



การผสมผสานแนวทางการลดกำลังสูญเสียเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
The Combined Loss Reduction Approach to Apply in Distribution System

ไพรัตน์ กริถาวร
Pairat Kritavorn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
พ.ศ. 2559



การผสมผสานแนวทางการลดกำลังสูญเสียเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
The Combined Loss Reduction Approach to Apply in Distribution System

ไพรัตน์ กริถาวร
Pairat Kritavorn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผสมผสานแนวทางการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
Thesis Title	The Combined Loss Reduction Approach to Apply in Distribution System
ชื่อ นามสกุล	นายไพรัตน์ กรีถาวร
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ 2. ดร.สุวิทย์ อัจริยะเมต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ

อาจารย์ ดร.อุมารินทร์ แสงพานิช

..... กรรมการ

อาจารย์ ดร.พลิชัฐ สุวรรณภิงคาร

..... กรรมการ

(ดร.สุวิทย์ อัจริยะเมต

..... กรรมการและเลขานุการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ฤทธิทอง)

วันที่ 29 เดือน เมษายน พ.ศ.2559

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผสมผสานแนวทางการลดกำลังสูญเสียเพื่อประยุกต์ใช้ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
ชื่อ สกุล	นายไพรัตน์ กวีถาวร
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการผสมผสานแนวทางการลดกำลังสูญเสียเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจัดจำหน่าย ซึ่งขนาดแรงดันไฟฟ้าทุกจุดโหลดในแต่ละระดับโหลดต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด การค้นหาโดยใช้เทคนิคการบออ่อนจำลอง ซึ่งเป็นหนึ่งเครื่องมือที่ถูกเลือกมาใช้สำหรับการหาตำแหน่งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตำแหน่งของตัวเก็บประจุที่เหมาะสม วิธีที่นำเสนอกับแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการประมวลผลหาตำแหน่งของเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอย่างเหมาะสม การผสมผสานแนวทางการลดกำลังสูญเสียเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าพร้อมการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตัวเก็บประจุในตำแหน่งที่เหมาะสม นอกจากนั้นยังสามารถสร้างความสมดุลโหลด และการเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้า วิธีการที่นำเสนอได้ใช้เทคนิคการบออ่อนจำลอง ซึ่งกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมของสวิตช์ถ่ายโอนและสวิตช์ตัดตอนสำหรับการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตัวเก็บประจุ โดยพิจารณาการจัดเรียงสายป้อนซึ่งประกอบด้วย การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และจำนวนครั้งสำหรับเปลี่ยนสถานะของสวิตช์

คำสำคัญ: แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย การบออ่อนจำลอง การจัดเรียงสายป้อนใหม่

Thesis title	The Combined Loss Reduction Approach to Apply in Distribution System
Author	Mr.Pairat Kritavorn
Degree	Master of Electrical Engineering
Major program	Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Academic Year	2015

ABSTRACT

This thesis presents the combined loss reduction approach to apply in distribution system. The thesis objective reduces the loss in the distribution system, when all voltage magnitude levels at connection points must under the limits. Therefore, the Simulated Annealing Technical selects as searching tool to find the suitable location of DG and Capacitor. The propose technique applies to the distribution system 69 buses model. The results shown that this technique can reduce in power losses from properly organize the location of DG and Capacitor. Moreover, it can also balance and increase the voltage levels. The propose Simulated Annealing Technical is used to determine and organize the sectionalizing and tie switches in the feeder, which installs DG and Capacitor, by considering the power losses, and the number of time to change the status of disconnecting switches.

Keywords: Distributed generator, Simulated Annealing, Feeder Reconfiguration

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ ดร.สุวิทย์ อัจริยะเมต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ และแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ รวมถึงการช่วยตรวจสอบการเขียนบทความวิชาการจนสำเร็จเรียบร้อยด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อุมารินทร์ แสงพานิช และอาจารย์ ดร.พลิชฐ์ สุวรรณภิงคาร ซึ่งให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์กับงานวิทยานิพนธ์ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ชี้แนะแนวทาง งานงานวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุรพล คุณแม่เฉลียว กวีถาวร และสมาชิกในครอบครัว สำหรับความรักความห่วงใย ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนอย่างดีมาโดยตลอด นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณเกศรา ยลสุวรรณ สำหรับกำลังใจที่ดี รวมถึงเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้การช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้โดยสมบูรณ์

ไพรัตน์ กวีถาวร



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 การทบทวนงานวิจัย	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.4 โครงสร้างภายในวิทยานิพนธ์	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 วิธีการวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ	5
บทที่ 2 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	6
2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า	6
2.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า	8
2.3 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	9
2.4 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยการจัดเรียงสายป้อนใหม่	14
2.5 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	15
บทที่ 3 อัลกอริทึมการบ่อน้ำจำลอง	19
3.1 บทนำ	19
3.2 อัลกอริทึมการบ่อน้ำจำลอง	22
3.3 การประยุกต์ใช้เทคนิคการบ่อน้ำจำลองในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การผสานแนวทางการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	30
4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา	30
4.2 กรณีศึกษา	32
4.3 กรณีศึกษาที่ 1	35
4.4 กรณีศึกษาที่ 2	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	43
5.1 สรุปผลการวิจัย	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก ก ข้อมูลโหลดและสายป้อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส	49
ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	54
ภาคผนวก ค เนื้อหาบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	56
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	70

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 รายละเอียดทั้ง 4 กรณี ของกรณีศึกษาที่ 1	35
4.2 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 1	38
4.3 รายละเอียดทั้ง 4 กรณี ของกรณีศึกษาที่ 2	39
4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 2	42



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 ตัวอย่างระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV	7
2.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	9
2.3 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดต่างๆ	11
2.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดต่างๆ	11
2.5 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในตำแหน่งต่างๆ	12
2.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในตำแหน่งต่างๆ	13
2.7 การต่อแบบขนาน	16
3.1 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและแบบวงกว้าง	20
3.2 การเดินค้นหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน	21
3.3 อัลกอริทึมการร่อนก่อนจำลอง	22
3.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส	25
3.5 หมายเลข 1 คือตำแหน่งสถานะเปิดของสวิตช์ถ่ายโอน	26
3.6 LOOP ที่ 1 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส	26
3.7 LOOP ที่ 2 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส	27
3.8 LOOP ที่ 3 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส	27
3.9 LOOP ที่ 4 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส	28
3.10 Loop ที่ 5 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส	28
3.11 กำหนดการปิด/เปิดสวิตช์เก็บคำตอบไว้เพื่อเปรียบเทียบกัน	29
3.12 การค้นหาตำแหน่งปิด/เปิดสวิตช์ใหม่ โดยเปรียบเทียบกับคำตอบปัจจุบัน	29
4.1 แผนผังการจัดเรียงสายบ่อนเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	33
4.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสกรณีนี้ที่ 1.1	36
4.3 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสกรณีนี้ที่ 1.2	36
4.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสกรณีนี้ที่ 1.3	37

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.5 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสกรณี 1.4	37
4.6 แรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสของทุกกรณี	38
4.7 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 2.2	40
4.8 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 2.3	40
4.9 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 2.4	41
4.10 แรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสของทุกกรณี	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการใช้ปริมาณไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอัตราการขยายอย่างต่อเนื่อง และชุมชนเมืองภายในประเทศเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ต้องมีการวางแผนจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้พอเพียงเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าที่สูงขึ้น สามารถทำได้โดยการวางแผนพัฒนามาตรฐานของระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ และมีความเชื่อถือได้ควบคู่กันไป ซึ่งประสิทธิภาพที่ดีของระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น ก็ย่อมหมายถึงประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นกับผู้ไฟฟ้าที่จะได้รับพลังงานที่เพียงพอและมีคุณภาพที่ดี ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดีได้นั้นขึ้นอยู่กับการดำเนินงานตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนในการก่อสร้าง หรือขยายระบบ และการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยการติดตั้งแหล่งกำเนิดกำลังรีแอกทีฟ และแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพิ่มเติมในระบบจำหน่ายเป็นแนวทางหนึ่งของการแก้ปัญหาเรื่องกำลังสูญเสีย และแรงดันตกในระบบจำหน่าย ดังนั้นการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการผสานแนวทางนั้น จะใช้การจัดเรียงสายบ่อนเข้ามาช่วยด้วยเพื่อการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 การทบทวนงานวิจัย

Baran and Wu (1989) ได้เสนอการจัดเรียงสายบ่อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และความสมดุลของโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า การจัดเรียงสายบ่อน คือการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ตัดตอน (Sectionalizing Switch) และสวิตช์ถ่ายโอน (Tie Switch) เพื่อให้ได้รูปแบบการจัดเรียงโครงข่ายของระบบจำหน่ายไฟฟ้าใหม่ที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสุด และมีความสมดุลของโหลดที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าดัชนีความสมดุลโหลดเป็นตัวประเมิน จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีที่นำเสนอ ในการแก้ปัญหาการจัดเรียงสายใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ นอกจากนี้ยังช่วยจัดความสมดุลโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

Wagner, Chikhani and Hackam (1991) ได้เสนอการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ด้วยเทคนิคการขนส่ง และการค้นหาแบบฮิวริสติก (Heuristics) สำหรับการแก้ไขปัญหานั้นขึ้นอยู่กับปริมาณโหลด และการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าอย่างเหมาะสม ในการทดสอบด้วยวิธีโปรแกรมเส้นตรง (Linear Programming) ซึ่งเป็นเทคนิคการขนส่ง โดยทำการทดสอบวิธีการที่นำเสนอกับแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 16 บัส และ 44 บัส จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงผลของการจัดเรียงสายป้อนใหม่ด้วยการใช้โปรแกรมเส้นตรงกับการค้นหาแบบฮิวริสติก ทำให้ได้รูปแบบโครงข่ายของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ต่ำสุด ในการใช้เทคนิคการค้นหาแบบฮิวริสติกยังมีบทความของ Taylor and Keman (1990) ได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการจัดเรียงสายป้อนเช่นเดียวกัน

Jeon and Kim (2000) ได้เสนอเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดในการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการจำลองแบบอบอ่อน (Simulated Annealing) ร่วมกับการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search) ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ซึ่งเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นเครื่องมือในการแก้ไขปัญหการจัดเรียงสายป้อนใหม่ทำให้ได้รูปแบบของการดำเนินงานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

Nara (2001) ได้เสนอการหาตำแหน่ง และขนาดกำลังผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าไฟฟ้ากระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งบทความนี้ได้นำเทคนิคการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search) มาประมวลผลหาตำแหน่ง และขนาดโดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากการประมวลผลทดสอบในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของขั้นตอนในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ซึ่งสามารถหาตำแหน่ง และขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวได้อย่างเหมาะสมโดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสุด

Gautam and Mithulananthan (2007) ได้นำเสนอวิธีการเพื่อให้ได้ตำแหน่งที่ดีที่สุดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการซื้อขายไฟฟ้า ในการหาตำแหน่งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวได้พิจารณาเทคนิคทางวิศวกรรม และการดำเนินงานด้านเศรษฐกิจ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวชี้วัด ได้ทดสอบวิธีการที่นำเสนอนี้กับระบบไฟฟ้ากำลัง 14 บัส จากการประมวลผลสามารถแสดงให้เห็นว่าการพิจารณาตำแหน่งที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทำให้ช่วยเพิ่มมูลค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการซื้อขายไฟฟ้า

Savier and Das (2007) ได้แสดงความแตกต่างของก่อน และหลังการจัดเรียงสายป้อน ด้วยวิธีฮิวริสติก และจุดประสงค์เชิงพีชคณิตเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการร่วมกันแก้ปัญหาในด้านของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล วิธีฮิวริสติกนั้นจะทำการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของสวิตช์ถ่ายโอน และสวิตช์ตัดตอนเพื่อการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งทั้งสองได้ทดสอบกับแบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริง และค่าสูญเสียจากส่วนต่างๆ ด้วยการจัดเรียงสายป้อนนั้นได้ช่วยให้ค่าใช้จ่ายน้อยลง

Chung-Fu Chang (2008) ได้เสนอการจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยวิธีฝูงมด (Ant Colony Search Algorithm; ACSA) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการจัดเรียงสายป้อนใหม่ และหาตำแหน่งตัวเก็บประจุที่เหมาะสม การค้นหาด้วยวิธีฝูงมดได้แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมตามธรรมชาติของมดในการหาแหล่งอาหาร และนำกลับไปยังที่พักโดยเส้นทางที่ไม่ซ้ำกันวิธีการที่เสนอสมาสามารถแสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงสายป้อนใหม่ และตำแหน่งตัวเก็บประจุที่เหมาะสมทำให้สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้บทความของ Kashem, Ganapathy and Jasmon (2008) และ Su and Lee (2003) แสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงสายป้อนใหม่เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่บัสได้

บทความของ Hossam-Eldin, Abdelaziz and Abu Fard (2010) ได้เสนอการหาค่าของการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่บัส กระแสของสายป้อน โหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า และตำแหน่งของการเปิด และปิดสวิตช์โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งบทความนี้ได้นำเทคนิคการค้นหาแบบการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing) มาประมวลผลหาตำแหน่ง และขนาดกับแบบจำลองไฟฟ้า 33 บัส โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากผลการทดสอบในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น เป็นที่น่าพอใจในผลเฉลยว่าการอบอ่อนจำลองนั้นเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาการผสมวิธีการหาแนวทางการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.3.2 เพื่อผสมวิธีในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เกี่ยวข้องกับการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.4 โครงสร้างภายในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท แต่ละบทสามารถอธิบายพอสังเขปได้ดังนี้

1.4.1 บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ทบทวนงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตการวิจัย โครงสร้างวิทยานิพนธ์ และประโยชน์ของการวิจัย

1.4.2 บทที่ 2 กล่าวถึงระบบจำหน่ายไฟฟ้า การลดกำลังฟ้าสูญเสียโดยแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การจัดเรียงสายป้อน และการติดตั้งตัวเก็บประจุ

1.4.3 บทที่ 3 กล่าวถึงเทคนิคการบ่อน้ำจำลอง การประยุกต์ใช้เทคนิคการบ่อน้ำจำลองในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.4.4 บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนการประมวลผลของการผสานแนวทางการลดกำลังฟ้าสูญเสีย และกรณีศึกษา

1.4.5 บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย พร้อมทั้งกล่าวถึงข้อเสนอแนะ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตการผสานแนวทางการลดกำลังฟ้าสูญเสียเพื่อประยุกต์ใช้ในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย

1.5.1 แบบจำลองระบบจำหน่ายที่พิจารณาเป็นแบบเรเดียล 69 บัส

1.5.2 พิจารณาระบบสามเฟสสมดุล

1.5.3 การผสานแนวทางในการลดกำลังฟ้าสูญเสียด้วยการจัดเรียงสายป้อนด้วยเทคนิคการบ่อน้ำจำลองไปพร้อมกับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตัวเก็บประจุ

1.5.4 กรณีศึกษาที่ 1 กำหนดให้มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวน 2 เครื่อง ขนาด 200 kW ติดตั้งที่บัส 50 และขนาด 400 kW ติดตั้งที่บัส 61

1.5.5 กรณีศึกษาที่ 2 กำหนดให้มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวน 1 เครื่อง ขนาด 400 kW และตัวเก็บประจุแบบค่าคงที่ ขนาด 400 kVAr จำนวน 1 ตัว

1.6 วิธีการวิจัย

1.6.1 ศึกษาปัญหาการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา

1.6.2 ศึกษาวิธีการคำนวณต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.6.3 สร้างแบบจำลอง และสมการคณิตศาสตร์ของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวเก็บประจุ และการจัดเรียงสายป้อน

1.6.4 ศึกษารายละเอียดของเทคนิคการบอบอ่อนจำลอง

1.6.5 ประยุกต์ และปรับปรุงการใช้วิธีการบอบอ่อนจำลอง เพื่อหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการผสมผสานแนวทางเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.6.6 ทดสอบการทำงานของแบบจำลอง และสมการคณิตศาสตร์ในข้อ 1.6.3 โดยพัฒนาในโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.6.7 วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.7.1 ได้แนวทาง ข้อมูล รายละเอียด และข้อสังเกตเกี่ยวกับการผสมผสานแนวทางสำหรับการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย

1.7.2 ได้เครื่องมือสำหรับการหาผลเฉลยเหมาะสม เพื่อใช้ในการการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย

1.7.3 ได้แนวทางสำหรับการนำวิธีการบอบอ่อนจำลองไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดอื่นๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.7.4 ได้แนวทางในการนำไปใช้ในการวางแผนการจัดเรียงสายป้อนกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทยได้

บทที่ 2

การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

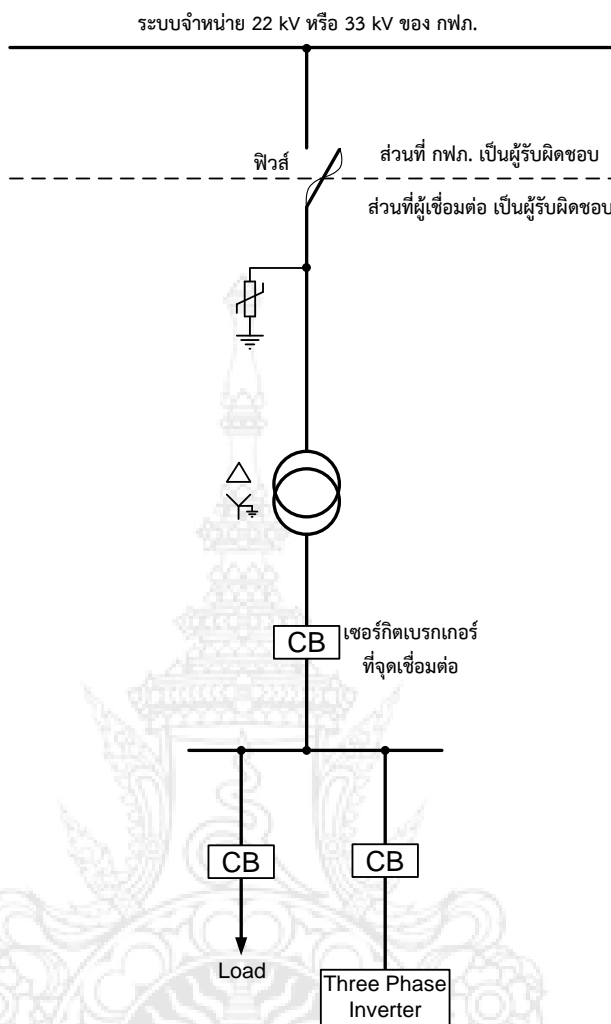
2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือ ระบบที่รับไฟฟ้าจากระบบส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าปฐมภูมิซึ่งรับไฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือสถานีไฟฟ้าย่อย ส่งต่อไปที่บริเวณผู้ใช้ไฟฟ้าแล้วลดระดับแรงดันโดยใช้ หม้อแปลงระบบจำหน่าย และสายป้อนทุติยภูมิ ซึ่งรับไฟจากหม้อแปลงระบบจำหน่าย ส่งต่อไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเพื่อใช้งาน ระบบจำหน่ายประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ดังนี้ สถานีกำลังไฟฟ้าย่อย ระบบสายส่งย่อย สถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย สายป้อนปฐมภูมิ หม้อแปลงจำหน่าย และระบบจำหน่ายทุติยภูมิซึ่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในภาพ 2.1

2.1.1 ระบบสายป้อนปฐมภูมิ

ระบบสายป้อนปฐมภูมิ หมายถึง ส่วนของระบบของไฟฟ้ากำลังที่อยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย และหม้อแปลงจำหน่าย ระบบสายป้อนปฐมภูมิ ประกอบด้วยวงจรสายป้อน ซึ่งเริ่มจากบัสแรงต่ำของสถานีไฟฟ้าย่อยผ่านไปยังบริเวณโหลดหนาแน่น และจ่ายไฟฟ้าให้หม้อแปลงจำหน่าย ถ้าเป็นระบบจำหน่ายในประเทศไทยก็คือระดับแรงดัน 22 และ 33 kV สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ 12 และ 24 kV สำหรับระบบของการไฟฟ้านครหลวง

สายป้อนปฐมภูมิประกอบด้วยสายประธาน และสายกิ่ง หรือสายที่แท็ปด้านข้าง ออกจากสายประธาน สายป้อนประธานโดยมากเป็นสามเฟสสามสายหรือสี่สายในขณะที่สายกิ่งเป็นสามเฟสหรือเฟสเดียว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในสายกิ่ง ถ้าเป็นผู้ใช้ไฟประเภทบ้านอยู่อาศัยและมีจำนวนไม่มากก็เดินสายกิ่งแบบเฟสเดียว สายกิ่งบางครั้งก็เรียกเป็นสายป้อนย่อยหรือไลน์ย่อย แล้วแต่การไฟฟ้าแต่ละแห่งจะตั้งชื่อเรียกกัน



ภาพ 2.1 ตัวอย่างระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV

2.1.2 ระบบสายป้อนปฐมภูมิการจัดวงจรแบบเรเดียลตรง

การจัดวงจรของระบบสายป้อนปฐมภูมิเป็นแบบที่ง่ายที่สุด และลงทุนน้อยที่สุด ไดอะแกรมเส้นเดียว การจัดวงจรของระบบสายป้อนปฐมภูมิแบบนี้มีความเชื่อถือในการจ่ายไฟต่ำ เพราะเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นที่จุดหนึ่งจุดใดในสายป้อนประธานจะทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้ผู้ผู้ใช้ไฟทั้งหมด นอกจากจุดลัดวงจรจะถูกตัดออกจากระบบด้วยฟิวส์หรือ สวิตช์ตัดตอนแยกจุดลัดวงจรออกถึงจะสามารถจ่ายไฟฟ้ากลับเข้ามาในระบบได้อีก แสดงระบบที่มีฟิวส์ตามสายป้อนประธาน และสายป้อนย่อยที่สามารถแยกตอนใดตอนหนึ่งของสายป้อนออกจากระบบได้

2.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่มีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าถือว่ามีผลสำคัญต่อการจ่ายโหลดไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้น การดำเนินงานเพื่อให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดีขึ้นก็ย่อมหมายถึงประโยชน์ที่จะเกิดขึ้นกับผู้ไฟฟ้าที่จะได้รับพลังงานที่เพียงพอและมีคุณภาพที่ดี ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพดีได้นั้นขึ้นอยู่กับการทำงานตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนในการก่อสร้างหรือขยายระบบ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า การเชื่อมต่อโหลดเข้ามาในระบบจำหน่ายไฟฟ้า การปลดโหลด และการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ในปัจจุบันมีความต้องการใช้ปริมาณไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม และชุมชนเมืองภายในประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น จึงมีการพัฒนาระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อให้สามารถตอบสนองความต้องการกำลังไฟฟ้า โดยการวางแผนในการจัดการกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพดีได้นั้นขึ้นอยู่กับการทำงานตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนในการก่อสร้างหรือขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้า การควบคุมแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า การเชื่อมต่อโหลดเข้ามาในระบบจำหน่ายไฟฟ้า การปลดโหลด และการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นแนวทางการลดค่าใช้จ่ายจากการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งวิธีการโดยทั่วไปที่สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ มีหลายวิธี ได้แก่ การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การติดตั้งตัวเก็บประจุ การเปลี่ยนสายส่งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น การปรับใช้ระดับแรงดันที่สูงขึ้น การจัดโหลดให้สมดุล และการจัดเรียงสายป้อนใหม่

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งวิธีการโดยทั่วไปที่สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้มีหลายวิธี ได้แก่ การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การติดตั้งตัวเก็บประจุ การเปลี่ยนสายส่งให้มีขนาดใหญ่ขึ้น การปรับใช้ระดับแรงดันที่สูงขึ้น การจัดโหลดให้สมดุล และการจัดเรียงสายป้อน

ประโยชน์ที่ได้รับจากการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ชะลอการก่อสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ เพื่อรองรับโหลดที่เพิ่มขึ้น
2. รองรับโหลดที่เพิ่มขึ้นได้
3. ลดขนาดของสายป้อนไฟฟ้า
4. ลดขนาดระบบส่งกำลัง
5. ลดขนาดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

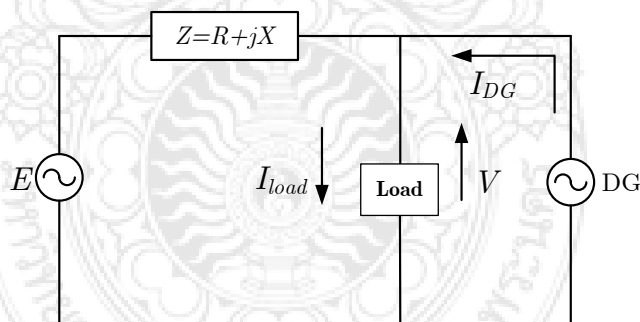
2.3 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ได้ให้คำนิยามแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว คือ การผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิต ตั้งแต่หน่วย kW – MW ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับประเทศไทยได้นิยามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 10 MW ที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายของการไฟฟ้า คือ ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก หมายถึง ผู้ผลิตไฟฟ้าทั้งภาคเอกชน รัฐบาล รัฐวิสาหกิจ ที่จำหน่ายไฟฟ้าให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย โดยมีปริมาณพลังไฟฟ้าขายเข้าระบบไม่เกิน 10 MW โดยที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย หมายถึง การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้ 2 ปัจจัยหลัก คือ ผลกระทบเนื่องจากขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และผลกระทบเนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2.3.1 ผลกระทบเนื่องจากขนาดกำลังของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ในกรณีที่สมมติให้ตำแหน่งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอยู่ที่จุดโหลด โดยจะใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้าดังแสดงในภาพ 2.2



