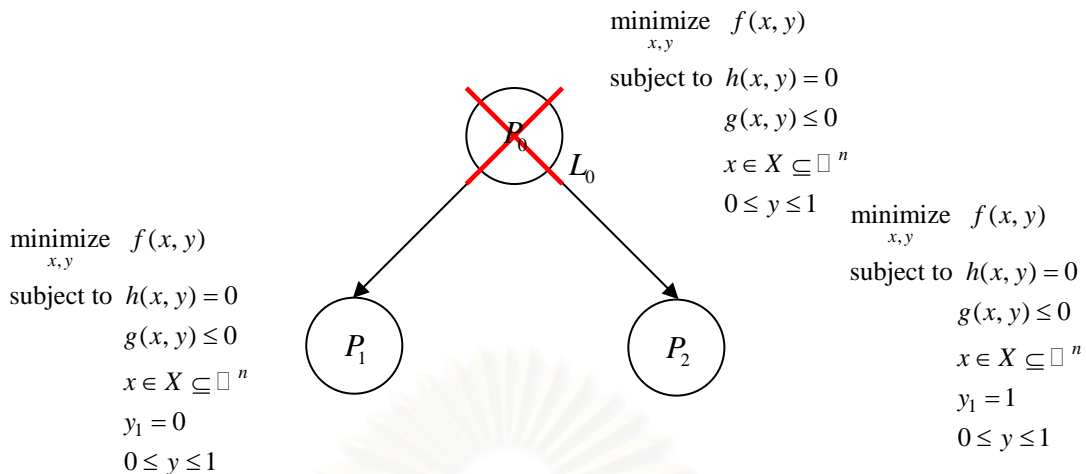
เมื่อผลการวิเคราะห์ปัญหา  $P_0$  เป็นไปตามกรณีที่ 1 หมายถึง ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_0$  จะสอดคล้องตามเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น และค่าขอบเขตล่าง  $L_0$  จะเท่ากับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาตั้งต้น ในกรณีนี้ เนื่องจากปัญหา  $P_0$  เป็นปัญหา NLP ที่เกิดจากการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น ดังนั้น หากผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_0$  สอดคล้องตามเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น จะสามารถสรุปได้ว่า ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_0$  จะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาตั้งต้นด้วย

หากผลการวิเคราะห์ปัญหา  $P_0$  เป็นไปตามกรณีที่ 2 หมายถึง ไม่มีผลเฉลยที่เป็นไปได้สำหรับปัญหา  $P_0$  และเนื่องจากเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้สำหรับปัญหา  $P_0$  ครอบคลุมเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหาตั้งต้น ดังนั้น หากปัญหา  $P_0$  ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ปัญหาตั้งต้นก็ไม่สามารถหาผลเฉลยได้เช่นเดียวกัน

หากปัญหา NLP ที่อยู่ในรายการของปัญหาถูกวิเคราะห์ว่าเป็นแฟรอมหรือเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ปัญหานั้นจะถูกตัดออกจากรายการ กล่าวคือ จะไม่ทำการแตกกิ่งต่อไปจากไหนต่อไป

ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์ปัญหา  $P_0$  เป็นไปตามกรณีที่ 3 หมายถึง ในการแก้ปัญหา  $P_0$  จะสามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ แต่ผลเฉลยค่านั้นไม่สอดคล้องตามเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น ในกรณีนี้เราจะทำการแตกกิ่งปัญหา  $P_0$  ออกเป็นปัญหาย่อย 2 ปัญหา โดยการเลือกตัวแปรแตกกิ่ง (Branching Variable) เพื่อกำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปรดังกล่าว

ยกตัวอย่างเช่น เลือกตัวแปร  $y_1$  เป็นตัวแปรแตกกิ่ง โดยปัญหาย่อยในกิ่งที่ 1 จะกำหนดให้  $y_1 = 0$  และปัญหาย่อยในกิ่งที่ 2 กำหนดให้  $y_1 = 1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การแตกกิ่งของปัญหา  $P_0$

เมื่อพิจารณาจากสมการของปัญหาย่อย  $P_1$  และ  $P_2$  จะเห็นว่าเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหาย่อยทั้งสองปัญหาจะเป็นเซตย่อยของเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหา  $P_0$

หลังจากการแตกกิ่ง ปัญหาที่ถูกแตกกิ่งแล้วจะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา โดยในรูปที่ 3.3 จะให้  ~~$P_0$~~  เป็นสัญลักษณ์แทนปัญหาที่ถูกตัดออกจากรายการ ส่วนปัญหาย่อยที่เกิดจากการแตกกิ่งจะถูกบรรจุเข้าไปอยู่ในรายการ

### ขั้นตอนที่ 6 การวนซ้ำและการสิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบ

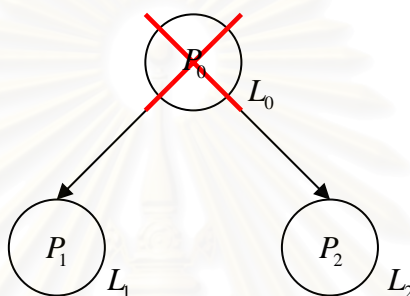
การสิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranch and bound จะเกิดขึ้นเมื่อปัญหาสุดท้ายที่เหลืออยู่ในรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณาได้ถูกตัดออกไป

จากรูปที่ 3.2 ปัญหา  $P_0$  เป็นปัญหาเดียวที่มีอยู่ในรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา หากในขั้นตอนที่ 5 ปัญหา  $P_0$  ถูกวิเคราะห์ว่าเป็นแฟรอมหรือไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ปัญหา  $P_0$  จะถูกตัดออกจากรายการ เป็นผลให้สิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranch and bound แต่หากปัญหา  $P_0$  ถูกวิเคราะห์ว่าไม่เป็นแฟรอมและสามารถหาผลเฉลยได้ ปัญหา  $P_0$  จะถูกแตกกิ่งออกเป็นปัญหาย่อย และปัญหาย่อยนั้นจะถูกบรรจุเข้ามาอยู่ในรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา ในกรณีนี้ถึงแม้ปัญหา  $P_0$  จะถูกตัดออกไป แต่จะมีปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ที่ถูกเพิ่มเข้ามาอยู่ในรายการ ทำให้ยังไม่สามารถสิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranch and bound ได้ และจะต้องเริ่มกระบวนการซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 จนถึงขั้นตอนที่ 5 ใหม่อีกครั้ง กับปัญหาที่ยังคงเหลืออยู่ในรายการ



### 3.4.1 การวนซ้ำของอัลกอริทึม

การทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 จะเป็นการหาขอบเขตล่างของปัญหาตั้งต้นโดยการแก้ปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  โดยในรูปที่ 3.4 จะสมมติให้  $L_1$  และ  $L_2$  เป็นค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  เมื่อแทนค่าตัวแปรในฟังก์ชันจุดประสงค์ด้วยผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละปัญหาตามลำดับ ซึ่งทั้ง  $L_1$  และ  $L_2$  จะเป็นค่าขอบเขตล่างของปัญหาตั้งต้น เมื่อทำการกำหนดค่าตัวแปรแตกกิ่งแล้ว

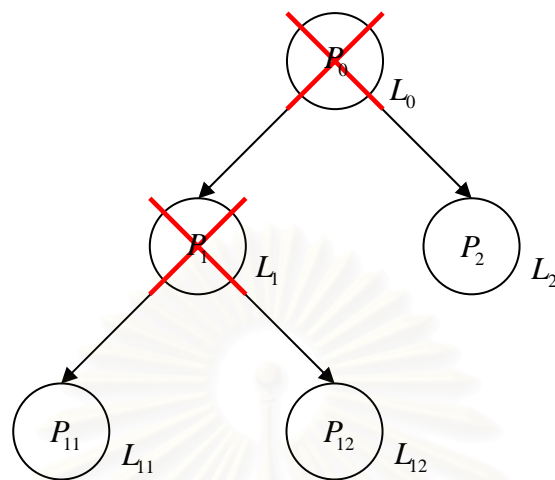


รูปที่ 3.4 การหาขอบเขตล่างของปัญหาย่อย  $P_1$  และ  $P_2$

เนื่องจากปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  เป็นปัญหาย่อยที่เกิดจากการแตกกิ่งของปัญหา  $P_0$  ดังนั้น เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหาย่อยทั้งสองจะเป็นเซตย่อยของเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ของปัญหา  $P_0$  และค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาย่อยทั้งสองจะต้องมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_0$  หรือสามารถกล่าวในอีกนัยหนึ่งได้ว่า เนื่องจากปัญหา  $P_0$  เป็นปัญหาที่เกิดจากการผ่อนคลายข้อบังคับของปัญหาตั้งต้นโดยตรง ดังนั้น ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_0$  จะเป็นค่าขอบเขตล่างที่ต่ำที่สุดของปัญหาตั้งต้น เมื่อเทียบกับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ที่เกิดจากการแตกกิ่งของปัญหา  $P_0$  และในอนาคตหากจะต้องทำการแตกกิ่งปัญหา  $P_1$  หรือ  $P_2$  ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาย่อยใหม่ที่เกิดขึ้นจากการแตกกิ่ง จะต้องมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาข้างบนที่อยู่ในกิ่งเดียวกัน

ยกตัวอย่างเช่น หากทำการแตกกิ่งปัญหา  $P_1$  ออกเป็นปัญหาย่อย  $P_{11}$  และ  $P_{12}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_{11}$  และ  $P_{12}$  จะต้องมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_1$  ซึ่งจะต้องมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_0$  กล่าวคือ  $L_{11} > L_1 > L_0$  และ  $L_{12} > L_1 > L_0$  แต่ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาย่อยในระดับต่ำกว่าไม่จำเป็นจะต้องมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาข้างบนที่อยู่คนละกิ่งกัน ยกตัวอย่างเช่น

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_{11}$  ไม่จำเป็นจะต้องมากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_2$



รูปที่ 3.5 การแตกกิ่งปัญหา  $P_1$  ออกเป็นปัญหาย่อย  $P_{11}$  และ  $P_{12}$

หลังจากขั้นตอนการหาขอบเขตล่าง จะเป็นการวิเคราะห์ปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ซึ่งผลการวิเคราะห์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี ดังที่ได้อธิบายไว้ในรายละเอียดของขั้นตอนที่ 4 ข้างต้น

เมื่อเสร็จจากขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหา จะเป็นการตัดสินใจดำเนินการกับปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  โดยอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ปัญหาในขั้นตอนที่ 4 ซึ่งในสถานการณ์ที่มีปัญหาอยู่ในรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณามากกว่า 1 ปัญหา การตัดสินใจดำเนินการกับปัญหาที่อยู่ในรายการจะซับซ้อนกว่ากรณีที่ปัญหาอยู่ในรายการเพียงปัญหาเดียว โดยเราจะแจกแจงผลการวิเคราะห์ปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ออกเป็น 6 กรณีย่อย พร้อมทั้งอธิบายวิธีดำเนินการกับทั้งสองปัญหาแยกตามแต่ละกรณี ดังนี้

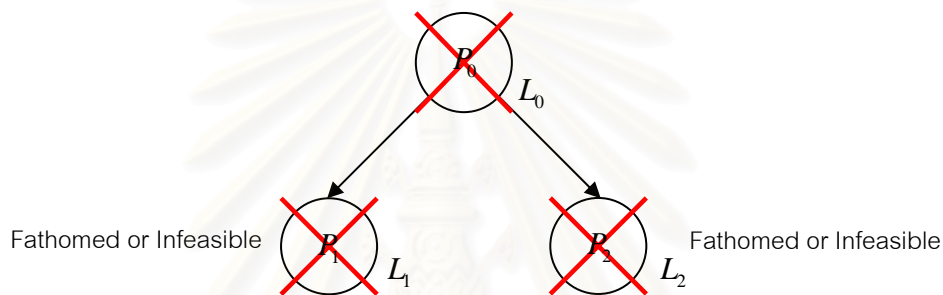
กรณีที่ 1 ปัญหาทั้งสองถูกวิเคราะห์ว่าเป็นแฟรอม ในกรณีนี้ ผลเฉลยค่าใดที่ทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาดั้งเดิมมีค่าต่ำสุด ผลเฉลยค่านั้นจะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาดั้งเดิม ส่วนปัญหาทั้งสองจะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา

จากรูปที่ 3.4 เมื่อปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ถูกวิเคราะห์ว่าเป็นแฟรอม ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาดั้งเดิมเมื่อแทนด้วยผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  จะเท่ากับ  $L_1$  และ  $L_2$  หากเปรียบเทียบกันระหว่าง  $L_1$  และ  $L_2$  แล้วพบว่า  $L_1 < L_2$  จะสามารถสรุปได้ว่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_1$  จะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาดั้งเดิม ในทางกลับกันหาก  $L_2 < L_1$  จะสามารถสรุปได้ว่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_2$  จะเป็นผลเฉลยที่

เหมาะสมที่สุดของปัญหาตั้งต้น หลังจากนั้นปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  จะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา

กรณีที่ 2 ปัญหาใดปัญหาหนึ่งถูกวิเคราะห์ว่าเป็นแฟธอม ในขณะที่อีกปัญหาหนึ่งถูกวิเคราะห์ว่าไม่สามารถหาผลเฉลยได้ จะสามารถสรุปได้ว่า ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาที่เป็นแฟธอมจะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาตั้งต้น และปัญหาทั้งสองจะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา

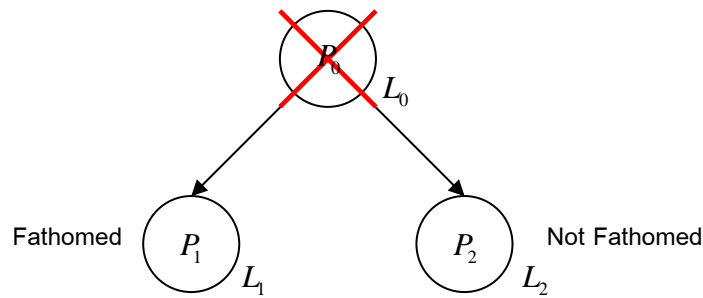
กรณีที่ 3 ทั้งสองปัญหาถูกวิเคราะห์ว่าไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ในกรณีนี้ทั้งสองปัญหาจะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา และสามารถสรุปได้ว่า ปัญหาตั้งต้นเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาผลเฉลยได้



รูปที่ 3.6 การตัดปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ออกจากการพิจารณาเมื่อปัญหาทั้งสองเป็นแฟธอมหรือไม่สามารถหาผลเฉลยได้

รูปที่ 3.6 เป็นแผนภาพต้นไม้แสดงการตัดกิ่งปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา เนื่องจากทั้งสองปัญหาถูกวิเคราะห์ว่าเป็นแฟธอมหรือเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ และเมื่อปัญหาที่มีอยู่ในรายการทั้งหมดได้ถูกตัดออกไป จะสามารถสิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranch and bound ได้

กรณีที่ 4 ปัญหาใดปัญหาหนึ่งถูกวิเคราะห์ว่าเป็นแฟธอมในขณะที่อีกปัญหาหนึ่งถูกวิเคราะห์ว่าไม่เป็นแฟธอมและสามารถหาผลเฉลยได้ โดยในที่นี้เราจะสมมติให้ปัญหา  $P_1$  เป็นแฟธอม และปัญหา  $P_2$  ไม่เป็นแฟธอมดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งวิธีดำเนินการกับปัญหาทั้งสองจะสามารถแบ่งเป็นกรณีย่อยได้อีก 2 กรณี ได้แก่



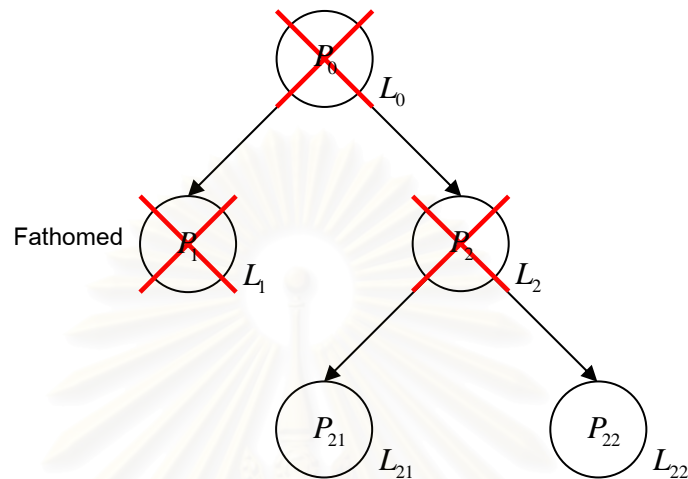
รูปที่ 3.7 ปัญหา  $P_1$  เป็นแฟธอมและปัญหา  $P_2$  ไม่เป็นแฟธอมและสามารถหาผลเฉลยได้

- ถ้า  $L_1 \leq L_2$  จะสื่อความหมายว่า ถึงแม้ปัญหา  $P_2$  จะสามารถแตกกิ่งออกเป็นปัญหาย่อยได้อีก แต่เนื่องจากค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาย่อยที่อยู่ด้านล่างย่อมมีค่ามากกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาที่อยู่ด้านบนสำหรับปัญหาย่อยในกิ่งเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ จึงไม่จำเป็นต้องทำการแตกกิ่งปัญหา  $P_2$  และสามารถตัดปัญหา  $P_2$  ออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณาได้ทันที และในท้ายที่สุดจะสามารถสรุปได้ว่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_1$  จะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมของปัญหาดั้งต้น

- ถ้า  $L_2 > L_1$  ในกรณีนี้ปัญหาที่ไม่เป็นแฟธอมจะถูกแตกกิ่งออกเป็นปัญหาย่อย ก่อนที่จะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา และปัญหาย่อยที่เกิดขึ้นจะถูกบรรจุเข้าไปอยู่ในรายการ ส่วนปัญหาที่เป็นแฟธอม จะถูกตัดออกจากรายการ ในขณะที่ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาที่เป็นแฟธอม จะถูกบันทึกไว้ว่าเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและเป็นค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาดั้งต้นชั่วคราว ซึ่งหมายความว่า トラบใดที่กระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์ยังไม่สิ้นสุด จะยังไม่สามารถสรุปได้ว่าผลเฉลยที่ถูกบันทึกไว้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาดั้งต้นอย่างแท้จริง เนื่องจากในอนาคต อาจมีปัญหาแฟธอมปัญหาใหม่เกิดขึ้นจากการแตกกิ่ง ซึ่งในกรณีนั้น จะต้องนำค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาดั้งต้นที่เหมาะสมที่สุดชั่วคราวมาเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาแฟธอมปัญหาใหม่ หากค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาแฟธอมปัญหาใหม่น้อยกว่าค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาดั้งต้นในสถานะปัจจุบัน ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาแฟธอมปัญหาใหม่ จะถูกบันทึกไว้แทนค่าชั่วคราวในสถานะปัจจุบัน ดังนั้น ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาดั้งต้นจะถูกปรับปรุงอยู่ตลอดเวลา จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์ จึงจะสามารถสรุปได้ว่าผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดค่าสุดท้ายที่ถูกบันทึกไว้ เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาดั้งต้นอย่างแท้จริง

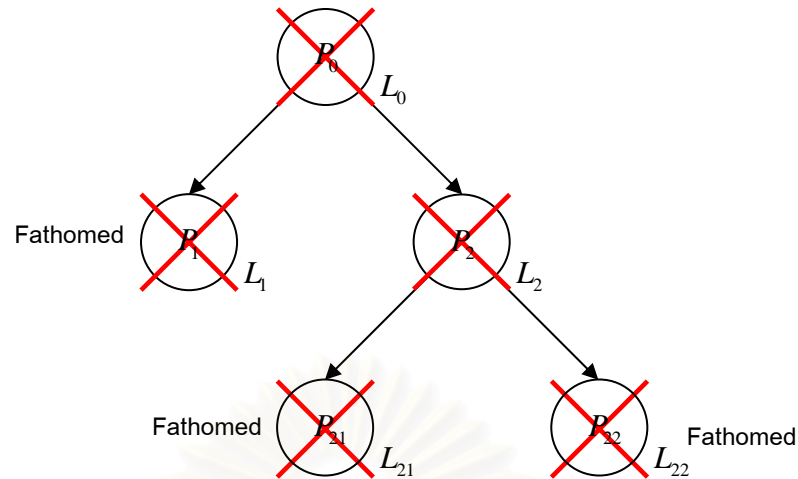
ในกรณีเช่นนี้ ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_1$  ( $L_1$ ) จะถูกบันทึกไว้ว่าเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและเป็นค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาดั้งต้นใน

สถานะปัจจุบัน ส่วนปัญหา  $P_1$  จะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา ในขณะที่ปัญหา  $P_2$  ซึ่งไม่ใช่ปัญหาที่เป็นแฟลทอมจะถูกแตกกิ่งออกเป็นปัญหาย่อย ก่อนที่จะถูกตัดออกจากกรรการรายการ และปัญหาย่อยที่เกิดขึ้นจะถูกบรรจุเข้ามาอยู่ในรายการ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การตัดปัญหา  $P_1$  ออกจากการพิจารณาเมื่อเป็นแฟลทอมและการแตกกิ่งปัญหา  $P_2$  ออกเป็นปัญหาย่อยเมื่อไม่เป็นแฟลทอมและสามารถหาผลเฉลยได้