ภาพ 2.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ในกรณีที่ไม่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ปรากฏในสายส่ง ดังแสดงในสมการ (2.1)

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

ในกรณีที่มิเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และสมมติให้แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียว กำลังสูญเสียปรากฏในสายจำหน่าย ดังแสดงในสมการ (2.2)

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

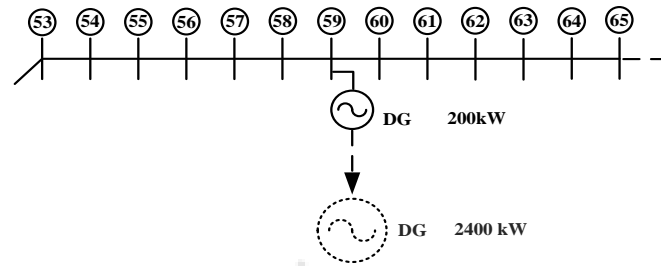
จากสมการที่ (2.2) แสดงให้เห็นว่าการที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่อเข้ามาในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $S_{loss} - S_{loss}^{DG} = (E - V)(I_{DG})$ และจากความสัมพันธ์นี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 สถานะ คือ สถานะที่กำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวน้อยกว่า หรือเท่ากับขนาดของโหลดจะช่วยให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าต่ำลง ในทางกลับกัน ถ้ากำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมากกว่าขนาดของโหลดประมาณ 2 เท่าจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น

การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบสามเฟสที่สมดุลสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$P_{Loss} = \sum_{l=1}^N |I_l|^2 R_l \quad (2.3)$$

- เมื่อ P_{Loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (kW)
 N_l คือ จำนวนของสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
 $|I_l|$ คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายป้อน
 R_l คือ ความต้านทานของสายป้อน

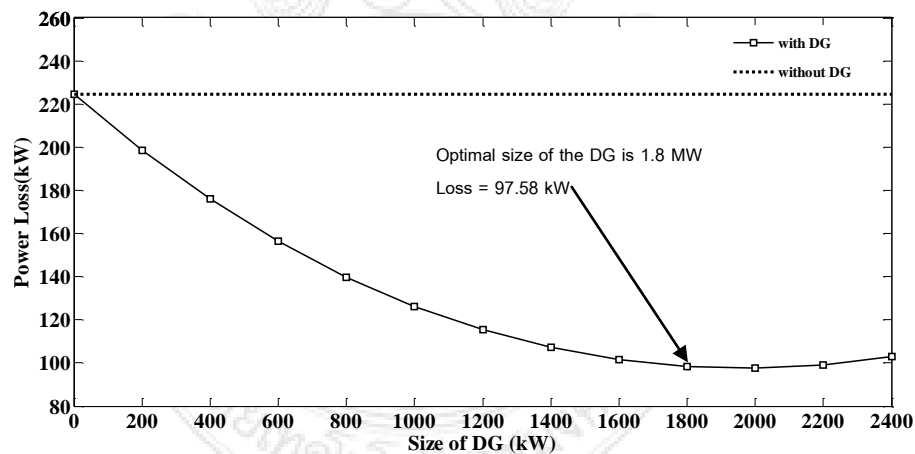
ผลกระทบของขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถ ยกตัวอย่างการทดสอบได้จากแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดงในภาพ 2.3 เป็นหนึ่งสาขาของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส และมีสถานีต้นทาง สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด



ภาพ 2.3 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดต่างๆ

กำหนดให้มีโหลดรวมทั้งหมดในระบบประมาณ 3.8 MW โดยที่ในแต่ละบัส มีโหลดดังแสดงในภาคผนวก ก จำลองการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวบัสที่ 59 ซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตตั้งแต่ 0.2 MW ถึง 2.4 MW ทำการทดสอบผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยปรับขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าเริ่มจาก 0.2 MW ไปจนถึง 2.4 MW แล้วประมวลผลหาค่าการไหลของกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จากการปรับเปลี่ยนขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถสรุปผลการทดสอบผลกระทบของขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า ดังแสดงในภาพ 2.4



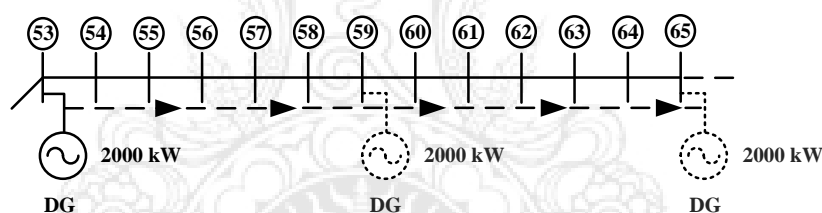
ภาพ 2.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวขนาดต่างๆ

ในภาพ 2.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ไม่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีค่า 224.63 kW ค่าที่ และในกรณีที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและมีการปรับขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย

ไฟฟ้ามีค่าลดลง คล้ายกับเส้นทางรูปตัวยู (U-Shaped Trajectory) โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงต่ำสุดที่ 97.58 kW ขนาดการผลิตกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1.8 MW ถ้าเพิ่มขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวให้สูงขึ้นจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ โดยจากทดสอบแสดงให้เห็นว่า ขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษาี้คือ 1.8 MW มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 97.58 MW ในกรณีที่ติดตั้งขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า 0.2 MW-2.4 MW จะสังเกตเห็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้กระแสในสายป้อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.3)

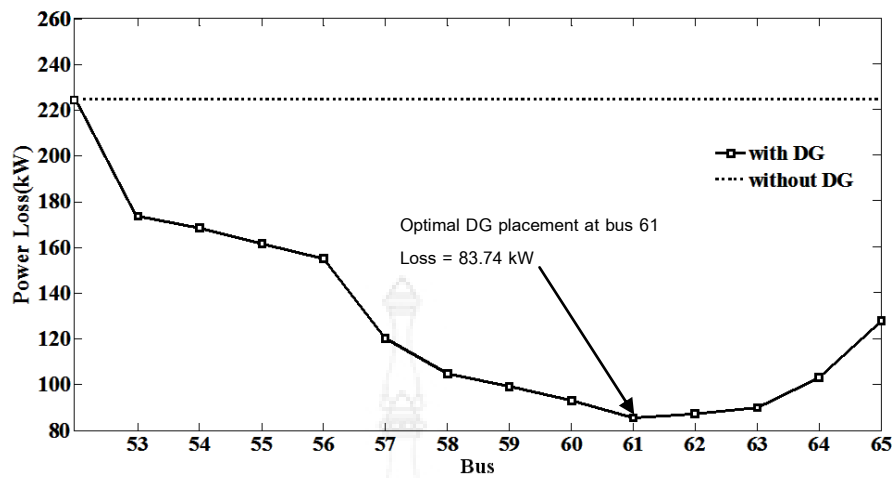
2.3.2 ผลกระทบเนื่องจากการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

การยกตัวอย่างผลกระทบของตำแหน่งในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ใช้แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดงในภาพ 2.5 เป็นสาขาหนึ่งของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส และมีสถานีต้นทางสำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด



ภาพ 2.5 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในตำแหน่งต่างๆ

กำหนดให้มีโหลดรวมทั้งหมดในระบบประมาณ 3.8 MW โดยที่แต่ละบัสมีโหลดดังแสดงในภาคผนวก ก เช่นเดียวกันกับการทดสอบผลกระทบด้านขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยจำลองการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีขนาดการผลิตกำลังไฟฟ้า 2 MW จากนั้นทำการทดสอบเปลี่ยนตำแหน่งจากบัสที่ 53-65 โดยทุกครั้งที่ทำการเปลี่ยนตำแหน่งจะมีการประมวลผลด้วยวิธีการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าที่ไหลในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่งที่ทำการติดตั้งที่มีต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า การประมวลผลทดสอบสามารถสรุปได้ดังแสดงในภาพ 2.6



ภาพ 2.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในตำแหน่งต่างๆ

จากภาพ 2.6 การปรับเปลี่ยนตำแหน่งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากบัสที่ 53 ถึงบัสที่ 65 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยตำแหน่งของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ติดตั้งบัสที่ 61 มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำที่สุดเท่ากับ 83.74 kW แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าปรับเปลี่ยนตำแหน่งในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวไปที่บัสที่ 53 และบัสที่ 65 จะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นจะแปรผันตามระยะทางระหว่างตำแหน่งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับตำแหน่งที่เป็นจุดโหลด

จากตัวอย่างการวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดกำลังการผลิต และตำแหน่งที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ทำให้สามารถสรุปได้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นมีผลมาจากขนาด และกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นในการประยุกต์ใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า จำเป็นต้องพิจารณาทั้งสองปัจจัยพร้อมกันจะทำให้สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นผลประโยชน์อย่างมากในทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการดำเนินงานในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2.4 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยการจัดเรียงสายป้อนใหม่

การจัดเรียงสายป้อน คือ การจัดสถานะการเปิด/ปิดของสวิตช์ตัดตอน และสวิตช์ถ่ายโอนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้อยู่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทนี้ ได้พิจารณาวัตถุประสงค์หลัก คือ การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สวิตช์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่ สวิตช์ที่อยู่ในตำแหน่งปกติเปิด เรียกว่าสวิตช์ถ่ายโอน (Tie Switch) และสวิตช์ที่อยู่ในตำแหน่งปกติปิดเรียกว่า สวิตช์ตัดตอน (Sectionalizing Switch) การเปลี่ยนสถานะการเปิด/ปิดของสวิตช์จะทำให้เกิดโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้ารูปแบบใหม่ (Baran and Wu, 1989) นอกจากการจัดเรียงสายป้อนเพื่อลดกำลัง ไฟฟ้าสูญเสียแล้วในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าอาจเกิดการเปลี่ยนสถานะเปิด/ปิดของอุปกรณ์ตัดตอนเพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆ เช่น เพื่อกำจัดเหตุความผิดปกติ (Fault) ที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งเป็นการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับระบบ การถ่ายโอนโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการซ่อมแซมบำรุงรักษาระบบ เป็นต้น การจัดเรียงสายป้อน อาจกลายเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อจัดการภาระโหลดเกิน (Overloads) ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงหรือสายป้อนในกรณีนี้จะเรียกว่าการจัดโหลดสมดุล (Load Balancing)

การปฏิบัติของระบบจำหน่ายไฟฟ้าควรพิจารณาการจัดเรียงสายป้อนให้สอดคล้องกับโหลดที่เป็นจริงในระบบโดยปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีโหลดในสถานะที่ไม่สมดุล (Unbalanced Load) จึงไม่สามารถใช้รูปแบบเฟสเดียวแทนระบบสามเฟสในกรณีโหลดสมดุลได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยรูปแบบสามเฟส เพื่อให้สะท้อนความเป็นจริงของระบบ (Wagner, Chikhani and Hackam, 1991) การจัดเรียงสายป้อนเพื่อวัตถุประสงค์ในการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เริ่มต้นจากการหารูปแบบโครงสร้างการเชื่อมต่อของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยที่ในแต่ละรูปแบบโครงสร้างจะต้องเป็นรูปแบบเรเดียล (Radial) และไม่มีจุดโหลดที่ถูกตัดออกจากระบบ จากนั้นทำการประมวลผลการไหลของกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งการประมวลผลจะต้องตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะต้องไม่เกินพิกัดที่จะรับได้ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบเพื่อหาโครงสร้างการจัดเรียงสายป้อนที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าต่ำที่สุด สำหรับการหารูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำที่สุด ต้องใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา โดยวิธีสำหรับ

การค้นสถานะสวิตช์เปิด/ปิดเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีหลายวิธีที่นำเสนอมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหา เช่น ขั้นตอนวิธีพันธุกรรม (Genetic Algorithm) (Subburaj, Ramar, Ganesan and Venkatesh, 2006) การค้นหาแบบตาบอด (Tabu Search) (Srikaew, 2009) และวิธีฮิวริสติก (Heuristic Methods) (Peponis and Papadopoulos, 1995)

2.5 การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยตัวเก็บประจุในระบบจำหน่าย

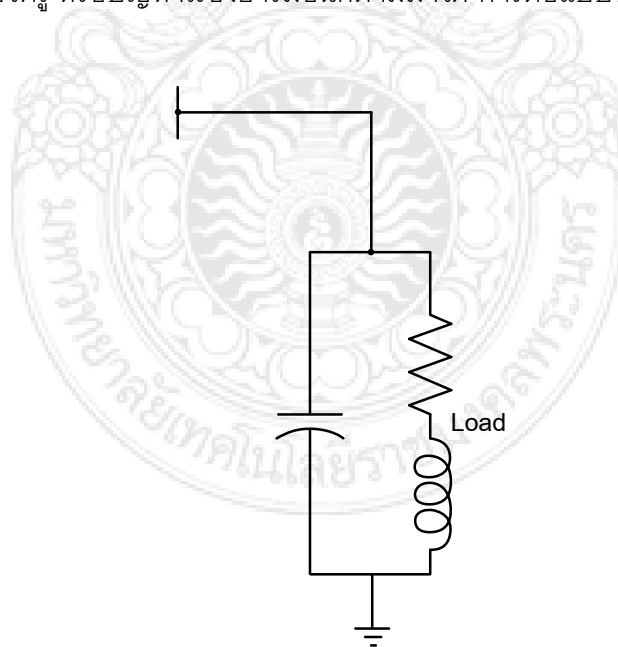
การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นมีความสำคัญ เพราะระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบช่วงสุดท้ายซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจากระบบส่ง และจ่ายต่อไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านสายป้อนปฐมภูมิ และสายป้อนทุติยภูมิ ระบบจำหน่ายประกอบด้วยบัส และจุดโหลด จำนวนมาก โดยปัญหาสำคัญที่ต้องพิจารณา ณ สภาวะการทำงานปกติของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และแรงดันตก ณ จุดโหลด โหลดทางไฟฟ้าเกือบทั้งหมดที่ใช้งานโดยทั่วไป เป็นโหลดประเภทความต้านทาน และความเหนี่ยวนำ ซึ่งต้องการทั้งกำลังจริง (Real Power) และกำลังรีแอกทีฟ (Reactive Power) จากระบบเพื่อให้สามารถทำงานได้ กำลังจริงจะถูกเปลี่ยนให้เกิดเป็นงานจริง เช่น ความร้อน แสงสว่าง หรือแรงขับเคลื่อน เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านต่างๆ ส่วนกำลังรีแอกทีฟเป็นกำลังที่ไม่ทำให้เกิดงาน แต่โหลดจำเป็นต้องใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้สามารถทำงานได้ การติดตั้งแหล่งกำเนิดกำลังรีแอกทีฟอื่นเพิ่มเติมในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นแนวทางหนึ่งของการจัดการกำลังรีแอกทีฟที่สามารถแก้ปัญหาเรื่องกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และแรงดันตกในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อโหลดได้รับกำลังรีแอกทีฟจากแหล่งอื่นๆ จะทำให้กำลังรีแอกทีฟรวมซึ่งระบบต้องจ่ายไปยังโหลดต่างๆ มีค่าน้อยลง ปริมาณกระแสที่ไหลในสายป้อนจึงมีค่าลดลง ซึ่งทำให้แรงดันที่จุดโหลดมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากแรงดันตกในสายป้อนมีค่าลดลง และทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าน้อยลง อุปกรณ์ที่สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่าย ได้แก่ เครื่องจักรกลเชิงโคโรนัส และตัวเก็บประจุ แต่วิทยานิพนธ์นี้เลือกตัวเก็บประจุ เนื่องจากต้นทุนค่าติดตั้งและค่าบำรุงรักษามีราคาถูก อีกทั้งกำลังสูญเสียในตัวเองยังมีค่าน้อย จึงมุ่งเน้นไปที่การติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นแหล่งกำเนิดกำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.5.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุในระบบจำหน่าย แบ่งตามตำแหน่งการติดตั้งได้เป็น 2 ประเภท คือ ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อย และตัวเก็บประจุในสายป้อน ตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยจะติดตั้งอยู่กับบัสทุติยภูมิ สำหรับควบคุมกำลังรีแอกทีฟของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อให้ตัวประกอบกำลังของระบบมีค่าสูง ส่วนตัวเก็บประจุในสายป้อนจะติดตั้งขนาน (Parallel) กับสายป้อนที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้แก่โหลดในระบบ (Liang and Cheng, 2001) การขนานตัวเก็บประจุกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อต่อตัวเก็บประจุที่โหลดจะทำให้แรงดันมีค่าค่อยๆ สูงขึ้นโดยเปอร์เซ็นต์แรงดันที่สูงขึ้นที่จุดติดตั้งตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)

$$\% \Delta V = \frac{100(V_{with\ cap} - V_{no\ cap})}{V_{with\ cap}} \quad (2.4)$$

$\% \Delta V$ ควรมีค่าเป็นศูนย์เมื่อไม่มีโหลด และมีค่าสูงสุดเมื่อมีโหลดเต็มพิกัด ดังนั้นจึงมีการติดตั้งตัวปลดสับตัวเก็บประจุแบบอัตโนมัติ เพื่อยกระดับแรงดันในภาวะโหลดสูง และป้องกันการเกิดแรงดันเกินในภาวะโหลดน้อย แต่อย่างไรก็ตามการสับหรือการปลดตัวเก็บประจุนี้อาจทำให้เกิดแรงดันเกินแบบชั่วคราว หรือปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกตามมาได้ การต่อแบบขนานตัวเก็บประจุแสดงในภาพ 2.7



ภาพ 2.7 การต่อแบบขนาน

ส่วนตัวเก็บประจุแบบอนุกรมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า การชดเชยแรงดันโดยต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า แรงดันที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าแปรตามกระแสในสาย โดยมีค่าสูงสุดเมื่อโหลดมีค่าสูง และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อไม่มีโหลด ข้อเสียของการต่อตัวเก็บประจุแบบอนุกรมคือ ไม่สามารถชดเชยค่ารีแอกทีฟในสาย จึงไม่สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมไม่สามารถทนกระแสลัดวงจรได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเพิ่มเติมให้กับตัวเก็บประจุ วิทยานิพนธ์นี้เน้นเรื่องของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จึงใช้การต่อแบบขนานตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.5.2 ชนิดของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดค่าคงที่ (Fixed Type) และชนิดปรับค่าได้ (Switched Type) การติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ไม่สามารถควบคุมการจ่ายกำลังรีแอกทีฟได้ โดยกำลังรีแอกทีฟจำนวนหนึ่งจากตัวเก็บประจุจะถูกจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าตลอดเวลา ส่วนการติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้ จะควบคุมการจ่ายกำลังรีแอกทีฟด้วยการเพิ่มหรือลดจำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า การลงทุนติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดปรับค่าได้จึงมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการติดตั้งตัวเก็บประจุชนิดค่าคงที่ เนื่องจากต้องติดตั้งกลไกการควบคุมเพิ่มเติมเพื่อสับเข้า และปลดออกตัวเก็บประจุ

ประเด็นที่ต้องพิจารณาเมื่อใช้ตัวเก็บประจุเป็นแหล่งกำเนิดกำลังรีแอกทีฟในระบบจำหน่ายคือ ข้อจำกัดของการส่งกำลังรีแอกทีฟ ถึงแม้โหลดจะมีความต้องการกำลังรีแอกทีฟในปริมาณมาก แต่ถ้าตัวเก็บประจุจ่ายกำลังรีแอกทีฟในปริมาณที่มากเกินไป ก็จะทำให้กำลังสูญเสีย และขนาดแรงดันบัลมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การติดตั้งตัวเก็บประจุในตำแหน่งซึ่งอยู่ห่างจากโหลดที่มีความต้องการกำลังรีแอกทีฟ ก็อาจทำให้เกิดปัญหาเช่นกัน เพราะการส่งกำลังรีแอกทีฟปริมาณมากเป็นระยะทางไกลๆ ทำให้แรงดัน ณ จุดปลายทางมีค่าลดลงจนอาจน้อยกว่าค่าแรงดันต่ำสุดที่ยอมรับได้ อีกทั้งยังทำให้กำลังสูญเสียรวมของระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น (Kundur, 1993) การกำหนดตำแหน่ง และค่ากำลังรีแอกทีฟที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุจึงมีความสำคัญอย่างมาก ความต้องการโหลดซึ่งลดลงหรือเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของวัน ก็ส่งผลต่อการทำงานของตัวเก็บประจุด้วยเช่นกัน เมื่อโหลดมีค่าลดลงโดยที่กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุยังคงมีค่าเท่าเดิมก็อาจทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินเนื่องจากการชดเชยมากเกินไป ในทางกลับกัน ถ้าโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุอาจไม่เพียงพอต่อการปรับปรุงขนาดแรงดัน

และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบจำหน่ายไฟฟ้า การควบคุมปริมาณกำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุให้เหมาะสมกับความต้องการโหลดจึงมีความจำเป็นเช่นกัน นอกจากนี้พิจารณาข้อจำกัดในการส่งกำลังรีแอกทีฟ และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโหลด การทำงานของตัวเก็บประจุยังต้องคำนึงถึงการประสานการทำงาน ให้สัมพันธ์กับอุปกรณ์อื่นในระบบ เช่น ตัวเปลี่ยนจุดแยก (Tap Changer) ของหม้อแปลงไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้าย่อย แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generations; DGs) เพราะอุปกรณ์เหล่านี้ต่างก็มีผลกระทบต่อขนาดแรงดันบัสและกำลังสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จากที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวเก็บประจุชนิดคงที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ค้นหาตำแหน่งการติดตั้งอย่างเหมาะสม ด้วยเทคนิคการอบอุ่นจำลองผลกับการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และผลกับการจัดเรียงสายบ่อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 3

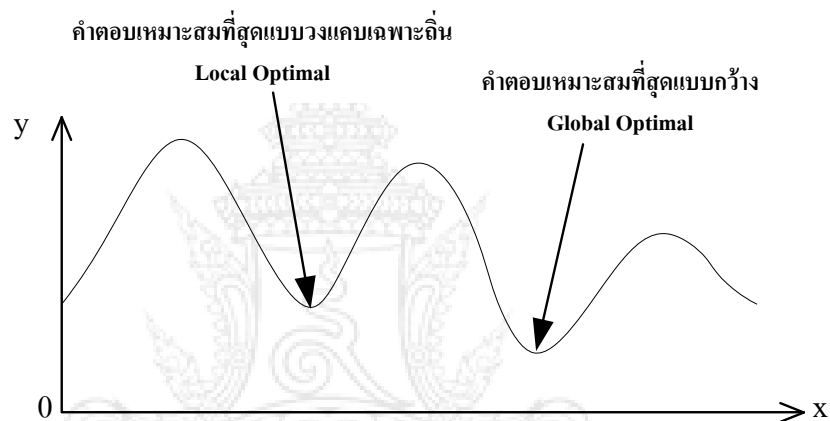
อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง

3.1 บทนำ

อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing; SA) เป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบแบบสุ่ม ซึ่งเลียนแบบกระบวนการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงช้าๆ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกที่มีพลังงานภายในน้อยที่สุดคุณลักษณะดังกล่าวจะทำให้โลหะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แข็งแกร่ง และทนทาน ในทางตรงกันข้าม ถ้าไม่ทำการควบคุมการทำให้เย็นของโลหะร้อนแล้ว โครงสร้างที่ได้จะมีจุดตำหนิ หรือบกพร่อง เป็นโลหะที่มีความแข็งแรงแต่เปราะ กระบวนการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะดังกล่าวเรียกว่าการอบอ่อน (Annealing Process) การอบอ่อนจำลองเป็นเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับปัญหาเชิงผสมผสาน โดยมีการควบคุมอุณหภูมิของการอบอ่อนเป็นการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นการปรับสถานะการเปิดปิดสวิตช์ตัดตอนและสวิตช์จ่ายอิน ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Srikaew, 2009)

การอบอ่อนจำลอง ได้รับการพัฒนาขึ้น (Kirkpatrick Gelatt Jr. and Vecchi, 1983) เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้นของการอบอ่อนจำลอง ทำให้ระบบได้รับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global Optimum) โดยการเลียนแบบกระบวนการอบอ่อนเหล็ก กระบวนการดังกล่าวเริ่มต้นจากการเผาเหล็กด้วยความร้อนสูงจนถึงจุดหลอมเหลวของเหล็ก ซึ่งทำให้เหล็กอยู่ในสถานะของเหลว และมีโครงสร้างระดับโมเลกุลที่มีพลังงานสูง สามารถมีปริมาณการเคลื่อนที่ ที่สูงได้ (Srikaew, 2009) ซึ่งจุดนี้เปรียบได้กับการที่การค้นหาคำตอบ มีพลังงานมากพอที่จะสามารถก้าวหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ (Local Optimum) ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและแบบวงกว้างแสดงในภาพ 3.1 เมื่อทำการลดอุณหภูมิของระบบลง โมเลกุลโครงสร้างของเหล็กจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เท่าเดิม และจะถูกจำกัดในช่วงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น เมื่อพิจารณาในระดับโครงสร้างผลึกของเหล็ก การลด อุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ทำให้เหล็กมีโครงสร้างผลึกที่แข็งแกร่ง (Srikaew, 2009) ในขณะเดียวกัน ถ้าอุณหภูมิลดลงอย่างไม่เหมาะสม โครงสร้างผลึกดังกล่าวจะมีการจัดตัวที่ไม่

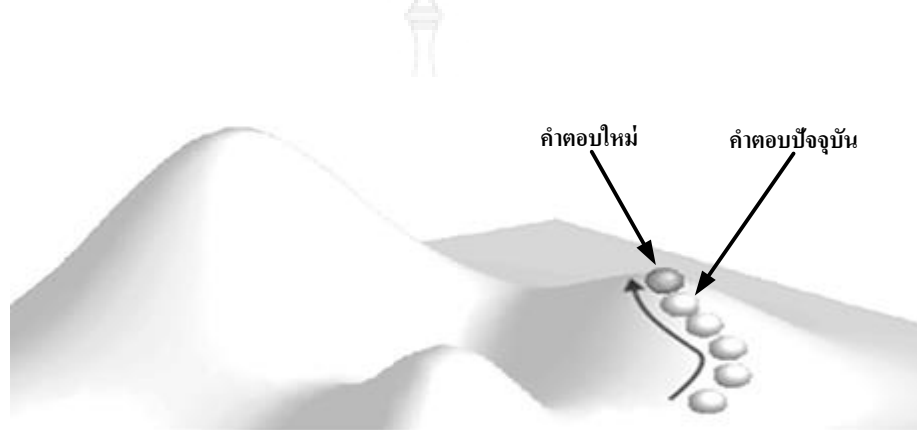
เหมาะสม ส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องในโครงสร้างผลึก ซึ่งจะทำให้เหล็กที่ได้มีความแข็งแรงแต่เปราะ เหล็กที่ไม่มีข้อบกพร่องในโครงสร้างผลึกเลยเปรียบได้กับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง กระบวนการอบอ่อนเหล็กดังกล่าวเปรียบเสมือนการเขย่ากล่องที่มีพื้นผิวไม่ราบเรียบ แต่ละพื้นผิว คือคำตอบ และมีลูกบอลกลิ้งไปมาบนพื้นผิวนั้นๆ เมื่อลูกบอลกลิ้งไปติดกับส่วนใดส่วนหนึ่งที่ราบเรียบบนพื้นผิวที่ผิวนั้น ต้องเขย่ากล่องให้แรงขึ้น เพื่อให้ลูกบอลหลุดออกจากพื้นที่ผิวนั้นให้ได้ พื้นที่ผิวดังกล่าว เปรียบได้กับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ส่วนพื้นที่ผิวที่ไม่ราบเรียบกว่า ต้องการการเขย่าที่แรงกว่าในการที่จะทำให้ลูกบอลหลุดออกจากพื้นที่ผิวที่ราบเรียบน้อยได้ การเขย่าที่แรงคือการให้พลังงานกับลูกบอลที่มากขึ้น ดังแสดงในภาพ 3.1



ภาพ 3.1 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและแบบวงกว้าง

เทียบได้กับการให้อุณหภูมิที่สูงกับโมเลกุลของเหล็ก อุณหภูมิที่ลดลงคือการเขย่ากล่องด้วยแรงที่ลดลง ทำให้ลูกบอลเคลื่อนที่ได้ราบเรียบ และเข้าสู่เป้าหมายได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการอบอ่อนจำลองจะสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ แต่เวลาในการค้นหาคำตอบอาจจะไม่เหมาะสมในการใช้งานจริงก็ได้ มีงานวิจัยมากมายที่เน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของการอบอ่อนจำลองให้ดีขึ้นเช่น FSA (Fast Simulated Annealing) หรือ ASA (Adaptive Simulated Annealing) ที่ซึ่งลู่อู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วขึ้นแบบเลขยกกำลัง (Rutenbar, 1989)(Hajek, 1989) มีความแตกต่างไปจากการค้นหาคำตอบแบบวนรอบดีขึ้น (Iterative Improvement Search) ตรงที่มีการใส่ค่าสุ่มเข้าไปในการค้นหาคำตอบ การสุ่มค่าดังกล่าวทำให้การอบอ่อนจำลองสามารถกระโดด หรือหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ การกระโดดดังกล่าวคือการปรับอุณหภูมิในกระบวนการอบอ่อนจำลองที่ได้

กล่าวมาแล้ว การปรับอุณหภูมิสูงของการอบอ่อนจำลอง เปรียบเสมือนระบบจะทำการค้นหาแบบหายาๆ การกระโดดไปมาอย่างแรง ไม่มีการไล่ระดับอุณหภูมิ ส่วนการปรับอุณหภูมิต่ำของการอบอ่อนจำลอง เสมือนการค้นหาแบบละเอียด ไม่มีการกระโดดไปมาอย่างรุนแรง ค้นหาคำตอบใหม่โดยเปรียบเทียบกับคำตอบปัจจุบัน ดังแสดงในภาพ 3.2 ด้วยลักษณะการทำงานแบบสุ่มดังกล่าว เราอาจเรียกการอบอ่อนจำลองว่าเป็นอัลกอริทึมเชิงน่าจะเป็น (Probabilistic Algorithm)



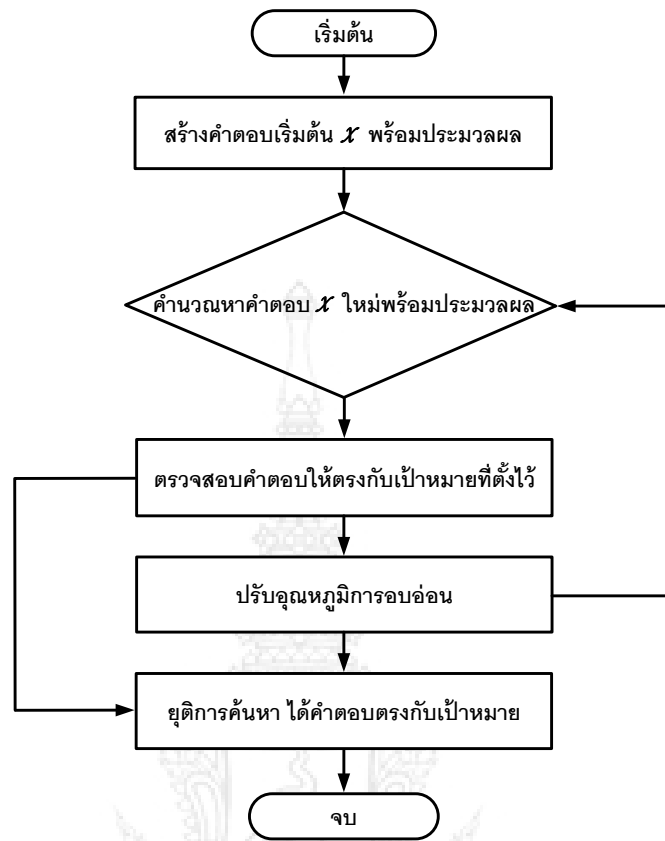
ภาพ 3.2 การเดินค้นหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน

3.2 อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing Algorithm)

อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลองได้รับแนวคิดทางธรรมชาติจากการทำให้เหล็กที่กำลังร้อนเย็นตัวลงในโครงสร้างของ เหล็กที่กำลังร้อนนั้น ความน่าจะเป็นของกลุ่มอะตอม ณ ตำแหน่ง r_i จะมีค่าพลังงานเฉพาะค่าหนึ่งคือ $E(r_i)$ ที่อุณหภูมิ T ค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวสามารถนิยามได้จากค่าความน่าจะเป็นแบบโบลต์ซมันน์ (Boltzmann Probability) ดังนี้

$$Pr[E(r_i)] = e^{-E(r_i)/k_B T} \quad (3.1)$$

โดยที่ k_B คือค่าคงที่โบลต์ซมันน์ ปรัชญาการณ์ข้างต้นนำไปสู่การออกแบบอัลกอริทึมสำหรับการอบอ่อนจำลอง ซึ่ง เป็นจุดเด่นที่ทำให้เทคนิคการอบอ่อนจำลอง ได้รับความสนใจมากมาย จุดเด่นที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การอบอ่อนจำลองมีโครงสร้างหรือหลักการการทำงาน ที่ไม่มีความซับซ้อนแต่อย่างใด แผนผังแสดงการทำงานของอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง ดังแสดงในภาพ 3.3 (Ham and Kostanic, 2001)



ภาพ 3.3 อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง

ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 4 อย่างดังนี้

1. รูปแบบของคำตอบที่ต้องการค้นหา
2. ตัวกำเนิดสุ่ม (Random Generator) หรือตัวปฏิบัติการค้นหาสำหรับทำการ “เดิน” หรือ “move” คำตอบของ ระบบไปยังคำตอบใหม่
3. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ของระบบ
4. ตารางจัดการการอบอุ่น (Annealing Schedule) ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ปรับค่าอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่จะให้ ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ รายละเอียดของอัลกอริทึมการอบอุ่นจำลองมีดังต่อไปนี้ (Srikaew, 2009)

อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง

1. สุ่มค่าเริ่มต้นเวกเตอร์คำตอบ x ในปฏิบัติการค้นหา ค่าเวกเตอร์คำตอบ x นี้สามารถพิจารณาว่าเป็นสถานะของระบบก็ได้

2. กำหนดตารางจัดการการอบอุ่นสำหรับพารามิเตอร์อุณหภูมิ T และตั้งค่าเริ่มต้นของ T ไว้ที่ค่าสูงอย่างเพียงพอ (ในการหลอมละลายเหล็กได้)

3. คำนวณหาเวกเตอร์คำตอบใหม่ $x_p = x + \Delta x$ โดยที่ Δx เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ถูกนำเสนอต่อระบบ

4. คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $\Delta f = f(x_p) - f(x)$

5. ทำการคำนวณหาว่าควรจะใช้ x_p เป็นคำตอบหรือสถานะใหม่ของระบบหรือไม่ กล่าวคือใช้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจที่จะเปลี่ยนสถานะตามเงื่อนไข ต่อไปนี้

$$P_r(x \rightarrow x_p) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta f < 0 \\ e^{-\Delta f/T} & \text{if } \Delta f \geq 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

โดยที่ T แทนอุณหภูมิของระบบ ในกรณีที่ f_0 ค่าตัวเลขสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) η จะถูกเลือกจากในช่วง $[0,1]$ ถ้า $P_r(x \rightarrow x_p) > \eta$ แล้วเวกเตอร์คำตอบ x_p จะถูกใช้เป็นคำตอบหรือสถานะใหม่ของระบบ มิฉะนั้นแล้ว ให้คงคำตอบของระบบไว้ที่ x เหมือนเดิม

6. ขั้นตอนข้างต้นจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งระบบเข้าสู่จุดสมดุล ที่ซึ่งรู้ได้จากจำนวนครั้งของการเปลี่ยนสถานะไม่มีนัยสำคัญเพียงพอ สภาวะดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีคำตอบหรือสถานะเข้าใกล้ค่าเหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยปกติแล้ว จำนวนครั้งของการทำซ้ำจะถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า

7. ทำการปรับค่าอุณหภูมิ T ตามตารางจัดการการอบอุ่น แล้วเริ่มทำขั้นตอนทำซ้ำทั้งหมดใหม่อีกครั้ง กระบวนการทั้งหมดสามารถยุติได้เมื่อค่าอุณหภูมิ T มีค่าเป็นศูนย์ (ระบบถูกแช่แข็ง)

รายละเอียดพารามิเตอร์ต่างๆ ของ SA มีดังต่อไปนี้

ตารางจัดการการอบอุ่น (Annealing Schedule) ในความเป็นจริงแล้ว ประสิทธิภาพของการอบอุ่นจำลอง จะขึ้นอยู่กับทางเลือกตารางจัดการการอบอุ่น (สำหรับพารามิเตอร์อุณหภูมิ T) ตารางจัดการการอบอุ่นจะเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่หรือ “move” ของคำตอบของระบบในระหว่างการค้นหา หลักในการเลือกตารางจัดการการอบอุ่นที่เหมาะสมคือ “ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของระบบควรจะสูงพอที่จะหลอมละลายระบบอย่างสมบูรณ์ และในระหว่างขั้นตอนการค้นหาควรมีค่าลดลง ไปจนถึงจุดเยือกแข็ง” การเลือกตารางจัดการการอบอุ่นจึง

ค่อนข้างเป็นงานศิลปะ ถ้าระบบถูกลดอุณหภูมิ ลงเร็วเกินไป การลู่เข้าสู่คำตอบอาจจะเร็วเกินไปด้วย ทำให้ระบบลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ เฉพาะถิ่น ในทางตรงกันข้าม ถ้าระบบมีอุณหภูมิลดลงช้าเกินไป จะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากเกินไป ด้วยเช่นกัน การเลือกตารางจัดการการอบอุ่นหลายวิธี ได้ถูกนำเสนอ ไม่ว่าจะเป็นวิธีการใช้ลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov Chain) ขนาดจำกัดในการลดอุณหภูมิ หรือวิธีการปรับอุณหภูมิ ดังต่อไปนี้ (Srikaew, 2009)

$$T(k) = \frac{T(0)}{\log(1+k)} \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

โดยที่ k คือจำนวนรอบที่กำลังทำซ้ำ $T(k)$ เป็นอุณหภูมิลำดับที่ k และ $T(0)$ เป็นค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (ควรมีค่า บวก และมากเพียงพอ) อัลกอริทึม SA รับประกันว่าจะลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ เมื่อ $k \rightarrow \infty$ หรือในรูปแบบการลดอุณหภูมิอย่างง่าย ๆ เช่น

$$T(k) = \alpha T(k-1) \quad (3.4)$$

โดยที่เป็นค่าคงที่ที่มีค่าใกล้เคียง และน้อยกว่า 1 เรียกว่า การลดอุณหภูมิแบบเลขชี้กำลัง (Exponential Cooling Scheme หรือ ECS) นำเสนอครั้งแรกด้วยการใช้ค่า $\alpha = 0.95$ ส่วนการลดอุณหภูมิแบบเชิงเส้น (Linear Cooling Scheme หรือ LCS) กำหนดการลดค่าอุณหภูมิดังนี้

$$T(k) = T(k-1) - T' \quad (3.5)$$

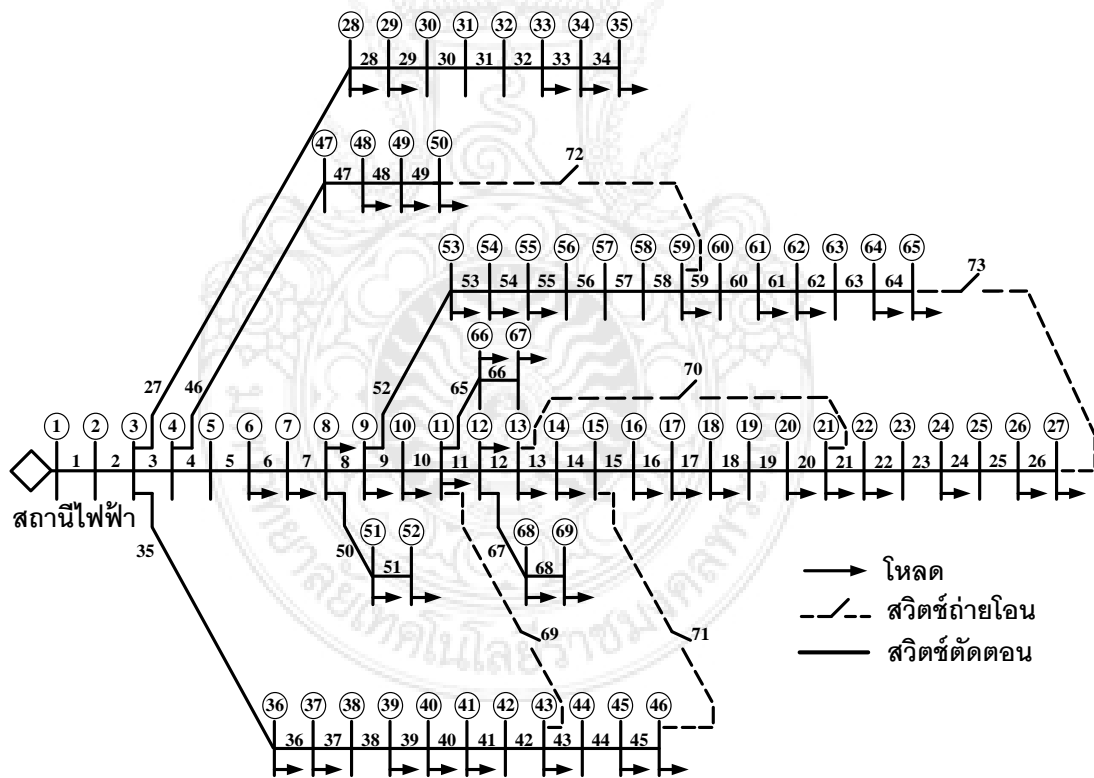
โดยที่ค่า T' เป็นค่าอุณหภูมิที่ลดลงไปในช่วงจำนวนการวนรอบที่กำหนด ข้อควรระวังคือค่าอุณหภูมิที่สามารถติดลบได้ในกรณีของ LCS (Srikaew, 2009)

ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (Initial Temperature) ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น $T(0)$ ที่เหมาะสมจะทำให้ค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นในการยอมรับคำตอบหรือสถานะใหม่ของระบบสูงถึง 0.8 กล่าวคือมีโอกาส 80% ที่การเปลี่ยนแปลงของคำตอบหรือสถานะของระบบจะถูกยอมรับ ค่าของ $T(0)$ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ f ดังนั้นค่าอุณหภูมิเริ่มต้นดังกล่าวจึงมีค่าเฉพาะของแต่ละปัญหา

ค่าอุณหภูมิสุดท้าย (Final Temperature) ในอัลกอริทึมอบอ่อนจำลองที่ไม่ซับซ้อน ค่าอุณหภูมิสุดท้ายของระบบสามารถหาได้จากจำนวนรอบของการทำซ้ำ จำนวนคำตอบใหม่ที่ได้ทั้งหมดหรือจำนวนค่าอุณหภูมิที่ใช้ไป ในขณะเดียวกัน เราสามารถยุติขั้นตอนของการอบอ่อนจำลองได้เมื่อระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของคำตอบหรือสถานะใหม่ การใช้วิธีอบอ่อนจำลองจึงเป็นหนึ่งในทางเลือกของ optimization technique ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการผสานแนวทางการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้

3.3 การประยุกต์ใช้เทคนิคการอบอ่อนจำลองในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

บทนี้นำเสนอตัวอย่างการใช้เทคนิคการอบอ่อนจำลองในการค้นหาตำแหน่งปิด/เปิดสวิตช์ตัดตอนและสวิตช์ถ่ายโอนกับแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ซึ่งประกอบด้วย 7 แขนง และมีสายถ่ายโอน 5 เส้น ดังแสดงในภาพ 3.4 (Savner and Das, 2007)

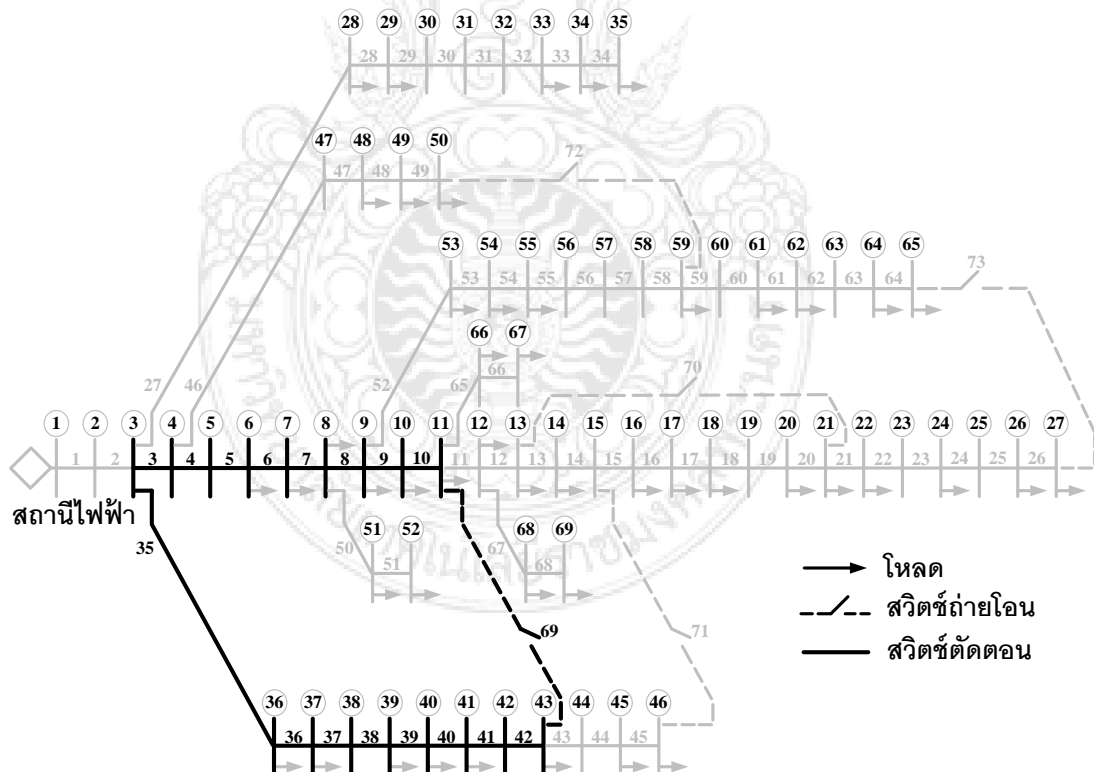


ภาพ 3.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

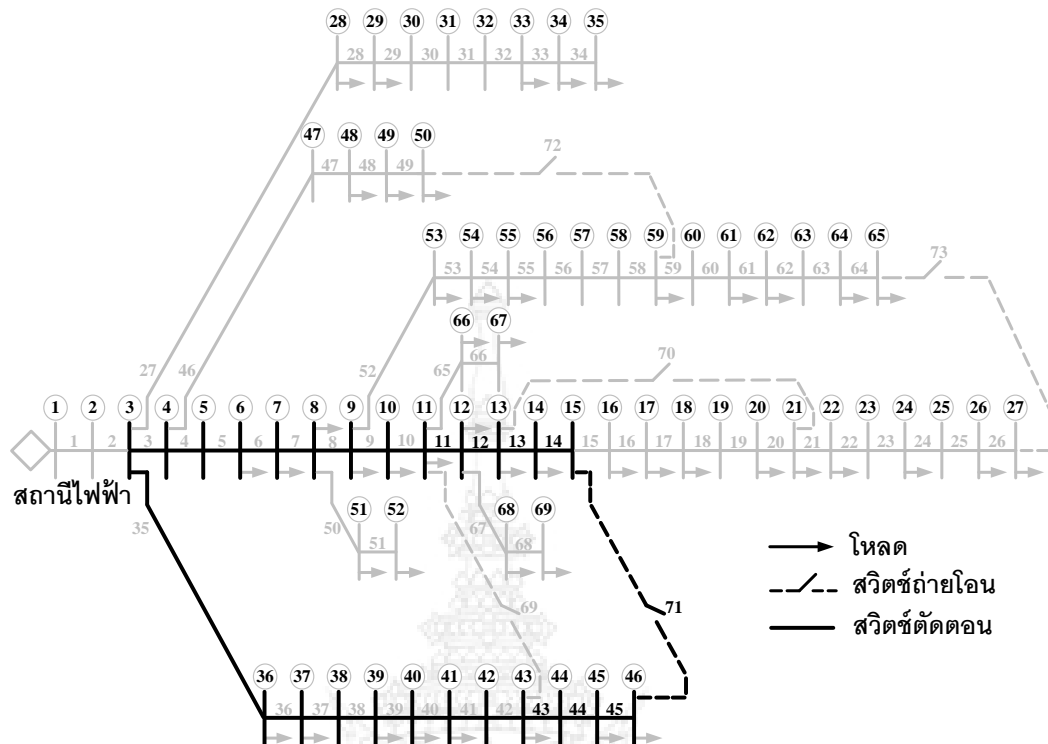
สามารถจำแนกได้เป็น 6 Loop แสดงในภาพ 3.5 ซึ่ง Loop main นั้นไม่สามารถปิด/เปิด สวิตช์ เพราะจะทำให้ไฟฟ้าดับได้ ส่วน Loop ที่ 1-5 นั้น ได้แสดงในภาพ 3.6 ถึง 3.10 ตามลำดับ สวิตช์แต่ละตัวจะไม่ซ้ำกัน หากอยู่ใน Loop ใดแล้ว สวิตช์ตัวนั้นจะไม่ถูกนำไปคำนวณใน Loop อื่นๆ

Loop_main	1	2	27	28	29	30	31	32	33	34	50	51	65	66	67	68	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Loop_1	35	36	37	38	39	40	41	42	69	3	4	5	6	7	8	9	10
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Loop_2	43	44	45	71	11	12	13	14									
	0	0	0	1	0	0	0	0									
Loop_3	15	16	17	18	19	20	70										
	0	0	0	0	0	0	1										
Loop_4	46	47	48	49	72	52	53	54	55	56	57	58					
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0					
Loop_5	21	22	23	24	25	26	73	59	60	61	62	63	64				
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0				