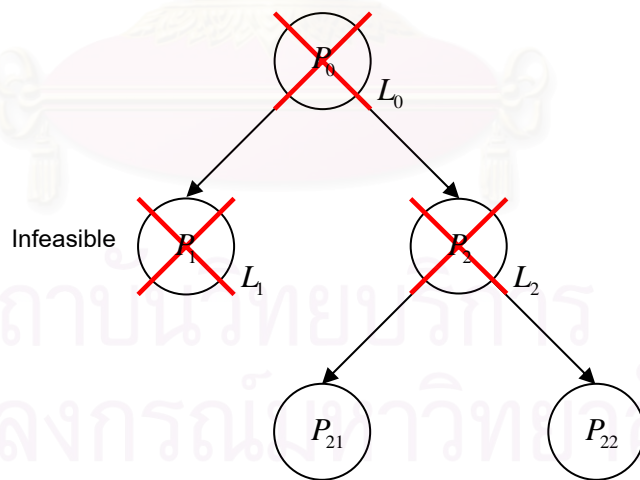
หากผลการวิเคราะห์ปัญหาระบุว่าทั้งปัญหา  $P_{21}$  และ  $P_{22}$  เป็นแฟลทอม ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของทั้งสองปัญหา ( $L_{21}$  และ  $L_{22}$ ) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาตั้งต้นในสถานะปัจจุบัน ( $L_1$ ) ที่ถูกบันทึกไว้ก่อนหน้านี้ หากผลการเปรียบเทียบระบุว่า ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_{21}$  มีค่าน้อยที่สุด ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหา  $P_{21}$  จะถูกบันทึกไว้เป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดและค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาตั้งต้นในสถานะปัจจุบันแทนที่ค่าเดิม และเนื่องจากปัญหา  $P_{21}$  และ  $P_{22}$  ถูกระบุว่า เป็นแฟลทอม ดังนั้น ปัญหาทั้งสองจะถูกตัดออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อปัญหาทั้งหมดที่อยู่ในรายการได้ถูกตัดออกไป กระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์จะสิ้นสุดลง โดยสามารถสรุปได้ว่า ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา  $P_{21}$  ซึ่งเป็นผลเฉลยค่าสุดท้ายที่ถูกบันทึกไว้จะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาตั้งต้น



รูปที่ 3.9 การตัดปัญหา  $P_{21}$  และ  $P_{22}$  ออกจากการพิจารณาเมื่อปัญหาทั้งสองเป็นแฟลทอม

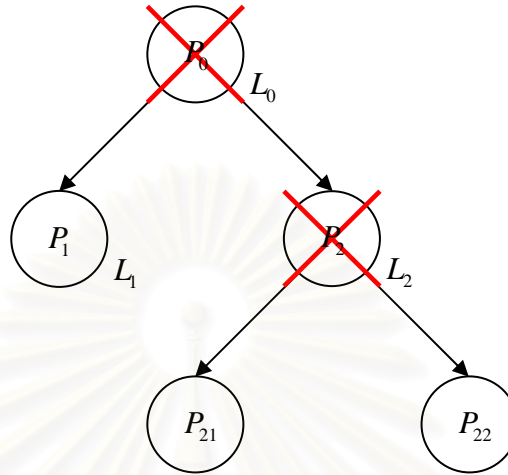
กรณีที่ 5 ปัญหาใดปัญหาหนึ่งถูกวิเคราะห์ว่าไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ในขณะที่อีกปัญหาหนึ่งถูกวิเคราะห์ว่าไม่เป็นแฟลทอมและสามารถหาผลเฉลยได้

ในกรณีนี้จะสามารถตัดปัญหาที่ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ออกจากรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณาได้ทันที ส่วนอีกปัญหาหนึ่งจะถูกแตกกิ่งออกเป็นปัญหาย่อย ก่อนที่จะถูกตัดออกจากรายการ ส่วนปัญหาย่อยที่เกิดขึ้นจะถูกบรรจุเพิ่มเข้ามาในรายการ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การตัดปัญหา  $P_1$  ออกจากการพิจารณาเนื่องจากไม่สามารถหาผลเฉลยได้และการแตกกิ่งปัญหา  $P_2$  ออกเป็นปัญหาย่อยเนื่องจากไม่เป็นแฟลทอมและสามารถหาผลเฉลยได้

กรณีนี้ 6 ปัญหาทั้งสองถูกวิเคราะห์ว่าไม่เป็นแฟรอมและสามารถหาผลเฉลยได้  
 ในกรณีนี้ปัญหาที่มีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์น้อยกว่าจะถูกตัดทิ้งก่อนจะถูกตัดออกจากรายการของ  
 ปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งเราสมมติให้  $L_2 < L_1$

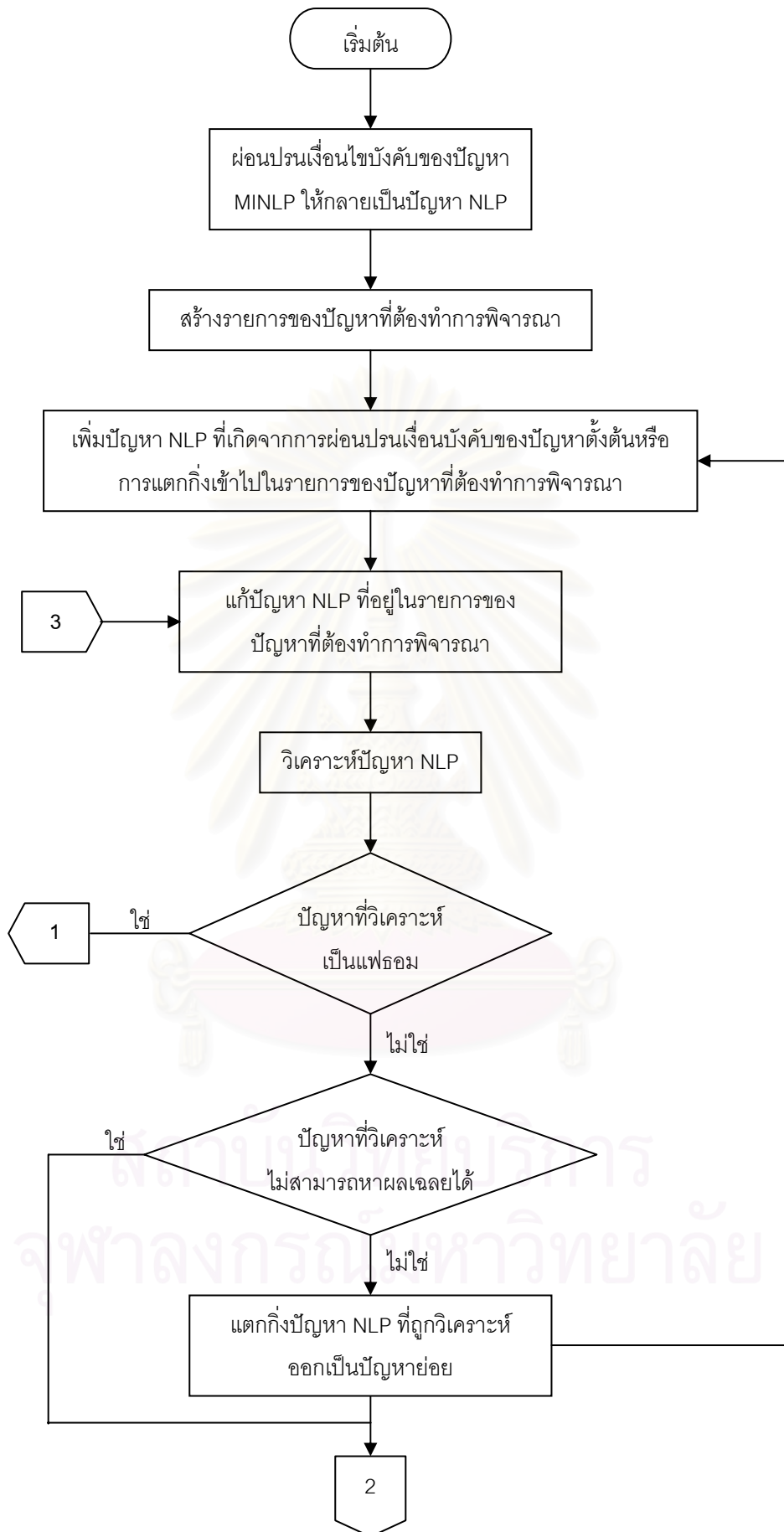


รูปที่ 3.11 ทั้งปัญหา  $P_1$  และ  $P_2$  ถูกวิเคราะห์ว่าไม่เป็นแฟรอมและสามารถหาผลเฉลยได้

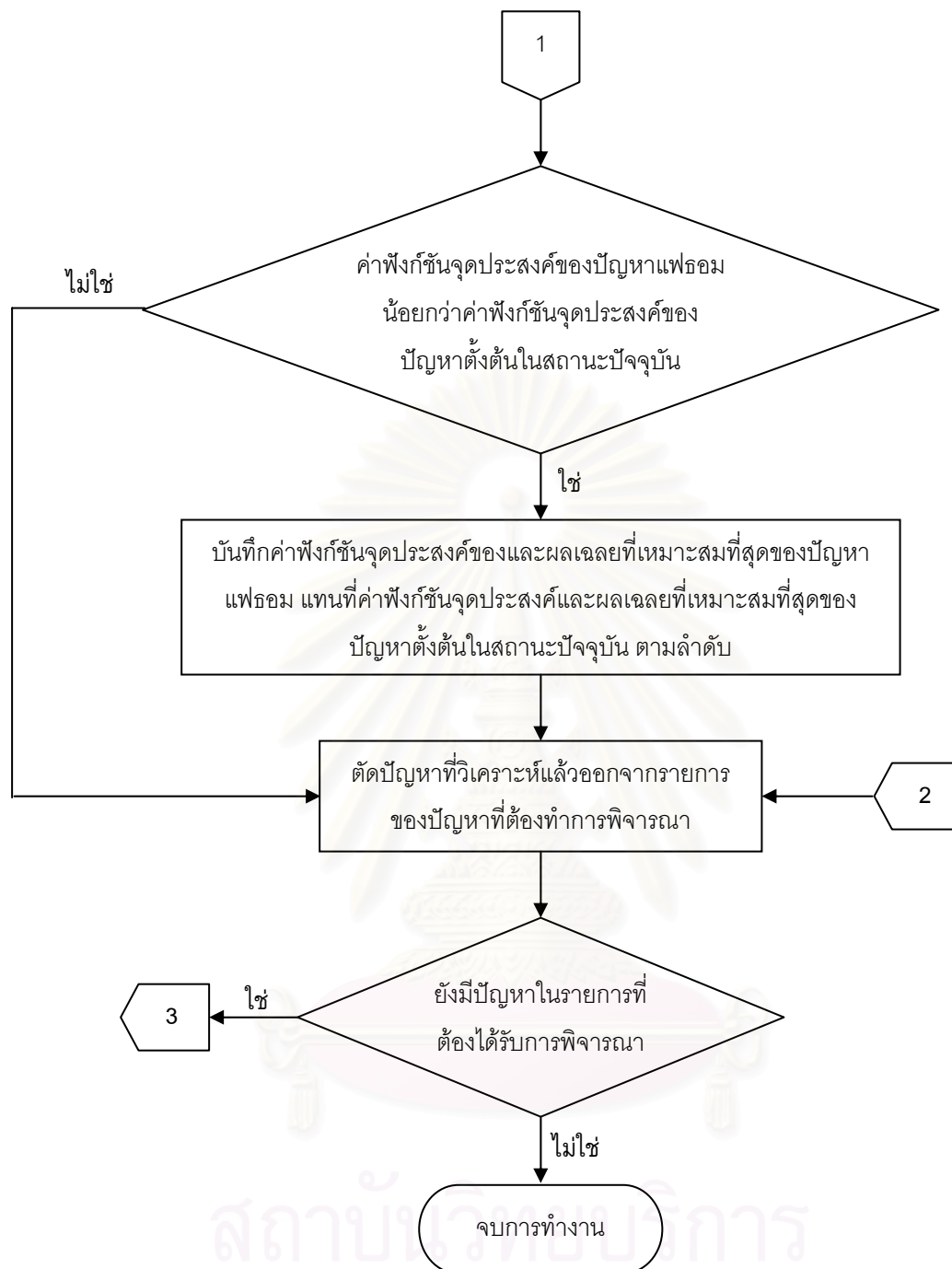
ทราบได้ทีในรายการยังมีปัญหาที่ต้องพิจารณา กระบวนการทำซ้ำจะยังคงดำเนินต่อไป จนกว่าปัญหาทั้งหมดที่มีอยู่ในรายการจะถูกตัดออกไปทั้งหมด จึงจะสามารถหยุดกระบวนการ ค้นหาคำตอบของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์ได้

จากขั้นตอนการหาคำตอบของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์ทั้ง 6 ขั้นตอน จะสามารถสรุปออกมา เป็นแผนผังการทำงานของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์ ดังในรูปที่ 3.12

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย







รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงการทำงานของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์

ในกระบวนการหาคำตอบของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์ทั้งหมด ขั้นตอนสำคัญหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของวิธีbranซ์แอนด์บาวด์ คือ ขั้นตอนการแก้ปัญหา NLP ที่แต่ละกิ่งของแผนภาพต้นไม้ อัลกอริทึมที่จะนำมาแก้ปัญหา NLP จะต้องเป็นอัลกอริทึมที่มี

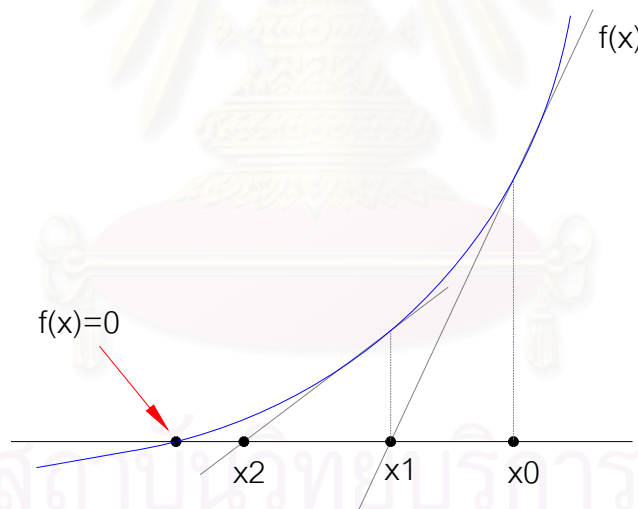
ประสิทธิภาพ สามารถแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็ว และให้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำ หนึ่งในอัลกอริทึมนี้ คือ วิธีการหาค่าเชิงกำลังสองสืบเนื่อง

### 3.5 กำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง (Sequential Quadratic Programming, SQP)

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีเงื่อนไขบังคับเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น (Nonlinearly Constrained Problem) โดยใช้วิธีการกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาประเภทนี้ อัลกอริทึมในการหาค่าตอบของวิธีการกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่องจะอนุพัทธ์มาจากการประยุกต์ใช้วิธีนิวตันเข้ากับเงื่อนไขจำเป็นอันดับที่หนึ่ง (First-Order Necessary Condition) ในการเป็นค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ของปัญหานี้

เพื่อเป็นการปูพื้นฐาน เราจะอธิบายถึงหลักการหาค่าตอบของวิธีนิวตันและการนำวิธีนิวตันมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับ

พิจารณาฟังก์ชันไม่เชิงเส้น  $f(x)$  ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การหาจุดตัดศูนย์ของฟังก์ชันไม่เชิงเส้นโดยใช้วิธีนิวตัน

เมื่อใช้วิธีนิวตันในการหาผลเฉลย  $x$  ที่ทำให้ฟังก์ชัน  $f$  มีค่าเท่ากับศูนย์ สูตรในการปรับปรุงผลเฉลยในแต่ละรอบของการคำนวณเป็นดังนี้

$$x_{k+1} = x_k + p_k \quad (3.4)$$

เมื่อ  $p_k$  คือ ทิศทางในการก้าว (Search Direction) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการของนิวตัน

$$f'(x_k)p_k = -f(x_k) \quad (3.5)$$

ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับ จะนำหลักการของวิธีนิวตันมาใช้ในการหาคำตอบ โดยการประยุกต์เอาสมการของนิวตันมาใช้กับเงื่อนไขจำเป็นอันดับที่หนึ่ง

พิจารณาปัญหาในสมการที่ 3.6 ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับ

$$\text{minimize } f(x) \text{ หรือ maximize } f(x) \quad (3.6)$$

ผลเฉลย  $x_*$  ใด ๆ จะเป็น Local Optimizer ของฟังก์ชัน  $f$  ได้ก็ต่อเมื่อ  $x_*$  สอดคล้องตามเงื่อนไข  $f'(x_*) = 0$  ซึ่งเงื่อนไขนี้จะเป็นเงื่อนไขจำเป็นอันดับที่หนึ่งในการเป็น Local Optimizer สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับ ซึ่งถ้าเป็นในกรณีของปัญหา 1 มิติ เงื่อนไขนี้จะเป็น  $f'(x) = 0$

เมื่อเราประยุกต์เอาสมการของนิวตันมาใช้กับเงื่อนไขจำเป็นอันดับที่หนึ่งในการเป็น Local Optimizer ของปัญหาในสมการที่ 3.6 นั่นคือ  $f'(x) = 0$  ซึ่งมีจาโคเบียนเท่ากับ  $\nabla^2 f(x)$  จะนำไปสู่สูตรของวิธีนิวตันในการปรับปรุงคำตอบสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับ คือ

$$x_{k+1} = x_k + p_k \quad (3.7)$$

เมื่อ  $p_k$  เป็นผลเฉลยที่หาได้จากสมการของนิวตัน

$$[\nabla^2 f(x_k)]p_k = -f'(x_k) \quad (3.8)$$

หลักการในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่ไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับที่กล่าวถึงข้างต้น ได้ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมในกรณีที่มีเงื่อนไขบังคับเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น และพัฒนาไปเป็นอัลกอริทึมในการหาคำตอบของวิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสี่บเนือง

พิจารณาปัญหาในสมการที่ 3.7 ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีเงื่อนไขบังคับเป็นสมการไม่เชิงเส้น

$$\begin{aligned} & \text{minimize } f(x) \\ & \text{subject to } g(x) = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขจำเป็นอันดับที่หนึ่งในการเป็น Local Minimizer คือ

$$\nabla L(x, \lambda) = 0 \quad (3.8)$$

เมื่อ  $L(x, \lambda)$  เป็นลากรางเจียนฟังก์ชัน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$L(x, \lambda) = f(x) - \lambda^T g(x) \quad (3.9)$$

เมื่อประยุกต์ใช้วิธีนิวตันเข้ากับเงื่อนไขจำเป็นอันดับที่หนึ่งในการเป็น Local Minimizer จะได้สูตรในการปรับปรุงคำตอบของวิธีนิวตัน คือ

$$\begin{pmatrix} x_{k+1} \\ \lambda_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_k \\ \lambda_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_k \\ v_k \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

เมื่อ  $p_k$  และ  $v_k$  สามารถหาได้จากการแก้ระบบสมการเชิงเส้น

$$\nabla^2 L(x_k, \lambda_k) \begin{pmatrix} p_k \\ v_k \end{pmatrix} = -\nabla L(x_k, \lambda_k) \quad (3.11)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในอีกรูปหนึ่งได้เป็น

$$\begin{pmatrix} \nabla_{xx}^2 L(x_k, \lambda_k) & -\nabla g(x_k) \\ -\nabla g(x_k)^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_k \\ v_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla_x L(x_k, \lambda_k) \\ g(x_k) \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

ซึ่งระบบสมการนี้จะเป็นเงื่อนไขความเป็นค่าเหมาะที่สุดอันดับที่หนึ่ง (First-Order Optimality Condition) สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสม ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
& \underset{p}{\text{minimize}} && \frac{1}{2} p^T [\nabla_{xx}^2 L(x_k, \lambda_k)] p + p^T [\nabla_x L(x_k, \lambda_k)] \\
& \text{subject to} && [\nabla g(x_k)]^T p + g(x_k) = 0
\end{aligned}
\tag{3.13}$$

ปัญหาในสมการที่ 3.13 เป็นปัญหาคำหนดการเชิงกำลังสอง (Quadratic Programming) ซึ่งมีฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นฟังก์ชันกำลังสองและมีเงื่อนไขบังคับเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ซึ่งฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหานี้จะได้มาจากการประมาณแบบกำลังสองของลากรางเจียนฟังก์ชันในสมการที่ 3.9 ที่จุด  $(x_k, \lambda_k)$  และเงื่อนไขบังคับจะได้มาจากการประมาณแบบเชิงเส้นของสมการ  $g(x_k + p) = 0$