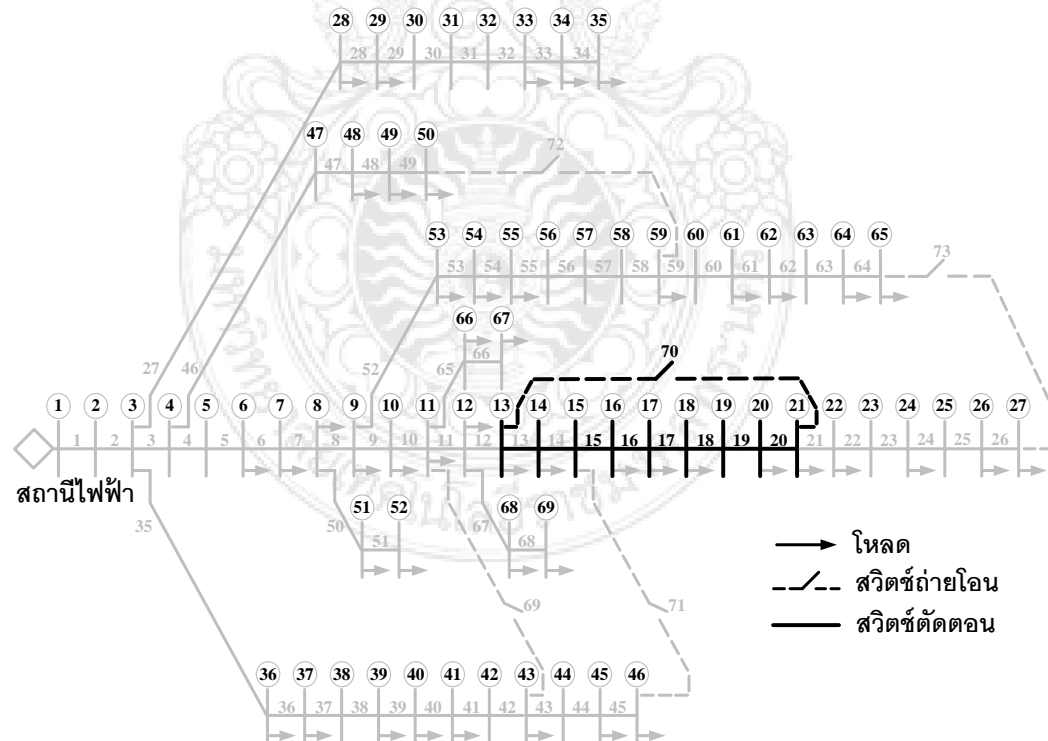
ภาพ 3.5 หมายเลข 1 คือตำแหน่งสถานะเปิดของสวิตช์ถ่ายโอน



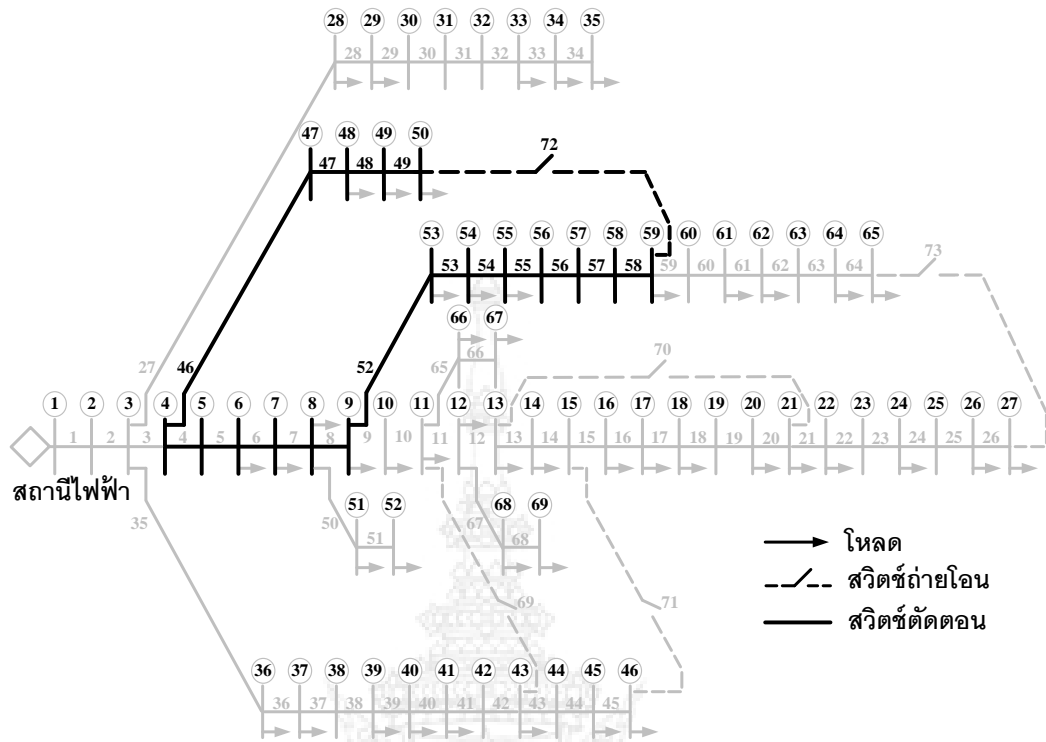
ภาพ 3.6 Loop ที่ 1 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส



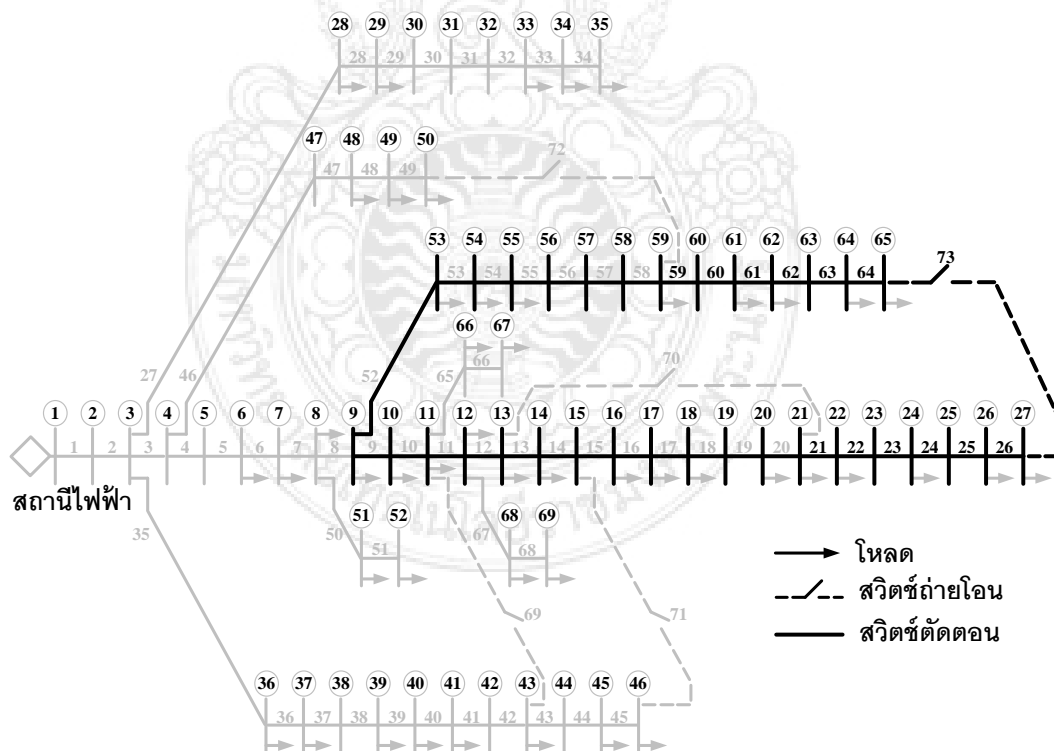
ภาพ 3.7 Loop ที่ 2 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส



ภาพ 3.8 Loop ที่ 3 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส



ภาพ 3.9 Loop ที่ 4 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส



ภาพ 3.10 Loop ที่ 5 ของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

ในการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากรูปแบบสวิตช์ที่กำหนดเป็นค่าเริ่มต้นเทคนิคการบอ
ก่อนจำลองจะทำการค้นหาค่าข้างเคียงตำแหน่งการปิด/เปิดของสวิตช์ถ่ายโอนและสวิตช์ตัดตอน
เพื่อให้ได้คำตอบของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีค่าต่ำที่สุด โดยภายในหนึ่ง
Loop จะเปิดสวิตช์ได้เพียงหนึ่งตำแหน่งเท่านั้น จากภาพ 3.11 กำหนดให้เริ่มค้นหาจากการเปิด
สวิตช์ 35, 43, 15, 46 และ 21 แล้วจึงเก็บคำตอบไว้เพื่อเปรียบเทียบกับคำตอบใหม่ โดยจะทำซ้ำ
ไปเรื่อยๆ

Loop_main	1	2	27	28	29	30	31	32	33	34	50	51	65	66	67	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Loop_1	35	36	37	38	39	40	41	42	69	3	4	5	6	7	8	9	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Loop_2	43	44	45	71	11	12	13	14	1	0	0	0	0	0	0	0																
Loop_3	15	16	17	18	19	20	70	1	0	0	0	0	0	0																		
Loop_4	46	47	48	49	72	52	53	54	55	56	57	58	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Loop_5	21	22	23	24	25	26	73	59	60	61	62	63	64	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							

ภาพ 3.11 กำหนดการปิด/เปิดสวิตช์เก็บคำตอบไว้เพื่อเปรียบเทียบกัน

ตำแหน่งสวิตช์ใน Loop ที่ 5 เปลี่ยนจาก 21 เป็น 22 สวิตช์จะถูกเปลี่ยนตำแหน่งจนกว่า
จะได้รับคำตอบที่พึงพอใจ ภายใต้เงื่อนไขกำหนด ดังแสดงในภาพ 3.12

Loop_main	1	2	27	28	29	30	31	32	33	34	50	51	65	66	67	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Loop_1	35	36	37	38	39	40	41	42	69	3	4	5	6	7	8	9	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Loop_2	43	44	45	71	11	12	13	14	1	0	0	0	0	0	0																	
Loop_3	15	16	17	18	19	20	70	1	0	0	0	0	0	0																		
Loop_4	46	47	48	49	72	52	53	54	55	56	57	58	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
Loop_5	21	22	23	24	25	26	73	59	60	61	62	63	64	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						

ภาพ 3.12 การค้นหาตำแหน่งปิด/เปิดสวิตช์ใหม่ โดยเปรียบเทียบกับคำตอบปัจจุบัน

บทที่ 4

การผสมแนวทางการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยเทคนิคการบ่อนจำลอง ได้ทำการทดสอบกับแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส โดยนำเสนอ 2 กรณีศึกษา คือกรณีที่ศึกษาที่ 1 การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวผสมกับการจัดเรียงสายป้อน และกรณีที่ศึกษาที่ 2 การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการติดตั้งตัวเก็บประจุ ทั้งสองวิธีผสมกับการจัดเรียงสายป้อน

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา

แบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาสำหรับการหาตำแหน่งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การหาตำแหน่งของตัวเก็บประจุ และการหาตำแหน่งของการเปิด/ปิดสวิตช์ในการจัดเรียงสายป้อน เพื่อลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขกำหนด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหา ดังแสดงในสมการที่ (4.1) (Rugthaicharoencheep and Sirisumrannukul, 2009)

$$\text{Minimize } P = \sum_{k=1}^l I_k^2 R_k \quad (4.1)$$

เมื่อ	P	คือ ผลรวมกำลังไฟฟ้าสูญเสีย
	I_k	คือ กระแสไฟฟ้าในสาขา k
	R_k	คือ ความต้านทานในสาขา k
	l	คือ จำนวนของสายป้อน

4.1.1 ขอบเขตการวิเคราะห์ปัญหา

4.1.1.1 ค่าของกำลังไฟฟารวมที่บัสใดๆ ต้องมีความสมดุลตามเงื่อนไขการไหลของกำลังไฟฟ้า

ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3)

$$P_i = \sum_{j=1}^{N_B} |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4.2)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{N_B} |Y_{ij} V_i V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4.3)$$

- เมื่อ P_i คือ กำลังไฟฟ้าที่บัส i
 Q_i คือ กำลังไฟฟ้ร่อกที่บัส i
 Y_{ij} คือ แอดมิแตนซ์ระหว่างบัส i กับ บัส j
 V_i คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
 V_j คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส j
 θ_{ij} คือ มุมของ Y_{ij}
 δ_j คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส j
 δ_i คือ มุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i

4.1.1.2 ค่าขนาดของแรงดันที่แต่ละบัสจะต้องยังคงอยู่ในขีดจำกัดที่กำหนดหลังจากการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้ามาในระบบ

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

- เมื่อ V_i^{\min} คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่บัส i
 V_i^{\max} คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่บัส i

4.1.1.3 ค่าขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแต่ละสายป้อนจะต้องยังคงอยู่ในขีดจำกัดที่กำหนดหลังจากการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้ามาในระบบ

$$I_l \leq I_l^{\max} \quad l = \{1, 2, 3, \dots, N_l\} \quad (4.5)$$

เมื่อ I_l คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายป้อน l

I_l^{\max} คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่านสายป้อน l

4.2 กรณีศึกษา

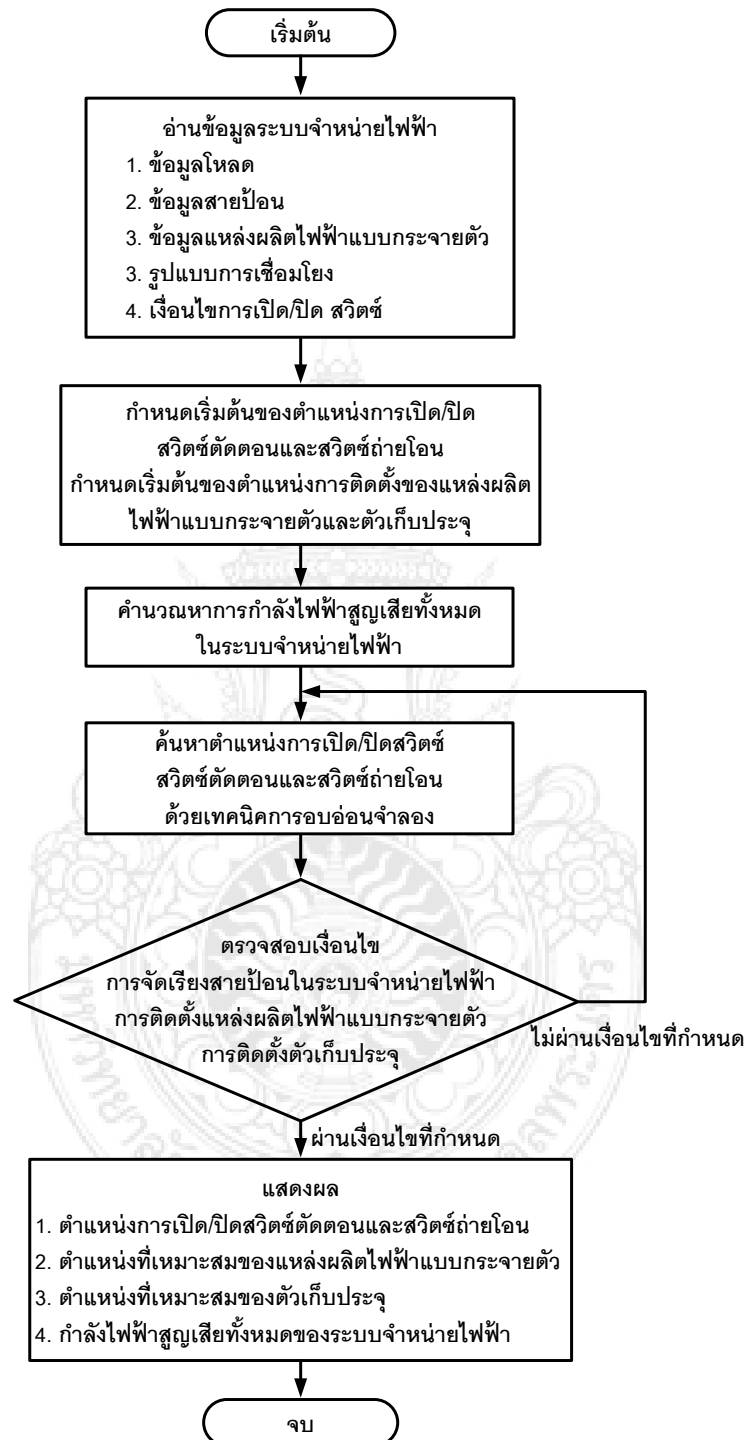
กรณีศึกษานี้นำเสนอความสามารถในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การติดตั้งตัวเก็บประจุ และการจัดเรียงสายป้อน โดยพิจารณาจากกรณีศึกษาต่างๆ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบขนาด 69 บัส ซึ่งใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของการจัดเรียงสายป้อน การค้นหาตำแหน่งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตัวเก็บประจุ เพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้นำวิธีที่เสนอทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

วิธีการค้นหาแบบเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด ประมวลผลหาค่าตอบที่เหมาะสมของตำแหน่งการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตำแหน่งของตัวเก็บประจุ และการจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสม โดยกำหนดแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในการทดสอบมีค่าต่ำสุด และสูงสุด คือ 0.95 p.u. และ 1.05 p.u. เป็นเงื่อนไขในการทดสอบทุกกรณีศึกษา

แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ซึ่งประกอบด้วย สวิตช์ตัดตอนจำนวน 68 ตัว สวิตช์หมายเลข 1 ถึงหมายเลข 68 สวิตช์ถ่ายโอนจำนวน 5 ตัว สวิตช์หมายเลข 69 ถึงหมายเลข 73 โหลดรวมที่เป็นกำลังไฟฟ้าจริง (Active Load) มีค่า 3,801.890 kW และโหลดรวมที่เป็นกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Load) มีค่า 2,694.108 kVAr รายละเอียดของโหลดที่บัสต่างๆ ได้แสดงไว้ในตาราง ก-1 (ภาคผนวก ก)

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มาอ้างอิงเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ เพื่อค้นหาค่าตำแหน่งปิด/เปิดสวิตช์ตัดตอนและสวิตช์ถ่ายโอน ทั้งนี้ วิธีการหาค่าเหมาะที่สุด จะสุ่มเพื่อค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง ถ้าค่าที่ค้นหาเป็นค่าที่เข้าใกล้กับค่าที่ต้องการ ขั้นตอนวิธีของการหาค่าเหมาะที่สุดก็จะเก็บค่าตอบไว้เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยจะทำการซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้รับคำตอบที่พึงพอใจ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคำตอบของการคำนวณรอบใหม่แทบจะไม่แตกต่างกันกับคำตอบที่ผ่านมา โดยพิจารณาจากความน่าจะเป็นของการยอมรับคำตอบนั้น ซึ่งขั้นตอนของเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดได้กล่าวในบทที่ 3 และแผนผัง

ขั้นตอนการประมวลผลของการผสานแนวทางการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย ดังแสดงในภาพ 4.1



ภาพ 4.1 แผนผังการจัดเรียงสายป้อนเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ขั้นตอนการประยุกต์ใช้เทคนิคการบ่อน้ำลงในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1. กำหนดรูปแบบของคำตอบที่ต้องการค้นหา การกำหนดการเปิด/ปิดสวิตช์ ตำแหน่งการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุ
2. ตัวกำเนิดสุ่ม หรือบัสเริ่มต้นของของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าไปยังคำตอบใหม่สุ่มค่าเริ่มต้นของคำตอบ x ในปริภูมิการค้นหา เป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
3. วัตถุประสงค์ในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
4. ใช้เทคนิคการบ่อน้ำลงปรับค่าอุณหภูมิ และกำหนดเวลาที่จะให้ ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งเปรียบเทียบกับกำหนดเงื่อนไขในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย และระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่เกิดการผิดพลาด
5. กำหนดตารางจัดการการบ่อน้ำลงสำหรับพารามิเตอร์อุณหภูมิ T และตั้งค่าเริ่มต้นของ T ไว้ที่ค่าสูงอย่างเพียงพอ ซึ่งเป็นการกำหนดรอบของการทดลองมากพอที่จะสามารถก้าวหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ ซึ่งการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยเทคนิคการบ่อน้ำลงนี้ได้ถูกกำหนดไว้ที่ 100 รอบ
6. คำนวณหาคำตอบใหม่ $x_p = x + \Delta x$ โดยที่ Δx เป็นการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้านำไปเปรียบเทียบกับค่าใหม่จนได้คำตอบที่ดีที่สุด
7. คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ Minimize $P = \sum_{k=1}^l I_k^2 R_k$
8. ทำการคำนวณคำตอบ หรือสถานะใหม่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้เทคนิคการบ่อน้ำลงในการตัดสินใจที่จะเปลี่ยนสถานะตามเงื่อนไข 0.95 และ 1.05 ใช้เฉพาะกับแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ $V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$
9. ขั้นตอนข้างต้นจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งระบบเข้าสู่จุดสมดุล ที่ซึ่งรู้ได้จากจำนวนครั้งของการเปลี่ยนสถานะไม่มีนัยสำคัญเพียงพอ สภาพะดังกล่าวนี้อาจเกิดขึ้นเมื่อระบบมีคำตอบหรือสถานะเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยปกติแล้ว จำนวนครั้งของการทำซ้ำจะถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า
10. ทำการปรับค่าอุณหภูมิ T ตามตารางจัดการเทคนิคการบ่อน้ำลง แล้วเริ่มทำขั้นตอนทำซ้ำทั้งหมดใหม่อีกครั้ง กระบวนการทั้งหมดสามารถยุติ ได้เมื่อค่าอุณหภูมิ T มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึงค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ค่าเท่าเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนครบจำนวนรอบ

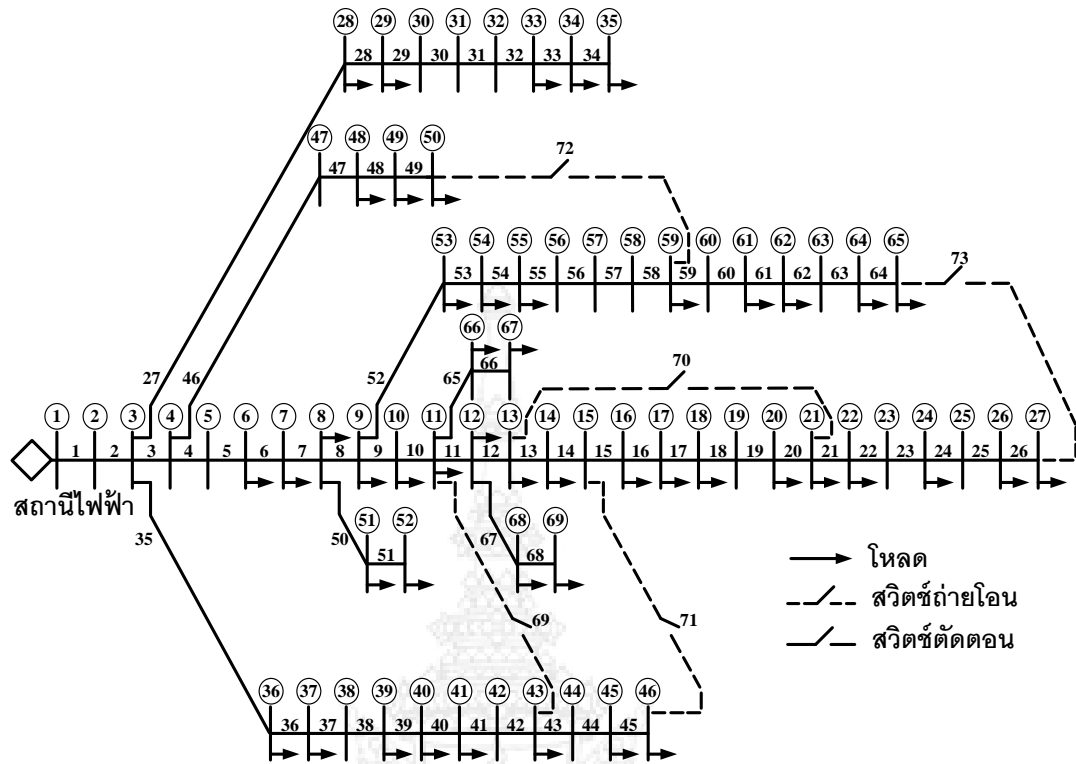
4.3 กรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาสำหรับพิจารณาความสามารถในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อน ซึ่งมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 2 เครื่อง ขนาด 200 kW ติดตั้งที่บัสที่ 50 และขนาด 400 kW ติดตั้งที่บัสที่ 61 จะประเมินจากค่ากำลังสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้า มี 4 กรณีดังนี้ แสดงดังตาราง 4.1

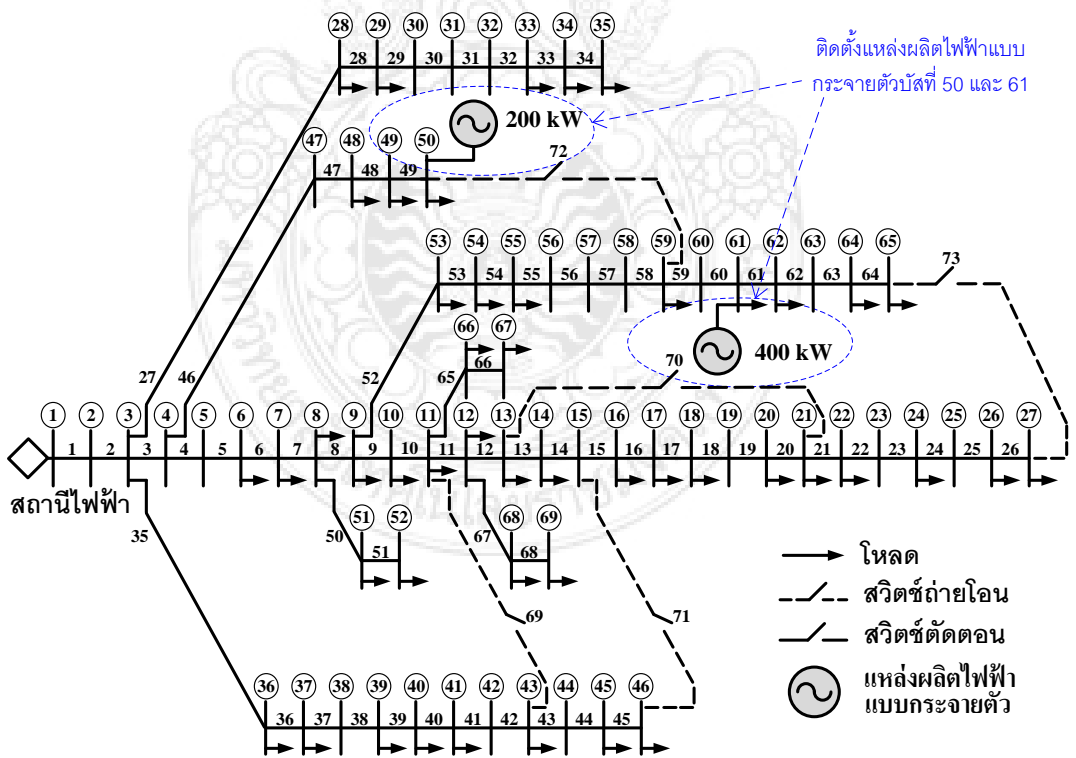
ตาราง 4.1 รายละเอียดทั้ง 4 กรณี ของกรณีศึกษาที่ 1

กรณีที่	การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	การจัดเรียงสายป้อนใหม่	หมายเลขสวิตช์ตัดตอน ที่เปลี่ยนเป็นสถานะเปิด	หมายเลขสวิตช์ถ่ายโอน ที่เปลี่ยนเป็นสถานะปิด	ภาพที่
1.1	-	-	-	-	4.2
1.2	✓	-	-	-	4.3
1.3	-	✓	14, 58, 61	71, 72, 73	4.4
1.4	✓	✓	12, 57, 61	71, 72, 73	4.5

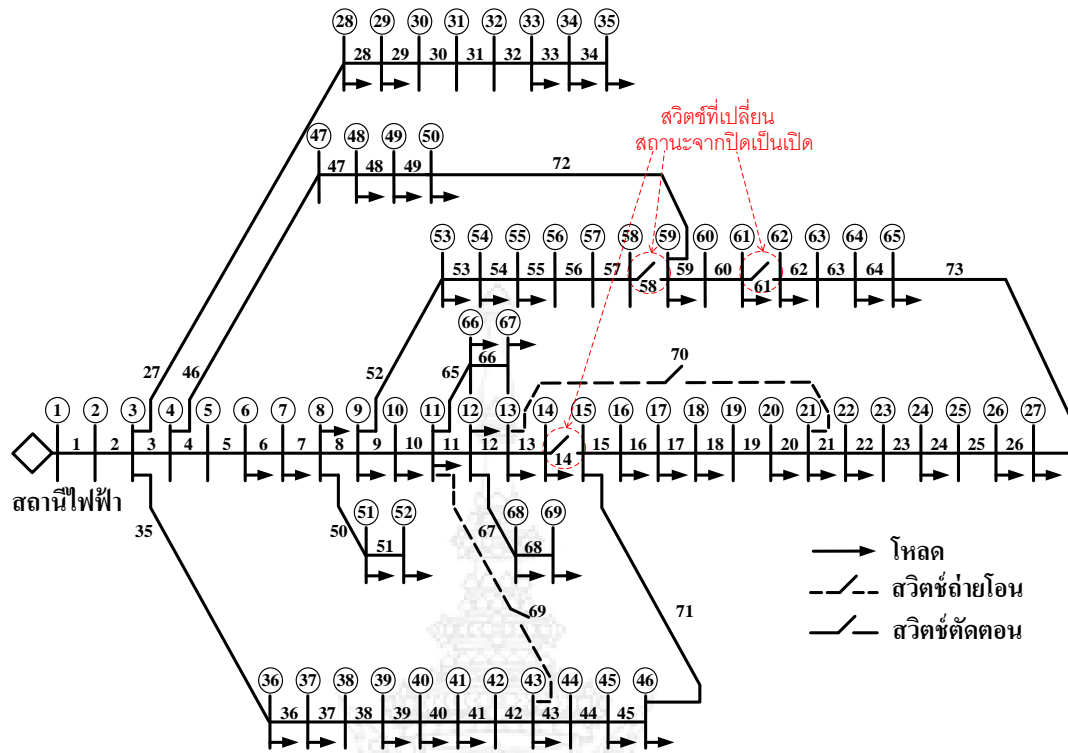
- กรณีที่ 1.1: ระบบที่ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและไม่มีการจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.2
- กรณีที่ 1.2: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้งสองเครื่องตามภาพที่ 1 แต่ไม่มีการจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.3
- กรณีที่ 1.3: ระบบที่ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว แต่มีการจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.4
- กรณีที่ 1.4: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้งสองเครื่อง และมีการจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.5



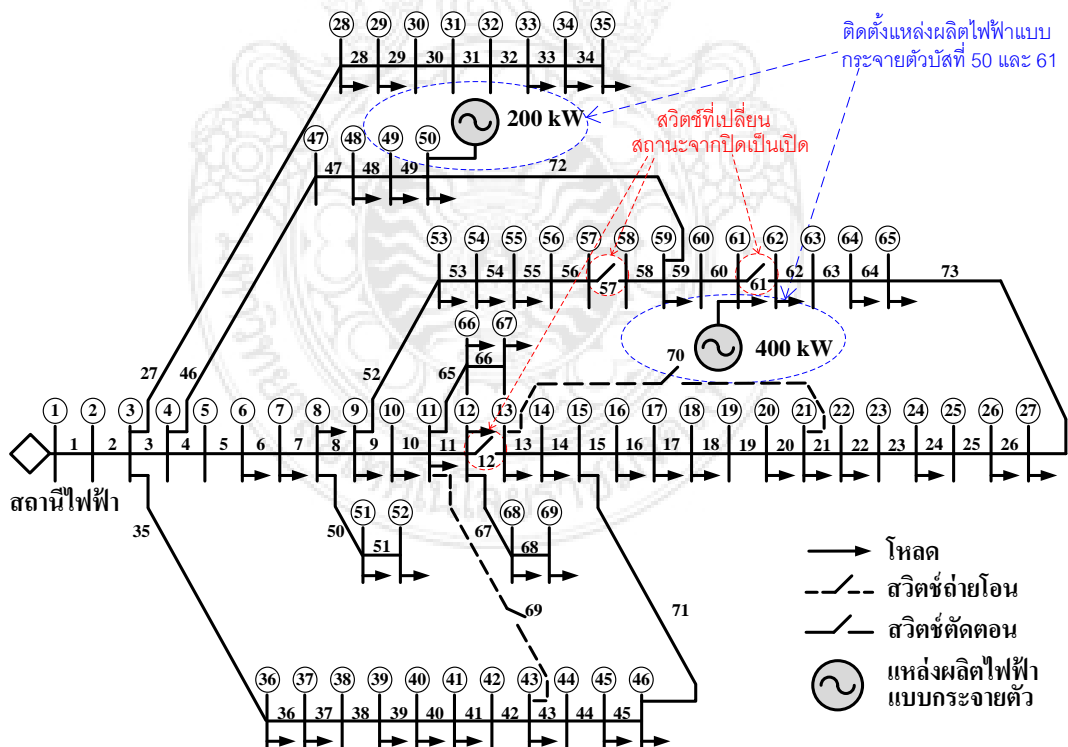
ภาพ 4.2 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 1.1



ภาพ 4.3 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 1.2



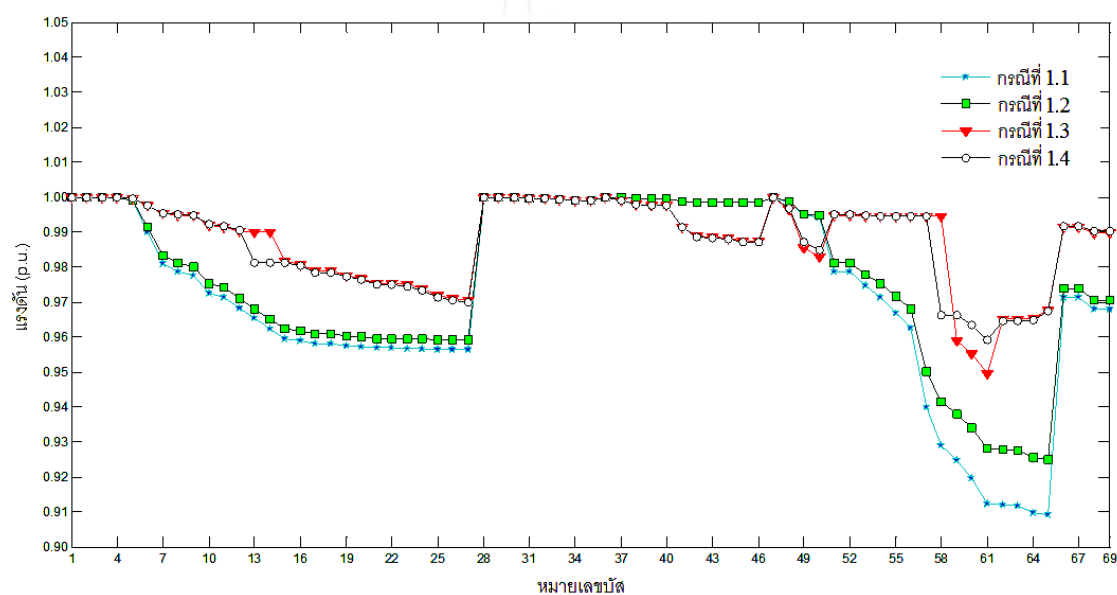
ภาพ 4.4 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 1.3



ภาพ 4.5 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 1.4

ตาราง 4.2 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษา	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ (kW)	ร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง (เทียบกับกรณีศึกษาที่ 1.1)
1.1	224.639	-
1.2	167.030	25.645
1.3	99.588	55.667
1.4	74.126	67.002



ภาพ 4.6 แรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสของทุกกรณี

จากตาราง 4.2 มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 2 เครื่อง แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นชนิดกำหนดค่าคงที่ โดยกำหนดบัสที่ติดตั้งคือ 50 และ 61 ขนาดคือ 200 kW และ 400 kW ตามลำดับ โดยกรณีศึกษา 1.2 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวถูกติดตั้งโดยไม่ได้ค้นหาตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสม สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 25.645% และยกระดับแรงดัน ตามภาพ 4.6 เมื่อมีการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษา 1.3 เทียบกับกรณีศึกษา 1.2 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อีก 30.002% สุดท้ายในกรณีศึกษา 1.4 ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้ง 2 เครื่องกับการจัดเรียงสายป้อนใหม่ สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากที่สุด ลดลงถึง 67.002%

4.4 กรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษาสำหรับพิจารณาความสามารถในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวเก็บประจุ และการจัดเรียงสายป้อน โดยมีการศึกษาเพิ่มเติม และแตกต่างจากกรณีที่ 1 คือ การค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 1 เครื่อง ขนาด 400 kW และการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ขนาด 400 kVAr จะประเมินจากค่ากำลังสูญเสียของระบบ มี 4 กรณีดังนี้ แสดงดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 รายละเอียดทั้ง 4 กรณี ของกรณีศึกษาที่ 2

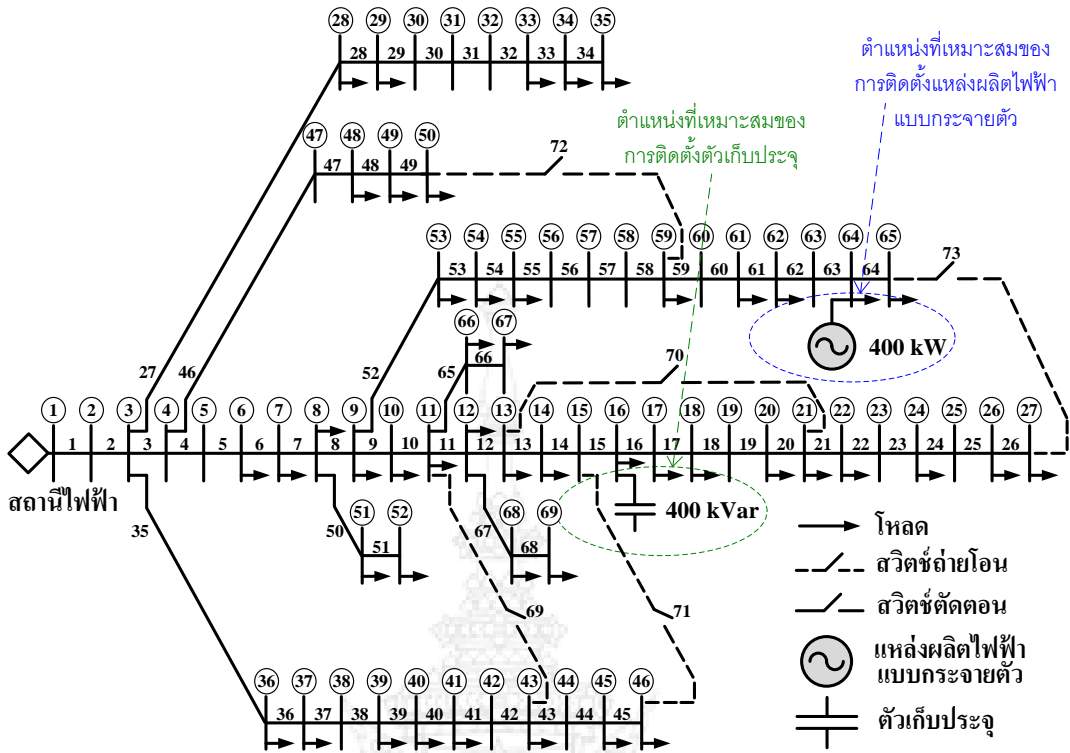
กรณีที่	การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	การจัดเรียงสายป้อนใหม่	การติดตั้งตัวเก็บประจุ	หมายเลขสวิตช์ตัดตอนที่เปลี่ยนเป็นสถานะเปิด	หมายเลขสวิตช์ถ่ายโอนที่เปลี่ยนเป็นสถานะปิด	ภาพที่
2.1	-	-	-	-	-	4.2
2.2	✓	-	✓	-	-	4.7
2.3	-	✓	✓	14, 58, 61	71, 72, 73	4.8
2.4	✓	✓	-	14, 56, 61	71, 72, 73	4.9

กรณีที่ 2.1: ระบบที่ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวเก็บประจุและไม่มี การจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.2

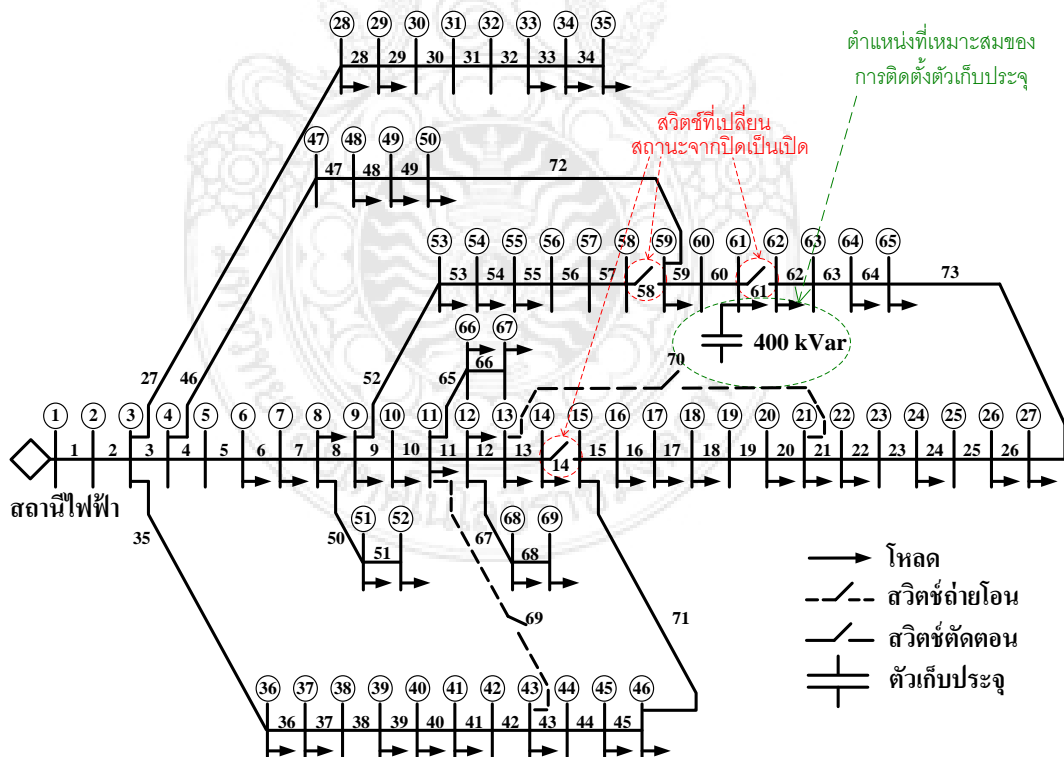
กรณีที่ 2.2: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวผสมผสานกับการติดตั้งตัวเก็บประจุ แต่ไม่มี การจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.7

กรณีที่ 2.3: ระบบที่ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมผสมผสานกับ การจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.8

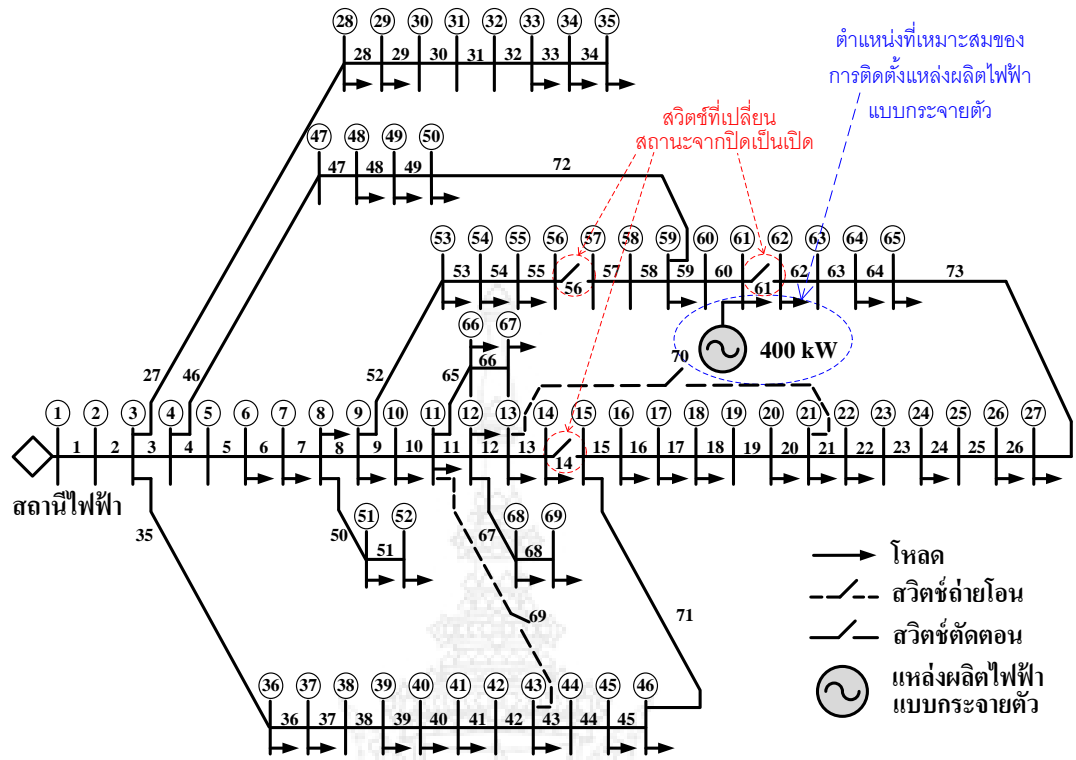
กรณีที่ 2.4: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสม ผสมผสานกับการจัดเรียงสายป้อน ตามภาพ 4.9



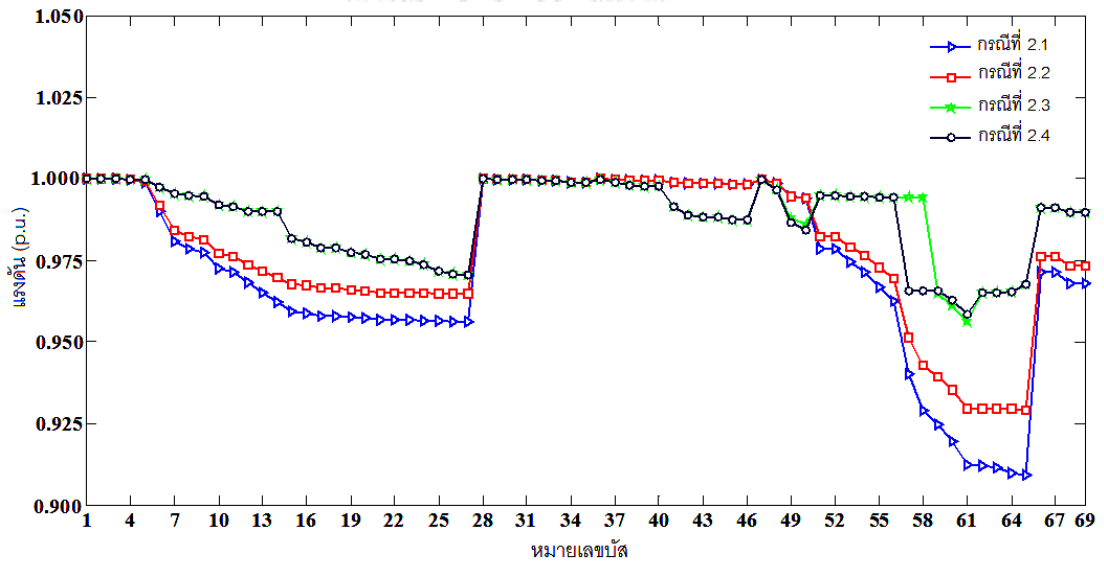
ภาพ 4.7 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 2.2



ภาพ 4.8 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 2.3



ภาพ 4.9 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส กรณีที่ 2.4



ภาพ 4.10 แรงดันไฟฟ้าแต่ละบัสของทุกกรณี

ตาราง 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาที่ 2

กรณีศึกษา	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ (kW)	ร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง (เทียบกับกรณีศึกษาที่ 2.1)
2.1	224.639	-
2.2	155.400	30.822
2.3	82.797	63.142
2.4	75.223	66.514

กรณีศึกษาที่ 2 มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 1 เครื่อง 400 kW และตัวเก็บประจุ 1 ตัว 400 kVar ทั้งคู่เป็นชนิดกำหนดค่าคงที่ ที่แตกต่างจากกรณีศึกษาที่ 1 คือ มีการค้นหาตำแหน่งที่ติดตั้งอย่างเหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และใช้ตัวเก็บประจุมาช่วยในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จากตาราง 4.4 ในกรณีศึกษาที่ 2.2 ค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งตัวเก็บประจุพร้อมกัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงมากกว่า 5.177% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1.2 ในตาราง 4.2 ที่ไม่มีการจัดเรียงสายป้อนเช่นเดียวกัน

ในกรณีศึกษาที่ 2.3 มีการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งตัวเก็บประจุ สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 32.320% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 2.2 และในกรณีศึกษาที่ 2.4 มีการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 35.692% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 2.2 เช่นเดียวกัน เมื่อดูจากภาพ 4.10 แสดงถึงความสามารถในการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการผสมผสานของแต่ละกรณีศึกษา การจัดเรียงสายป้อนร่วมกับวิธีการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอื่นในกรณีศึกษาที่ 2.3 และ 2.4 นั้นสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ดี ซึ่งการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวผสมผสานกับการจัดเรียงสายป้อนนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด นอกจากจะช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแล้ว สามารถเพิ่มขนาดแรงดันบัสที่แต่ละบัสอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

เนื่องจากปัจจุบันความต้องการใช้ปริมาณไฟฟ้าภายในประเทศเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องมีการวางแผนจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้พอเพียงเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าที่สูงขึ้น ทำได้โดยการวางแผนพัฒนามาตรฐานของระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพ และมีความเชื่อถือได้ควบคู่กันไป ซึ่งประสิทธิภาพที่ดีของระบบจำหน่ายไฟฟ้าและการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น ขึ้นอยู่กับการดำเนินงานตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนในการก่อสร้างหรือขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย มีวิธีการมากมายในการเพิ่มประสิทธิภาพ และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การจัดเรียงสายป้อนใหม่ การติดตั้งตัวเก็บประจุ และใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดมาช่วยในการคำนวณ

การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว มีผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าลดลง จะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าของเครื่องผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถแยกพิจารณาได้เป็น 2 สถานะ คือ สถานะที่กำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวน้อยกว่า หรือเท่ากับขนาดของโหลดจะช่วยให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าต่ำลง ในทางกลับกัน ถ้ากำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมากกว่าขนาดของโหลดประมาณ 2 เท่าจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ส่วนตำแหน่งที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอย่างเหมาะสม สามารถทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นมีผลมาจากขนาดของโหลดที่บัส และกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นในการประยุกต์ใช้แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า จำเป็นต้องพิจารณาทุกปัจจัยจึงจะทำให้สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การจัดเรียงสายป้อน เป็นการจัดสถานะการเปิด/ปิดของสวิตช์ตัดตอน และสวิตช์ถ่ายโอนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้อยู่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด โดยวัตถุประสงค์หลักของวิทยานิพนธ์นี้คือ

การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า การเปลี่ยนสถานะการเปิด/ปิดของสวิตช์จะทำให้เกิดโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเปลี่ยนไป โดยเริ่มต้นจากการหารูปแบบโครงสร้างการเชื่อมต่อของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นไปได้ทั้งหมด โดยที่ในแต่ละรูปแบบโครงสร้างจะต้องเป็นรูปแบบเรเดียล และไม่มีจุดโหลดที่ถูกตัดออกจากระบบ จากนั้นทำการประมวลผลการไหลของกำลังไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งการประมวลผลจะต้องตรวจสอบเงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ไหลในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะต้องไม่เกินพิกัดที่จะรับได้ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าในแต่ละรูปแบบเพื่อหาโครงสร้างการจัดเรียงสายป้อนที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าต่ำที่สุด

การติดตั้งตัวเก็บประจุ เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย สามารถทำให้กระแสในสายป้อนมีค่าน้อยลง เป็นวิธีหนึ่งซึ่งใช้ลดค่ากระแสในสายป้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการ คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าเท่ากับผลคูณของค่ายกกำลังสองของกระแสที่ไหลในสายป้อนกับความต้านทานสายป้อน เมื่อต้องการลดค่ากำลังสูญเสีย ก็ต้องทำให้กระแสในสายป้อน โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อชดเชยกำลังรีแอกทีฟที่ไหลต้องการจากระบบ กำลังรีแอกทีฟจากตัวเก็บประจุทำให้กระแสส่วนที่เป็นกระแสรีแอกทีฟซึ่งไหลต้องใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าน้อยลง เมื่อปริมาณกระแสรีแอกทีฟในสายป้อนมีค่าต่ำลง กระแสรวมที่ไหลในสายป้อนก็จะลดลง และนำไปสู่การลดค่ากำลังสูญเสียในระบบจำหน่ายประโยชน์ที่ได้จากการติดตั้งตัวเก็บประจุ คือ การควบคุมขนาดแรงดันบัส การปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบ รวมทั้งช่วยให้สายป้อนและระบบจำหน่ายสามารถรองรับ โหลดได้มากขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยเทคนิคการอบอ่อนจำลอง เพื่อแก้ปัญหาในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ข้อดีของเทคนิคการอบอ่อนจำลองคือ เนื่องจากมีรายละเอียดเนื้อหาที่แตกต่างไปจากเทคนิคการค้นหาค่าตอบอื่นๆ ที่ซึ่งมีความเป็นเอกลักษณ์ของตัวเองที่ชัดเจน ถือว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีโครงสร้างที่เข้าใจง่าย และไม่ซับซ้อนเหมาะในการประยุกต์ใช้กับแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ในขั้นตอนการวางแผนได้เป็นอย่างดี มีความแม่นยำในการค้นหาผลเฉลย รวมทั้งมีเสถียรภาพของการลู่เข้าสู่ผลเฉลย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น จึงการผสานแนวทางด้วยการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การติดตั้งตัวเก็บประจุ เข้ามาร่วมกับการจัดเรียงสายป้อนใหม่อย่างเหมาะสม

จากผลการวิจัยในกรณีศึกษาที่ 1 มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 2 เครื่อง แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นชนิดกำหนดค่าคงที่ โดยกำหนดบัลที่ติดตั้งคือ 50 และ 61 ขนาดคือ 200 kW และ 400 kW ตามลำดับ เนื่องจากตำแหน่งการติดตั้งตรงกับบัลที่ 61 ซึ่งเป็นบัลที่มีปริมาณโหลดมากที่สุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จึงทำให้ความสามารถในการจัดเรียงสายป้อนใหม่ผสมผสานกับการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ไม่มีการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ส่วนในกรณีศึกษาที่ 2 มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 1 เครื่อง 400 kW ตัวเก็บประจุ 1 ตัว 400 kVar ทั้งคู่เป็นชนิดกำหนดค่าคงที่ ที่แตกต่างจากกรณีศึกษาที่ 1 คือ มีการค้นหาตำแหน่งที่ติดตั้งอย่างเหมาะสมในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตัวเก็บประจุ ในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งตัวเก็บประจุพร้อมกัน จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงมากกว่าเล็กน้อย การเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 1 ที่มีติดตั้งแบบกำหนดตำแหน่งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและไม่มีการจัดเรียงสายป้อนเช่นเดียวกัน

เมื่อนำกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2 มาเปรียบเทียบกับกัน จะเห็นว่าการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าพร้อมการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งตัวเก็บประจุ สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากกว่า 7.475% และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าพร้อมการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากกว่า 10.847% สุดทำกรณีศึกษาที่ 1 มีการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และติดตั้งและผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวบัลที่ 50 และ 61 ไม่ได้มีการค้นหาตำแหน่งการติดตั้งอย่างเหมาะสม แต่เนื่องจากมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ถึง 2 เครื่อง และเครื่องหนึ่งถูกติดตั้งในบัลที่มีปริมาณโหลดมากที่สุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จึงทำให้มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้มากที่สุดถึง 11.335%

ผลจากกรณีศึกษาทั้งหมด ที่ผู้วิจัยได้เสนอผลงานวิจัยทั้ง 3 บทความ ได้แสดงถึงความสามารถของเทคนิคการบออ่อนจำลองในการค้นหาผลเฉลย และแสดงถึงประโยชน์ของการผสมผสานแนวทางในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย สามารถปรับปรุงสมรรถนะ และประสิทธิภาพของ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการค้นหาของปัญหาของการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตัวเก็บประจุ พร้อมกับการจัดเรียงสายป้อน ด้วยเทคนิคการออกแบบจำลอง ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการเพิ่มขึ้นตอนในการเชื่อมโยง รวมถึงขนาด และตำแหน่งการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่แตกต่างไปจากวิทยานิพนธ์นี้ จึงไม่สามารถตัดสินได้ว่า การติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ผสานกับการจัดเรียงสายป้อนใหม่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ได้ทำการผสมผสานการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การติดตั้งตัวเก็บประจุ และการจัดเรียงสายป้อนใหม่ ซึ่งสามารถพัฒนาขึ้นได้อีก ได้แก่

5.2.1 การประมวลผลทดสอบในการหาตำแหน่งพร้อมทั้งหาขนาดที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

5.2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ควรพิจารณาถึงผลกระทบจากตัวเก็บประจุที่ติดตั้งอยู่เดิมในระบบ

5.2.3 การประมวลผลทดสอบในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามากกว่า 1 ตำแหน่ง

5.2.4 เพิ่มขึ้นตอนในการเชื่อมโยง การค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และตัวเก็บประจุ พร้อมกับการจัดเรียงสายป้อนใหม่

เอกสารอ้างอิง

1. E. Baran, and F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," IEEE Trans. on Power Delivery. 4 (April 1989): 1401-1407.
2. T.P. Wagner, A.Y. Chikhani, and R. Hackam, "Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: an Application of Distribution Automation," IEEE Trans. Power Delivery. 6 (October 1991): 1922-1933.
3. T. Taylor, and D. Lub Keman, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration," IEEE Trans. on Power Delivery. 5 (January 1990): 239-246.
4. Young-Jae. Jeon and Jae-chul. Kim, "Network Reconfiguration in Radial Distribution System Using Simulated Annealing and Tabu Search," Proceeding of Power Engineering Society Winter Meeting Conference. (2000): 2329-2333.
5. K. Nara, et al. "Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators," Proceeding of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. (2001): 918-923.
6. D. Gautam, and N. Mithulananthan, "Optimal DG Placement in Deregulated Electricity Market," Electrical Power System Search. 77 (2007): 1627-1636.
7. J. S. Savier, and D. Das, "Impact of Network Reconfiguration on Loss Allocation of Radial Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Delivery. 2 (October 2007): 2473-2480.
8. Chung-Fu Chang, "Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm," IEEE Trans. on Power Systems. 23 (November 2008): 1747-1755.
9. M.A. Kashem, V. Ganapathy, and G.B. Jasmon, "Network Reconfiguration for Enhancement of Voltage Stability in Distribution Networks," IEE Proc-Gener. Transm. Distrib. 147 (May 2000): 171-175.

10. C. T. Su, and C. S. Lee, "Network Reconfiguration of Distribution Systems Using Improved Mixed-Integer Hybrid Differential Evolution," IEEE Trans. Power Delivery. 18 (July 2003): 1022-1027.
11. A. A. Hossam-Eldin, A. R. Abdelaziz, and A.-E.I. Abu Fard, "A Simulated Annealing Based Automation of Distribution Systems," IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC), (31st Aug - 3rd Sept 2010): pp. 1 – 5.
12. P. K., Subburaj, et al. "Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction Using Genetic Algorithm," Journal of Electrical Systems. 2 (December 2006): 198-207
13. A. Srikaew, "Computational Intelligence," Institute of Engineering Suranaree University of Technology, (2009).
14. G. Peponis, and M. Papadopoulos, "Reconfiguration of Radial Distribution Networks: Application of Heuristic Methods on Large-Scale Networks," IEE Proc.-Trans. Distrib. 142 (November 1995): 631-638.
15. Kundur, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1993.
16. S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," Science. (13 May 1983): Vol. 220 no. 4598 pp. 671-680.
17. R. A. Rutenbar, "Simulated annealing algorithms: an overview," IEEE Circuits and Device Magazine. (Jan 1989): Vol. 5, pp. 19 – 26.
18. B. Hajek, "A tutorial survey of theory and applications of simulated annealing," In Proceedings of 24th IEEE Conference on Decision and control (1985): Vol. 2 pages 755 – 760.
19. M. Fredric, Ham and Ivica Kostanic, "Principle of Neurocomputing for Science & Engineering," McGraw-Hill, (2001): chapter 5, pages 209-215.
20. N. Rugthaicharoencheep, and S. Sirisumrannukul, "Optimal Feeder Reconfiguration with Distributed Generators in Distribution System by Fuzzy Multiobjective and Tabu Search," Proceeding of Sustainable Power Generation and Supply. China (2009).

ภาคผนวก ก

ข้อมูลโหลดและสายป้อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส



ตาราง ก-1 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

หมายเลข บัส	กำลังไฟฟ้าจริง (kW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ (kVAr)	หมายเลข บัส	กำลังไฟฟ้าจริง (kW)	กำลังไฟฟ้า รีแอกทีฟ (kVAr)
6	2.60	2.20	37	26.00	18.55
7	40.40	30.00	39	24.00	17.00
8	75.00	54.00	40	24.00	17.00
9	30.00	22.00	41	1.20	1.00
10	28.00	19.00	43	6.00	4.30
11	145.00	104.00	45	39.22	26.30
12	145.00	104.00	46	39.22	26.30
13	8.00	5.00	48	79.00	56.40
14	8.00	5.50	49	384.70	274.50
16	45.50	30.00	50	384.70	274.50
17	60.00	35.00	51	40.50	28.30
18	60.00	35.00	52	3.60	2.70
20	1.00	0.60	53	4.35	3.50
21	114.00	81.00	54	26.40	19.00
22	5.00	3.50	55	24.00	17.20
24	28.00	20.00	59	100.00	72.00
26	14.00	10.00	61	1,244.00	888.00
27	14.00	10.00	62	32.00	23.00
28	26.00	18.60	64	227.00	162.00
29	26.00	18.60	65	59.00	42.00
33	14.00	10.00	66	18.00	13.00
34	19.50	14.00	67	18.00	13.00
35	6.00	4.00	68	28.00	20.00
36	26.00	18.55	69	28.00	20.00

ตาราง ก-2 ข้อมูลสายป้อนของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

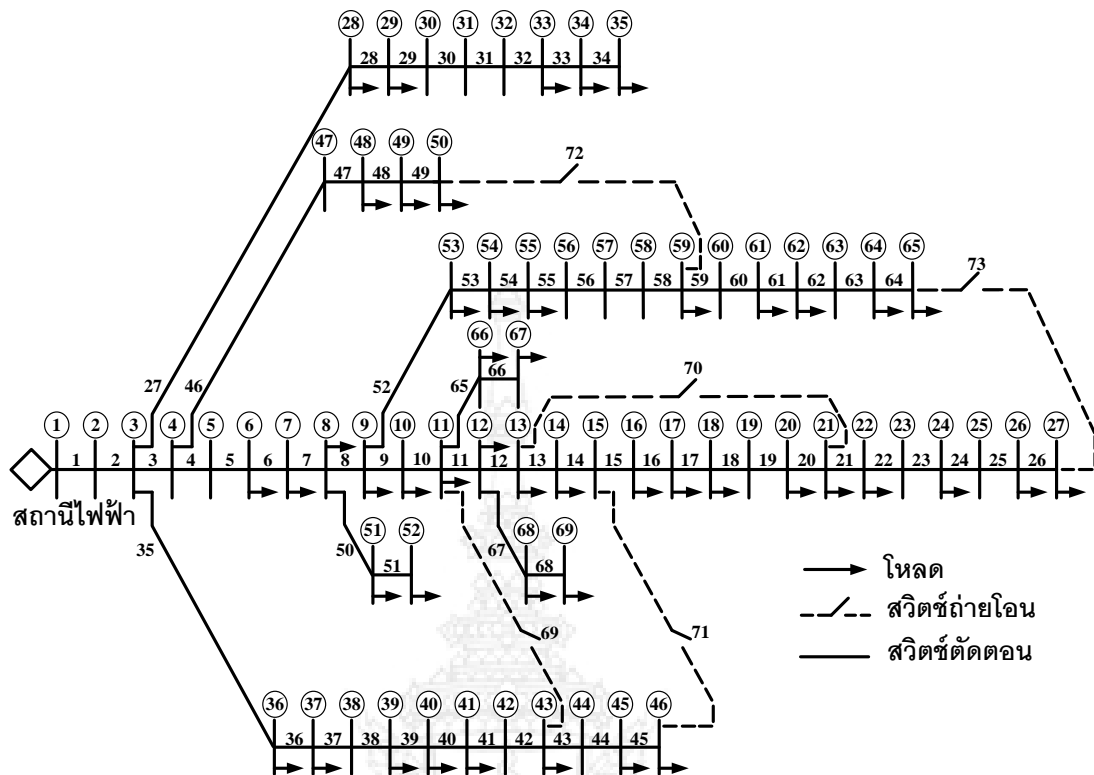
หมายเลข สาขา	บัสส่ง	บัสรับ	R (Ω)	X (Ω)	หมายเลข สาขา	บัสส่ง	บัสรับ	R (Ω)	X (Ω)
1	1	2	0.0005	0.0012	26	26	27	0.1732	0.0572
2	2	3	0.0005	0.0012	27	3	28	0.0044	0.0108
3	3	4	0.0015	0.0036	28	28	29	0.0640	0.1565
4	4	5	0.0251	0.0294	29	29	30	0.3978	0.1315
5	5	6	0.3660	0.1864	30	30	31	0.0702	0.0232
6	6	7	0.3811	0.1941	31	31	32	0.3510	0.1160
7	7	8	0.0922	0.0470	32	32	33	0.8390	0.2816
8	8	9	0.0493	0.0251	33	33	34	1.7080	0.5646
9	9	10	0.8190	0.2707	34	34	35	1.4740	0.4873
10	10	11	0.1872	0.0619	35	3	36	0.0044	0.0108
11	11	12	0.7114	0.2351	36	36	37	0.0640	0.1565
12	12	13	1.0300	0.3400	37	37	38	0.1053	0.1230
13	13	14	1.0440	0.3450	38	38	39	0.0304	0.0355
14	14	15	1.0580	0.3496	39	39	40	0.0018	0.0021
15	15	16	0.1966	0.0650	40	40	41	0.7283	0.8509
16	16	17	0.3744	0.1238	41	41	42	0.3100	0.3623
17	17	18	0.0047	0.0016	42	42	43	0.0410	0.0478
18	18	19	0.3276	0.1083	43	43	44	0.0092	0.0116
19	19	20	0.2106	0.0690	44	44	45	0.1089	0.1373
20	20	21	0.3416	0.1129	45	45	46	0.0009	0.0012
21	21	22	0.0140	0.0046	46	4	47	0.0034	0.0084
22	22	23	0.1591	0.0526	47	47	48	0.0851	0.2083
23	23	24	0.3463	0.1145	48	48	49	0.2898	0.7091
24	24	25	0.7488	0.2475	49	49	50	0.0822	0.2011
25	25	26	0.3089	0.1021	50	8	51	0.0928	0.0473

ตาราง ก-2 (ต่อ)

หมายเลข สาขา	บัสส่ง	บัสรับ	R (Ω)	X (Ω)	หมายเลข สาขา	บัสส่ง	บัสรับ	R (Ω)	X (Ω)
51	51	52	0.3319	0.1114	63	63	64	0.7105	0.3619
52	9	53	0.1740	0.0886	64	64	65	1.0410	0.5302
53	53	54	0.2030	0.1034	65	11	66	0.2012	0.0611
54	54	55	0.2842	0.1447	66	66	67	0.0047	0.0014
55	55	56	0.2813	0.1433	67	12	68	0.7394	0.2444
56	56	57	1.5900	0.5337	68	68	69	0.0047	0.0016
57	57	58	0.7837	0.2630	Tie-line				
58	58	59	0.3042	0.1006	69	11	43	0.5000	0.5000
59	59	60	0.3861	0.1172	70	13	21	0.5000	0.5000
60	60	61	0.5075	0.2585	71	15	46	1.0000	0.5000
61	61	62	0.0974	0.0496	72	50	59	2.0000	1.0000
62	62	63	0.1450	0.0738	73	27	65	1.0000	0.5000

พิกัดการรองรับกระแสไฟฟ้าในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส มีดังนี้

1. สายป้อน หมายเลขสาขาที่ 1- 9 มีพิกัดการรองรับกระแสไฟฟ้าได้ 400 A
2. สายป้อน หมายเลขสาขาที่ 46-49 และ 52-64 มีพิกัดการรองรับกระแสไฟฟ้าได้ 300 A
3. สายป้อน หมายเลขที่เหลือทั้งหมด มีพิกัดการรองรับกระแสไฟฟ้าได้ 200 A



ภาพ ก-1 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1. ไพรัตน์ กীরถาวร, ทง ลานธารทอง, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ สุวิทย์ อัจริยะเมต. “กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการจัดเรียงสายป้อนที่เหมาะสม” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6 (EENET2014): 149-152.*
2. ไพรัตน์ กীরถาวร, พูนศรี วรรณการ, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ สุวิทย์ อัจริยะเมต. “การผานแนวทางการลดกำลังสูญเสียด้วยการจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตัวเก็บประจุ” *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON37): 213-216.*
3. P. Kritavorn, T. Lantharthong, and N. Rugthaicharoencheep, “The Combined Loss Reduction Approach to Apply in Distribution System with Distribution Generation,” *IEEE Region 10 Conference TENCON 2014 (Oct 2014): pp.1-5.*



ภาคผนวก ค

เนื้อหาบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการจัดเรียงสายป้อนที่เหมาะสม

Active Power Losses in Distribution System with Distributed Generators and Feeder Reconfiguration

ไพรัตน์ กวีธาว ' หง ลานธารทอง ' นัฐโชติ ธิกไทยเจริญชีพ ' และ สุวิทย์ อัจฉริยะเมตต์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาธิปไตยสาย 1 แขวงวงษ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์: 02-9132424 ต่อ 150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

ฝ่ายวิศวกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

35 หมู่ 3 เทคโนโลยีธานี ถนนเลียบคลองห้า ตำบลคลองห้า อำเภอลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120, E-mail: suwit@tistr.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสม ที่มีต่อค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยพิจารณาจากผลลัพธ์ของการจำลองในกรณีศึกษาต่างๆของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ซึ่งประยุกต์ใช้วิธีการอบอ่อนจำลองเพื่อหาผลเฉลยเหมาะที่สุดของการจัดเรียงสายป้อน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการจัดเรียงสายป้อนที่เหมาะสม สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและเพิ่มขนาดแรงดันบัส อีกทั้งเมื่อใช้แนวทางทั้งสองร่วมกัน ก็ยังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากขึ้น

คำสำคัญ: การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย, การจัดเรียงสายป้อน, แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

Abstract

This paper presents the impacts of distributed generators (DG) and optimal feeder reconfiguration on the value of active power losses in distribution systems. The impacts from these two approaches are evaluated from the simulation results of case study in 69-bus radial distribution system which the simulated annealing is applied to find the optimal solution of feeder reconfiguration. It can be seen that DG and optimal feeder reconfiguration not only help reduce active power losses in distribution systems but also increase the magnitude of bus voltages. Moreover, test results also show that losses are more decreased when DG and feeder reconfiguration are both simultaneously applied.