ดังนั้น หลักการในการหาคำตอบของวิธีกำหนดการเชิงกำลังสองสืบเนื่อง คือ ในแต่ละรอบของการทำซ้ำจะต้องทำการแก้ปัญหาคำหนดการเชิงกำลังสองในสมการที่ 3.13 เพื่อให้ได้ค่าเวกเตอร์  $(p_k, v_k)$  ซึ่งค่านี้จะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงผลเฉลย  $(x_k, \lambda_k)$  ตามสมการที่ 3.10 จนกว่าผลต่างระหว่างผลเฉลย  $(x_{k+1}, \lambda_{k+1})$  ในรอบถัดไปกับผลเฉลย  $(x_k, \lambda_k)$  ในรอบก่อนหน้าจะเข้าสู่ค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

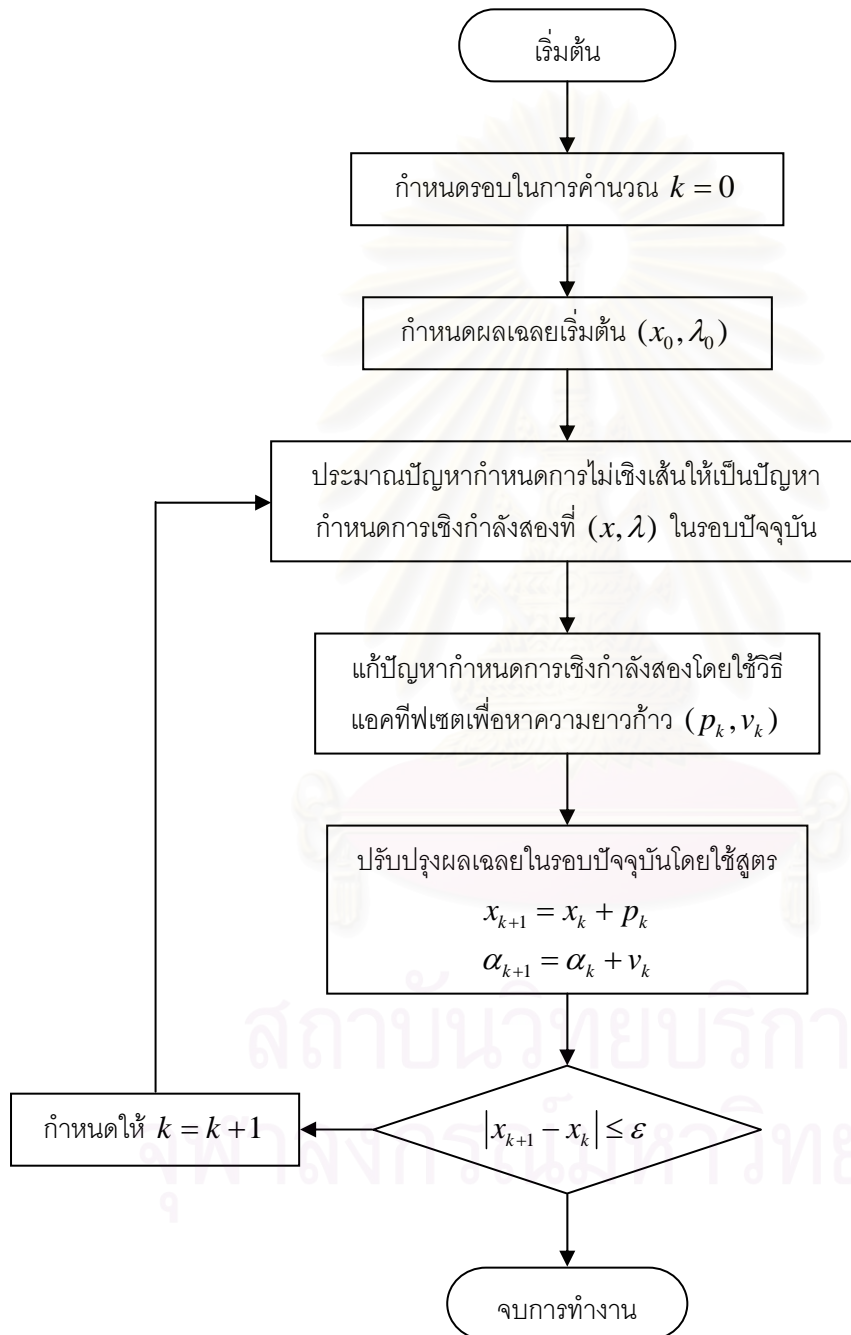
ในส่วนตัวอันนี้เราจะทำการพิจารณาปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่มีทั้งสมการและอสมการเงื่อนไขบังคับซึ่งมีรูปแบบสมการทั่วไป ดังนี้

$$\begin{aligned}
& \text{minimize} && f(x) \\
& \text{subject to} && g_1(x) \geq 0 \\
& && g_2(x) = 0
\end{aligned}
\tag{3.14}$$

ปัญหาคำหนดการเชิงกำลังสองที่ได้กล่าวมาข้างต้น เกิดจากการประมาณลากรางเจียนฟังก์ชันแบบกำลังสอง และการประมาณเงื่อนไขบังคับแบบเชิงเส้น ซึ่งเมื่อใช้หลักการเดียวกันนี้กับปัญหาในสมการที่ 3.9 จะทำให้ได้ปัญหาคำหนดการเชิงกำลังสองอยู่ในรูปสมการ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
& \underset{p}{\text{minimize}} && \frac{1}{2} p^T [\nabla_{xx}^2 L(x_k, \lambda_k)] p + p^T [\nabla_x L(x_k, \lambda_k)] \\
& \text{subject to} && [\nabla g_1(x_k)]^T p + g_1(x_k) \geq 0 \\
& && [\nabla g_2(x_k)]^T p + g_2(x_k) = 0
\end{aligned}
\tag{3.15}$$

ซึ่งผลเฉลย  $(p_k, v_k)$  ของปัญหาในสมการที่ 3.15 จะถูกนำไปปรับปรุงคำตอบในรอบถัดไป ปัญหากำหนดการเชิงกำลังสองดังที่แสดงในสมการ 3.13 และ 3.15 สามารถแก้ได้โดยใช้วิธีแควดทีฟเซต ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก [4] แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธี SQP จะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธี SQP

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีแก้ปัญหาที่ถูกนำมาประยุกต์มาใช้ในวิทยานิพนธ์ ได้แก่ วิธีโบราณซ์ แอนด์บาวด์และวิธีกำหนดการเชิงลำดับกำลังสอง ซึ่งในบทถัดไปจะเป็นการอธิบายถึงวิธีการกำหนดรูปแบบของปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ และการประยุกต์เอาวิธีโบราณซ์แอนด์บาวด์และวิธีกำหนดการเชิงลำดับกำลังสองมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การกำหนดตำแหน่งติดตั้งและขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงปัญหาและแนวทางการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยจะอธิบายถึงวิธีการกำหนดรูปแบบของปัญหาให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ และวิธีการประยุกต์ใช้แนวทางการแก้ปัญหาที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 มาแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์

#### 4.1 นิยามตัวแปร

ก่อนที่จะกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการระบุปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย จะขอกล่าวถึงนิยามของตัวแปรที่ปรากฏอยู่ในสมการ เพื่อความเข้าใจชัดเจน ดังนี้

นิยามตัวแปร

ตัวแปรต่อเนื่อง ได้แก่

$P_L$  คือ กำลังสูญเสียจริงทั้งหมดของระบบจำหน่ายที่พิจารณา

$P_1$  คือ กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง

$P_i$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงรวมที่บัส  $i$

$Q_i$  คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟรวมที่บัส  $i$

$P_{G_i}$  คือ กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$

$Q_{G_i}$  คือ กำลังการผลิตรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$

$V_i$  คือ ขนาดของแรงดันที่บัส  $i$

$\delta_i$  คือ มุมของแรงดันที่บัส  $i$

$I_{ij}$  คือ ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากบัส  $i$  ไปยังบัส  $j$

$S_{ij}$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลจากบัส  $i$  ไปยังบัส  $j$



ตัวแปรไบนารี ได้แก่

$e_i$  คือ ตัวแปรที่เป็นตัวบอกถึงสถานะการมีอยู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่บัส  $i$

ข้อมูลป้อนเข้า ได้แก่

$P_{D_i}$  คือ ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจริงที่บัส  $i$

$P_{G_i}^{\max}$  คือ กำลังการผลิตจริงสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$

$Q_{G_i}^{\max}$  คือ กำลังการผลิตรีแอกทีฟสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$

$P_{G_i}^{\min}$  คือ กำลังการผลิตจริงต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$

$Q_{G_i}^{\min}$  คือ กำลังการผลิตรีแอกทีฟต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$

$V_i^{\max}$  คือ ขนาดแรงดันสูงสุดของบัส  $i$

$V_i^{\min}$  คือ ขนาดแรงดันต่ำสุดของบัส  $i$

$Y_{ij}$  คือ ขนาดของสมาชิกแถวที่  $i$  คอลัมน์ที่  $j$  ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

$\theta_{ij}$  คือ มุมของสมาชิกแถวที่  $i$  คอลัมน์ที่  $j$  ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์

$y_{ij}$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส  $i$  และบัส  $j$

$y_{i0}$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส  $i$  กับกราวด์ของระบบ

$S_{ij}^{\max}$  คือ พิกัดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่ง

$n_{bus}$  คือ จำนวนบัสของระบบที่ทำการศึกษา

$n_{DG}$  คือ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ต้องการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบจำหน่าย

## 4.2 รูปแบบของปัญหา

ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปัญหา MINLP ที่มีตัวแปรไม่ต่อเนื่องเป็นตัวแปรไบนารี โดยมีฟังก์ชันจุดประสงค์และเงื่อนไขบังคับ ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ถึง 4.7

จุดประสงค์ของปัญหา คือ ต้องการหาตำแหน่งของบัส  $e_i$  ที่ทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กและขนาดกำลังการผลิต  $P_{G_i}$  ที่จะทำให้อำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย  $P_L$  มีค่าต่ำที่สุด โดยกำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่ายสามารถคำนวณได้จากผลรวมของกำลังการผลิต

ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แต่ละบัสลบด้วยผลรวมของความต้องการกำลังไฟฟ้าที่แต่ละบัส ซึ่งใน  
ที่นี้จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาจะแสดงในอยู่สมการที่ 4.1

$$\text{minimize } P_L = P_1 + \sum_{i=2}^{\text{nbus}} (P_{G_i} \cdot e_i - P_{D_i}) \quad (4.1)$$

โดยมีเงื่อนไขบังคับ ดังต่อไปนี้

1. ค่าของกำลังไฟฟารวมที่บัสใดๆจะต้องสมดุลตามเงื่อนไขของสมการโหนดโพลาร์

$$\begin{aligned} P_i - \sum_{j=1}^{\text{nbus}} |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) &= 0 \\ Q_i - \sum_{j=1}^{\text{nbus}} |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) &= 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $P_i = P_{G_i} \cdot e_i - P_{D_i}$  และ  $Q_i = Q_{G_i} \cdot e_i - Q_{D_i}$

2. กำลังการผลิตที่แต่ละบัสจะต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวสามารถจ่ายได้

$$\begin{aligned} P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \\ Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \end{aligned} \quad (4.3)$$

3. หลังจากทำการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ามาในระบบจำหน่ายแล้ว ขนาดของ  
แรงดันที่แต่ละบัสจะต้องยังคงอยู่ในช่วงพิกัด

$$V_i^{\min} \leq |V_i| \leq V_i^{\max} \quad (4.4)$$

4. จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่ายเท่ากับที่ระบุไว้ล่วงหน้า

$$\sum_{i=2}^{\text{nbus}} e_i = \text{nDG} \quad (4.5)$$

5. กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งจะต้องมีค่าไม่เกินพิกัดของสายส่งแต่ละเส้น

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $S_{ij} = V_i I_{ij}^*$  และ  $I_{ij} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{i0}V_i$

6. ตัวแปรบอกตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะต้องมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

$$e_i \in \{0,1\} \quad (4.7)$$

เมื่อ  $e_i = 0$  หมายถึงไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่ออยู่ที่บัส  $i$  และ  $e_i = 1$  หมายถึงมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่ออยู่ที่บัส  $i$

การแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย จะประยุกต์เอาหลักการของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ร่วมกับวิธี SQP ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 มาใช้ในการแก้ปัญหา

#### 4.2 การประยุกต์ใช้หลักการของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ร่วมกับวิธี SQP

ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมเชิงผสมจำนวนเต็มที่มีขนาดใหญ่ และมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง อีกทั้งยังเป็นปัญหาที่ไม่เป็นคอนเวกซ์ ซึ่งหมายความว่า มีผลเฉลยเฉพาะที่มากกว่า 1 ค่า ซึ่งโดยปกติ ปัญหา NLP ทั่วไปที่ไม่มีตัวแปรจำนวนเต็มมาเกี่ยวข้องซึ่งมีขนาดใหญ่และไม่เป็นคอนเวกซ์ก็เป็นปัญหาที่จัดอยู่ในประเภทของปัญหา NP-complete ซึ่งในทางทฤษฎีนับว่าเป็นปัญหาที่แก้ได้ยากมากอยู่แล้ว การเพิ่มตัวแปรจำนวนเต็มเข้าไปยิ่งเป็นการเพิ่มความซับซ้อนให้กับปัญหา และเพิ่มระดับความยากของปัญหาให้มากขึ้นไปอีก ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีการนำเสนอวิธีการตามแนวทางเชิงกำหนดในการแก้ปัญหา MINLP ที่สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่ครอบคลุมผลเฉลยทั้งหมดได้ [3] [7] [15] [22] แต่หลักการของวิธีเหล่านี้ก็ยังคงยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ และเหมาะสมกับปัญหาที่มีขนาดเล็กมากกว่าปัญหาขนาดใหญ่ เพราะอัลกอริทึมในการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนทำให้ต้องใช้เวลาและทรัพยากรในการคำนวณมากพอสมควร ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่โดยส่วนใหญ่เมื่อต้องเผชิญกับปัญหา MINLP ที่มีขนาดใหญ่ มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง และไม่คอนเวกซ์ ผู้ใช้จึงมักจะเลือก

วิธีการแก้ปัญหาตามแนวทางสโทคาสติก เพราะการประยุกต์ใช้งานง่ายกว่ามาก เช่นเดียวกับการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ซึ่งมีการนำเสนอไว้ในงานวิจัยอื่น ๆ จะเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาตามแนวทางสโทคาสติก ดังที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 อย่างไรก็ตามด้วยเหตุผลที่ว่า ถึงแม้จะใช้วิธีการตามแนวทางสโทคาสติก ผู้ใช้ก็ไม่สามารถแน่ใจได้ว่าจะสามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้ อีกทั้งจากการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติม เราพบว่าในช่วงรอบทศวรรษที่ผ่านมา (ค.ศ.1990-ค.ศ.2000) มีแนวโน้มของการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหา MINLP ตามแนวทางเชิงกำหนดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าในอนาคตย่อมต้องมีการนำเสนอมิติ Global Optimization ซึ่งเป็นวิธีแก้ปัญหา MINLP ตามแนวทางเชิงกำหนดวิธีใหม่ ๆ ที่สามารถแก้ปัญหา MINLP ที่เป็นปัญหาขนาดใหญ่ และไม่เป็นคอนเวกซ์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาต่อไปในอนาคต เราจึงเลือกใช้วิธีการตามแนวทางเชิงกำหนดมาแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ ซึ่งวิธีที่เราเลือกใช้ คือ วิธีบรานซ์แอนด์บาร์ดร่วมกับวิธี SQP แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ เราได้พัฒนาโปรแกรมช่วยในการคำนวณขึ้นมาเองโดยได้นำเอารหัสคำสั่งบางส่วนของโปรแกรมเดิมที่มีผู้พัฒนาไว้แล้วมาปรับปรุงและประกอบรวมเข้าด้วยกัน บวกกับเหตุผลที่เราต้องการลดขั้นตอนในการคำนวณ เราจึงเลือกใช้อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาโดยการตั้งข้อสมมติฐานว่าปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเป็นปัญหาคอนเวกซ์ ซึ่งผลการทดลองโปรแกรมกับระบบตัวอย่างจะถูกนำเสนอในบทถัดไป

อัลกอริทึมในการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายที่ประยุกต์มาจากวิธีบรานซ์แอนด์บาร์ดร่วมกับวิธี SQP จะแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 แต่ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการการค้นหาคำตอบโดยใช้กฎการค้นหาตามกิ่ง (Tree Search) จะต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรต่าง ๆ อย่างเหมาะสม เพื่อให้อัลกอริทึมสามารถลู่ออกหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างรวดเร็ว

#### 4.2.1 การกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร

ปัญหาในสมการที่ 4.1 ถึง 4.7 จะมีตัวแปรสถานะ 6 ตัว ที่เราต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้น ได้แก่  $P_i$   $P_{G_i}$   $Q_{G_i}$   $V_i$   $\delta_i$  และ  $e_i$  ในกรณีที่กำหนดให้มีจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่ายเท่ากับ  $n$  เครื่อง จะกำหนดให้ตำแหน่งของบัสเริ่มต้นที่จะทำการ

ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ บัสที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด  $n$  อันดับแรก และค่าเริ่มต้นของกำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กแต่ละตัวเท่ากับค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าจริงของบัสนั้น ๆ และเนื่องจากเรากำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียว ดังนั้น ค่าเริ่มต้นของกำลังการผลิตรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะเท่ากับศูนย์ ส่วนค่าเริ่มต้นของขนาดแรงดันและมุมเฟสของแต่ละบัสจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1∠0 เปรอริยูนิต ส่วนค่าเริ่มต้นของกำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิงจะเท่ากับศูนย์

ค่าพารามิเตอร์ของระบบ ได้แก่ ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าของแต่ละบัส แอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ของระบบ พิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก พิกัดแรงดันของแต่ละบัส พิกัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่ง และจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบ จำหน่ายจะได้มาจากข้อมูลป้อนเข้า

#### 4.2.2 กระบวนการแก้ปัญหา

การประยุกต์ใช้วิธีบรันช์แอนด์บาวด์ร่วมกับวิธี SQP ในการแก้ปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย แบ่งเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ได้ดังนี้

ขั้นตอนแรก จะต้องทำการผ่อนปรนปัญหาดังต้นในสมการที่ 4.1 ถึง 4.7 ให้เป็นปัญหา NLP โดยการเปลี่ยนตัวแปรบอกตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก  $e_i$  จากเดิมที่เป็นตัวแปรไบนารีให้เป็นตัวแปรต่อเนื่อง ดังนั้น เงื่อนไขบังคับของปัญหาในสมการที่ 4.7 จะกลายเป็น

$$0 \leq e_i \leq 1 \quad (4.8)$$

ปัญหาดังต้นที่ถูกผ่อนปรนแล้วจะเป็นปัญหา NLP ปัญหาแรกที่เกิดขึ้นและเป็นปัญหาในโหนดแรกของแผนภาพต้นไม้

ขั้นตอนที่ 2 สร้างรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณาและบรรจุปัญหา NLP ปัญหาแรกลงไปในรายการ

ขั้นตอนที่ 3 ทำการแก้ปัญหา NLP ด้วยวิธี SQP เพื่อหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะเป็นขอบเขตล่างของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาดังต้น

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่อยู่ในรายการโดยอาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 ซึ่งผลการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ถ้าตัวแปร  $e_i$  มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ปัญหาจะเป็นแฟธอม และผลเฉลยของปัญหานี้จะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาตั้งต้น กรณีที่สอง ปัญหาในโหนดแรกไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการกำหนดค่าเริ่มต้นที่ไม่เหมาะสม หากลองเปลี่ยนตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก หรือเปลี่ยนขนาดกำลังการผลิตหลาย ๆ ครั้งแล้วผลการคำนวณยังไม่เปลี่ยนแปลง แสดงว่าระบบจำหน่ายที่ใช้ในการทดสอบไม่เหมาะสมที่จะทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กได้ และในกรณีที่ 3 ตัวแปร  $e_i$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ 1 แสดงว่ายังไม่สามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาตั้งต้นได้

ขั้นตอนที่ 5 การดำเนินการกับปัญหาในรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา ในกรณีที่ปัญหาเป็นแฟธอม หรือไม่สามารรถหาผลเฉลยได้ ปัญหาจะถูกตัดออกจากรายการ ซึ่งจะทำให้ในรายการไม่มีปัญหาเหลือให้พิจารณา ดังนั้น ในขั้นตอนที่ 6 จะสามารถจบกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ได้ แต่หากปัญหาไม่เป็นแฟธอมและสามารถหาผลเฉลยได้ จะต้องทำการแตกกิ่งปัญหานี้ออกเป็นปัญหาย่อย และบรรจุปัญหาย่อย 2 ปัญหาลงในรายการที่ต้องพิจารณา โดยการเลือกตัวแปรแตกกิ่งและกำหนดค่าให้กับมัน

ในวิทยานิพนธ์นี้เราได้นำหลักการเลือกตัวแปรแตกกิ่งที่ได้นำเสนอไว้ใน [5] มาประยุกต์ใช้ โดยเลือกตัวแปร  $e_i$  ที่มีค่าใกล้เคียง 0.5 มากที่สุดให้เป็นตัวแปรแตกกิ่ง จากนั้นเพิ่มเงื่อนไขบังคับ  $e_i = 0$  เข้าไปในปัญหาย่อยที่หนึ่งและ  $e_i = 1$  เข้าไปในปัญหาย่อยที่ 2 แล้วเพิ่มปัญหาย่อยทั้ง 2 ลงไปในรายการของปัญหาที่ต้องทำการพิจารณา ก่อนจะตัดปัญหาในโหนดแรกออกจากรายการ

ในกรณีที่ยังคงมีปัญหาในรายการให้พิจารณา ในขั้นตอนที่ 6 กระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์จะวนกลับมาทำซ้ำกับปัญหาที่เหลืออยู่ในรายการ โดยกระบวนการทำซ้ำจะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่าปัญหาทั้งหมดที่เหลืออยู่ในรายการถูกตัดออกไป ในระหว่างการทำซ้ำอาจจะมีปัญหาที่เป็นแฟธอมเกิดขึ้นมากกว่า 1 ปัญหา ซึ่งผลเฉลยของปัญหาที่เป็นแฟธอมเหล่านั้นจะถูกบันทึกไว้ และถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ผลสรุปในขั้นตอนสุดท้าย คือ ผลเฉลยของปัญหาแฟธอมที่ทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาตั้งต้นมีค่าต่ำที่สุดจะเป็นผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาตั้งต้น และเมื่อปัญหาทั้งหมดที่มีอยู่ในรายการถูกตัดออกไป จะสามารถหยุดกระบวนการค้นหาคำตอบของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ได้

หลังจากนำขั้นตอนเหล่านี้ไปพัฒนาเป็นโปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณหาขนาดกำลังผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ในบทถัดไปจะนำเสนอผลการทดสอบโปรแกรมกับแบบจำลองของระบบจำหน่ายที่มีการใช้งานจริง

## บทที่ 5

### การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงการทดสอบโปรแกรมการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาจากอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 โดยจะอธิบายถึงโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของระบบทดสอบ ตามด้วยขั้นตอนในการทดลอง และในหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับระบบทดสอบ พร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลลัพธ์ในแต่ละกรณี

#### 5.1 ขอบเขตของระบบทดสอบและโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ

ในการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำหน่ายตัวอย่าง เราจะพัฒนารหัสต้นฉบับ (Source Code) ขึ้นมาโดยใช้โปรแกรม MATLAB รุ่น 6.5 โดยประยุกต์เอาบางส่วนขอโปรแกรม MATPOWER 2.0 มาประกอบรวมเข้าด้วยกัน ระบบจำหน่ายที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างเป็นแบบเรเดียลหรือแบบลูป
2. เป็นระบบ 3 เฟสแบบสมดุล
3. ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่ใช้ทดสอบจะต้องลู่เข้า

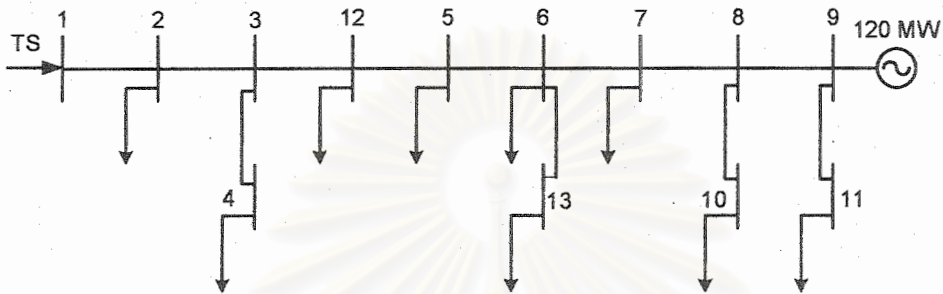
นอกจากนี้ระบบจำหน่ายที่ใช้จะต้องมีข้อมูลป้อนเข้าครบถ้วนตามตารางที่แสดงในภาคผนวก ก

#### 5.2 โครงสร้างของระบบทดสอบ

ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอ เราจะใช้ระบบจำหน่ายตัวอย่างในการทดสอบจำนวน 4 ระบบ ซึ่งเป็นแบบจำลองของระบบจำหน่ายที่มีการใช้งานจริง

มีทั้งระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบเรเดียล และระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบลูป โดยในหัวข้อนี้จะเป็นการบรรยายให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของระบบจำหน่ายทั้ง 4 ระบบดังต่อไปนี้

### 5.2.1 ระบบจำหน่ายที่ 1

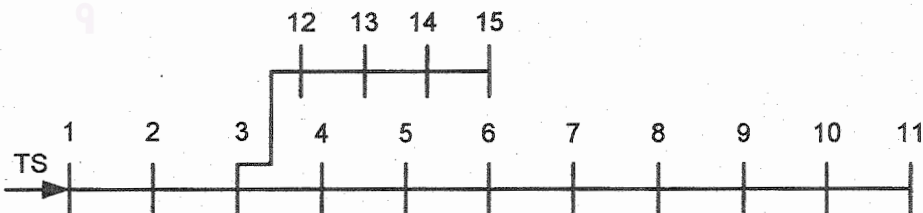


รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายที่ 1

ระบบจำหน่ายที่ 1 [31] เป็นระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างเป็นแบบเรเดียล มีจำนวนบัสในระบบทั้งหมด 13 บัส โดยมีบัส 1 เป็นบัสอ้างอิง (Slack Bus) และเป็นบัสที่เชื่อมต่อกับระบบส่งที่ระดับแรงดัน 115 kV บัส 9 เป็นบัสควบคุมแรงดัน (Voltage-Controlled Bus) ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 120 MW เชื่อมต่ออยู่แล้ว ส่วนบัสอื่น ๆ ที่เหลือในระบบจะเป็นโหลดบัส (Load Bus)

ลักษณะทางกายภาพของระบบจำหน่ายที่ 1 คือ จะมีสายป้อนหลักอยู่หนึ่งเส้น และมีการแยกสาขาของโหลดบัสออกมาจากสายป้อนหลักที่บางตำแหน่ง ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและพบเห็นได้บ่อยนักในระบบจำหน่ายทั่วไป

### 5.2.2 ระบบจำหน่ายที่ 2



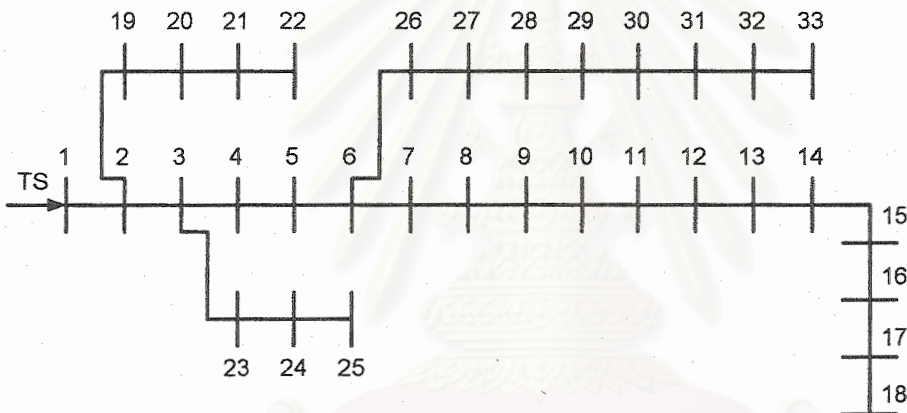
รูปที่ 5.2 แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายที่ 2



ระบบจำหน่ายที่ 2 [21] เป็นระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบเรเดียล มีจำนวนบัสในระบบทั้งหมด 15 บัส โดยมีบัส 1 เป็นบัสอ้างอิง ซึ่งเป็นบัสที่เชื่อมต่อกับระบบส่งที่ระดับแรงดัน 6.6 kV ส่วนบัสอื่น ๆ ที่เหลือในระบบจะเป็นโหลดบัส ระบบนี้เดิมจะไม่มีบัสควบคุมแรงดันและการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นไปในทิศทางเดียว

ระบบจำหน่ายที่ 2 จะมีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกับระบบจำหน่ายที่ 1 แต่จะแตกต่างกันตรงที่ระบบจำหน่ายนี้มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพียงแค่จุดเดียว คือ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมต่อกับระบบส่ง ในขณะที่ระบบจำหน่ายที่ 1 มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอื่นนอกเหนือจากแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง

### 5.2.3 ระบบจำหน่ายที่ 3

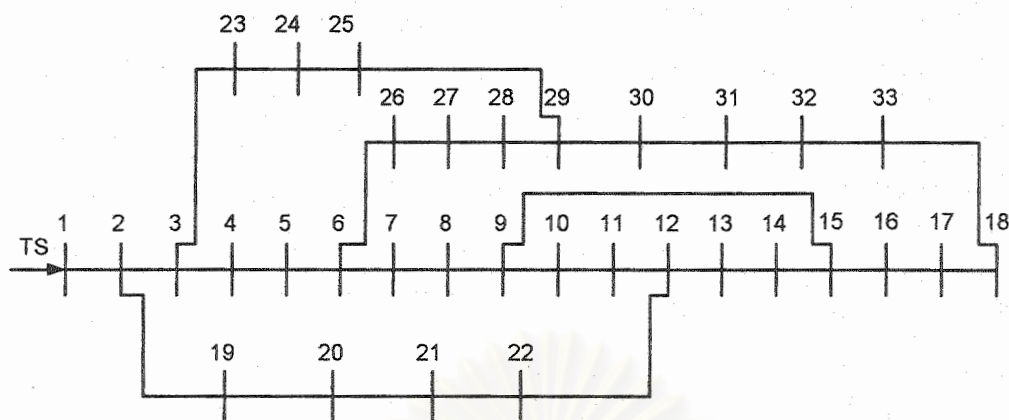


รูปที่ 5.3 แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายที่ 3

ระบบจำหน่ายที่ 3 [18] เป็นระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบเรเดียล มีจำนวนบัสในระบบทั้งหมด 33 บัส โดยมีบัส 1 เป็นบัสอ้างอิง ซึ่งเป็นบัสที่เชื่อมต่อกับระบบส่งที่ระดับแรงดัน 12.66 kV ส่วนบัสอื่น ๆ ที่เหลือในระบบจะเป็นโหลดบัส

โครงสร้างของระบบจำหน่ายที่ 3 จะค่อนข้างซับซ้อนมากกว่าระบบจำหน่ายที่ 1 และ 2 คือ มีสายป้อนหลักหนึ่งเส้น และมีสาขาของสายป้อนซึ่งมีจุดโหลดหลายตำแหน่งแยกออกมาจากสายป้อนหลัก มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพียงจุดเดียว คือ ตำแหน่งที่ทำการเชื่อมต่อกับระบบส่ง

## 5.2.4 ระบบจำหน่ายที่ 4



รูปที่ 5.4 แผนภาพเส้นเดียวของระบบจำหน่ายที่ 4

ระบบจำหน่ายที่ 4 ดัดแปลงมาจากโครงสร้างของระบบจำหน่ายที่ 3 โดยการสับสวิตช์เพื่อเชื่อมต่อบัสบางบัสในระบบเข้าด้วยกัน ซึ่งจากเดิมระบบจำหน่ายที่ 3 จะมีโครงสร้างแบบเรเดียล หลังจากการสับสวิตช์ ทำให้ได้ระบบจำหน่ายที่ 4 ซึ่งเป็นระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบลูป

## 5.3 ขั้นตอนในการทดสอบ

ระเบียบวิธีในการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำหน่ายทั้ง 4 ระบบ จะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลของระบบจำหน่ายในกรณีฐาน ตามโครงสร้างเดิมดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5.1 ถึง 5.4 เพื่อเพื่อคำนวณค่ากำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายสำหรับกรณีฐาน โดยข้อมูลป้อนเข้าและผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงอยู่ในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ในภาคผนวก ก
2. ในระบบจำหน่ายที่มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอื่นนอกเหนือจากจุดที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบส่ง ให้ตัดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้านั้น ๆ ออก แล้วปฏิบัติกับบัสนั้นเช่นเดียวกับโหลดบัส
3. ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้าไปในระบบจำหน่าย ในที่นี้จะแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา โดยเริ่มจากติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 1 ตัว จากนั้นจึงเพิ่มเป็น 2 3 และ 4 ตัว ตามลำดับ โดยกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นที่จะทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ บัสที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 4 อันดับแรก

4. ใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อคำนวณหาตำแหน่งของบัสและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยในแต่ละกรณีศึกษาจะกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปร ค่าพารามิเตอร์ และค่าคงที่ต่าง ๆ ตามวิธีที่ได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4
5. ตรวจสอบความถูกต้องของกำลังสูญเสียที่คำนวณได้จากโปรแกรม โดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATPOWER 2.0 และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ว่าตรงกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาหรือไม่
6. เปรียบเทียบผลของกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กด้วยขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของบัสที่คำนวณได้จากโปรแกรม กับกำลังสูญเสียในกรณีฐาน เพื่อดูว่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายลดลงได้กี่เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียในกรณีฐาน
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำหน่ายในแต่ละกรณี

#### 5.4 ผลการทดสอบโปรแกรม

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบอัลกอริทึมในการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย สำหรับระบบทดสอบทั้ง 4 ระบบ ในแต่ละกรณีศึกษาแยกตามจำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะทำการติดตั้ง จะแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ตามลำดับ โดยผลลัพธ์ที่แสดงไว้ข้างนี้อ้างอิงมาจากการทดสอบโปรแกรมโดยใช้คอมพิวเตอร์ ที่มีความเร็วในการประมวลผล (CPU Speed) เท่ากับ 2.8 กิกะเฮิร์ตซ์ และมีหน่วยความจำเข้าถึงโดยสุ่ม (RAM) เท่ากับ 512 เมกะไบต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 1

จำนวน DG	บัสที่ติดตั้ง DG	กำลังการผลิตจากบัสอ้างอิง (MW)	กำลังการผลิตของ DG (MW)	กำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสียที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (%)	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (h/m/s)
1*	9	96.32	120	1.1193	-	-
1	2	157.12	58.307	0.2281	79.62	0/0/0.3
2	2, 13	110.89	60, 44.32	0.0133	98.81	0/0/41
3	2, 6, 13	109.32	60, 26.59, 19.29	0.0026	99.76	0/1/3.5
4	5, 6, 12, 13	169.35	0.38, 21.83, 9.70, 13.95	0.0072	99.36	0/3/56

หมายเหตุ “\*” หมายความว่าถึงจำนวน DG ในกรณีฐาน

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 2

จำนวน DG	บัสที่ติดตั้ง DG	กำลังการผลิตจากบัสอ้างอิง (MW)	กำลังการผลิตของ DG (MW)	กำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสียที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (%)	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (h/m/s)
0*	-	6.34	-	0.1071	-	-
1	11	2.90	3.35	0.0129	87.95	0/0/38
2	10, 11	2.70	1.34, 2.20	0.0118	89.02	0/6/34
3	11, 14, 15	2.45	3.33, 0.28, 0.18	0.0065	93.90	0/6/56
4	4, 7, 11, 15	0.55	1.58, 1.15, 2.53, 0.42	0.0009	99.15	0/17/37

หมายเหตุ “\*” หมายความว่าถึงจำนวน DG ในกรณีฐาน

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 3

จำนวน DG	บัสที่ติดตั้ง DG	กำลังการผลิตจากบัสอ้างอิง (MW)	กำลังการผลิตของ DG (MW)	กำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสียที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (%)	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (h/m/s)
0*	-	3.92	-	0.2027	-	-
1	30	2.29	1.48	0.0526	74.05	0/14/49
2	8, 32	1.52	1.44, 0.79	0.0297	85.34	2/23/21
3	8, 25, 32	0.85	1.32, 0.82, 0.74	0.0214	89.43	23/21/15
4	7, 18, 25, 32	0.74	1.12, 0.42, 0.78, 0.67	0.0108	94.67	0/41/6.9

หมายเหตุ “\*” หมายความว่าถึงจำนวน DG ในกรณีฐาน

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบอัลกอริทึมกับระบบจำหน่ายที่ 4

จำนวน DG	บัสที่ติดตั้ง DG	กำลังการผลิตจากบัสอ้างอิง (MW)	กำลังการผลิตของ DG (MW)	กำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่าย (MW)	กำลังสูญเสียที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (%)	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (h/m/s)
0*	-	3.84	-	0.1233	-	-
1	30	1.71	2.03	0.0249	79.84	0/7/54
2	29, 32	1.34	1.49, 0.90	0.0159	87.10	9/16/43
3	8, 29, 33	0.79	1.08, 1.17, 0.69	0.0095	92.33	6/14/32
4	8, 24, 30, 33	0.57	1.05, 0.82, 0.67, 0.60	0.0059	95.19	12/7/45

หมายเหตุ “\*” หมายความว่าถึงจำนวน DG ในกรณีฐาน

ในการตรวจสอบความถูกต้องของกำลังสูญเสียที่คำนวณได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเมื่อใช้ระบบจำหน่ายทั้ง 4 ระบบ จะใช้โปรแกรม MATPOWER 2.0 ในการคำนวณการไหลของ

กำลังไฟฟ้า และนำผลของกำลังสูญเสียที่ได้ในแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา ซึ่งเมื่อตรวจสอบแล้วก็พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ตรงกัน

## 5.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึม

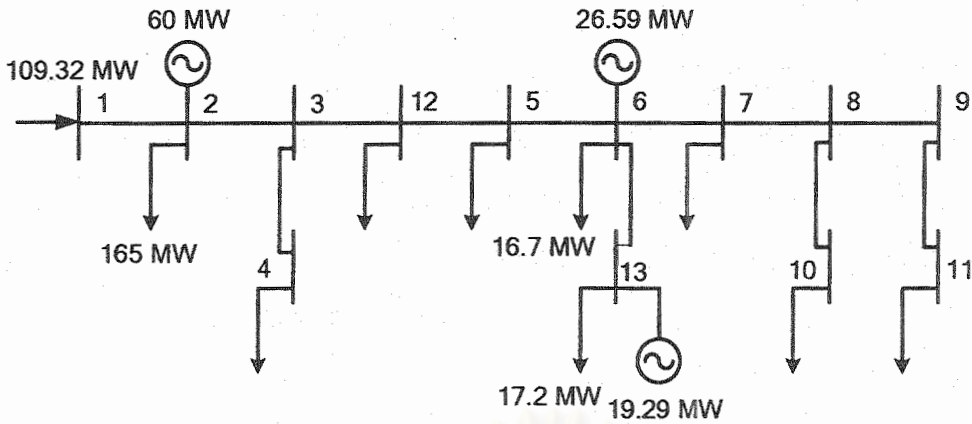
### 5.5.1 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบโปรแกรม

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำหน่ายตัวอย่างทั้ง 4 ระบบ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ในกรณีที่มีการกำหนดจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่าย เมื่อเราใช้โปรแกรมในการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก จะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายลดลงได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกำลังสูญเสียที่คำนวณได้ในกรณีฐาน

เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กมากกว่า 1 ตัว จะพบว่าลักษณะการกระจายตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายจะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายตัวของโหลด

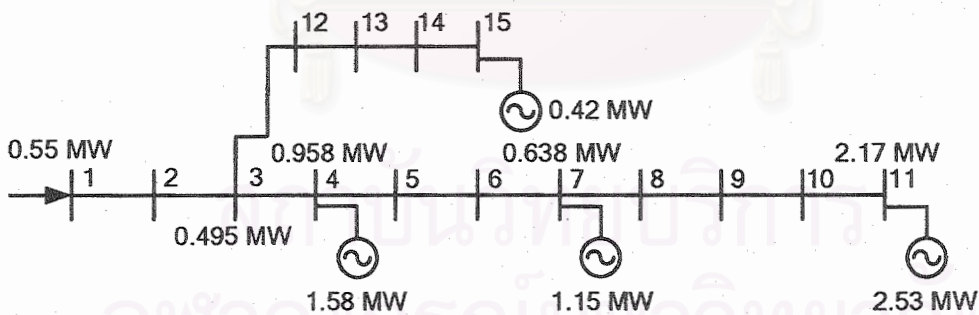
ในกรณีของระบบจำหน่ายที่ 1 โหลดที่มีอิทธิพลต่อทั้งระบบจำหน่ายจะเป็นโหลดที่บัส 2 บัส 13 และบัส 6 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 165 MW 17.2 MW และ 16.7 MW ตามลำดับ ส่วนโหลดที่บัสอื่น ๆ จะมีขนาดเล็กไม่เกิน 5 MW และเมื่อใช้โปรแกรมในการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในกรณีที่มีการกำหนดจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กตั้งแต่ 1 ถึง 3 ตัว ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าต่ำสุด คือ บัส 2 บัส 13 และบัส 6 เรียงตามลำดับขนาดของโหลด

รูปที่ 5.7 แสดงการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ณ ตำแหน่งของบัสที่โหลดมีอิทธิพลมากที่สุด 3 อันดับแรกในระบบทดสอบที่ 1 ซึ่งผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ 3 บัสดังกล่าวด้วยขนาดกำลังการผลิตตามที่แสดงในรูปที่ 5.7 จะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 5.7 ระบบจำหน่ายที่ 1 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 ตัว