Keywords: Power Loss Reduction, Feeder Reconfiguration, Distributed Generation

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) ประกอบด้วยบัส (Buses) และจุดโหลด (Load Points) จำนวนมาก โดยปัญหาที่ต้องคำนึงถึงในสภาวะการทำงานปกติของระบบจำหน่าย ได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss) และแรงดันตก (Voltage Drop) ณ จุดโหลด ทั้งนี้แนวทางแก้ไขปัญหามีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generators: DG) หรือการจัดเรียงสายป้อน (Feeder Reconfiguration) และวิธีการอื่นๆ

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ผลิตกำลังไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ (เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม หรือพลังงานชีวมวล) แล้วต่อขนานเข้ากับระบบจำหน่าย แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงโหลดสูงสุด ทำให้โรงไฟฟ้าผลิตกำลังไฟฟ้าลดลง อีกทั้งยังช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย รวมทั้งทำให้ระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพและความมั่นคงเพิ่มขึ้น[1][2]

การจัดเรียงสายป้อนใช้การกำหนดสถานะเปิด/ปิดของสวิตช์สองชนิด คือ สวิตช์จ่ายโตน (มีสถานะอยู่ในตำแหน่งปกติปิด) และสวิตช์ตัดตอน (มีสถานะอยู่ในตำแหน่งปกติเปิด) เพื่อให้เส้นทางการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงจากเดิม ซึ่งสามารถช่วยลดเวลาหยุดดำเนินการ ลดความเสียหายจากภาวะโหลดเกิน และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย[3][4]

บทความนี้นำเสนอความสามารถในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการจัดเรียงสายป้อน โดยพิจารณาจากกรณีศึกษาต่างๆของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบขนาด 69 บัส ซึ่งใช้วิธีการอบอ่อนจำลองสำหรับหาผลเฉลยเหมาะที่สุดของการจัดเรียงสายป้อน

26-28 มีนาคม 2557 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

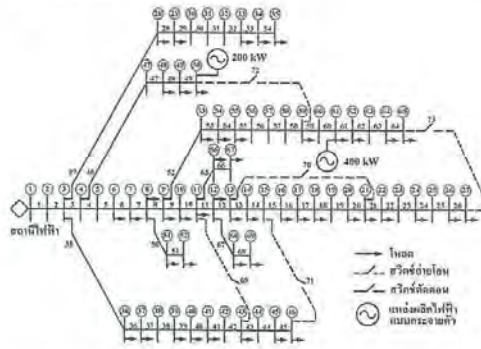
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

2. กรณีศึกษา

แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสที่ใช้ในบทความนี้ ได้แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย สวิตช์ตัดคอนจำนวน 68 ตัว (สวิตช์หมายเลข 1 ถึงหมายเลข 68) สวิตช์ถ่ายโอนจำนวน 5 ตัว (สวิตช์หมายเลข 69 ถึงหมายเลข 73) แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 2 เครื่อง (ขนาด 200 kW ติดตั้งที่บัสหมายเลข 50 และขนาด 400 kW ติดตั้งที่บัสหมายเลข 61) โหลดรวมทั้งเป็นกำลังไฟฟ้าจริง (Active Load) มีค่า 3,801.89 kW และ โหลดรวมทั้งเป็นกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Load) มีค่า 2,694.10 kVAr รายละเอียดของโหลดที่มีค่าต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1[5][6]



รูปที่ 1 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสที่ใช้ในกรณีศึกษา

ตารางที่ 1 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส[6][7]

หมายเลข บัส	กำลังไฟฟ้าจริง (kW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVAr)	หมายเลข บัส	กำลังไฟฟ้าจริง (kW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVAr)
6	2.60	2.20	37	26.00	18.55
7	40.40	30.00	39	24.00	17.00
8	75.00	54.00	40	24.00	17.00
9	30.00	22.00	41	1.20	1.00
10	28.00	19.00	43	6.00	4.30
11	145.00	104.00	45	39.22	26.30
12	145.00	104.00	46	39.22	26.30
15	8.00	5.00	48	79.00	56.40
14	8.00	5.50	49	384.70	274.50
16	45.50	30.00	50	384.70	274.50
17	60.00	35.00	51	40.50	28.30
18	60.00	35.00	52	3.60	2.70
20	1.00	0.60	53	4.35	3.50
21	114.00	81.00	54	26.40	19.00
22	5.00	3.50	55	24.00	17.20
24	28.00	20.00	59	100.00	72.00
26	14.00	10.00	61	1,744.00	888.00
27	14.00	10.00	62	32.00	23.00
28	26.00	18.60	64	227.00	162.00
29	26.00	18.60	65	59.00	42.00
33	14.00	10.00	66	18.00	13.00
34	19.50	14.00	67	18.00	13.00
35	6.00	4.00	68	28.00	20.00
36	26.00	18.55	69	28.00	20.00

กรณีศึกษาสำหรับพิจารณาความสามารถในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อน จะประเมินจากค่ากำลังสูญเสียของระบบในแต่ละกรณีต่อไปนี้

- กรณีที่ 1: ระบบที่ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและปราศจากการจัดเรียงสายป้อน
- กรณีที่ 2: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้งสองเครื่องตามรูปที่ 1 แต่ไม่มีการจัดเรียงสายป้อน
- กรณีที่ 3: ระบบที่ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว แต่ถูกจัดเรียงสายป้อน
- กรณีที่ 4: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้งสองเครื่องตามรูปที่ 1 และมีการจัดเรียงสายป้อน

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ (P_k) จะคำนวณจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละเฟสของสาขา (Branch) จากสมการที่ (1)

$$P_k = [I_k]^T [R_k] [I_k] \tag{1}$$

เมื่อ $[I_k]$ คือ เมทริกซ์ของกระแสไฟฟ้าในระบบสามเฟสในสาขา k

$[R_k]$ คือ เมทริกซ์ของความต้านทานระบบสามเฟสในสาขา k

โดย $[I_k]$ และ $[R_k]$ มีรายละเอียดตามสมการที่ (2)-(3)

$$[I_k] = \begin{bmatrix} I_k^a \\ I_k^b \\ I_k^c \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$[R_k] = \begin{bmatrix} r_k^{aa} & r_k^{ab} & r_k^{ac} \\ r_k^{ba} & r_k^{bb} & r_k^{bc} \\ r_k^{ca} & r_k^{cb} & r_k^{cc} \end{bmatrix} \tag{3}$$

เมื่อ $[I_k^p]$ คือ กระแสไฟฟ้าในเฟส p ของสาขา k

$r_k^{aa}, r_k^{bb}, r_k^{cc}$ คือ ความต้านทานตัวเอง (Self Resistance) ของตัวนำในเฟส a, b และ c ของสาขา k

$r_k^{ab}, r_k^{ac}, r_k^{ba}, r_k^{bc}, r_k^{ca}, r_k^{cb}$ คือ ความต้านทานร่วม (Mutual Resistance) ระหว่างเฟสของสาขา k

การหาสถานะเปิด/ปิดของสวิตช์ตัดคอนและสวิตช์ถ่ายโอนสำหรับการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษาที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 4 เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Problem) ซึ่งบทความนี้ใช้วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) ในการหาผลเฉลย

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

การรอบอ้อนจำลองเป็นเทคนิคการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่นำการเขียนตัวและการเพิ่มความร้อนของโลหะ จึงทำให้เกิดการคดคลักในทางกายภาพ มาอ้างอิงเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีทางคณิตศาสตร์ ทั้งนี้ วิธีการรอบอ้อนจำลอง จะหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง ถ้าค่าที่ค้นหาค่าที่เข้าใกล้กับค่าที่ล่องการ ขั้นตอนวิธีของการรอบอ้อนก็จะเก็บผลเฉลยไว้เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยจะทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้รับผลเฉลยที่พึงพอใจ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผลเฉลยของการคำนวณรอบใหม่แทบจะไม่แตกต่างกับผลเฉลยที่ค่ามาแล้ว โดยพิจารณาจากความน่าจะเป็นของการยอมรับผลเฉลยนั้น[S][9]

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) ของการจัดเรียงสายป้อนในบทความนี้ คือ การทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด ส่วนเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ประกอบด้วย

- สมการสำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow) ในระบบสามเฟส
- ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่มีทุกบัสต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด

$$V_i^{p,\min} \leq V_i^p \leq V_i^{p,\max} \quad (4)$$

- ทิศักของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายป้อนต้องไม่เกินความสามารถในการนำกระแสของสาย

$$|I_k^p| \leq I_k^{p,\max} \quad k \in \{1, 2, 3, \dots, l\} \quad (5)$$

- รูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าต้องเป็นเรติคูล
- ทุกจุดโหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้าต้องไม่เกิดไฟฟ้าดับ

$V_i^{p,\min}$ คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงในเฟส a, b และ c (สำหรับบทความนี้กำหนด $V_i^{p,\min} = 0.95$ p.u. และ $V_i^{p,\max} = 1.05$ p.u.)

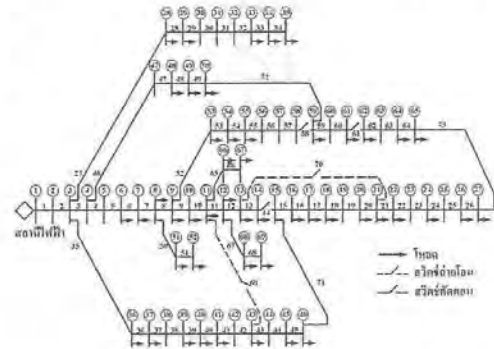
$I_k^{p,\max}$ คือ ระดับกระแสไฟฟ้าสูงสุดในเฟส a, b และ c ของสาขา k

3. ผลการจำลอง

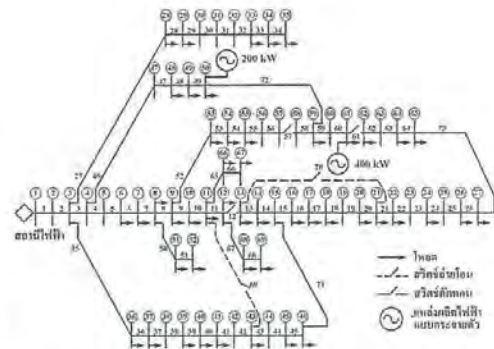
สำหรับการจัดเรียงสายป้อนในกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 วิธีการรอบอ้อนจำลองได้ให้ผลเฉลยซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับทั้งหมดที่กำหนด โดยระบุสถานะการเปิด/ปิดของสวิตช์ตัดคอนและสวิตช์จ่ายโอน ตามรายละเอียดในตารางที่ 2 ซึ่งทำให้โครงสร้างของระบบจำหน่าย 69 บัสเปลี่ยนไปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 และรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ตำแหน่งสวิตช์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

กรณีศึกษา	หมายเลขสวิตช์ตัดคอนที่เปลี่ยนเป็นสถานะเปิด	หมายเลขสวิตช์จ่ายโอนที่เปลี่ยนเป็นสถานะปิด
3	14, 58, 61	71, 72, 73
4	12, 57, 61	71, 72, 73



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบหลังจากการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของระบบหลังจากการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษาที่ 4

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของแต่ละกรณีศึกษาซึ่งคำนวณจากการไหลของกำลังไฟฟ้า ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาทั้งหมด

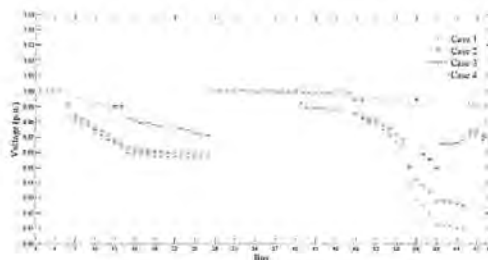
กรณีศึกษา	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ (kW)	ร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง (เทียบกับกรณีศึกษาที่ 1)
1	224.639	-
2	167.930	25.645
3	999.588	55.667
4	074.126	67.002

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 6

Proceedings of the 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2014 (EENET 2014)

ผลการจำลองในกรณีที่ 2 กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3 เป็นหลักฐานที่แสดงถึงความสามารถในการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อน และนอกจากจะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียแล้ว ขนาดแรงดันบัลต์ที่แต่ละบัลต์ของทุกกรณีศึกษาซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4 ยังแสดงให้เห็นว่า แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อน ยังสามารถช่วยยกระดับขนาดแรงดันบัลต์ให้มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัลต์ของทุกกรณีศึกษา

เนื่องจากกรณีศึกษาที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในบทความนี้ ได้กำหนดทั้งขนาดและตำแหน่งติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวไว้แล้ว จึงไม่อาจเปรียบเทียบได้ว่า วิธีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวหรือวิธีการจัดเรียงสายป้อน วิธีใดมีความสามารถที่ดีกว่าในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองในกรณีที่ 4 ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากขึ้น

4. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการใช้แนวทางการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อน เพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยจำลองกรณีศึกษาค่าต่างๆ กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัต์ ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อนนั้น นอกจากจะช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียแล้ว ยังช่วยยกระดับของขนาดแรงดันบัลต์ให้มีค่าสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อใช้แนวทางทั้งสองร่วมกัน ก็สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chiradeja and R. Ramakumar, "An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, no.4, December 2004.
- [2] N. Rugthaicharoencheep, T. Lantharhong and S. Atchariyamet, "Optimal Operation for Active Management of Distribution System with Distributed Generation," *Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2011, pp. 715–719.
- [3] M. E. Baran and F. F. Wit, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, no.2, pp.1401-1407, April 1989.
- [4] C. T. Su and C. S. Lee, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 1022-1027, July 2003.
- [5] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, "Feeder reconfiguration for loss reduction in three phase distribution system under unbalanced loading conditions," *IEEE Universities Power Engineering Conference*, pp. 1–6, 31st Aug–3rd Sept 2010.
- [6] J. S. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no.4, pp. 2473-2480, Oct. 2007.
- [7] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul "Optimal feeder reconfiguration with distributed generators in distribution system by fuzzy multiobjective and Tabu search" *Sustainable Power Generation and Supply*, Page(s): 1 – 7, April 2009
- [8] V. Parada, J. A. Ferland and M.Arias, "Optimization of Electrical Distribution Feeders Using Simulated Annealing," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1135-1141, July 2004.
- [9] A. A. Hossam-Eldin, A. R.Abdelaziz and A.-E.I.Abu Fard, "A Simulated Annealing-Based Automation of Distribution Systems," *IEEE Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1 – 5, 31st Aug – 3rd Sept 2010.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 7 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

การผสานแนวทางการลดกำลังสูญเสียด้วยการจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
ที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตัวเก็บประจุ
The Combined Loss Reduction by Feeder Reconfiguration in Distribution System with
Distribution Generation and Capacitor Placements

ไพรัตน์ ภริณาวร* หุนทรี วรรณการ* นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ* และสุวิทย์ อัจฉริยะเมต*

*สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร e-mail: nattachote.r.@rmutp.ac.th
*ฝ่ายวิศวกรรม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย e-mail: suwit@istr.or.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายเบรตเต็ลด้วยการจัดเรียงสายป้อนหรือทั้งหาค่าแห่งการติดตั้งที่เหมาะสมของทั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตัวเก็บประจุ เพื่อลดค่าความสูญเสีย อีกทั้งแสดงให้เห็นถึงการใช้กรรมวิธีการอบอุ่นจำลองเพื่อค้นหาลำดับการจัดเรียงสายป้อนที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ผลจากการจำลองระบบจำหน่าย 69 บัสเบรตเต็ล ด้วยการจัดเรียงสายป้อนร่วมกับการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตัวเก็บประจุ แสดงให้เห็นรูปแบบการเปิด/ปิดที่เหมาะสม ซึ่งสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมถึงช่วยในการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: การจัดเรียงสายป้อน แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การติดตั้งตัวเก็บประจุ การอบอุ่นจำลอง

Abstract

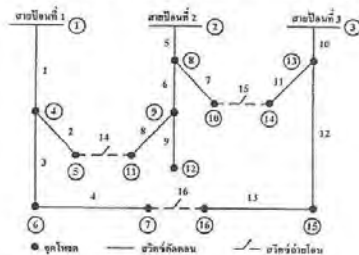
This paper presents the combined technique to enhance the efficiency of distribution systems in term of loss reduction by using optimal feeder reconfiguration including the installation of distributed generators (DG) and capacitors. The optimization problem is formulated and solved by simulated annealing method to simultaneously identify the proper on/off patterns of the switches and the optimal location for DG and capacitor placement. The impacts of the proposed technique are evaluated from the simulation results of case study in 69-bus radial distribution system. The results show that the optimal on/off patterns of the switches combined with DG and capacitor placement can help reduce losses and also increase the magnitude of bus voltages.

Keywords: Feeder reconfiguration, distributed generation, capacitor placement, simulated annealing

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าประกอบด้วยบัสและจุดโหลด จำนวนมาก โดยปัญหาที่ต้องคำนึงถึงในสภาวะการทำงานปกติของระบบจำหน่าย ได้แก่ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และแรงดันตก ณ จุดโหลด ทั้งนี้ แนวทางแก้ไขปัญหาลักษณะนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การจัดเรียงสายป้อน (Feeder Reconfiguration) การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution Generation: DG) และ การติดตั้งตัวเก็บประจุ (Capacitor placement) [1]

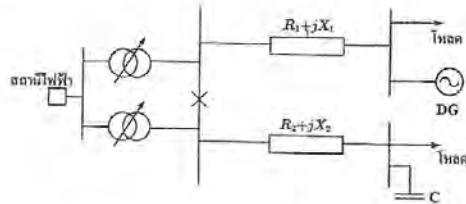
การจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายเป็นสิ่งสำคัญต่อการปฏิบัติการจำหน่ายไฟฟ้าเพราะช่วยให้การจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดความต่อเนื่องมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ การจัดเรียงสายป้อนทำได้โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายป้อนโดยการเปลี่ยนสถานะการเปิด/ปิดของสวิตช์ตัดคั่น (Sectionalizing Switches) และสวิตช์ถ่ายโอน (Ties Switches) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติสวิตช์ตัดคั่นจะอยู่ในสภาวะปิด และสวิตช์ถ่ายโอนจะอยู่ในสภาวะเปิด ดังแสดงในรูปที่ 1 [2]



รูปที่ 1 สวิตช์ตัดคั่นและสวิตช์ถ่ายโอนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation : DG) คือ การผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิต ตั้งแต่หน่วยกิโลวัตต์ถึงเมกะวัตต์ โดยผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังลม พลังแสงอาทิตย์ พลังน้ำขนาดเล็ก พลังคลื่นทะเล พลังความร้อนใต้พิภพ และก๊าซชีวภาพ ประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2 ได้แก่ การช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย การปรับปรุงคุณภาพ

แรงดันไฟฟ้า การเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า การป้องกันปัญหาไฟดับและช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงโหลดสูงสุด การช่วยลดต้นทุนในการผลิตและสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ รวมถึงการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบส่งกำลังไฟฟ้า [3-4]



รูปที่ 2 การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

การติดตั้งตัวเก็บประจุ (Capacitors) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพค่าแรงดันไฟฟ้า โดยการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ซึ่งช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้ แต่ต้องพิจารณาขนาดและตำแหน่งของการติดตั้งให้เหมาะสม

บทความนี้นำเสนอความสามารถในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการผสมผสานการจัดการเชิงสายป้อน ร่วมกับการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการติดตั้งตัวเก็บประจุ โดยประมวลผลกับแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบขนาด 69 บัส และใช้วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing: SA) สำหรับหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของการจัดเรียงสายป้อน

2. เทคนิคการอบอ่อนจำลอง

เทคนิคการอบอ่อน เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งเลียนแบบการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะแล้วปล่อยให้เย็นลงเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่มีพลังงานภายในน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้โลหะมีคุณสมบัติที่แข็งแรงและทนทาน เทคนิคการอบอ่อนจำลองสามารถแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น และทำให้ได้รับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง เทคนิคการอบอ่อนจำลองมีรูปแบบกระบวนการคำนวณแบบวนซ้ำจนกระทั่งได้ผลเฉลยที่น่าพอใจ รูปแบบการค้นหาค่าเฉลยเป็นแบบเคี้ยว โดยเก็บคำตอบที่น่าพึงพอใจที่สุดไว้เพื่อเปรียบเทียบผล และค้นหาผลเฉลยใหม่ที่น่าพึงพอใจกว่าเดิมจากผลเฉลยใกล้เคียง ถ้าไม่มีผลเฉลยใกล้เคียงที่พึงพอใจกว่า ก็จะคำนวณความน่าจะเป็นของการยอมรับผลเฉลยนั้น [5] การประยุกต์ใช้การอบอ่อนจำลองในการจัดเรียงสายป้อนนั้น ทำได้โดยกำหนดสถานะของสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุด

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ (P) คำนวณจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละสายป้อนของสาขา (Branch) จากสมการที่ (1)

$$P = \sum_{k=1}^n I_k^2 R_k \tag{1}$$

เมื่อ I_k คือ กระแสไฟฟ้าในสาขา k

R_k คือ ความต้านทานในสาขา k

ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) ของการจัดเรียงสายป้อนในบทความนี้ คือ การทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบมีค่าน้อยที่สุด ส่วนเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ประกอบด้วย

- 1. สมการสำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow)

$$P_i = \sum_{j=1}^{NB} |Y_{ij}| V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \tag{2}$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^{NB} |Y_{ij}| V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \tag{3}$$

- 2. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสทุกบัสต้องอยู่ในขอบเขตที่กำหนด

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \tag{4}$$

- 3. พิกัดของกระแสไฟฟ้าที่โหลดสายป้อนต้องไม่เกินความสามารถในการนำกระแสของสาย

$$|I_k| \leq I_{k, max} \quad k \in \{1, 2, 3, \dots\} \tag{5}$$

- 4. รูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าต้องเป็นเรเดียล
- 5. ทุกจุดโหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้าต้องไม่เกิดไฟฟ้าย้อน

เมื่อ V_{min} คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูง (สำหรับบทความนี้กำหนด $V_{min} = 0.95$ p.u. และ $V_{max} = 1.05$ p.u.)
 $I_{k, max}$ คือ ระดับกระแสไฟฟ้าสูงสุดของสาขา k

4. กรณีศึกษา

แบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสที่ใช้ในบทความนี้แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย สวิตช์ตัดคอนจำนวน 68 ตัว ได้แก่ สวิตช์หมายเลข 1 ถึงหมายเลข 68 สวิตช์จ่ายโอนจำนวน 5 ตัว ได้แก่ สวิตช์หมายเลข 69 ถึงหมายเลข 73 ข้อมูลหมายเลขสวิตช์ตัดคอนและสวิตช์จ่ายโอน ดังแสดงในตารางที่ 1 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีเครื่อง ขนาด 400 kW ตัวเก็บประจุ 1 ตัว ขนาด 400 kVAr โหลดรวมเป็นกำลังไฟฟ้าจริง (Active Load) มีค่า 3,801.89 kW และ โหลดรวมเป็นกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Load) มีค่า 2,694 kVAr รายละเอียดของโหลดที่บัสต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2 [6]

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 7 (EECON-37) 19 – 21 พฤศจิกายน 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตารางที่ 1 ข้อมูลหมายเลขสวิตช์ตัดคอนและสวิตช์จ่ายโอน

วงจร	หมายเลขสวิตช์ตัดคอน (ปกติเปิด)	หมายเลขสวิตช์จ่ายโอน (ปกติเปิด)
1	3 4 5 6 7 8 9 10 35 36 37 38 39 40 41 42	69
2	15 16 17 18 19 20	70
3	11 12 13 14 43 44 45	71
4	46 47 48 49 52 53 54 55 56 57 58	72
5	21 22 23 24 25 26 59 60 61 62 63 64	73

ตารางที่ 2 ข้อมูลโหลดของแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

หมายเลขบัส	กำลังไฟที่แท้จริง (kW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVA)	หมายเลขบัส	กำลังไฟที่แท้จริง (kW)	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVA)
6	2.60	2.20	37	26.00	18.55
7	40.40	30.00	39	24.00	17.00
8	75.00	54.00	40	24.00	17.00
9	30.00	22.00	41	1.20	1.00
10	28.00	19.00	43	6.00	4.30
11	145.00	104.00	45	39.22	26.30
12	145.00	104.00	46	39.22	26.30
13	8.00	5.00	48	79.00	56.40
14	8.00	5.50	49	384.70	274.50
16	45.50	30.00	50	394.70	274.50
17	60.00	35.00	51	40.50	26.30
18	60.00	35.00	52	3.60	2.70
20	1.00	0.60	53	4.35	3.80
21	114.00	81.00	54	26.40	19.00
22	5.00	3.50	55	24.00	17.20
24	28.00	20.00	59	100.00	72.00
26	14.00	10.00	61	1,244.00	898.00
27	14.00	10.00	62	32.00	23.00
28	26.00	18.60	64	227.00	162.00
29	26.00	18.60	65	59.00	42.00
33	14.00	10.00	66	18.00	13.00
34	19.50	14.00	67	18.00	13.00
35	6.00	4.00	68	28.00	20.00
36	26.00	18.55	69	28.00	20.00

การหาสถานะเปิด/ปิดของสวิตช์ตัดคอนและสวิตช์จ่ายโอนสำหรับการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษาที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 4 เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization Problem) ซึ่งบทความนี้ใช้วิธีการอนุพัทธ์จำลอง (Simulated Annealing: SA) ในการหาคำตอบ

กรณีศึกษาสำหรับพิจารณาความสามารถในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อน จะประเมินจากค่ากำลังสูญเสียของระบบในแต่ละกรณีต่อไป

- กรณีศึกษาที่ 1: ระบบที่ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ควบคู่กับประจุและไม่มีการจัดเรียงสายป้อน
- กรณีศึกษาที่ 2: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวผสมผสานกับการติดตั้งตัวเก็บประจุ แต่ไม่มีการจัดเรียงสายป้อน
- กรณีศึกษาที่ 3: ระบบที่ติดตั้งตัวเก็บประจุด้วยการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมผสมผสานกับการจัดเรียงสายป้อน
- กรณีศึกษาที่ 4: ระบบที่ติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวด้วยการค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสมผสมผสานกับการจัดเรียงสายป้อน

สำหรับการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษาที่ 3 และกรณีศึกษาที่ 4 วิธีการก่อนอื่นจำลองได้ให้ผลเฉลยซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับทั้งหมดที่กำหนดโดยระบบสถานะการเปิด/ปิดของสวิตช์ตัดคอนและสวิตช์จ่ายโอน ตามรายละเอียดในตารางที่ 3 ซึ่งทำให้โครงสร้างของระบบจำหน่าย 69 บัสเปลี่ยนไปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

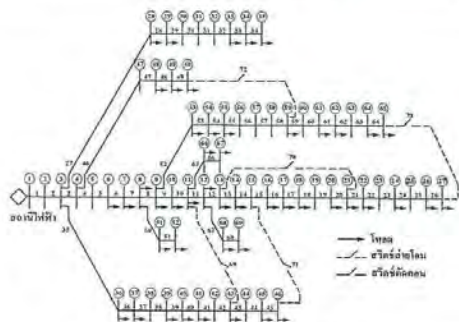
ตารางที่ 3 ตำแหน่งสวิตช์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

กรณีศึกษา	หมายเลขสวิตช์ตัดคอนที่เปลี่ยนเป็นสถานะเปิด	หมายเลขสวิตช์จ่ายโอนที่เปลี่ยนเป็นสถานะเปิด
3	14, 58, 61	71, 72, 73
4	14, 56, 61	71, 72, 73

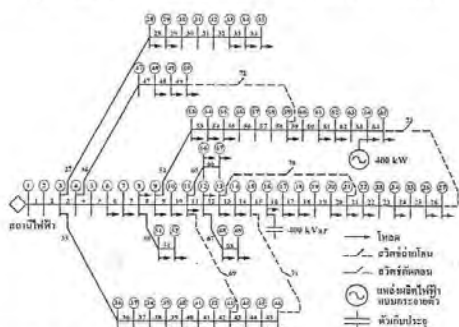
กำลังไฟฟ้าสูญเสียของแต่ละกรณีศึกษาจึงคำนวณจากการไหลของกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีศึกษาทั้งหมด

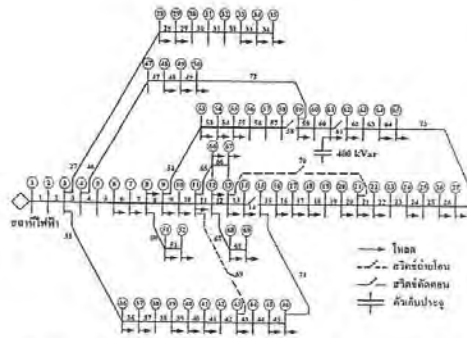
กรณีศึกษา	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ (kW)	ร้อยละของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (เทียบกับกรณีศึกษาที่ 1)
1	224.639	
2	155.400	30.822
3	082.797	63.142
4	075.223	66.514



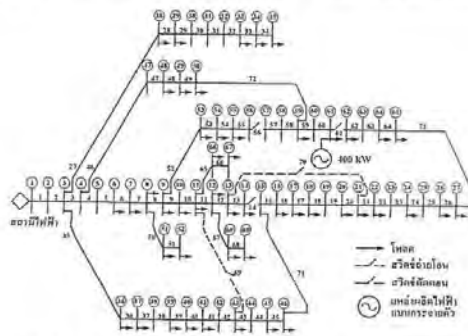
รูปที่ 3 แบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัสที่ใช้ในกรณีศึกษา



รูปที่ 4 โครงสร้างของระบบหลังจากการพบตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตัวเก็บประจุในกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 5 โครงสร้างของระบบหลังจากการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษาที่ 3

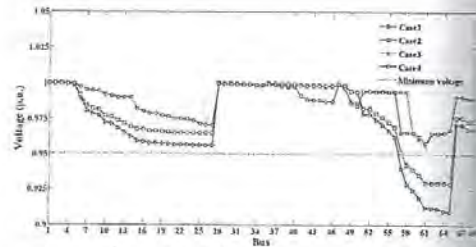


รูปที่ 6 โครงสร้างของระบบหลังจากการจัดเรียงสายป้อนในกรณีศึกษาที่ 4

บทความนี้ได้เปรียบเทียบแต่ละกรณีศึกษาที่ประสิทธิภาพของการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย เริ่มจากในกรณีที่ 2 ประมวลผลพร้อมกันในกรณาคำแนะนำการติดตั้งที่เหมาะสมของทั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตัวเก็บประจุ สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 30.822 % ในกรณีที่ 3 ประมวลผลพร้อมกันในกรณาคำแนะนำที่เหมาะสมของการติดตั้งตัวเก็บประจุและตำแหน่งการเปิด/ปิดสวิตช์ของการจัดเรียงสายป้อน สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 63.142% และสุดท้ายในกรณีที่ 4 ประมวลผลพร้อมกันในกรณาคำแนะนำที่เหมาะสมของการติดตั้งตัวแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตำแหน่งการเปิด/ปิดสวิตช์ของการจัดเรียงสายป้อน สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 66.514 % จึงเปรียบเทียบได้ว่าการผสมผสานติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับวิธีการจัดเรียงสายป้อน เป็นวิธีที่มีความสามารถกว่าวิธีอื่น ในการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

ผลการจำลองในกรณีที่ 2 กรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3 เป็นหลักฐานที่แสดงถึงความสามารถในการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายด้วยการผสมผสานเทคนิคต่างๆ ซึ่งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อนนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด นอกจากจะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียแล้ว ขนาด

แรงดันบัสที่แต่ละบัสของทุกกรณีศึกษาซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6 ยังแสดงให้เห็นว่า แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการจัดเรียงสายป้อน เมื่อนำมาผสมผสานกันยังสามารถช่วยยกระดับขนาดแรงดันบัสให้มีความสูงขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสของทุกกรณีศึกษา

5. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการใช้แนวทางการผสมผสานของการจัดเรียงสายป้อน การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการติดตั้งตัวเก็บประจุ เพื่อลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย โดยจำลองกรณีศึกษาคำจำกัดจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการจัดเรียงสายป้อนนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยยกระดับของขนาดแรงดันที่ละบัสให้มีความสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chiradeja and R. Ramakumar, "An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, no.4, December 2004.
- [2] J. S. Savier, and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2473-2480, October 2007.
- [3] Q. Zhun, D. Shirmohammadi and W.H.E. Liu, "Distribution feeder reconfiguration for service Restoration And Load Balancing" *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 12, No. 2, pp.724-729, May 1997.
- [4] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No.2, pp.1401-1407, April 1989.
- [5] V. Parada, J. A. Ferland, and M.Arias, "Optimization of Electrical Distribution Feeders Using Simulated Annealing," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1135-1141, July 2004.
- [6] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, "Feeder reconfiguration for loss reduction in three phase distribution system under unbalanced loading conditions," *IEEE Universities Power Engineering Conference*, pp. 1-6, 31st Aug-3rd September 2010

The Combined Loss Reduction Approach to Apply in Distribution System with Distribution Generation

P. Kritavorn, T. Lantharthong, and N. Rugthaicharoencheep, *Member, IEEE*
 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
 Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, 10800
 nattachote.r@rmutp.ac.th

Abstract—This paper presents the combined technique from optimal feeder reconfiguration and the installation of distributed generators (DG). The objective is to reduce power loss in distribution system. The optimization problem is solved by simulated annealing method to simultaneously identify the proper on/off patterns of the switches and the optimal location for DG placement. The impacts of this combined technique are evaluated from the simulation results of case study in 69-bus radial distribution system. It can be summarized from simulation results that the optimal DG placement and optimal feeder reconfiguration not only help reduce losses but also increase the magnitude of bus voltages.

Keywords—Power Loss Reduction, Feeder Reconfiguration, Distributed Generation

I. INTRODUCTION

DG is a small sized generator connected in parallel with the distribution system. DG is expected to play an increasing role in emerging electric power systems. Studies have predicted that DG will be a significant percentage of all new generation going on line. There are several different types of resources and technologies that can be used for DG such as wind, solar, fuel cells, hydrogen and biomass. DG can result in a network operation and planning practices with economic implications. The benefits of DG are classified into two groups: technical and economics [1]. For example, loss, voltage profile, reliability of supply, maintenance costs, and network connection reinforcement costs can be affected by the connection of DG to the distribution system [2-3]. Electric utilities, therefore, can benefit from the installation of DG.

Distribution system reliability assessment can, in general, be divided into the two basic tasks of assessing past performance and predicting future performance. Predicting reliability performance is usually concerned with the supply adequacy at the customer load points [4]. The conventional approach to teaching distribution system reliability evaluation, in either a university or industry based setting, is to use the basic analytical equations to calculate load point failure rates, average outage durations and average annual outage times.

The introduction of DG to distribution system can significantly impact the flow of power and voltage conditions at customers and utility equipment. These impacts may be either positively or negatively depending on the distribution

system operating characteristics and the DG characteristics [5].

Many methods have been employed for reducing the active power loss, for example, increasing conductor size, shortening circuit lengths, adjusting transformer tap and installing capacitors. Another efficient operation that can improve the performance of distribution systems is feeder reconfiguration. It is a process that changes the topology of a distribution system by altering the open/close status of switches. Positive impacts are generally called “system support benefits,” and include [5-7]:

- Loss reduction
- Improved utility system reliability
- Voltage support and improved power quality
- Transmission and distribution capacity release
Deferments of new or upgraded transmission and distribution infrastructure.
- Easy and quicker installation on account of prefabricated standardized components.
- Lowering of cost by avoiding long distance high voltage transmission.
- Environment friendly where renewable sources are used.
- Running cost more or less constant over the period of time with the use of renewable sources.
- Possibility of user-operator participation due to lesser complexity.
- More dependability with simple construction, and consequent easy operation and maintenance.

The configuration of distribution system is varied and loads are transferred among the feeders while the radial configuration format of electrical supply is still maintained and all load points are not interrupted. This implementation is defined as feeder reconfiguration. The advantages obtained from feeder reconfiguration are, for example, real power loss reduction, balancing system load, bus voltage profile improvement, increasing system security, reliability and power quality improvement [8-9].

This paper emphasizes on the implementation of feeder reconfiguration to the distribution system with distributed generators. The application of a simulated annealing is applied to determine the optimal on/off patterns of the switches to minimize the system loss subject to system constraints [7].

The effectiveness of the methodology is demonstrated by a practical sized distribution system consisting of 69 bus and 48 load points.

II. IMPACT OF SIZING AND LOCATION OF DG

The real power loss for a three-phase balanced distribution system can be calculated by [6]:

$$P_{Loss} = \sum_{l=1}^{Nl} 3|I_l|^2 R_l \quad (1)$$

From equation (1), if a DG can reduce current flow in the feeder, the active power loss will therefore decrease. Nevertheless, the loss reduction is varied depending on its sizes and locations for example 69 bus distribution systems as shown in Fig. 1.

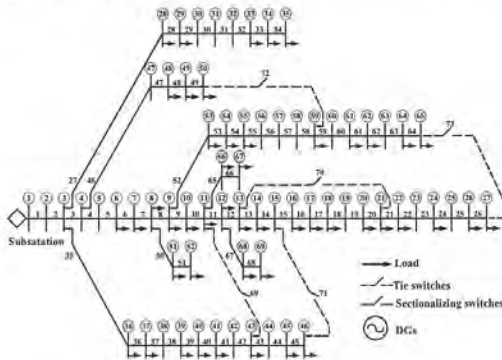


Fig. 1. 69 bus distribution systems

A. Impact of the size of DG

The impact of DG size can be explained by simple of 69 bus distribution system shown in Fig. 2. This system has an active power loss of 224.63 kW. Each bus in this system is shown in the table. A DG is placed at bus 59. When its capacity is varied, the system loss will be changed as U-shaped trajectory as seen in Fig. 3. This figure shows that the loss begins to decrease until the loss reaches its minimum level at 97.58 kW. At this level of loss, the size of the DG is 2 MW. If the DG capacity continues to increase from 2 MW, the loss will rise and exceed its original loss of 224.63 kW.

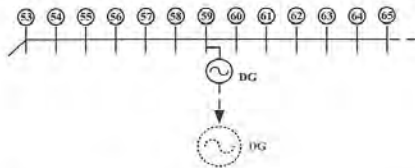


Fig. 2. Distribution system with different sizes of DG connected at bus 59

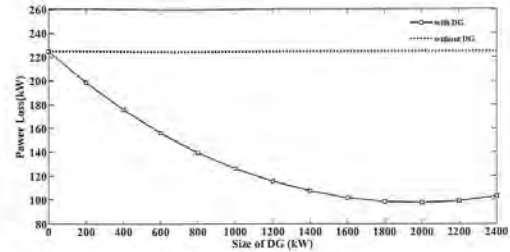


Fig. 3. Loss dependence on DG size

B. Impact of the location of DG

The system in Fig. 1, and its previous load are still employed to illustrate the impact of DG location on losses. In this case, the size of a DG is fixed to 2 MW, while its location is moved from buses 53 to 65 as shown in Fig. 4. The loss associated with each DG location is plotted in Fig. 5. The loss is observed reduced when it is placed at downstream buses. However, the DG degrades the loss if it is installed at bus 62 to 65.

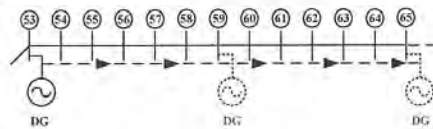


Fig. 4. Distribution system with different location of DG connected all buses

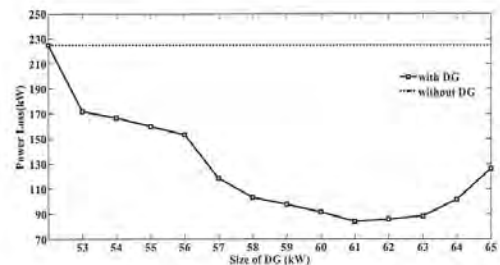


Fig. 5. Loss dependence on DG location

III. SIMULATED ANNEALING

A known thermal process for obtaining low energy state of a solid in a heat bath. This process consists of two steps: Step1: Increase the temperature of the heat bath to a maximum value at which the solid melts. Step2: Decrease the temperature carefully until the particles arrange themselves in a ground state of the solid.

The Simulated Annealing algorithm is a meta-heuristic algorithm to determine an optimal or a suboptimal solution of optimization problems. It is based on the analogy between the

minimization and annealing of a metal used for crystallization in physical system. It is a guides a local search strategy to explore the solution space beyond local optimality. This mechanism is mathematically best described by means of a Markov chain, which represents a sequence of trials, where the outcome of each trial depends only on the outcome of the previous one. The algorithm asymptotically finds a global minimum with probability 1, using the theory of Markov chains. In an annealing process a melt, initially at high temperature and disordered, is slowly cooled so that the system at any time is approximately in thermodynamic equilibrium. As cooling proceeds, the system becomes more ordered and approaches a frozen ground state at $T = 0$. Hence the process can be thought of as an adiabatic approach to the lowest energy state. If the initial temperature of the system is too low or cooling is done insufficiently slowly the system may become quenched forming defects or freezing out in metastable states [10-12].

IV. FEEDER RECONFIGURATION

Feeder reconfiguration in a distribution system is an operation in configuration management that determines the switching operations for many purposes such as decreasing network loss, balancing system load, and improving bus voltages or system reliability. The configuration may be varied via switching operations to transfer loads among the feeders. Two types of switches are used: normally closed switches (sectionalizing switches) and normally open switches (tie switches) [3]. A flowchart for feeder reconfiguration algorithm is shown in Fig. 5.

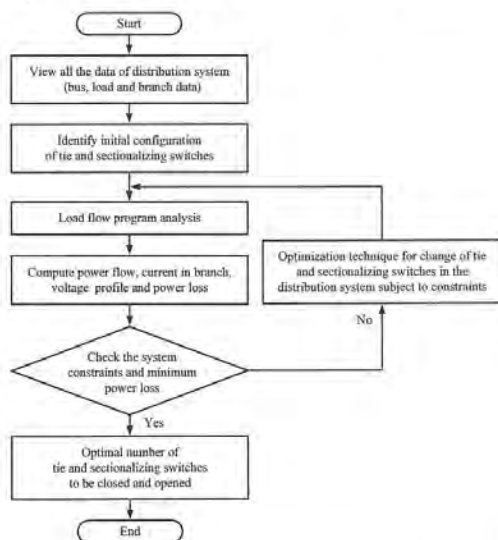


Fig. 5. Flowchart of feeder reconfiguration for loss reduction

V. PROBLEM FORMULATION

The objective function of the problem is to minimize the total power loss as:

$$\text{Minimize } PL = \sum_{l=1}^{Nl} \sum_{k=1}^l |I_k|^2 R_k \quad (2)$$

where PL = total power loss
 Nl = number of load levels
 l = number of feeders
 I_k = current flow in branch k
 R_k = resistance of branch k

The objective function in (2) is subject to the following constraints.

- Power flow equations:

$$P_i = \sum_{j=1}^{Nb} |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^{Nb} |Y_{ij} V_i V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (4)$$

where P_i, Q_i = active and reactive power at bus i
 Nb = number of buses
 Y_{ij} = element (i, j) in bus admittance matrix
 V_i, V_j = voltage of bus i and bus j
 θ_{ij} = angle of Y_{ij}
 δ_i, δ_j = voltage angle of bus i and bus j

- Bus voltage limits:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (5)$$

- Feeder capability limits:

$$|I_k| \leq I_k^{\max} \quad k \in \{1, 2, 3, \dots, l\} \quad (6)$$

- Radial configuration format

- The system has to remain radially operated after reconfiguration.
- No load-point interruption
- All load points have to be served after reconfiguration.

where V_i^{\min}, V_i^{\max} = minimum and maximum voltage
 I_k^{\max} = maximum current capability of branch k

VI. CASE STUDY

The developed methodology is demonstrated by a radial distribution system with distributed generation, 69 buses, 7 laterals and 5 tie-lines (looping branches), as shown in Fig. 6. The current carrying capacity of branch No.1-9 is 400 A, No. 46-49 and No. 52-64 are 300 A and the other remaining branches including the tie lines are 200 A. DG unit with capacity of 400 kW should be optimized to locate at any bus between bus No.53-65. The base values for voltage and power are 12.66 kV and 100 MVA. Each branch in the system has a sectionalizing switch for reconfiguration. The load data and branch data are given in Table I. and Table II. [9].

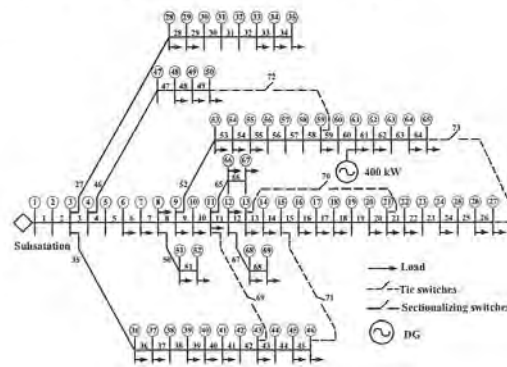


Fig. 6. Radial distribution system with 69 buses

TABLE I. LOAD DATA OF 69-BUS DISTRIBUTION SYSTEM

Bus Number	P_L (kW)	Q_L (kVAr)	Bus Number	P_L (kW)	Q_L (kVAr)
6	2.60	2.20	37	26.00	18.55
7	40.40	30.00	39	24.00	17.00
8	75.00	54.00	40	24.00	17.00
9	30.00	22.00	41	1.20	1.00
10	28.00	19.00	43	6.00	4.30
11	145.00	104.00	45	39.22	26.30
12	145.00	104.00	46	39.22	26.30
13	8.00	5.00	48	79.00	56.40
14	8.00	5.50	49	384.70	274.50
16	45.50	30.00	50	384.70	274.50
17	60.00	35.00	51	40.50	28.30
18	60.00	35.00	52	3.60	2.70
20	1.00	0.60	53	4.35	3.50
21	114.00	81.00	54	26.40	19.00
22	5.00	3.50	55	24.00	17.20
24	28.00	20.00	59	100.00	72.00
26	14.00	10.00	61	1,244.00	888.00
27	14.00	10.00	62	32.00	23.00
28	26.00	18.60	64	227.00	162.00
29	26.00	18.60	65	59.00	42.00
33	14.00	10.00	66	18.00	13.00
34	19.50	14.00	67	18.00	13.00
35	6.00	4.00	68	28.00	20.00
36	26.00	18.55	69	28.00	20.00

TABLE II. BRANCH DATA OF 69-BUS DISTRIBUTION SYSTEM

Branch Number	Sending end bus	Receiving end bus	R (Ω)	X (Ω)
1	1	2	0.0005	0.0012
2	2	3	0.0005	0.0012
3	3	4	0.0015	0.0036
4	4	5	0.0251	0.0294
5	5	6	0.3660	0.1864
6	6	7	0.3811	0.1941
7	7	8	0.0922	0.0470
8	8	9	0.0493	0.0251
9	9	10	0.8190	0.2707
10	10	11	0.1872	0.0619
11	11	12	0.7114	0.2351
12	12	13	1.0300	0.3400
13	13	14	1.0440	0.3450
14	14	15	1.0580	0.3496
15	15	16	0.1966	0.0650
16	16	17	0.3744	0.1238
17	17	18	0.0047	0.0016
18	18	19	0.3276	0.1083
19	19	20	0.2106	0.0690
20	20	21	0.3416	0.1129
21	21	22	0.0140	0.0046
22	22	23	0.1591	0.0526
23	23	24	0.3463	0.1145
24	24	25	0.7488	0.2475
25	25	26	0.3089	0.1021
26	26	27	0.1732	0.0572
27	3	28	0.0044	0.0108
28	28	29	0.0640	0.1565
29	29	30	0.3978	0.1315
30	30	31	0.0702	0.0232
31	31	32	0.3510	0.1160
32	32	33	0.8390	0.2816
33	33	34	1.7080	0.5646
34	34	35	1.4740	0.4873
35	3	36	0.0044	0.0108
36	36	37	0.0640	0.1565
37	37	38	0.1053	0.1230
38	38	39	0.0304	0.0355
39	39	40	0.0018	0.0021
40	40	41	0.7283	0.8509
41	41	42	0.3100	0.3623
42	42	43	0.0410	0.0478
43	43	44	0.0092	0.0116
44	44	45	0.1089	0.1373
45	45	46	0.0009	0.0012
46	4	47	0.0034	0.0084
47	47	48	0.0851	0.2083
48	48	49	0.2898	0.7091
49	49	50	0.0822	0.2011
50	8	51	0.0928	0.0473
51	51	52	0.3319	0.1114
52	9	53	0.1740	0.0886
53	53	54	0.2030	0.1034
54	54	55	0.2842	0.1447
55	55	56	0.2813	0.1433
56	56	57	1.5900	0.5337
57	57	58	0.7837	0.2630
58	58	59	0.3042	0.1006
59	59	60	0.3861	0.1172
60	60	61	0.5075	0.2585
61	61	62	0.0974	0.0496
62	62	63	0.1450	0.0738
63	63	64	0.7105	0.3619
64	64	65	1.0410	0.5302

TABLE II. (CONTINUED)

Branch Number	Sending end bus	Receiving end bus	R (Ω)	X (Ω)
65	11	66	0.2012	0.0611
66	66	67	0.0047	0.0014
67	12	68	0.7394	0.2444
68	68	69	0.0047	0.0016
Tie line				
69	11	43	0.5000	0.5000
70	13	21	0.5000	0.5000
71	15	46	1.0000	0.5000
72	50	59	2.0000	1.0000
73	27	65	1.0000	0.5000

The initial statuses of all the sectionalizing switches (switches No. 1-68) are closed while all the tie-switches (switch No. 69-73) open. The total loads for this test system are 3,801.89 kW and 2,694.10 kVAr. The minimum and maximum voltages are set at 0.95 and 1.05 p.u.

The two cases are examined for network reconfiguration in distribution system with distributed generation and in Table III. The test results for the two cases are summarized in Table IV. and Table V.

TABLE III. CASE STUDY

Case	Network Reconfiguration	DG Placement
1	-	-
2	✓	✓

TABLE IV. POWER LOSS IN DISTRIBUTION SYSTEM

Case Study	Total Power loss in System (kW)	Loss Reduction (%)
1	224.63	-
2	75.89	66.21

TABLE V. RESULTS FOR OPTIMAL FEEDER RECONFIGURATION

Case Study	Number of tie switches	Number of sectionalizing switches
2	14, 56, 61	71, 72, 73

The bus voltage profile for all the cases as shown in Fig. 7.

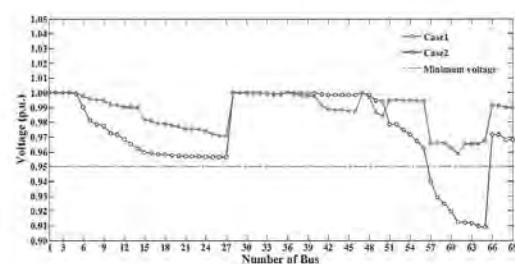


Fig. 7. Bus Voltage Profile

VII. CONCLUSION

The optimization technique by SA has presented in this paper to simultaneously find the most appropriate position of tie/sectionalizing switches for feeder reconfiguration and the optimal location for DG placement. The objective function of feeder reconfiguration is to minimize the total system loss. The objective function is subjected to power flow equations, bus voltage limits, current limits, radial configuration format and no load-point interruption. A 69-bus distribution system is used to demonstrate the effectiveness of the proposed technique. Test results reveal that not only bus voltages are improved above the limit, but also the system power loss can be further reduced. The decrease in loss produces significant savings on the annual energy loss cost, thus emphasizing the benefit of feeder reconfiguration and DG placement.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express his gratitude to Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Thailand for support and Dr.Suwit Auchariyamet, a research officer in Thailand Institute of Scientific and Technological Research, for his technical support on optimization technique.

REFERENCES

- [1] P. Chiradeja and R. Ramakumar, "An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, December 2004.
- [2] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [3] C. T. Su and C. S. Lee, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 1022-1027, July 2003.
- [4] J. S. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2473-2480, October 2007.
- [5] B. Delfino, "Modeling of the integration of distributed generation into the electrical system," in *Proc. IEEE Conf. Power Engineering Society Summer Meeting, USA*, pp. 170-175, 2002.
- [6] N. Rugthaicharoencheep and S. Sirisumrannukul, "Benefit assessment of loss reduction from distributed generation in distribution networks by tabu search," *Conference of The electric Power Supply Industry (CEPSI)*, 2008.
- [7] V. Parada, J. A. Ferland and M. Arias, "Optimization of electrical distribution feeders using simulated annealing," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1135-1141, July 2004.
- [8] C. T. Su and C. S. Lee, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution," *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp.1022-1027, 2003.
- [9] J. S. Savier and D. Das, "Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp.2473-2480, 2007.
- [10] K. P. Wong and C. C. Fung, "Simulated annealing based economic dispatch algorithm," *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol. 140, no. 6, pp. 509 - 515, 1993.
- [11] A. H. A. Mantawy, Y. L. Abdel-Magid and S.Z.Selim, "Simulated annealing algorithm for unit commitment," *IEEE Transaction on Power System*, vol. 13, no. 1, pp. 197 - 204, 1998.
- [12] A. A. Hossam-Eldin, A.R. Abdelaziz, and A.-E.I.A. Abu Fard, "Simulated annealing-based automation of distribution systems," *Universities Power Engineering Conference (UPEC) International*, pp.1 - 5, 2010.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นามสกุล นายไพรัตน์ กวีถาวร
วัน เดือน ปีเกิด 11 ธันวาคม พ.ศ.2527
ภูมิลำเนา 122/126 หมู่ที่ 2 หมู่บ้านรักไทย ตำบลบ้านกรด บางปะอิน
พระนครศรีอยุธยา
ที่อยู่ปัจจุบัน 10/217 ซอยพัฒนาการ 26 ถนนพัฒนาการ แขวงสวนหลวง
เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร พ.ศ.2554

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ.2551

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ พ.ศ.2548

สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา พ.ศ.2546

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งวิศวกรอยู่ที่บริษัทฟานัคไทย จำกัด และตำแหน่งผู้จัดการอยู่ที่บริษัท บางกอก เพาเวอร์ ไลน์ จำกัด