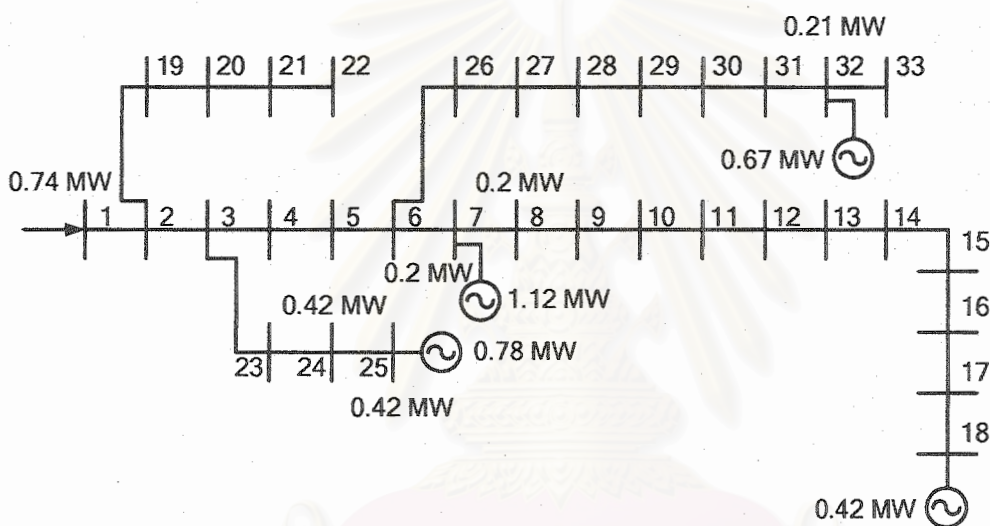
ในกรณีของระบบจำหน่ายที่ 2 โหลดที่มีขนาดใหญ่ที่สุดจะอยู่ที่บัส 11 ขนาดเท่ากับ 2.17 MW รองลงมา คือ โหลดที่บัส 4 บัส 7 และบัส 3 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.958 MW 0.638 MW และ 0.495 MW ตามลำดับ ส่วนโหลดที่บัสอื่น ๆ จะมีขนาดเฉลี่ยไม่เกิน 0.3 MW และมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาผลจากตารางที่ 5.2 จะพบว่าในการคำนวณทุกครั้ง โปรแกรมจะกำหนดให้มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่บัส 11 เสมอ และในกรณีที่กำหนดให้มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 4 ตัว โปรแกรมจะกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 3 ตัวถูกติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งของบัสที่โหลดมีขนาดใหญ่ที่สุด 3 อันดับแรก ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และกรณีนี้เป็นกรณีที่ทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 5.8 ระบบจำหน่ายที่ 2 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว

ในกรณีของระบบจำหน่ายที่ 3 และ 4 โหลดที่มีอิทธิพลต่อระบบจำหน่ายมากที่สุดอยู่ที่ บัส 24 และบัส 25 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 0.42 MW รองลงมาคือโหลดที่บัส 32 บัส 6 และบัส 7 โหลดที่ บัส 32 มีขนาดเท่ากับ 0.21 MW ส่วนโหลดที่บัส 7 และบัส 8 มีขนาดเท่ากับ 0.2 MW เมื่อ พิจารณาผลการทดสอบในตารางที่ 5.3 ในกรณีที่กำหนดให้มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 2 ตัว 3 ตัว และ 4 ตัว โปรแกรมจะกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กติดตั้งอยู่ที่ ณ ตำแหน่งของบัสในกลุ่มที่มีอิทธิพลกับระบบจำหน่ายมากที่สุด

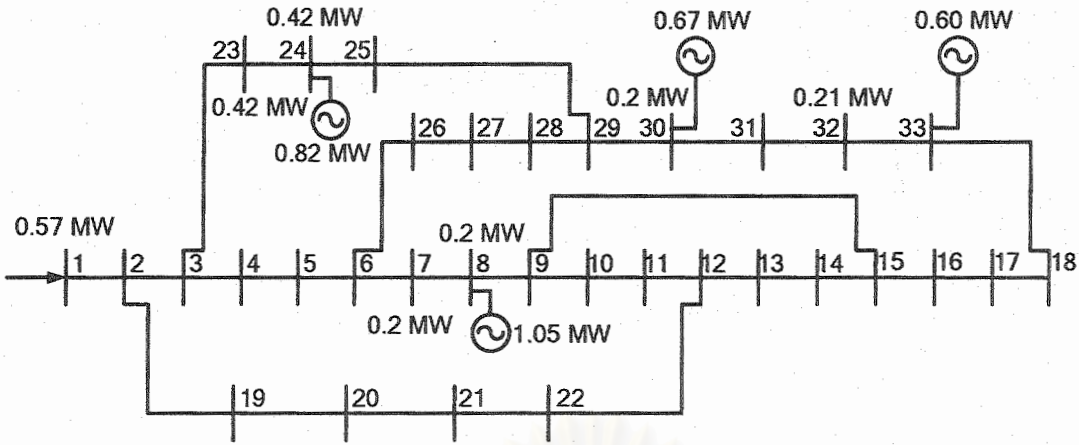
รูปที่ 5.9 แสดงผลการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายที่ 3 ในกรณีที่กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว ซึ่งเป็นกรณีที่ทำให้ระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 5.9 ระบบจำหน่ายที่ 3 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว

ในกรณีของระบบจำหน่ายที่ 4 ซึ่งถูกดัดแปลงมาจากระบบจำหน่ายที่ 3 ในกรณีที่กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะติดตั้งในระบบจำหน่ายจำนวน 2 ตัว 3 ตัว และ 4 ตัว โปรแกรมจะกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กติดตั้งอยู่ที่บัสในกลุ่มที่มีอิทธิพลกับระบบจำหน่ายมากที่สุดหรือบัสที่อยู่ใกล้เคียง ได้แก่ บัส 29 และบัส 33ที่อยู่ติดกับบัส 30 และบัส 32 ซึ่งเป็นบัสในกลุ่มที่มีอิทธิพลต่อระบบจำหน่าย รูปที่ 5.10 แสดงผลการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายที่ 4 ในกรณีที่กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว ซึ่งเป็นกรณีที่ทำให้ระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุด





รูปที่ 5.10 ระบบจำหน่ายที่ 4 เมื่อทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว

จากรูปที่ 5.7 ถึง 5.10 จะเห็นลักษณะการกระจายตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กไปตามโหนดที่มีอิทธิพลในระบบจำหน่ายอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นการพิสูจน์หลักการที่ว่าหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กติดตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งที่เป็นศูนย์กลางโหนด และจ่ายกำลังการผลิตที่เหมาะสมจะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายลดลงได้มากที่สุด

### 5.5.2 วิเคราะห์ข้อดีข้อเสียของอัลกอริทึม

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 อัลกอริทึมของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ที่เรานำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นอัลกอริทึมสำหรับนำมาแก้ปัญหา MINLP ที่เป็นคอนเวกซ์เท่านั้น จึงจะสามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่ครอบคลุมผลเฉลยทั้งหมดได้ แต่เนื่องจากอัลกอริทึมของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาที่ไม่เป็นคอนเวกซ์ จะมีขั้นตอนการคำนวณที่ซับซ้อนกว่ามาก ดังนั้น เราจึงเลือกประยุกต์ใช้อัลกอริทึมของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ที่นำเสนอในบทที่ 3 มาแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ โดยสมมติว่าปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเป็นปัญหาที่เป็นคอนเวกซ์ ดังนั้น ผลเฉลยค่าสุดท้ายที่ได้จากการแก้ปัญหาจึงอาจไม่ใช่ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดที่ครอบคลุมผลเฉลยทั้งหมด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดจุดเริ่มต้นในการค้นหาคำตอบ อีกทั้งการแก้ปัญหา NLP ในแต่ละโหนดของแผนภาพต้นไม้ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ และมีตัวแปรหลายตัวโดยใช้วิธี SQP จะใช้เวลานานในการคำนวณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าปัญหา MINLP เป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่ ประกอบกับใช้วิธีการเลือกตัวแปรตกกึ่งที่ไม่เหมาะสม จะทำให้

เกิดการแตกกิ่งหลายครั้ง และมีปัญหา NLP เกิดขึ้นหลายปัญหา ยิ่งเป็นการทำให้เสียเวลาในการคำนวณเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากผลการศึกษาในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ที่บางครั้งอาจต้องใช้เวลาในการคำนวณนานถึง 23 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม เวลาในการคำนวณก็ขึ้นอยู่กับความเร็วในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ด้วย และในบางครั้งก็อาจมีความเป็นไปได้ที่ปัญหา MINLP จะเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาคำตอบได้ แต่ไม่แสดงให้เห็นในการแก้ปัญหา NLP ที่เกิดจากการผ่อนคลายเงื่อนไขบังคับของปัญหาตั้งต้น ทำให้เกิดการแตกกิ่งปัญหา NLP ออกเป็นปัญหาย่อยโดยไม่จำเป็น

ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นข้อดีของวิธีbranched and bound และวิธี SQP เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหา MINLP ที่มีขนาดใหญ่ และไม่เป็นคอนเวกซ์ เมื่อมองในแง่ของหลักการทางคณิตศาสตร์ แต่อย่างไรก็ดี จากผลการทดสอบโปรแกรมกับระบบจำหน่ายทั้ง 4 ระบบ ผลการทดสอบก็ถือว่าเป็นที่น่าพอใจเพราะสามารถลดกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายได้เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้จะใช้เวลานานในการคำนวณ แต่เมื่อมองในแง่ของเศรษฐศาสตร์ การลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายในระดับนี้ก็นับได้ว่าการนำอัลกอริทึมของวิธีbranched and bound ร่วมกับวิธี SQP มาใช้ในการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายก็ได้ผลคุ้มค่าเป็นที่น่าสนใจ

## 5.6 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโปรแกรมกับผลลัพธ์จากงานวิจัยในอดีต

เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของอัลกอริทึมที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์กับอัลกอริทึมที่พัฒนาจากวิธีการแก้ปัญหาตามแนวทางสโตคาสติก จากงานวิจัย [19] ซึ่งใช้วิธีการค้นหาแบบตามูในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่าย พบว่าวิธีแก้ปัญหาตามแนวทางสโตคาสติกจะเหนือกว่าในแง่ของเวลาในการคำนวณ จากผลการวิจัยที่น่าเสนอ จะใช้ระบบทดสอบ 2 ระบบ ระบบทดสอบที่ 1 เป็นระบบจำหน่ายที่มีสายป้อน 4 เส้น ซึ่งถูกแบ่งพื้นที่ออกเป็น 28 ส่วนโดยสวิตช์ตัดตอน เมื่อกำหนดให้ขนาดกำลังการผลิตรวมสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเท่ากับ 4 MW และจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่ายเท่ากับ 10 ตัว จะใช้เวลาในการคำนวณ 1 ชั่วโมง 40 นาที เมื่อกำหนดให้จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่ายเท่ากับ 20 ตัว จะใช้เวลาในการคำนวณ 4 ชั่วโมง 16 นาที ระบบทดสอบที่ 2 เป็นระบบจำหน่ายที่มีสายป้อน 6 เส้น ซึ่งถูกแบ่งพื้นที่ออกเป็น 78 ส่วนโดยสวิตช์ตัดตอน เมื่อกำหนดให้ขนาดกำลังการผลิตรวมสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเท่ากับ 13.7 MW และจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้ง

ในระบบจำหน่ายเท่ากับ 15 ตัว จะใช้เวลาในการคำนวณ 6 ชั่วโมง 43 นาที เมื่อกำหนดให้จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่ายเท่ากับ 20 ตัว จะใช้เวลาในการคำนวณ 16 ชั่วโมง 21 นาที อย่างไรก็ตามในบทความนี้ไม่ได้นำเสนอผลการลดลงของกำลังสูญเสียหลังจากติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เราจึงไม่สามารถเปรียบเทียบอัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้กับอัลกอริทึมที่พัฒนาโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่ในแง่ของประสิทธิภาพในการลดกำลังสูญเสียได้

ในกรณีของงานวิจัย [23] ซึ่งใช้วิธีเจเนอรัลไลเซอริตวิธเกรเดียนท์และงานวิจัย [9] ซึ่งใช้วิธีไฮยี่ร์ฟอร์ดแรนจ์ในการกำหนดขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะทำให้อำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุด เมื่อมีการระบุตำแหน่งของบัสที่จะทำการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายไว้แล้ว อัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยทั้งสองนี้จะเสียเปรียบอัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ในแง่ของการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง เพราะไม่สามารถกำหนดทั้งตำแหน่งติดตั้งและขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่จะทำให้อำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุดได้ในการคำนวณครั้งเดียว หากต้องการทราบตำแหน่งของบัสที่เหมาะสมที่สุดจะต้องใช้วิธีกระจายค่าความเป็นไปได้ของบัสที่จะติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กทั้งหมดออกมา แล้วทำการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตที่ตำแหน่งของบัสนั้น ๆ ซึ่งในกรณีที่ระบบจำหน่ายมีขนาดใหญ่และมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายตัว อัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์จะเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานมากกว่า

สำหรับงานวิจัย [2] ซึ่งใช้วิธีซิมูเลทแอนนีลลิ่ง (Simulate Annealing) ในการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยการเรียงลำดับบัสตามการลดลงของกำลังสูญเสียจากมากไปหาน้อยหลังจากติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กขนาด 10 MW ที่บัสนั้น จากนั้น ทดลองติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ณ ตำแหน่งของบัสที่ทำให้กำลังสูญเสียลดลงมากที่สุดโดยเพิ่มกำลังการผลิตที่ละ 10 MW จนกว่าจะได้ค่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายที่ต่ำที่สุด เมื่อใช้อัลกอริทึมนี้ทดสอบกับระบบจำหน่ายระบบหนึ่ง ค่ากำลังสูญเสียจะลดลงมากที่สุดประมาณ 0.7% เทียบกับกรณีที่ไม่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก ความแตกต่างของอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้กับอัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ จะอยู่ที่ความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ อัลกอริทึมในงานวิจัยนี้เหมาะจะนำไปประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตได้ที่ละขั้น และมีจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพียงไม่กี่ตัว ส่วนอัลกอริทึมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้กับกรณีที่ต้องการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถใช้ได้กับกรณีที่ต้องการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายตัวในระบบจำหน่าย

## บทที่ 6

### บทสรุป และข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

#### 6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาการกำหนดตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตและที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยในบทที่ 2 จะเป็นการนำเสนอความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก และข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ จากนั้นในบทที่ 3 ได้นำเสนอหลักการและทฤษฎีที่จำเป็นต้องใช้ในการแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมแบบ MINLP โดยใช้หลักการของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ และทฤษฎีในการแก้ปัญหา NLP โดยใช้หลักการของวิธี SQP จากนั้นในบทที่ 4 ได้นำเสนอวิธีการกำหนดรูปแบบของปัญหาการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย และเงื่อนไขบังคับต่าง ๆ ของระบบ ให้อยู่รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งปัญหาที่เรากำหนดขึ้นจัดเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมแบบ MINLP และได้้นำเสนอหลักการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของวิธีบรานซ์แอนด์บาวด์ร่วมกับวิธี SQP มาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งเราได้นำหลักการนี้ไปพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB 6.5 ร่วมกับการประยุกต์เอาบางส่วนของโปรแกรม MATPOWER 2.0 มาประกอบเข้าด้วยกัน ได้เป็นโปรแกรมช่วยในการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย ซึ่งในบทที่ 5 เราได้นำเสนอผลการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายจำนวน 4 ระบบ และได้ทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบโปรแกรม

กล่าวโดยสรุปคือ จากการทดสอบอัลกอริทึมในการคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายจำนวน 4 ระบบ ซึ่งมีทั้งระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบเรเดียล และระบบจำหน่ายที่มีโครงสร้างแบบลูป จะเห็นว่า กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายสามารถลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ และโปรแกรมสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้อง (จากการตรวจสอบโดยใช้

โปรแกรม MATPOWER 2.0) แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นที่น่าพอใจ

ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์นี้ คือ เราสามารถที่จะนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการกำหนดขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายได้จริง และยังสามารถนำหลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ไปประยุกต์กับปัญหา MINLP อื่น ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ปัญหาด้านการจัดการพลังงาน (Demand Side Management) เพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกลำดับการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดกำลังการผลิต และระยะเวลาในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัว ที่จะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้มากที่สุด เป็นต้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

แนวทางที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ยังมีข้อบกพร่องที่ควรได้รับการปรับปรุง ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการคำนวณในกรณีที่ระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ มีบัสจำนวนมากในระบบ และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายตัว และอัลกอริทึมที่ใช้ในการแก้ปัญหา MINLP โดยใช้หลักการของวิธีบริหารซันแอนด์บาร์ดร่วมกับวิธี SQP ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ที่จริงแล้วเป็นหลักการที่รับรองได้เฉพาะการหาค่า Local Optimum แต่ยังไม่รับรองว่าจะสามารถหาค่า Global Optimum ได้ ยกเว้นในกรณีที่ปัญหาเป็น Convex Function คือ มีค่า Optimum เพียงค่าเดียว ในกรณีที่เราสามารถประยุกต์ใช้หลักการหาค่า Global Optimum กับปัญหานี้โดยที่ไม่ทำให้โปรแกรมต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเกินไป ก็อาจจะทำให้กำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายลดลงได้มากกว่าการใช้วิธีที่ได้นำเสนอไว้ในวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนที่ต้องนำมาชดเชยกำลังสูญเสีย และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสายส่งได้อีกเป็นจำนวนมาก

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอหลักการหาขนาดกำลังการผลิตและตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อจุดประสงค์ในการลดกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายเพียงอย่างเดียว แต่ในทางปฏิบัติ ยังมีประเด็นปัญหาที่เกิดจากการเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ามาในระบบจำหน่ายอีกมากที่ควรได้รับการแก้ไข เช่น ปัญหาการทำงานที่ผิดพลาดของระบบป้องกัน ปัญหาการเกิดแรงดันเกินรวมทั้ง ปัญหาเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่าย เป็นต้น ดังนั้น ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อให้การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กเข้ามาในระบบจำหน่ายสามารถก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ระบบการผลิตและการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวม

## รายการอ้างอิง

1. A. Agustoni, E. Tironi, M. Brenna, R. Faranda. Constraints for the Interconnection of Distributed Generation in Radial Distribution Systems. 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power 1 (2002) : 310 - 315
2. A. Law, D. Secrest, K. Tomsovic, T. Griffin. Placement of Dispersed Generations Systems for Reduced Losses. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (2000) : 1446-1454
3. A. Neumaier, C.S. Adjimin, C.A. Floudas, S. Dallwig. A Global Optimization Method, alpha-BB, for General Twice-Differentiable Constrained NLPs: I–Theoretical Advances. Computers and Chemical Engineering 22 (1998) : 1137-1158
4. A. Sofer, S.G. Nash. Linear and Nonlinear Programming. Singapore : McGraw-Hill, 1996.
5. B. Borchers, J.E. Mitchell. An Improved Branch and Bound Algorithm for Mixed-Integer Nonlinear Programs. Computers and Operations Research 21 (1994) : 359-367
6. C.A. Floudas. Nonlinear and Mixed-Integer Optimization: Fundamentals and Applications. New York : Oxford University Press, 1995.
7. C.A. Floudas, C.S. Adjimin, I.P. Androulakis. A Global Optimization Method, alpha-BB, for General Twice-Differentiable Constrained NLPs: II–Implementation and Computational Results. Computers and Chemical Engineering 22 (1998) : 1159-1179
8. Choi Joon-Ho, Kim Jae-Chul. Network Reconfiguration at The Power Distribution System With Dispersed Generations for Loss Reduction. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 4 (2000) : 2363-2367
9. C. Singh, J.O. Kim, K.W. Park, S.K. Park. Dispersed Generation Planning Using Improved Hereford Ranch algorithm. Evolutionary Computation Proceedings (1998) : 678-683
10. D.G. Luenberger. Introduction to Linear and Nonlinear Programming. USA : Addison-Wesley Publishing, 1973.

11. D.S. Shugar, T. Hoff. The Value of Grid-Support Photovoltaics in Reducing Distribution System Losses. IEEE Transactions on Energy Conversion 10 (Sep 1995) : 569-576
12. E.K.P. Chong, S.H. Zak. An Introduction to Optimization. 2nd edition. USA : John Wiley & Sons, 2001.
13. F.C. Lambert, H.B. Puttgen, P.R. MacGrego. Distributed Generation : Semantic Hype or The Dawn of A New Era?. IEEE Power and Energy Magazine 1 (2003) : 22-29
14. F. Pilo, G. Cell. Optimal Distributed Generation Allocation in MV Distribution Networks. Power Industry Computer Applications (2001) : 81-86
15. H.S. Ryou, N.V. Sahinidis. Global Optimization of Nonconvex NLPs and MINLPs with Applications in Process Design. Computers and Chemical Engineering 19 (1995) : 551-566
16. I.E. Grossmann. Review of Nonlinear Mixed-Integer and Disjunctive Programming Techniques. Optimization and Engineering 3 (2002) : 227-252
17. I.E. Grossmann, Z. Kravanja. Mixed-Integer Nonlinear Programming: A Survey of Algorithms and Applications. In A.R Conn, L.T. Biegler, T.F. Coleman, F.N. Santosa editor, Large-Scale Optimization with Applications. Part II: Optimal Design and Control, 451-494. Berlin : Springer-Verlag, 1996.
18. J. Nanda, L.L. Lai, M. Sharma, M.S. Srinivas, S.S. Dey. New Findings on Radial Distribution System Load Flow Algorithms. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2 (2000) : 1157 - 1161
19. K. Ikeda, K. Nara, T. Ashizawa, Y. Hayashi. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2 (2001) : 918-923
20. K. Murty. Linear and Combinatorial Programming. New York : John Wiley & Sons, 1976.
21. K. Tomsovic, S.Li, T. Hiyama. Load Following Functions Using Distributed Energy Resources. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 3 (2000) : 1756 - 1761

22. M. Tawarmalani, N.V. Sahinidis. Global Optimization of Mixed-Integer Nonlinear Programs: A Theoretical and Computational Study. Mathematical Programming 99 (2004) : 563-591
23. N.S. Rau and Yih-Heui Wan. Optimum Location of Resources in Distributed Planning. IEEE Transactions on Power Systems 9 (Nov. 1994) : 2014-2020
24. P.P. Barker, R.W. De Mello. Determining The Impact of Distributed Generation on Power Systems. I. Radial distribution systems. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 3 (2000) : 1645-1656
25. R. Fletcher, S. Leyffer. Solving Mixed-Integer Nonlinear Programs by Outer Approximation. Mathematical Programming 66 (1994) : 327-349
26. R.J Dakin. A Tree-Search Algorithm for Mixed Integer Programming Problem. Computer Journal 8 (1965) : 250-255.
27. S. Leyffer. Integrating SQP and Branch-and-Bound for Mixed Integer Nonlinear Programming. Computational Optimization and Applications 18 (2001) : 295-309
28. T. Ackermann, V. Knyazkin. Interaction Between Distributed Generation and The Distribution Network: Operation Aspects. Asia Pacific IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2 (2002) : 1357-1362
29. IEEE std 1547-2003, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
30. IEEE std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
31. อนุบุตร สง่าราศรี, ชรินทร์น์ พานิชชาติ, สุรชัย ชัยทัศนีย์, แนบบนุญ หุนเจริญ, บัณฑิต เอื้ออาภรณ์. การศึกษาผลกระทบของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กต่อกำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 (2546) : 69-74



## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลป้อนเข้าของระบบทดสอบและผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ภาคผนวก จะแสดงรายละเอียดของข้อมูลป้อนเข้าของระบบทดสอบที่ใช้ในบทที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลบัส ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลสายส่ง ข้อมูลบัสประกอบด้วย

1. bus no หมายเลขบัส
2. bus type ชนิดของบัส
  - โหลดบัส = 1
  - บัสควบคุมแรงดัน = 2
  - บัสอ้างอิง = 3
3. Pd ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจริง (MW)
4. Qd ความต้องการพลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)
5. Vm ขนาดแรงดัน (p.u.)
6. Va มุมของแรงดัน (degrees)
7. baseKV แรงดันฐาน (kV)
8. maxVm ขนาดแรงดันสูงสุด (p.u.)
9. minVm ขนาดแรงดันต่ำสุด (p.u.)

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย

1. bus no. บัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. Pg กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MW)
3. Qg กำลังการผลิตรีแอกทีฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (MVar)
4. Qmax กำลังการผลิตรีแอกทีฟสูงสุด (MVar)
5. Qmin กำลังการผลิตรีแอกทีฟต่ำสุด (MVar)
6. Vg แรงดันของบัสที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (p.u.)
7. status สถานะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
  - 1 - จ่ายกำลังไฟฟ้าได้
  - 0 - ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้

8. Pmax กำลังการผลิตจริงสูงสุด (MW)

9. Pmin กำลังการผลิตจริงต่ำสุด (MW)

ข้อมูลสายส่งประกอบด้วย

1. f บัสต้นทาง

2. t บัสปลายทาง

3. r ความต้านทานของสายส่ง (p.u.)

4. x รีแอกแตนซ์ของสายส่ง (p.u.)

5. b โหลดชาร์จจิ่งส์เซปแทนซ์ (Line Charging Susceptance) ของสายส่ง (p.u.)

6. ratio อัตราส่วนออฟนอมินัลของหม้อแปลง (Transformer Off Nominal Turns Ratio)

มีค่าเท่ากับ 0 สำหรับสายส่ง

7. angle มุมเฟสชิฟท์ของหม้อแปลง (Transformer Phase Shift Angle) (degrees)

8. status สถานะของสายส่ง

1 – ใช้งานได้

0 – ไม่สามารถใช้งานได้

ข้อมูลป้อนเข้าจะแสดงอยู่ในรูปของตาราง โดยจะแบ่งออกเป็น 5 กรณี คือ กรณีฐาน กรณีที่กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 1 ตัว กรณีที่กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 2 ตัว กรณีที่กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 3 ตัว และกรณีที่กำหนดให้มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว ในแต่ละกรณีจะแสดงตารางของข้อมูลบัสและข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนข้อมูลสายส่งจะแสดงอยู่ในกรณีฐานเพียงอย่างเดียว เนื่องจากกรณีอื่น ๆ ข้อมูลสายส่งจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

### ก.1 ระบบทดสอบที่ 1

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบที่ 1

bus no	type	Pd(MW)	Qd(Mvar)	Vm(pu)	Va(deg)	baseKV(KV)	maxVm(pu)	minVm(pu)
1	3	0	0	1.035	0	345	1.1	0.9
2	1	165	94	1.0349	-0.004	345	1.1	0.9
3	1	0	0	1.0237	0.253	345	1.1	0.9

4	1	5.3	2.91	1.0234	0.237	345	1.1	0.9
5	1	3.4	1.87	1.007	0.746	345	1.1	0.9
6	1	16.7	9.18	1.0026	0.899	345	1.1	0.9
7	1	4.3	2.36	1.0025	0.917	345	1.1	0.9
8	1	0	0	1.0011	1.097	345	1.1	0.9
9	2	0	0	1	1.246	345	1.1	0.9
10	1	1.5	0.82	1	1.246	345	1.1	0.9
11	1	0.7	0.38	1.0011	1.096	345	1.1	0.9
12	1	1.1	0.6	1.0094	0.67	345	1.1	0.9
13	1	17.2	9.46	1.0018	0.836	345	1.1	0.9

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ 1 กรณีฐาน

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	149	162.4	9900	-9900	1.035	1	1000	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	120	-61	999	-999	1	1	200	50
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบที่ 1

f	t	r(pu)	x(pu)	b(pu)	ratio	Angle	status
1	2	0.00001	0.00006	0	0	0	1
2	3	0.00282	0.01761	0.005	0	0	1

3	4	0.00099	0.00617	0.0017	0	0	1
3	12	0.00377	0.02348	0.0066	0	0	1
5	6	0.0012	0.00749	0.0021	0	0	1
12	5	0.00065	0.00405	0.0011	0	0	1
6	7	0.00007	0.00045	0.0001	0	0	1
6	13	0.00114	0.00708	0.002	0	0	1
7	8	0.00071	0.00445	0.0013	0	0	1
8	9	0.00058	0.00364	0.001	0	0	1
8	11	0.0005	0.00314	0.0009	0	0	1
9	10	0.00003	0.0002	0.0001	0	0	1

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก  
1 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	1000	0
2	60	0	999	-999	1	1	60	10
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด

เล็ก 2 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	1000	0
2	60	0	999	-999	1	1	60	10
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	17.2	0	999	-999	1	1	60	10

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

3 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	1000	0
2	60	0	999	-999	1	1	60	10
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	16.7	0	999	-999	1	1	60	10
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0

12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	17.2	0	999	-999	1	1	60	10

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก  
4 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	1000	0
2	60	0	999	-999	1	1	60	10
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	5.3	0	999	-999	1	1	60	10
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	16.7	0	999	-999	1	1	60	10
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	17.2	0	999	-999	1	1	60	10

## ก.2 ระบบทดสอบที่ 2

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบที่ 2

bus no	type	Pd(MW)	Qd(Mvar)	Vm(pu)	Va(deg)	baseKV(KV)	maxVm(pu)	minVm(pu)
1	3	0	0	1	0	6.6	1.05	0.95
2	1	0.208	0.021	1	0	6.6	1.05	0.95
3	1	0.495	0.051	1	0	6.6	1.05	0.95
4	1	0.958	0.098	1	0	6.6	1.05	0.95
5	1	0.442	0.045	1	0	6.6	1.05	0.95
6	1	0.113	0.012	1	0	6.6	1.05	0.95

7	1	0.638	0.066	1	0	6.6	1.05	0.95
8	1	0.323	0.033	1	0	6.6	1.05	0.95
9	1	0.213	0.022	1	0	6.6	1.05	0.95
10	1	0.208	0.029	1	0	6.6	1.05	0.95
11	1	2.17	2.2	1	0	6.6	1.05	0.95
12	1	0.132	0.014	1	0	6.6	1.05	0.95
13	1	0.029	0.003	1	0	6.6	1.05	0.95
14	1	0.161	0.016	1	0	6.6	1.05	0.95
15	1	0.139	0.014	1	0	6.6	1.05	0.95

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ 2 กรณีฐาน

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบที่ 2

f	t	r(pu)	x(pu)	b(pu)	ratio	angle	status
1	2	0.003145	0.075207	0	1	0	1
2	3	0.00033	0.001849	0	1	0	1
3	4	0.006667	0.030808	0	1	0	1
3	12	0.27502	0.127043	0	1	0	1
4	5	0.005785	0.014949	0	1	0	1
4	7	0.008001	0.036961	0	1	0	1
5	6	0.014141	0.036547	0	1	0	1
7	8	0.008999	0.041575	0	1	0	1
8	9	0.007	0.032346	0	1	0	1
9	10	0.003666	0.01694	0	1	0	1
10	11	0.008999	0.041575	0	1	0	1
12	13	0.031497	0.081405	0	1	0	1
13	14	0.039653	0.102984	0	1	0	1
14	15	0.01607	0.004153	0	1	0	1

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 1 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	2.17	0	999	-999	1	1	5	0



12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 2 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0.958	0	999	-999	1	1	2	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	2.17	0	999	-999	1	1	5	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 3 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0.958	0	999	-999	1	1	2	0

5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0.638	0	999	-999	1	1	3	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	2.17	0	999	-999	1	1	5	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.14 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด  
เล็ก 4 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0.495	0	999	-999	1	1	4	0
4	0.958	0	999	-999	1	1	2	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0.638	0	999	-999	1	1	3	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	2.17	0	999	-999	1	1	5	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0

## ก.3 ระบบทดสอบที่ 3

ตารางที่ ก.15 ข้อมูลบัส ระบบทดสอบที่ 3

bus no	Type	Pd(MW)	Qd(Mvar)	Vm(pu)	Va(deg)	baseKV(KV)	maxVm(pu)	minVm(pu)
1	3	0	0	1	0	12.66	1.1	0.9
2	1	0.1	0.06	1	0	12.66	1.1	0.9
3	1	0.09	0.04	1	0	12.66	1.1	0.9
4	1	0.12	0.08	1	0	12.66	1.1	0.9
5	1	0.06	0.03	1	0	12.66	1.1	0.9
6	1	0.06	0.02	1	0	12.66	1.1	0.9
7	1	0.2	0.1	1	0	12.66	1.1	0.9
8	1	0.2	0.1	1	0	12.66	1.1	0.9
9	1	0.06	0.02	1	0	12.66	1.1	0.9
10	1	0.06	0.02	1	0	12.66	1.1	0.9
11	1	0.045	0.03	1	0	12.66	1.1	0.9
12	1	0.06	0.035	1	0	12.66	1.1	0.9
13	1	0.06	0.035	1	0	12.66	1.1	0.9
14	1	0.12	0.08	1	0	12.66	1.1	0.9
15	1	0.06	0.01	1	0	12.66	1.1	0.9
16	1	0.06	0.02	1	0	12.66	1.1	0.9
17	1	0.06	0.02	1	0	12.66	1.1	0.9
18	1	0.09	0.04	1	0	12.66	1.1	0.9
19	1	0.09	0.04	1	0	12.66	1.1	0.9
20	1	0.09	0.04	1	0	12.66	1.1	0.9
21	1	0.09	0.04	1	0	12.66	1.1	0.9
22	1	0.09	0.04	1	0	12.66	1.1	0.9
23	1	0.09	0.05	1	0	12.66	1.1	0.9
24	1	0.42	0.2	1	0	12.66	1.1	0.9
25	1	0.42	0.2	1	0	12.66	1.1	0.9
26	1	0.06	0.025	1	0	12.66	1.1	0.9
27	1	0.06	0.025	1	0	12.66	1.1	0.9

28	1	0.06	0.02	1	0	12.66	1.1	0.9
29	1	0.12	0.07	1	0	12.66	1.1	0.9
30	1	0.2	0.6	1	0	12.66	1.1	0.9
31	1	0.15	0.07	1	0	12.66	1.1	0.9
32	1	0.21	0.1	1	0	12.66	1.1	0.9
33	1	0.06	0.04	1	0	12.66	1.1	0.9

ตารางที่ ก.16 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบทดสอบที่ 3 กรณีฐาน

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0
16	0	0	999	-999	1	0	0	0
17	0	0	999	-999	1	0	0	0
18	0	0	999	-999	1	0	0	0
19	0	0	999	-999	1	0	0	0
20	0	0	999	-999	1	0	0	0
21	0	0	999	-999	1	0	0	0
22	0	0	999	-999	1	0	0	0

23	0	0	999	-999	1	0	0	0
24	0	0	999	-999	1	0	0	0
25	0	0	999	-999	1	0	0	0
26	0	0	999	-999	1	0	0	0
27	0	0	999	-999	1	0	0	0
28	0	0	999	-999	1	0	0	0
29	0	0	999	-999	1	0	0	0
30	0	0	999	-999	1	0	0	0
31	0	0	999	-999	1	0	0	0
32	0	0	999	-999	1	0	0	0
33	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.18 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบที่ 3

f	T	r(pu)	x(pu)	b(pu)	ratio	angle	status
1	2	0.0057526	0.0029324	0	1	0	1
2	3	0.0307595	0.0156668	0	1	0	1
3	4	0.0228357	0.01163	0	1	0	1
4	5	0.0237778	0.0121104	0	1	0	1
5	6	0.0510995	0.0441115	0	1	0	1
6	7	0.0116799	0.0386085	0	1	0	1
7	8	0.044386	0.0146685	0	1	0	1
8	9	0.0642643	0.0461705	0	1	0	1
9	10	0.0651378	0.0461705	0	1	0	1
10	11	0.0122664	0.0040555	0	1	0	1
11	12	0.0233598	0.0077242	0	1	0	1
12	13	0.0915922	0.0720634	0	1	0	1
13	14	0.0337918	0.0444796	0	1	0	1
14	15	0.036874	0.0328185	0	1	0	1
15	16	0.0465635	0.0340039	0	1	0	1
16	17	0.080424	0.1073775	0	1	0	1
17	18	0.0456713	0.0358133	0	1	0	1

2	19	0.0102324	0.0097644	0	1	0	1
19	20	0.0938508	0.0845668	0	1	0	1
20	21	0.0255497	0.0298486	0	1	0	1
21	22	0.0442301	0.0584805	0	1	0	1
3	23	0.0281515	0.0192356	0	1	0	1
23	24	0.0560285	0.0442425	0	1	0	1
24	25	0.0559037	0.0437434	0	1	0	1
6	26	0.0126657	0.0064514	0	1	0	1
26	27	0.017732	0.0090282	0	1	0	1
27	28	0.0660737	0.0582559	0	1	0	1
28	29	0.0501761	0.0437122	0	1	0	1
29	30	0.0316642	0.0161285	0	1	0	1
30	31	0.0607953	0.060084	0	1	0	1
31	32	0.0193729	0.0225799	0	1	0	1
32	33	0.0212759	0.0331928	0	1	0	1

ตารางที่ ก.19 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด  
เล็ก 1 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0

13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0
16	0	0	999	-999	1	0	0	0
17	0	0	999	-999	1	0	0	0
18	0	0	999	-999	1	0	0	0
19	0	0	999	-999	1	0	0	0
20	0	0	999	-999	1	0	0	0
21	0	0	999	-999	1	0	0	0
22	0	0	999	-999	1	0	0	0
23	0	0	999	-999	1	0	0	0
24	0.42	0	999	-999	1	1	7	0
25	0	0	999	-999	1	0	0	0
26	0	0	999	-999	1	0	0	0
27	0	0	999	-999	1	0	0	0
28	0	0	999	-999	1	0	0	0
29	0	0	999	-999	1	0	0	0
30	0	0	999	-999	1	0	0	0
31	0	0	999	-999	1	0	0	0
32	0	0	999	-999	1	0	0	0
33	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.20 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด  
เล็ก 2 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0

7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0
16	0	0	999	-999	1	0	0	0
17	0	0	999	-999	1	0	0	0
18	0	0	999	-999	1	0	0	0
19	0	0	999	-999	1	0	0	0
20	0	0	999	-999	1	0	0	0
21	0	0	999	-999	1	0	0	0
22	0	0	999	-999	1	0	0	0
23	0	0	999	-999	1	0	0	0
24	0.42	0	999	-999	1	1	7	0
25	0.42	0	999	-999	1	1	5	0
26	0	0	999	-999	1	0	0	0
27	0	0	999	-999	1	0	0	0
28	0	0	999	-999	1	0	0	0
29	0	0	999	-999	1	0	0	0
30	0	0	999	-999	1	0	0	0
31	0	0	999	-999	1	0	0	0
32	0.21	0	999	-999	1	1	3	0
33	0	0	999	-999	1	0	0	0



ตารางที่ ก.21 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด

เล็ก 3 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0	0	999	-999	1	0	0	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0
16	0	0	999	-999	1	0	0	0
17	0	0	999	-999	1	0	0	0
18	0	0	999	-999	1	0	0	0
19	0	0	999	-999	1	0	0	0
20	0	0	999	-999	1	0	0	0
21	0	0	999	-999	1	0	0	0
22	0	0	999	-999	1	0	0	0
23	0	0	999	-999	1	0	0	0
24	0.42	0	999	-999	1	1	7	0
25	0.42	0	999	-999	1	1	5	0
26	0	0	999	-999	1	0	0	0
27	0	0	999	-999	1	0	0	0
28	0	0	999	-999	1	0	0	0

29	0	0	999	-999	1	0	0	0
30	0	0	999	-999	1	0	0	0
31	0	0	999	-999	1	0	0	0
32	0.21	0	999	-999	1	1	3	0
33	0	0	999	-999	1	0	0	0

ตารางที่ ก.22 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด

เล็ก 4 ตัว

bus no	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmax(Mvar)	Qmin(Mvar)	Vg(pu)	status	Pmax(MW)	Pmin(MW)
1	0	0	999	-999	1	1	10	0
2	0	0	999	-999	1	0	0	0
3	0	0	999	-999	1	0	0	0
4	0	0	999	-999	1	0	0	0
5	0	0	999	-999	1	0	0	0
6	0	0	999	-999	1	0	0	0
7	0.2	0	999	-999	1	1	6	0
8	0	0	999	-999	1	0	0	0
9	0	0	999	-999	1	0	0	0
10	0	0	999	-999	1	0	0	0
11	0	0	999	-999	1	0	0	0
12	0	0	999	-999	1	0	0	0
13	0	0	999	-999	1	0	0	0
14	0	0	999	-999	1	0	0	0
15	0	0	999	-999	1	0	0	0
16	0	0	999	-999	1	0	0	0
17	0	0	999	-999	1	0	0	0
18	0	0	999	-999	1	0	0	0
19	0	0	999	-999	1	0	0	0
20	0	0	999	-999	1	0	0	0
21	0	0	999	-999	1	0	0	0
22	0	0	999	-999	1	0	0	0

23	0	0	999	-999	1	0	0	0
24	0.42	0	999	-999	1	1	7	0
25	0.42	0	999	-999	1	1	5	0
26	0	0	999	-999	1	0	0	0
27	0	0	999	-999	1	0	0	0
28	0	0	999	-999	1	0	0	0
29	0	0	999	-999	1	0	0	0
30	0	0	999	-999	1	0	0	0
31	0	0	999	-999	1	0	0	0
32	0.21	0	999	-999	1	1	3	0
33	0	0	999	-999	1	0	0	0

#### ก.4 ระบบทดสอบที่ 4

เนื่องจากระบบทดสอบที่ 4 เป็นระบบที่ดัดแปลงมาจากระบบทดสอบที่ 3 โดยการเพิ่มไทไลน์ (Tie Line) เข้ามาในระบบ ดังนั้น ข้อมูลบัสและข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละกรณีจะไม่มีเปลี่ยนแปลง จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะข้อมูลของสายส่ง ดังนั้น ระบบทดสอบที่ 4 จะแสดงเฉพาะข้อมูลสายส่งเพียงอย่างเดียว โดยให้เข้าใจตรงกันว่าข้อมูลบัสและข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะใช้ข้อมูลชุดเดียวกับที่แสดงในระบบทดสอบที่ 3

ตารางที่ ก.23 ข้อมูลสายส่ง ระบบทดสอบที่ 4

f	t	r(pu)	x(pu)	b(pu)	ratio	angle	status
1	2	0.005753	0.002932	0	1	0	1
2	3	0.03076	0.015667	0	1	0	1
3	4	0.022836	0.01163	0	1	0	1
4	5	0.023778	0.01211	0	1	0	1
5	6	0.0511	0.044112	0	1	0	1
6	7	0.01168	0.038609	0	1	0	1
7	8	0.044386	0.014669	0	1	0	1

8	9	0.064264	0.046171	0	1	0	1
9	10	0.065138	0.046171	0	1	0	1
10	11	0.012266	0.004056	0	1	0	1
11	12	0.02336	0.007724	0	1	0	1
12	13	0.091592	0.072063	0	1	0	1
13	14	0.033792	0.04448	0	1	0	1
14	15	0.036874	0.032819	0	1	0	1
15	16	0.046564	0.034004	0	1	0	1
16	17	0.080424	0.107378	0	1	0	1
17	18	0.045671	0.035813	0	1	0	1
2	19	0.010232	0.009764	0	1	0	1
19	20	0.093851	0.084567	0	1	0	1
20	21	0.02555	0.029849	0	1	0	1
21	22	0.04423	0.058481	0	1	0	1
3	23	0.028152	0.019236	0	1	0	1
23	24	0.056029	0.044243	0	1	0	1
24	25	0.055904	0.043743	0	1	0	1
6	26	0.012666	0.006451	0	1	0	1
26	27	0.017732	0.009028	0	1	0	1
27	28	0.066074	0.058256	0	1	0	1
28	29	0.050176	0.043712	0	1	0	1
29	30	0.031664	0.016129	0	1	0	1
30	31	0.060795	0.060084	0	1	0	1
31	32	0.019373	0.02258	0	1	0	1
32	33	0.021276	0.033193	0	1	0	1
8	21	0.124785	0.124785	0	1	0	1
9	15	0.124785	0.124785	0	1	0	1
12	22	0.124785	0.124785	0	1	0	1
18	33	0.031196	0.031196	0	1	0	1
25	29	0.031196	0.031196	0	1	0	1

### ก.5 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ ก.24 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 1 กรณีฐาน

bus no	Vm(pu)	Va(deg)	Pg(MW)	Qg(MW)	Pd(MW)	Qd(MW)
1	1.035	0	96.3193	172.65	0	0
2	1.0349	-0.0022	0	0	165	94
3	1.0234	0.7725	0	0	0	0
4	1.0232	0.7562	0	0	5.3	2.91
5	1.0068	2.0964	0	0	3.4	1.87
6	1.0025	2.4811	0	0	16.7	9.18
7	1.0023	2.5135	0	0	4.3	2.36
8	1.001	2.832	0	0	0	0
9	1	3.0945	120	-46.3334	0	0
10	1	3.0944	0	0	1.5	0.82
11	1.001	2.8309	0	0	0.7	0.38
12	1.0092	1.8969	0	0	1.1	0.6
13	1.0016	2.4177	0	0	17.2	9.46
Total			216.319		215.200	
Real Power Losses (MW)					1.1193	

ตารางที่ ก.25 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 1 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0309	0.0000	157.12	60.35	0.00	0.00
2	1.0308	-0.0048	58.31	60.37	165.00	94.00
3	1.0249	-0.4451	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.0246	-0.4614	0.00	0.00	5.30	2.91
5	1.0165	-1.0656	0.00	0.00	3.40	1.87
6	1.0144	-1.2194	0.00	0.00	16.70	9.18
7	1.0144	-1.2209	0.00	0.00	4.30	2.36
8	1.0143	-1.2260	0.00	0.00	0.00	0.00

9	1.0143	-1.2288	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.0143	-1.2289	0.00	0.00	1.50	0.82
11	1.0143	-1.2271	0.00	0.00	0.70	0.38
12	1.0177	-0.9757	0.00	0.00	1.10	0.60
13	1.0135	-1.2813	0.00	0.00	17.20	9.46
<b>Total</b>			<b>215.43</b>		<b>215.20</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.2281</b>	

ตารางที่ ก.26 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 2 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0228	0.0000	110.89	49.18	0.00	0.00
2	1.0227	-0.0034	60.00	49.25	165.00	94.00
3	1.0218	-0.0530	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.0215	-0.0694	0.00	0.00	5.30	2.91
5	1.0211	-0.0533	0.00	0.00	3.40	1.87
6	1.0211	-0.0368	0.00	0.00	16.70	9.18
7	1.0211	-0.0383	0.00	0.00	4.30	2.36
8	1.0210	-0.0433	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1.0210	-0.0460	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.0210	-0.0462	0.00	0.00	1.50	0.82
11	1.0210	-0.0444	0.00	0.00	0.70	0.38
12	1.0212	-0.0553	0.00	0.00	1.10	0.60
13	1.0222	0.0614	44.32	20.95	17.20	9.46
<b>Total</b>			<b>215.21</b>		<b>215.20</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0133</b>	

ตารางที่ ก.27 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 3 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0735	0.0000	109.32	47.64	0.00	0.00
2	1.0735	-0.0030	60.00	47.77	165.00	94.00
3	1.0731	-0.0385	0.00	0.00	0.00	0.00
4	1.0729	-0.0534	0.00	0.00	5.30	2.91
5	1.0733	-0.0237	0.00	0.00	3.40	1.87
6	1.0735	-0.0046	26.59	13.24	16.70	9.18
7	1.0735	-0.0059	0.00	0.00	4.30	2.36
8	1.0734	-0.0105	0.00	0.00	0.00	0.00
9	1.0734	-0.0130	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1.0734	-0.0131	0.00	0.00	1.50	0.82
11	1.0734	-0.0115	0.00	0.00	0.70	0.38
12	1.0732	-0.0277	0.00	0.00	1.10	0.60
13	1.0736	0.0022	19.29	10.42	17.20	9.46
Total			215.20		215.20	
Real Power Loss (MW)					0.0026	

ตารางที่ ก.28 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 4 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	0.9786	0.0000	169.35	90.68	0.00	0.00
2	0.9786	-0.0055	0.00	0.00	165.00	94.00
3	0.9790	-0.0566	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.9788	-0.0744	0.00	0.00	5.30	2.91
5	0.9803	-0.0738	0.38	-0.35	3.40	1.87
6	0.9804	-0.0964	21.83	14.29	16.70	9.18
7	0.9804	-0.0980	0.00	0.00	4.30	2.36
8	0.9803	-0.1034	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.9803	-0.1064	0.00	0.00	0.00	0.00

10	0.9803	-0.1066	0.00	0.00	1.50	0.82
11	0.9803	-0.1047	0.00	0.00	0.70	0.38
12	0.9803	-0.0551	9.70	4.91	1.10	0.60
13	0.9804	-0.1105	13.95	9.99	17.20	9.46
<b>Total</b>			<b>215.21</b>		<b>215.20</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0072</b>	

ตารางที่ ก.29 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 2 กรณีฐาน

Bus no	Vm(pu)	Va(deg)	Pg(MW)	Qg(MW)	Pd(MW)	Qd(MW)
1	1	0	6.3362	3.40586	0	0
2	0.9735	-2.7426	0	0	0.208	0.021
3	0.9727	-2.805	0	0	0.495	0.051
4	0.9602	-3.6598	0	0	0.958	0.098
5	0.9598	-3.7094	0	0	0.442	0.045
6	0.9595	-3.734	0	0	0.113	0.012
7	0.9472	-4.3685	0	0	0.638	0.066
8	0.9336	-5.0203	0	0	0.323	0.033
9	0.9235	-5.4726	0	0	0.213	0.022
10	0.9183	-5.6895	0	0	0.208	0.029
11	0.906	-6.1745	0	0	2.17	2.2
12	0.9588	-3.0826	0	0	0.132	0.014
13	0.9574	-3.2433	0	0	0.029	0.003
14	0.9559	-3.4293	0	0	0.161	0.016
15	0.9556	-3.4315	0	0	0.139	0.014
<b>Total</b>			<b>6.3362</b>		<b>6.229</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.1072</b>	



ตารางที่ ก.30 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 1 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0500	0.0000	2.89	0.34	0.00	0.00
2	1.0469	-1.1292	0.00	0.00	0.21	0.02
3	1.0468	-1.1547	0.00	0.00	0.50	0.05
4	1.0452	-1.4270	0.00	0.00	0.96	0.10
5	1.0448	-1.4688	0.00	0.00	0.44	0.05
6	1.0446	-1.4896	0.00	0.00	0.11	0.01
7	1.0451	-1.4673	0.00	0.00	0.64	0.07
8	1.0457	-1.3767	0.00	0.00	0.32	0.03
9	1.0466	-1.2528	0.00	0.00	0.21	0.02
10	1.0471	-1.1696	0.00	0.00	0.21	0.03
11	1.0488	-0.9220	3.35	2.37	2.17	2.20
12	1.0339	-1.3943	0.00	0.00	0.13	0.01
13	1.0326	-1.5325	0.00	0.00	0.03	0.00
14	1.0311	-1.6923	0.00	0.00	0.16	0.02
15	1.0309	-1.6942	0.00	0.00	0.14	0.01
<b>Total</b>			<b>6.24</b>		<b>6.23</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0129</b>	

ตารางที่ ก.31 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 2 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0402	0.0000	2.70	0.39	0.00	0.00
2	1.0367	-1.0741	0.00	0.00	0.21	0.02
3	1.0366	-1.0982	0.00	0.00	0.50	0.05
4	1.0350	-1.3426	0.00	0.00	0.96	0.10
5	1.0346	-1.3853	0.00	0.00	0.44	0.05
6	1.0344	-1.4065	0.00	0.00	0.11	0.01
7	1.0348	-1.3439	0.00	0.00	0.64	0.07

8	1.0354	-1.2066	0.00	0.00	0.32	0.03
9	1.0362	-1.0454	0.00	0.00	0.21	0.02
10	1.0368	-0.9423	1.34	0.10	0.21	0.03
11	1.0369	-0.9360	2.20	2.21	2.17	2.20
12	1.0236	-1.3425	0.00	0.00	0.13	0.01
13	1.0223	-1.4835	0.00	0.00	0.03	0.00
14	1.0208	-1.6466	0.00	0.00	0.16	0.02
15	1.0206	-1.6485	0.00	0.00	0.14	0.01
Total			6.24		6.23	
Real Power Loss (MW)					0.0118	

ตารางที่ ก.32 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 3 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0083	0.0000	2.45	0.29	0.00	0.00
2	1.0055	-1.0370	0.00	0.00	0.21	0.02
3	1.0054	-1.0601	0.00	0.00	0.50	0.05
4	1.0037	-1.3585	0.00	0.00	0.96	0.10
5	1.0033	-1.4039	0.00	0.00	0.44	0.05
6	1.0031	-1.4264	0.00	0.00	0.11	0.01
7	1.0035	-1.4062	0.00	0.00	0.64	0.07
8	1.0042	-1.3123	0.00	0.00	0.32	0.03
9	1.0050	-1.1813	0.00	0.00	0.21	0.02
10	1.0055	-1.0929	0.00	0.00	0.21	0.03
11	1.0072	-0.8287	3.33	2.36	2.17	2.20
12	1.0053	-1.0605	0.00	0.00	0.13	0.01
13	1.0058	-1.0037	0.00	0.00	0.03	0.00
14	1.0065	-0.9158	0.28	0.02	0.16	0.02
15	1.0066	-0.9158	0.18	0.02	0.14	0.01
Total			6.24		6.23	
Real Power Loss (MW)					0.0065	

ตารางที่ ก.33 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 4 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0017	0.0000	0.55	-0.07	0.00	0.00
2	1.0020	-0.2389	0.00	0.00	0.21	0.02
3	1.0021	-0.2427	0.00	0.00	0.50	0.05
4	1.0026	-0.2147	1.58	0.10	0.96	0.10
5	1.0022	-0.2602	0.00	0.00	0.44	0.05
6	1.0020	-0.2828	0.00	0.00	0.11	0.01
7	1.0034	-0.1973	1.15	0.37	0.64	0.07
8	1.0027	-0.2837	0.00	0.00	0.32	0.03
9	1.0024	-0.2927	0.00	0.00	0.21	0.02
10	1.0024	-0.2773	0.00	0.00	0.21	0.03
11	1.0026	-0.1918	2.53	2.18	2.17	2.20
12	1.0009	-0.2661	0.00	0.00	0.13	0.01
13	1.0013	-0.2254	0.00	0.00	0.03	0.00
14	1.0019	-0.1576	0.00	0.00	0.16	0.02
15	1.0023	-0.1537	0.42	0.04	0.14	0.01
<b>Total</b>			<b>6.23</b>		<b>6.23</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0009</b>	

ตารางที่ ก.34 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 3 กรณีฐาน

Bus no	Vm(pu)	Va(deg)	Pg(MW)	Qg(MW)	Pd(MW)	Qd(MW)
1	1	0	3.91768	2.43514	0	0
2	0.997	0.0145	0	0	0.1	0.06
3	0.9829	0.096	0	0	0.09	0.04
4	0.9755	0.1617	0	0	0.12	0.08
5	0.9681	0.2283	0	0	0.06	0.03
6	0.9497	0.1339	0	0	0.06	0.02
7	0.9462	-0.0965	0	0	0.2	0.1
8	0.9413	-0.0604	0	0	0.2	0.1

9	0.9351	-0.1335	0	0	0.06	0.02
10	0.9292	-0.196	0	0	0.06	0.02
11	0.9284	-0.1888	0	0	0.045	0.03
12	0.9269	-0.1773	0	0	0.06	0.035
13	0.9208	-0.2686	0	0	0.06	0.035
14	0.9185	-0.3473	0	0	0.12	0.08
15	0.9171	-0.385	0	0	0.06	0.01
16	0.9157	-0.4082	0	0	0.06	0.02
17	0.9137	-0.4855	0	0	0.06	0.02
18	0.9131	-0.4951	0	0	0.09	0.04
19	0.9965	0.0037	0	0	0.09	0.04
20	0.9929	-0.0633	0	0	0.09	0.04
21	0.9922	-0.0827	0	0	0.09	0.04
22	0.9916	-0.103	0	0	0.09	0.04
23	0.9794	0.0651	0	0	0.09	0.05
24	0.9727	-0.0237	0	0	0.42	0.2
25	0.9694	-0.0674	0	0	0.42	0.2
26	0.9477	0.1733	0	0	0.06	0.025
27	0.9452	0.2295	0	0	0.06	0.025
28	0.9337	0.3124	0	0	0.06	0.02
29	0.9255	0.3903	0	0	0.12	0.07
30	0.922	0.4956	0	0	0.2	0.6
31	0.9178	0.4112	0	0	0.15	0.07
32	0.9169	0.3881	0	0	0.21	0.1
33	0.9166	0.3804	0	0	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.91768</b>		<b>3.715</b>	
<b>Real Power Losses (MW)</b>					<b>0.2027</b>	

ตารางที่ ก.35 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 1 ตัว

bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.1000	0.0000	2.28	1.12	0.00	0.00
2	1.0985	-0.0014	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0921	-0.0065	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0901	-0.0073	0.00	0.00	0.12	0.08
5	1.0883	-0.0102	0.00	0.00	0.06	0.03
6	1.0843	-0.0693	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0813	-0.2451	0.00	0.00	0.20	0.10
8	1.0771	-0.2178	0.00	0.00	0.20	0.10
9	1.0716	-0.2735	0.00	0.00	0.06	0.02
10	1.0666	-0.3211	0.00	0.00	0.06	0.02
11	1.0658	-0.3156	0.00	0.00	0.05	0.03
12	1.0645	-0.3070	0.00	0.00	0.06	0.04
13	1.0592	-0.3762	0.00	0.00	0.06	0.04
14	1.0573	-0.4356	0.00	0.00	0.12	0.08
15	1.0560	-0.4640	0.00	0.00	0.06	0.01
16	1.0549	-0.4816	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0531	-0.5397	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0526	-0.5470	0.00	0.00	0.09	0.04
19	1.0980	-0.0103	0.00	0.00	0.09	0.04
20	1.0948	-0.0654	0.00	0.00	0.09	0.04
21	1.0941	-0.0813	0.00	0.00	0.09	0.04
22	1.0936	-0.0981	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0889	-0.0315	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0829	-0.1032	0.00	0.00	0.42	0.20
25	1.0799	-0.1385	0.00	0.00	0.42	0.20
26	1.0851	-0.0683	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0864	-0.0664	0.00	0.00	0.06	0.03
28	1.0922	0.0223	0.00	0.00	0.06	0.02

29	1.0969	0.0950	0.00	0.00	0.12	0.07
30	1.1000	0.0991	1.48	1.22	0.20	0.60
31	1.0965	0.0399	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0958	0.0237	0.00	0.00	0.21	0.10
33	1.0955	0.0183	0.00	0.00	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.77</b>		<b>3.72</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0526</b>	

ตารางที่ ก.36 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 2 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0870	0.0000	1.52	0.79	0.00	0.00
2	1.0860	0.0004	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0822	0.0049	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0821	0.0113	0.00	0.00	0.12	0.08
5	1.0823	0.0158	0.00	0.00	0.06	0.03
6	1.0832	0.0395	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0845	0.0923	0.00	0.00	0.20	0.10
8	1.0872	0.0596	1.44	0.75	0.20	0.10
9	1.0818	0.0049	0.00	0.00	0.06	0.02
10	1.0768	-0.0418	0.00	0.00	0.06	0.02
11	1.0760	-0.0364	0.00	0.00	0.05	0.03
12	1.0747	-0.0280	0.00	0.00	0.06	0.04
13	1.0695	-0.0958	0.00	0.00	0.06	0.04
14	1.0675	-0.1541	0.00	0.00	0.12	0.08
15	1.0663	-0.1820	0.00	0.00	0.06	0.01
16	1.0651	-0.1992	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0634	-0.2563	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0629	-0.2633	0.00	0.00	0.09	0.04
19	1.0855	-0.0087	0.00	0.00	0.09	0.04
20	1.0823	-0.0651	0.00	0.00	0.09	0.04

21	1.0816	-0.0814	0.00	0.00	0.09	0.04
22	1.0810	-0.0985	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0790	-0.0207	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0729	-0.0937	0.00	0.00	0.42	0.20
25	1.0699	-0.1296	0.00	0.00	0.42	0.20
26	1.0830	0.0459	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0827	0.0554	0.00	0.00	0.06	0.03
28	1.0820	0.0910	0.00	0.00	0.06	0.02
29	1.0818	0.1260	0.00	0.00	0.12	0.07
30	1.0823	0.1441	0.00	0.00	0.20	0.60
31	1.0875	0.0833	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0897	0.0800	0.79	0.78	0.21	0.10
33	1.0895	0.0744	0.00	0.00	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.74</b>		<b>3.72</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0297</b>	

ตารางที่ ก.37 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 3 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0373	0.0000	0.87	0.44	0.00	0.00
2	1.0367	-0.0002	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0352	0.0011	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0346	0.0053	0.00	0.00	0.12	0.08
5	1.0343	0.0072	0.00	0.00	0.06	0.03
6	1.0341	0.0094	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0354	0.0498	0.00	0.00	0.20	0.10
8	1.0380	0.0004	1.36	0.78	0.20	0.10
9	1.0323	-0.0596	0.00	0.00	0.06	0.02
10	1.0270	-0.1109	0.00	0.00	0.06	0.02
11	1.0263	-0.1050	0.00	0.00	0.05	0.03
12	1.0249	-0.0956	0.00	0.00	0.06	0.04

13	1.0194	-0.1703	0.00	0.00	0.06	0.04
14	1.0173	-0.2344	0.00	0.00	0.12	0.08
15	1.0161	-0.2651	0.00	0.00	0.06	0.01
16	1.0148	-0.2841	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0130	-0.3470	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0125	-0.3548	0.00	0.00	0.09	0.04
19	1.0362	-0.0102	0.00	0.00	0.09	0.04
20	1.0328	-0.0721	0.00	0.00	0.09	0.04
21	1.0321	-0.0900	0.00	0.00	0.09	0.04
22	1.0315	-0.1088	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0348	-0.0050	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0347	-0.0145	0.00	0.00	0.42	0.20
25	1.0377	0.0144	0.82	0.41	0.42	0.20
26	1.0336	0.0196	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0331	0.0346	0.00	0.00	0.06	0.03
28	1.0311	0.0766	0.00	0.00	0.06	0.02
29	1.0299	0.1177	0.00	0.00	0.12	0.07
30	1.0299	0.1457	0.00	0.00	0.20	0.60
31	1.0342	0.0774	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0361	0.0715	0.00	0.00	0.21	0.10
33	1.0395	0.1093	0.69	0.68	0.06	0.04
Total			3.74		3.72	
Real Power Loss (MW)					0.0211	

ตารางที่ ก.38 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 4 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0032	0.0000	0.74	0.38	0.00	0.00
2	1.0027	0.0003	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0016	0.0043	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0014	0.0086	0.00	0.00	0.12	0.08



5	1.0017	0.0106	0.00	0.00	0.06	0.03
6	1.0027	0.0299	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0046	0.1080	1.12	0.67	0.20	0.10
8	1.0022	0.1251	0.00	0.00	0.20	0.10
9	1.0001	0.1014	0.00	0.00	0.06	0.02
10	0.9984	0.0866	0.00	0.00	0.06	0.02
11	0.9982	0.0889	0.00	0.00	0.05	0.03
12	0.9979	0.0914	0.00	0.00	0.06	0.04
13	0.9976	0.0862	0.00	0.00	0.06	0.04
14	0.9978	0.0901	0.00	0.00	0.12	0.08
15	0.9987	0.0970	0.00	0.00	0.06	0.01
16	1.0001	0.1082	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0037	0.2143	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0058	0.2420	0.42	0.19	0.09	0.04
19	1.0021	-0.0104	0.00	0.00	0.09	0.04
20	0.9986	-0.0766	0.00	0.00	0.09	0.04
21	0.9979	-0.0958	0.00	0.00	0.09	0.04
22	0.9972	-0.1159	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0010	-0.0005	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0006	-0.0084	0.00	0.00	0.42	0.20
25	1.0034	0.0248	0.78	0.38	0.42	0.20
26	1.0022	0.0400	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0016	0.0548	0.00	0.00	0.06	0.03
28	0.9994	0.0929	0.00	0.00	0.06	0.02
29	0.9982	0.1317	0.00	0.00	0.12	0.07
30	0.9981	0.1596	0.00	0.00	0.20	0.60
31	1.0025	0.0802	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0044	0.0715	0.67	0.68	0.21	0.10
33	1.0042	0.0650	0.00	0.00	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.73</b>		<b>3.72</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0108</b>	

ตารางที่ ก.39 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 4 กรณีฐาน

Bus no	Vm(pu)	Va(deg)	Pg(MW)	Qg(MW)	Pd(MW)	Qd(MW)
1	1	0	3.83829	2.38792	0	0
2	0.9971	0.0143	0	0	0.1	0.06
3	0.9862	0.0526	0	0	0.09	0.04
4	0.9826	0.0574	0	0	0.12	0.08
5	0.9791	0.0598	0	0	0.06	0.03
6	0.9711	-0.0506	0	0	0.06	0.02
7	0.9701	-0.1464	0	0	0.2	0.1
8	0.969	-0.1651	0	0	0.2	0.1
9	0.9657	-0.1937	0	0	0.06	0.02
10	0.9652	-0.2176	0	0	0.06	0.02
11	0.9652	-0.2201	0	0	0.045	0.03
12	0.9654	-0.227	0	0	0.06	0.035
13	0.962	-0.2262	0	0	0.06	0.035
14	0.9608	-0.2411	0	0	0.12	0.08
15	0.9604	-0.2356	0	0	0.06	0.01
16	0.9586	-0.2149	0	0	0.06	0.02
17	0.9551	-0.2121	0	0	0.06	0.02
18	0.954	-0.1793	0	0	0.09	0.04
19	0.9953	-0.0001	0	0	0.09	0.04
20	0.9807	-0.0818	0	0	0.09	0.04
21	0.9767	-0.1318	0	0	0.09	0.04
22	0.9729	-0.1923	0	0	0.09	0.04
23	0.9807	0.0445	0	0	0.09	0.05
24	0.97	-0.0125	0	0	0.42	0.2
25	0.9627	-0.0232	0	0	0.42	0.2
26	0.9701	-0.0399	0	0	0.06	0.025
27	0.9688	-0.0243	0	0	0.06	0.025
28	0.9636	-0.0286	0	0	0.06	0.02
29	0.9601	-0.0204	0	0	0.12	0.07

30	0.9569	0.0488	0	0	0.2	0.6
31	0.9538	-0.0848	0	0	0.15	0.07
32	0.9533	-0.1239	0	0	0.21	0.1
33	0.9535	-0.1507	0	0	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.83829</b>		<b>3.715</b>	
<b>Real Power Losses (MW)</b>					<b>0.1233</b>	

ตารางที่ ก.40 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 4 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 1 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0999	0.0000	1.71	0.84	0.00	0.00
2	1.0988	0.0000	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0953	-0.0001	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0939	-0.0002	0.00	0.00	0.12	0.08
5	1.0928	-0.0003	0.00	0.00	0.06	0.03
6	1.0904	-0.0012	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0892	-0.0027	0.00	0.00	0.20	0.10
8	1.0877	-0.0027	0.00	0.00	0.20	0.10
9	1.0862	-0.0032	0.00	0.00	0.06	0.02
10	1.0855	-0.0035	0.00	0.00	0.06	0.02
11	1.0854	-0.0035	0.00	0.00	0.05	0.03
12	1.0855	-0.0035	0.00	0.00	0.06	0.04
13	1.0847	-0.0038	0.00	0.00	0.06	0.04
14	1.0846	-0.0038	0.00	0.00	0.12	0.08
15	1.0853	-0.0038	0.00	0.00	0.06	0.01
16	1.0860	-0.0038	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0882	-0.0030	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0895	-0.0029	0.00	0.00	0.09	0.04
19	1.0979	-0.0002	0.00	0.00	0.09	0.04
20	1.0914	-0.0017	0.00	0.00	0.09	0.04
21	1.0897	-0.0023	0.00	0.00	0.09	0.04

22	1.0881	-0.0030	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0942	-0.0003	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0924	-0.0006	0.00	0.00	0.42	0.20
25	1.0936	-0.0004	0.00	0.00	0.42	0.20
26	1.0907	-0.0011	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0912	-0.0011	0.00	0.00	0.06	0.03
28	1.0938	-0.0003	0.00	0.00	0.06	0.02
29	1.0961	0.0005	0.00	0.00	0.12	0.07
30	1.1000	0.0006	2.03	1.48	0.20	0.60
31	1.0939	-0.0012	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0922	-0.0018	0.00	0.00	0.21	0.10
33	1.0909	-0.0025	0.00	0.00	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.74</b>		<b>3.72</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0249</b>	

ตารางที่ ก.41 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 4 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 2 ตัว

bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0077	0.0000	0.79	0.39	0.00	0.00
2	1.0071	0.0000	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0053	0.0000	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0050	0.0000	0.00	0.00	0.12	0.08
5	1.0051	0.0000	0.00	0.00	0.06	0.03
6	1.0057	0.0001	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0062	0.0006	0.00	0.00	0.20	0.10
8	1.0080	0.0004	1.08	0.50	0.20	0.10
9	1.0052	-0.0003	0.00	0.00	0.06	0.02
10	1.0036	-0.0007	0.00	0.00	0.06	0.02
11	1.0034	-0.0007	0.00	0.00	0.05	0.03
12	1.0032	-0.0007	0.00	0.00	0.06	0.04
13	1.0026	-0.0009	0.00	0.00	0.06	0.04

14	1.0026	-0.0009	0.00	0.00	0.12	0.08
15	1.0034	-0.0008	0.00	0.00	0.06	0.01
16	1.0040	-0.0007	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0061	0.0004	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0074	0.0007	0.00	0.00	0.09	0.04
19	1.0068	-0.0001	0.00	0.00	0.09	0.04
20	1.0050	-0.0005	0.00	0.00	0.09	0.04
21	1.0049	-0.0006	0.00	0.00	0.09	0.04
22	1.0039	-0.0009	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0043	-0.0002	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0029	-0.0007	0.00	0.00	0.42	0.20
25	1.0048	-0.0004	0.00	0.00	0.42	0.20
26	1.0057	0.0001	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0058	0.0000	0.00	0.00	0.06	0.03
28	1.0067	0.0003	0.00	0.00	0.06	0.02
29	1.0078	0.0006	1.17	0.97	0.12	0.07
30	1.0063	0.0018	0.00	0.00	0.20	0.60
31	1.0066	0.0009	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0072	0.0008	0.00	0.00	0.21	0.10
33	1.0088	0.0013	0.69	0.45	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.72</b>		<b>3.72</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0095</b>	

ตารางที่ ก.42 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 4 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 3 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0077	0.0000	0.79	0.39	0.00	0.00
2	1.0071	0.0000	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0053	0.0000	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0050	0.0000	0.00	0.00	0.12	0.08
5	1.0051	0.0000	0.00	0.00	0.06	0.03

6	1.0057	0.0001	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0062	0.0006	0.00	0.00	0.20	0.10
8	1.0080	0.0004	1.08	0.50	0.20	0.10
9	1.0052	-0.0003	0.00	0.00	0.06	0.02
10	1.0036	-0.0007	0.00	0.00	0.06	0.02
11	1.0034	-0.0007	0.00	0.00	0.05	0.03
12	1.0032	-0.0007	0.00	0.00	0.06	0.04
13	1.0026	-0.0009	0.00	0.00	0.06	0.04
14	1.0026	-0.0009	0.00	0.00	0.12	0.08
15	1.0034	-0.0008	0.00	0.00	0.06	0.01
16	1.0040	-0.0007	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0061	0.0004	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0074	0.0007	0.00	0.00	0.09	0.04
19	1.0068	-0.0001	0.00	0.00	0.09	0.04
20	1.0050	-0.0005	0.00	0.00	0.09	0.04
21	1.0049	-0.0006	0.00	0.00	0.09	0.04
22	1.0039	-0.0009	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0043	-0.0002	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0029	-0.0007	0.00	0.00	0.42	0.20
25	1.0048	-0.0004	0.00	0.00	0.42	0.20
26	1.0057	0.0001	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0058	0.0000	0.00	0.00	0.06	0.03
28	1.0067	0.0003	0.00	0.00	0.06	0.02
29	1.0078	0.0006	1.17	0.97	0.12	0.07
30	1.0063	0.0018	0.00	0.00	0.20	0.60
31	1.0066	0.0009	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0072	0.0008	0.00	0.00	0.21	0.10
33	1.0088	0.0013	0.69	0.45	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.72</b>		<b>3.72</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0095</b>	

ตารางที่ ก.43 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบที่ 4 กรณีที่ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก 4 ตัว

Bus no	Vm (pu)	Va (deg)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Pd (MW)	Qd (Mvar)
1	1.0034	0.0000	0.57	0.29	0.00	0.00
2	1.0030	0.0000	0.00	0.00	0.10	0.06
3	1.0020	0.0000	0.00	0.00	0.09	0.04
4	1.0015	0.0000	0.00	0.00	0.12	0.08
5	1.0013	0.0000	0.00	0.00	0.06	0.03
6	1.0013	-0.0002	0.00	0.00	0.06	0.02
7	1.0017	0.0003	0.00	0.00	0.20	0.10
8	1.0034	0.0001	1.05	0.50	0.20	0.10
9	1.0005	-0.0006	0.00	0.00	0.06	0.02
10	0.9989	-0.0011	0.00	0.00	0.06	0.02
11	0.9987	-0.0011	0.00	0.00	0.05	0.03
12	0.9985	-0.0011	0.00	0.00	0.06	0.04
13	0.9978	-0.0013	0.00	0.00	0.06	0.04
14	0.9978	-0.0013	0.00	0.00	0.12	0.08
15	0.9985	-0.0012	0.00	0.00	0.06	0.01
16	0.9990	-0.0012	0.00	0.00	0.06	0.02
17	1.0009	-0.0002	0.00	0.00	0.06	0.02
18	1.0021	0.0001	0.00	0.00	0.09	0.04
19	1.0026	-0.0001	0.00	0.00	0.09	0.04
20	1.0006	-0.0007	0.00	0.00	0.09	0.04
21	1.0004	-0.0008	0.00	0.00	0.09	0.04
22	0.9994	-0.0012	0.00	0.00	0.09	0.04
23	1.0022	0.0000	0.00	0.00	0.09	0.05
24	1.0033	0.0002	0.82	0.41	0.42	0.20
25	1.0012	-0.0002	0.00	0.00	0.42	0.20
26	1.0011	-0.0002	0.00	0.00	0.06	0.03
27	1.0011	-0.0002	0.00	0.00	0.06	0.03
28	1.0013	-0.0001	0.00	0.00	0.06	0.02

29	1.0019	0.0002	0.00	0.00	0.12	0.07
30	1.0033	0.0002	0.67	0.82	0.20	0.60
31	1.0023	-0.0001	0.00	0.00	0.15	0.07
32	1.0024	0.0000	0.00	0.00	0.21	0.10
33	1.0034	0.0006	0.60	0.28	0.06	0.04
<b>Total</b>			<b>3.72</b>		<b>3.72</b>	
<b>Real Power Loss (MW)</b>					<b>0.0059</b>	



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ข

### การตรวจสอบโปรแกรมกับปัญหา MINLP ตัวอย่าง

#### ข.1 ปัญหาตัวอย่างที่ 1

ปัญหานี้อ้างอิงมาจาก [6] หน้า 133

ปัญหา MINLP ตั้งต้นมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & y_1 + y_2 + y_3 + 5x^2 \\ \text{subject to} \quad & 3x - y_1 - y_2 \leq 0 \\ & -x + 0.1y_2 + 0.25y_3 \leq 0 \\ & y_1 + y_2 + y_3 \geq 2 \\ & y_1 + y_2 + 2(y_3 - 1) \geq 0 \\ & 0.2 \leq x \leq 1 \\ & y_1, y_2, y_3 = 0, 1 \end{aligned} \tag{ข.1}$$

ขั้นตอนที่ 1 ผ่อนปรนปัญหาตั้งต้นให้เป็นปัญหา NLP จะได้สมการที่ (ข.2)

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & y_1 + y_2 + y_3 + 5x^2 \\ \text{subject to} \quad & 3x - y_1 - y_2 \leq 0 \\ & -x + 0.1y_2 + 0.25y_3 \leq 0 \\ & y_1 + y_2 + y_3 \geq 2 \\ & y_1 + y_2 + 2(y_3 - 1) \geq 0 \\ & 0.2 \leq x \leq 1 \\ & 0 \leq y_1, y_2, y_3 \leq 1 \end{aligned} \tag{ข.2}$$

เมื่อแก้ปัญหานี้ด้วย SQP ผลลัพธ์ที่ได้ คือ

$$[y_1, y_2, y_3, x] = [0.7895, 0.6842, 0.5263, 0.2000]$$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 2.2

ขั้นตอนที่ 2 แยกปัญหา NLP ออกเป็น 2 ปัญหาย่อย

ปัญหาย่อยที่ 1 แสดงดังสมการ ข.3

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} && y_1 + y_2 + y_3 + 5x^2 \\
 & \text{subject to} && 3x - y_1 - y_2 \leq 0 \\
 & && -x + 0.1y_2 + 0.25y_3 \leq 0 \\
 & && y_1 + y_2 + y_3 \geq 2 \\
 & && y_1 + y_2 + 2(y_3 - 1) \geq 0 \\
 & && 0.2 \leq x \leq 1 \\
 & && 0 \leq y_1, y_2 \leq 1 \\
 & && y_3 = 1
 \end{aligned}
 \tag{ข.3}$$

ผลเฉลยที่ได้ คือ  $[y_1, y_2, y_3, x] = [1, 0, 1, 0.25]$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 2.3125

ปัญหาย่อยที่ 2 แสดงดังสมการ ข.4

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} && y_1 + y_2 + y_3 + 5x^2 \\
 & \text{subject to} && 3x - y_1 - y_2 \leq 0 \\
 & && -x + 0.1y_2 + 0.25y_3 \leq 0 \\
 & && y_1 + y_2 + y_3 \geq 2 \\
 & && y_1 + y_2 + 2(y_3 - 1) \geq 0 \\
 & && 0.2 \leq x \leq 1 \\
 & && 0 \leq y_1, y_2 \leq 1 \\
 & && y_3 = 0
 \end{aligned}
 \tag{ข.4}$$

ผลเฉลยที่ได้ คือ  $[y_1, y_2, y_3, x] = [1, 1, 0, 0.2]$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 2.2

ดังนั้น ผลเฉลยที่ให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ต่ำสุด คือ  $[y_1, y_2, y_3, x] = [1, 1, 0, 0.2]$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ 2.2

## ข.2 ปัญหาตัวอย่างที่ 2

ปัญหานี้อ้างอิงมาจาก [6] หน้า 163

ปัญหา MINLP ตั้งต้นมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 &\text{minimize} && -11C + 7B_1 + B_2 + 1.2B_3 + 1.8A_2 + \\
 & && 1.8A_3 + 3.5y_1 + y_2 + 1.5y_3 \\
 &\text{subject to} && B_2 - \ln(1 + A_2) = 0 \\
 & && B_3 - \ln(1 + A_3) = 0 \\
 & && C - 0.9(B_1 + B_2 + B_3) = 0 \\
 & && C - y_1 \leq 0 \\
 & && B_2 - \frac{1}{0.9}y_2 \leq 0 \\
 & && B_3 - \frac{1}{0.9}y_3 \leq 0 \\
 & && y_2 + y_3 \leq 1 \\
 & && C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3 \geq 0 \\
 & && y_1, y_2, y_3 = 0,1
 \end{aligned}
 \tag{ข.5}$$

ขั้นตอนที่ 1 ผ่อนปรนปัญหาตั้งต้นให้เป็นปัญหา NLP จะได้สมการที่ ข.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} && -11C + 7B_1 + B_2 + 1.2B_3 + 1.8A_2 + \\
& && 1.8A_3 + 3.5y_1 + y_2 + 1.5y_3 \\
&\text{subject to} && B_2 - \ln(1 + A_2) = 0 \\
& && B_3 - \ln(1 + A_3) = 0 \\
& && C - 0.9(B_1 + B_2 + B_3) = 0 \\
& && C - y_1 \leq 0 \\
& && B_2 - \frac{1}{0.9}y_2 \leq 0 \\
& && B_3 - \frac{1}{0.9}y_3 \leq 0 \\
& && y_2 + y_3 \leq 1 \\
& && C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3 \geq 0 \\
& && 0 \leq y_1, y_2, y_3 \leq 1
\end{aligned} \tag{ข.6}$$

เมื่อแก้ปัญหานี้ด้วย SQP ผลลัพธ์ที่ได้ คือ

$$[C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3, y_1, y_2, y_3] = [1, 0, 0.5352, 0.5759, 0.7078, 0.6160, 1, 0.4817, 0.5183]$$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ -2.6318

ขั้นตอนที่ 2 แตกกิ่งปัญหา NLP ออกเป็น 2 ปัญหาย่อย

ปัญหาย่อยที่ 1 แสดงดังสมการ ข.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{aligned}
 &\text{minimize} && -11C + 7B_1 + B_2 + 1.2B_3 + 1.8A_2 + \\
 & && 1.8A_3 + 3.5y_1 + y_2 + 1.5y_3 \\
 &\text{subject to} && B_2 - \ln(1 + A_2) = 0 \\
 & && B_3 - \ln(1 + A_3) = 0 \\
 & && C - 0.9(B_1 + B_2 + B_3) = 0 \\
 & && C - y_1 \leq 0 \\
 & && B_2 - \frac{1}{0.9}y_2 \leq 0 \\
 & && B_3 - \frac{1}{0.9}y_3 \leq 0 \\
 & && y_2 + y_3 \leq 1 \\
 & && C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3 \geq 0 \\
 & && 0 \leq y_1, y_3 \leq 1 \\
 & && y_2 = 1
 \end{aligned}$$

(ข.7)

ผลเฉลยที่ได้ คือ  $[C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3, y_1, y_2, y_3] = [1, 0.4643, 0.6467, 0, 0.9093, 0, 1, 1, 0]$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ -0.9659

ปัญหาย่อยที่ 2 แสดงดังสมการ ข.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\begin{aligned}
&\text{minimize} && -11C + 7B_1 + B_2 + 1.2B_3 + 1.8A_2 + \\
& && 1.8A_3 + 3.5y_1 + y_2 + 1.5y_3 \\
&\text{subject to} && B_2 - \ln(1 + A_2) = 0 \\
& && B_3 - \ln(1 + A_3) = 0 \\
& && C - 0.9(B_1 + B_2 + B_3) = 0 \\
& && C - y_1 \leq 0 \\
& && B_2 - \frac{1}{0.9}y_2 \leq 0 \\
& && B_3 - \frac{1}{0.9}y_3 \leq 0 \\
& && y_2 + y_3 \leq 1 \\
& && C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3 \geq 0 \\
& && 0 \leq y_1, y_3 \leq 1 \\
& && y_2 = 0
\end{aligned}$$

(๑.8)

ผลเฉลยที่ได้ คือ  $[C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3, y_1, y_2, y_3] = [1, 0, 0, 1.1111, 0, 1.5242, 1, 0, 1]$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ -1.9231

ดังนั้น ผลเฉลยที่ให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ต่ำสุด คือ

$[C, B_1, B_2, B_3, A_2, A_3, y_1, y_2, y_3] = [1, 0, 0, 1.1111, 0, 1.5242, 1, 0, 1]$

ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เท่ากับ -1.9231

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชรินทร์ พานิชชาติ เกิดวันที่ 27 ตุลาคม พ.ศ. 2524 ที่อำเภอเมือง จังหวัดพังงา เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2544 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย