

การหาค่าเหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเพื่อควบคุม
ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย

นายโอฟาริก อัครนนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED GENERATION AND VOLTAGE CONTROL DEVICES
FOR CONTROLLING DISTRIBUTION VOLTAGE PROFILE

Mr. Olarick Ausavanop

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาค่าเหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว
และอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า
ของระบบจำหน่าย

โดย

นายไอฟาริก อัศวนภ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร. สุรัชชัย ชัยทัศนีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรฤกษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชะสุนันต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(อาจารย์ ดร. สุรัชชัย ชัยทัศนีย์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ประดิษฐ์ เฟื่องฟู)

โอฟาริก อัครนน : การหาค่าเหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย. (OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED GENERATION AND VOLTAGE CONTROL DEVICES FOR CONTROLLING DISTRIBUTION VOLTAGE PROFILE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. สุรัชย์ ชัยทัศนีย์, 160 หน้า.

ปัญหาความไม่แน่นอนของระดับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่ไม่คงที่ ตลอดจนการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันในระบบพร้อมกับการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว อาจทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าละเมิดขอบเขตจำกัดได้ รวมทั้งสามารถส่งผลให้เกิดความผันผวนต่อระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทควบคุมได้ ตัวชดเชยเชิงโคโรนัสถิต คาปาซิเตอร์ และแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายให้มีระดับแรงดันเข้าใกล้กับระดับแรงดันที่กำหนด โดยใช้กระบวนการค้นหาแบบทาบูนิดปรับตัวได้ วิธีการค้นหามีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยที่น้อยที่สุด ซึ่งจำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์ได้ถูกพิจารณาเป็นเงื่อนไขข้อจำกัด นอกจากนี้ค่าตัวประกอบกำลังของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทควบคุมได้จะถูกเลือกจากกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด และเพื่อครอบคลุมการคำนวณปัญหาจากความไม่แน่นอนจากการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงประยุกต์ใช้วิธีคำนวณแบบมอนติคาร์โล วิธีการแก้ปัญหาที่นำเสนอได้ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 บัส และระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2554

5270823221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : DISTRIBUTED GENERATION / DISTRIBUTION SYSTEM / OPTIMIZATION /
 TABU SEARCH

OLARICK AUSAVANOP: OPTIMIZATION OF DISTRIBUTED GENERATION AND
 VOLTAGE CONTROL DEVICES FOR CONTROLLING DISTRIBUTION VOLTAGE
 PROFILE. ADVISOR: SURACHAI CHAITUSANEY, Ph.D.,160 pp.

The uncertainty of renewable energy DG, loads, and the installation of voltage regulator and/or capacitor together, may bring about voltage violation and may also cause voltage fluctuation on the interconnecting system.

This thesis proposes a method for determining the appropriate size of dispatchable DG, STATCOM, capacitor and voltage regulator taps that help regulate the distribution system voltages to lie close to the desired value, by applying Adaptive Tabu Search algorithm. The optimization objective function is to minimize the average voltage difference value, while the operation limits including switching number of voltage regulator and capacitor are treated as optimization constraints. Moreover, the power factor of dispatchable DG is also determined by the proposed method. To fully evaluate the uncertainties of renewable energy DG and loads, the probabilistic load flow calculation based on Monte Carlo simulations has been performed. The proposed method is demonstrated in IEEE 34-bus test system and a modified Provincial Electricity Authority (PEA) of Thailand.

Department : ... Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study : ... Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : ... 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กระผมขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง จากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สุรัชชัย ชัยทัศน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ตลอดจนได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์ อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล และดร. ประดิษฐ์ เฟื่องฟู ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณบุคคลรอบตัว และ ผู้ร่วมวิจัยในห้องปฏิบัติการที่คอยให้คำปรึกษา และ เป็นกำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พี่สาว ตลอดจนญาติทุกๆ ท่านที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
1.3 วัตถุประสงค์.....	4
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 ขั้นตอนการศึกษา และวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	6
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 หลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว.....	8
2.1.1 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก.....	8
2.1.2 การพิจารณาแบบจำลองของ DG.....	10
2.1.3 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้านครหลวง และ IEEE Std 1547-2008.....	11
2.1.3.1 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของการไฟฟ้าส่วน ภูมิภาค.....	11
2.1.3.2 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของการไฟฟ้านครหลวง	12
2.1.3.3 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของ IEEE Std 1547-2008.....	13
2.2 ตัวคุมค่าแรงดัน (Voltage regulator).....	13
2.2.1 หลักการพื้นฐานของตัวคุมค่าแรงดัน.....	14
2.2.2 ผลกระทบของตัวคุมค่าแรงดันต่อแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	16

2.3 คาปาซิเตอร์ (Capacitor).....	17
2.3.1 ขนาดของคาปาซิเตอร์.....	19
2.3.2 ผลกระทบของคาปาซิเตอร์ต่อแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	20
2.3.3 การควบคุมคาปาซิเตอร์.....	21
2.4 ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (Static Synchronous Compensator, STATCOM).....	22
2.4.1 หลักการทำงานของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต.....	23
2.5 ความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด.....	24
2.5.1 การคำนวณแบบมอนติคาร์โล.....	25
2.5.2 ลักษณะการจ่ายกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน.....	26
2.6 สรุป.....	28
บทที่ 3 วิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาลำบาก.....	29
3.1 วิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาลำบาก (Heuristic Search).....	29
3.1.1 อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing).....	30
3.1.2 อัลกอริทึมพันธุกรรม (Genetic Algorithm).....	30
3.1.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization).....	32
3.1.4 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยโคโลนีมด (Ant Colony Optimization).....	33
3.1.5 วิธีค้นหาแบบทาบู (Tabu Search).....	33
3.2 สรุป.....	35
บทที่ 4 วิธีการค้นหาแบบทาบู.....	36
4.1 การค้นหาแบบทาบู.....	36
4.2 แนวคิดพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบู.....	36
4.3 วิธีค้นหาคำตอบแบบทาบูชนิดปรับตัวได้ (Adaptive Tabu Search).....	38
4.4 ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบทาบูชนิดปรับตัวได้.....	40
4.5 สรุป.....	42
บทที่ 5 การหาค่าเหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและอุปกรณ์ควบคุมแรงดันโดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบทาบูชนิดปรับตัวได้.....	43
5.1 นิยามตัวแปร.....	43
5.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function).....	44
5.1.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints).....	44

5.2	ขั้นตอนในการแก้ปัญหาโดยวิธีค้นหาคำตอบแบบทฤษฎีปรับตัวได้.....	45
5.2.1	ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยใช้กลไก ATS.....	46
5.2.2	ขั้นตอนการประเมินคุณภาพคำตอบ.....	50
5.2.3	ขั้นตอนการสร้างสมาชิกชุดคำตอบ.....	55
5.3	การสอบทานผลลัพธ์จากอัลกอริทึม.....	57
5.4	สรุปขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาจากวิธีที่นำเสนอ.....	58
บทที่ 6	วิธีการทำงานของอัลกอริทึมวิธีที่นำเสนอ.....	60
6.1	วิธีการทำงานของอัลกอริทึม.....	60
6.1.1	ขั้นตอนของอัลกอริทึมจากวิธีที่นำเสนอ.....	61
6.1.2	ผลการทดสอบจากการพิจารณาทุกกรณี.....	69
6.1.3	การพิจารณาการควบคุมแรงดันจากทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ... ..	70
6.2	สรุปผลการสอบทานอัลกอริทึม.....	76
บทที่ 7	ผลการทดสอบวิธีที่นำเสนอ.....	77
7.1	ระบบทดสอบ.....	77
7.1.1	ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS.....	77
7.1.2	ระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	79
7.2	รูปแบบกรณีการนำเสนอผลการทดสอบ.....	80
7.3	ผลการทดสอบจากระบบทดสอบ IEEE 34-BUS.....	82
7.3.1	ผลการทดสอบจากระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เวลา 14.00 น.....	82
7.3.2	ผลการทดสอบจากระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เวลา 18.00 น.....	91
7.4	ผลการทดสอบจากระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค....	105
7.4.1	ผลการทดสอบจากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เวลา 14.00 น.....	105
7.4.2	ผลการทดสอบจากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เวลา 18.00 น.....	113
7.5	สรุปผลการทดสอบ.....	129
บทที่ 8	สรุป.....	131
8.1	สรุปผลการวิจัย.....	131
8.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	132
	รายการอ้างอิง.....	133
	ภาคผนวก.....	137
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143

สารบัญญัตราสาร

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ประเภทของ DG และค่าตัวประกอบกำลัง.....	9
ตารางที่ 2.2	มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	12
ตารางที่ 2.3	มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง.....	12
ตารางที่ 2.4	คาปาซิเตอร์ในสถานีไฟฟ้าย่อย และคาปาซิเตอร์ในฟีดเดอร์ในระบบ จำหน่าย.....	18
ตารางที่ 2.5	ขนาดคาปาซิเตอร์ทั่วไปในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEEE Standard 18-2002.....	19
ตารางที่ 2.6	ขนาดของคาปาซิเตอร์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	20
ตารางที่ 3.1	ความสามารถของแต่ละวิธีในการประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	34
ตารางที่ 6.1	ระดับแรงดันในแต่ละบัสเมื่อคำนวณจากค่าป้อนเข้าของคำตอบเริ่มต้น.....	61
ตารางที่ 6.2	การวิเคราะห์คุณภาพคำตอบของคำตอบเริ่มต้น.....	62
ตารางที่ 6.3	ตัวอย่างค่าของสมาชิกชุดคำตอบที่เป็นไปได้.....	63
ตารางที่ 6.4	คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นทั้งหมดที่พบ.....	63
ตารางที่ 6.5	คำตอบแบบวงกว้างจากการพิจารณาทุกกรณี.....	70
ตารางที่ 6.6	ขนาดของ DG ประเภทควบคุม 2 ตัว ขนาดของคาปาซิเตอร์ เทียบของตัวคุม ค่าแรงดัน และค่าการประเมิน.....	72
ตารางที่ 6.7	ค่าของระดับแรงดันในแต่ละบัส.....	73
ตารางที่ 6.8	คำตอบที่เป็นไปได้ในการคำนวณโดยการตรวจจับทิศทางการไหลของ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของรูปแบบที่ 1.....	74
ตารางที่ 6.9	ค่าของระดับแรงดันในแต่ละบัส.....	75
ตารางที่ 6.10	คำตอบที่เป็นไปได้ในการคำนวณโดยการตรวจจับทิศทางการไหลของ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของรูปแบบที่ 2.....	75
ตารางที่ 6.11	ค่าของระดับแรงดันในแต่ละบัส.....	76
ตารางที่ 7.1	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัส ที่เชื่อมต่อกันของระบบทดสอบ IEEE กรณีสถาน เวลา 14.00 น.....	83
ตารางที่ 7.2	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัส ที่เชื่อมต่อกันของระบบทดสอบ IEEE กรณี 2 เวลา 14.00 น.....	84

ตารางที่ 7.3	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.....	85
ตารางที่ 7.4	ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.....	86
ตารางที่ 7.5	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.....	88
ตารางที่ 7.6	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.....	89
ตารางที่ 7.7	การเปรียบเทียบคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตและจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบทดสอบ IEEE.....	90
ตารางที่ 7.8	ข้อเปรียบเทียบกลไกระหว่างการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบอช่อนจำลอง.....	90
ตารางที่ 7.9	การเปรียบเทียบคำตอบจากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบอช่อนจำลองในระบบทดสอบ IEEE.....	91
ตารางที่ 7.10	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกันของระบบทดสอบ IEEE กรณีฐาน เวลา 18.00 น.....	92
ตารางที่ 7.11	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกันของระบบทดสอบ IEEE กรณี 2 เวลา 18.00 น.....	93
ตารางที่ 7.12	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.....	94
ตารางที่ 7.13	ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.....	95
ตารางที่ 7.14	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.....	97
ตารางที่ 7.15	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.....	98
ตารางที่ 7.16	การเปรียบเทียบคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตและจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบทดสอบ IEEE.....	99
ตารางที่ 7.17	สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต.....	100
ตารางที่ 7.18	สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์.....	102

ตารางที่ 7.19	การเปรียบเทียบคำตอบจากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบออ่อน จำลองในระบบทดสอบ IEEE.....	104
ตารางที่ 7.20	การเปรียบเทียบคำตอบแบบวงกว้างจากการค้นหาแบบทามู และการค้นหา แบบบออ่อนจำลองในระบบทดสอบ IEEE.....	104
ตารางที่ 7.21	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัส ที่เชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณีฐาน เวลา 14.00 น...	105
ตารางที่ 7.22	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัส ที่เชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณี 2 เวลา 14.00 น.....	106
ตารางที่ 7.23	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่ เชื่อมต่อกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบไฟฟ้า ดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.....	107
ตารางที่ 7.24	ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.....	108
ตารางที่ 7.25	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.....	110
ตารางที่ 7.26	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.....	111
ตารางที่ 7.27	การเปรียบเทียบคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตและจากการ ติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.....	112
ตารางที่ 7.28	การเปรียบเทียบคำตอบจากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบออ่อน จำลองในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.....	112
ตารางที่ 7.29	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัส ที่เชื่อมต่อกัน กรณีฐานของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น....	113
ตารางที่ 7.30	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัส ที่เชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณี 2 เวลา 18.00 น.....	114
ตารางที่ 7.31	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่ เชื่อมต่อกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบไฟฟ้า ดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.....	115
ตารางที่ 7.32	ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.....	116
ตารางที่ 7.33	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.....	118
ตารางที่ 7.34	ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.....	119

ตารางที่ 7.35	การเปรียบเทียบคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และ จากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.....	120
ตารางที่ 7.36	สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต.....	121
ตารางที่ 7.37	สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์.....	125
ตารางที่ 7.38	การเปรียบเทียบคำตอบจากการค้นหาแบบทานู และการค้นหาแบบบ่อนจําลองในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.....	129
ตารางที่ 7.39	การเปรียบเทียบคำตอบแบบวงกว้างจากการค้นหาแบบทานู และการค้นหาแบบบ่อนจําลองในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.....	129
ตารางที่ ก.1	ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 34 bus.....	138
ตารางที่ ก.2	ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบ IEEE 34 bus.....	139
ตารางที่ ข.1	ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลงการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	141
ตารางที่ ข.2	ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบไฟฟ้าดัดแปลงการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	142

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	การไหลของกำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟ (ก) ไม่มี DG (ข) DG แบบคาปาซิทีฟ (ค) DG แบบอินดักทีฟ (ง) DG แบบยูนิตี.....	10
รูปที่ 2.2	การทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน.....	14
รูปที่ 2.3	การควบคุมการเปลี่ยนแท็บ.....	15
รูปที่ 2.4	การติดตั้งตัวคุมค่าแรงดันเพื่อแก้ปัญหาแรงดัน (ก) ปัญหาแรงดันปลายทางต่ำ (ข) ปัญหาแรงดันปลายทางสูง.....	17
รูปที่ 2.5	การติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อยกกระดับแรงดัน.....	21
รูปที่ 2.6	การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟระหว่างตัวชุดเซยซิงโครนัสสถิตกับระบบกำลังไฟฟ้า.....	23
รูปที่ 2.7	การกระจายตัวของข้อมูลแบบแจกแจงปกติ.....	24
รูปที่ 2.8	การกระจายข้อมูลของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโหลด แบบแจกแจงปกติ.....	25
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ยของ DG พลังงานแสงอาทิตย์ (ก) ค่าความเข้มแสงตลอดทั้งวัน (ข) กำลังการผลิตไฟฟ้าของ DG พลังงานแสงอาทิตย์.....	27
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ยของ DG พลังงานลม.....	27
รูปที่ 2.11	การจ่ายกำลังไฟฟ้าของ DG พลังงานหมุนเวียนเมื่อพิจารณาผลความไม่แน่นอน (ก) การจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก DG พลังงานแสงอาทิตย์ (ข) การจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก DG พลังงานลม.....	28
รูปที่ 3.1	อัลกอริทึมการรอบก่อนจำลอง.....	30
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของ GA.....	31
รูปที่ 3.3	แผนผังอัลกอริทึมพื้นฐานของ PSO.....	32
รูปที่ 3.4	การทดลองเส้นทางเดินของมด.....	33
รูปที่ 4.1	ปฏิบัติการเดิน เพื่อหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน.....	37
รูปที่ 4.2	การค้นหาคำตอบเฉพาะที่.....	37
รูปที่ 4.3	การเดินย้อนรอยใน ATS.....	39
รูปที่ 4.4	(ก) การค้นหาแบบทามูซนิตปรับตัวได้ (ข) การค้นหาแบบทามูซนิตธรรมดา	40
รูปที่ 4.5	การสุ่มเลือกคำตอบเริ่มต้น (S_0).....	41
รูปที่ 4.6	การสร้างพื้นที่คำตอบรอบข้าง.....	41

	หน้า	
รูปที่ 4.7	การเดินทางไปยังค่าตอบรอบข้างที่มีค่าการประเมินสูงกว่าค่าตอบปัจจุบัน.....	42
รูปที่ 5.1	แผนผังการทำงานกลไก ATS.....	49
รูปที่ 5.2	ขั้นตอนการประเมินคุณภาพค่าตอบ.....	54
รูปที่ 5.3	ขั้นตอนการสร้างสมาชิกชุดค่าตอบ.....	57
รูปที่ 5.4	ขั้นตอนรวมทั้งหมดจากวิธีที่นำเสนอ.....	59
รูปที่ 6.1	ระบบทดสอบอัลกอริทึมจากวิธีที่นำเสนอ (IEEE 34-BUS).....	60
รูปที่ 6.2	ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยค่าตอบที่ 1.....	64
รูปที่ 6.3	ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยค่าตอบที่ 2.....	64
รูปที่ 6.4	ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยค่าตอบที่ 3.....	65
รูปที่ 6.5	ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยค่าตอบที่ 4.....	65
รูปที่ 6.6	ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากการใช้ค่าตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่ดีที่สุด..	66
รูปที่ 6.7	ระดับแรงดันในแต่ละบัสเมื่อไม่มีการชดเชยแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน.....	67
รูปที่ 6.8	การไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ.....	68
รูปที่ 6.9	ระดับแรงดันเมื่อการควบคุมการปรับแก้ของตัวคุมค่าแรงดันไม่ถูกต้อง.....	69
รูปที่ 6.10	ระดับแรงดันเมื่อการควบคุมการปรับแก้ของตัวคุมค่าแรงดันถูกต้อง.....	69
รูปที่ 6.11	ระบบทดสอบอัลกอริทึมจากวิธีที่นำเสนอ (ระบบไฟฟ้าดัดแปลงจากระบบจริงของ กฟภ.).....	71
รูปที่ 6.12	ระดับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัส.....	72
รูปที่ 6.13	ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	72
รูปที่ 7.1	(ก) ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต (ข) ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์.....	78
รูปที่ 7.2	(ก) ระบบไฟฟ้าดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต (ข) ระบบไฟฟ้าดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์.....	80
รูปที่ 7.3	ระดับโหลดรายชั่วโมง.....	81
รูปที่ 7.4	กราฟแสดงกำลังเฉลี่ยของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบใช้พลังงานลมเมื่อใช้วิธีคำนวณแบบมอนติคาร์โล.....	81
รูปที่ 7.5	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE กรณีพื้นฐาน เวลา 14.00 น...	83
รูปที่ 7.6	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อกับตัวคุมค่าแรงดันและคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต เวลา 14.00 น.....	84

รูปที่ 7.7	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 14.00 น.....	85
รูปที่ 7.8	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด เวลา 14.00 น.....	86
รูปที่ 7.9	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 14.00 น.....	87
รูปที่ 7.10	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 14.00 น.....	89
รูปที่ 7.11	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE กรณีพื้นฐาน เวลา 18.00 น.	92
รูปที่ 7.12	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดันและคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต เวลา 18.00 น.....	93
รูปที่ 7.13	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 18.00 น.....	94
รูปที่ 7.14	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด เวลา 18.00 น.....	95
รูปที่ 7.15	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 18.00 น.....	96
รูปที่ 7.16	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 18.00 น.....	98
รูปที่ 7.17	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณีพื้นฐาน เวลา 14.00 น.....	105
รูปที่ 7.18	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดันและคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ณ เวลา 14.00 น.....	106
รูปที่ 7.19	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยตัวอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 14.00 น.....	107

รูปที่ 7.20	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด ณ เวลา 14.00 น.....	108
รูปที่ 7.21	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 14.00 น.....	110
รูปที่ 7.22	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 14.00 น.....	111
รูปที่ 7.23	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. กรณีพื้นฐาน เวลา 18.00 น.....	114
รูปที่ 7.24	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อดำเนินการ และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต เวลา 18.00 น.....	114
รูปที่ 7.25	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 18.00 น.....	115
รูปที่ 7.26	ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด ณ เวลา 18.00 น.....	116
รูปที่ 7.27	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 18.00 น.....	118
รูปที่ 7.28	ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าตัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ ณ เวลา 18.00 น.....	119

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของวิทยานิพนธ์นี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตพลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก ณ จุดศูนย์กลางการผลิตเพียงจุดเดียว โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อาศัยเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน นิวเคลียร์ หรือน้ำ มาใช้ในการผลิตไฟฟ้า สำหรับในประเทศไทยนั้นการผลิตไฟฟ้าได้ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ลิกไนต์ และพลังงานน้ำ เป็นต้น [1] ซึ่งแหล่งพลังงานที่ใช้เหล่านี้มีข้อดี คือ ค่าใช้จ่ายต่ำเมื่อเทียบกับขนาดของพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับตลอดจนการดำเนินงานถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ ปัจจัยภูมิศาสตร์ ปัจจัยทางธรณีวิทยา และปัจจัยทางความปลอดภัย เป็นต้น การเลือกใช้แหล่งพลังงานโดยคำนึงถึงปัจจัยที่กล่าวมานั้นสามารถยกตัวอย่างได้ดังต่อไปนี้ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานถ่านหินต้องสร้างไกลออกจากบริเวณชุมชนเพื่อไม่ให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศกระทบต่อประชาชน และอาจสร้างให้ใกล้เคียงถ่านหินเพื่อลดต้นทุนการขนส่ง หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำจำเป็นต้องสร้างเขื่อนที่เหมาะสมตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การผลิตไฟฟ้าในรูปแบบที่กล่าวมานี้มักต้องส่งกระแสไฟฟ้าในระยะทางไกลซึ่งทำให้เกิดข้อเสียต่างๆ เช่น ทำให้ความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เกิดการรुकูล้ำพื้นที่ทางธรรมชาติ ตลอดจนต้นทุนที่สูงขึ้นในการสร้างสายส่งหรือสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นต้น ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว หรือ Distributed Generation (DG) ซึ่งสามารถติดตั้งใกล้บริเวณจุดโหลดได้ [2] จึงเป็นทางหนึ่งที่สามารถช่วยกระจายพลังงานไฟฟ้า

DG คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าปริมาณน้อย (ปกติจะมีขนาดอยู่ในช่วงน้อยกว่า 10,000 kW) นิยมติดตั้งใกล้จุดโหลด โดย DG ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นทั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า อีกทั้งยังได้รับความสนใจจากทั้งผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าด้วย เนื่องจากประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตั้ง DG มีหลายประการ เช่น ช่วยกระจายการจ่ายกำลังไฟฟ้าตามจุดโหลดในพื้นที่ต่างๆ ทำให้ภาระในการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่งลดลง ช่วยควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ภายในขอบเขตตามที่มาตรฐานกำหนดเนื่องจาก DG มีโหมดการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส/อินดักชัน/อินเวอร์เตอร์ได้ ซึ่งพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละแบบนี้มีผล

ต่อระดับแรงดันไฟฟ้า ช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ระบบไฟฟ้าเมื่อเกิดความขัดข้องที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง ทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟาลดลง และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนสามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงรวมทั้งไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษด้วย [2] - [3] อย่างไรก็ตามการติดตั้ง DG อาจส่งผลเสียต่อระบบไฟฟ้าหากไม่ได้รับการออกแบบการติดตั้งอย่างรัดกุม [4] - [6] เช่นผลกระทบต่อแรงดันในระบบ กล่าวคือการติดตั้ง DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าหรือสูงกว่าขอบเขตจำกัดได้ เนื่องจากความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าที่ได้รับขึ้นอยู่กับที่ตั้งและสภาวะอากาศ ณ ขณะนั้น หรือในกรณีที่ DG ทำงานพร้อมกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (ตัวคุมค่าแรงดัน หรือ คาปาซิเตอร์) อาจทำให้ระดับแรงดันสูงกว่าขอบเขตจำกัดได้ หรือตัวคุมค่าแรงดันอาจไม่ช่วยยกระดับแรงดันในช่วงโหลดสูง หาก DG ขนาดใหญ่ติดตั้งอยู่ถัดจากตัวคุมค่าแรงดัน เนื่องจากตัวคุมค่าแรงดันจะเห็นระดับโหลดน้อยลงเพราะกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากสถานีไฟฟ้าย่อยลดลง ส่งผลให้ตัวคุมค่าแรงดันทำการชดเชยแรงดันให้แก่ระบบไม่เพียงพอ ทำให้แรงดันอาจต่ำกว่าขอบเขตจำกัดได้ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบต่อแรงดันในระบบอาจเกิดจากสาเหตุอื่น เช่น ความไม่แน่นอนของระดับโหลด โดยหากระดับโหลดสูงอาจทำให้แรงดันระบบต่ำกว่าขอบเขตได้ หรือ หากระดับโหลดต่ำก็อาจทำให้แรงดันระบบสูงกว่าขอบเขตได้ ปัญหาการเกิดแรงดันเกินขอบเขตเนื่องจากผลกระทบของโหลดสามารถป้องกันได้โดยติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน [7] - [8] ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น ตัวคุมค่าแรงดันช่วยรักษาระดับแรงดันให้คงที่ ณ จุดโหลดจุดหนึ่ง และคาปาซิเตอร์ช่วยชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบ อย่างไรก็ตามหากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันทำงานถี่เกินไปอาจทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ดังกล่าวสั้นลงได้

นอกเหนือจากอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่ได้กล่าวมานั้น ในปัจจุบันมีอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟหลายชนิดที่นำมาใช้ในการรักษาระดับแรงดันได้แก่ ตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต (Static Var Compensator: SVC) และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (Static Synchronous Compensator: STATCOM) โดยแต่ละอุปกรณ์นั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาถึงอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพียงชนิดเดียวคือ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตเท่านั้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรักษาระดับแรงดันในระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถสร้างแรงดันกระแสสลับสมมูล 3 เฟส ตลอดจนสามารถควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้ จึงเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความสนใจในการนำมาเพิ่มความสามารถในการรักษาระดับแรงดันให้กับระบบกำลังไฟฟ้า [9] ทั้งนี้ในเนื้อหาต่อไป ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตได้ถูกพิจารณาว่าเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการเข้าใจ

อุปกรณ์ที่สามารถควบคุมแรงดันได้นอกจากตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตแล้วนั้น DG ประเภทควบคุมได้ (Dispatchable Distributed Generation) ยัง

สามารถนำมาใช้ในการควบคุมแรงดันได้ด้วย โดย DG ชนิดนี้สามารถควบคุมกำลังการผลิตได้ เช่น DG กังหันก๊าซ และ DG แบบเผาไหม้ภายใน โดยกำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังสามารถควบคุมเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการกำลังไฟฟ้า ณ ขณะนั้นๆ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมแรงดัน DG ประเภทควบคุมได้ ควรทำงานควบคู่ไปกับตัวคุมค่าแรงดัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแรงดันสามชนิดคือ ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิต

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแรงดัน อย่างไรก็ตาม DG ประเภทควบคุมได้ไม่ได้ถูกพิจารณาควบคู่กับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันในการคำนวณ หรือ ไม่ได้พิจารณาถึงขีดจำกัดการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน โดยสามารถแสดงตัวอย่างงานวิจัยในอดีตได้ดังต่อไปนี้

งานวิจัย [10] ควบคุมแรงดันโดยใช้เพียงแค่ DG ประเภทควบคุมได้ โดยไม่ได้ทำงานควบคู่กับอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยดังกล่าวพิจารณามลกระทบจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนด้วย

งานวิจัย [11] ต้องการควบคุมแรงดันให้อยู่ภายในขีดจำกัด โดยพิจารณาจำนวนครั้งการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์) เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ ซึ่งควรที่จะพิจารณาเป็นค่าขีดจำกัดในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมากกว่าการพิจารณาเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์

งานวิจัย [12] ไม่ได้พิจารณาค่าขีดจำกัดจำนวนครั้งการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์) เช่นกัน แต่เพิ่มการประสานการทำงานระหว่างอุปกรณ์ควบคุมแรงดันกับ DG อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ไม่ได้กำหนดให้ DG สามารถควบคุมได้ หากเพียงแต่กำหนดขนาดให้มีค่าคงที่ ซึ่ง DG นั้นควรพิจารณาให้สามารถปรับขนาดได้

งานวิจัย [13] พิจารณาขีดจำกัดจำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน และพิจารณาคาปาซิเตอร์เป็นแบบชนิดขนาดคงที่ ซึ่งคาปาซิเตอร์ควรพิจารณาเป็นชนิดปรับค่าได้ อีกทั้ง DG ไม่สามารถควบคุมได้ หากเพียงแต่กำหนดขนาดให้มีค่าคงที่เช่นกัน

งานวิจัย [14] พิจารณาการควบคุมแรงดันแบบเวลาจริง (Real-time) โดยมีการพิจารณาขีดจำกัดค่าตัวประกอบกำลังของ DG และสามารถควบคุมขนาด DG ได้ แต่ฟังก์ชันจุดประสงค์กำหนดให้เป็นการชดเชยกำลังรีแอกทีฟโดยคาปาซิเตอร์ ซึ่งควรที่จะพิจารณาเป็นขีดจำกัดการชดเชยกำลังรีแอกทีฟจากคาปาซิเตอร์มากกว่าพิจารณาเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ อีกทั้งตัวคุมค่าแรงดันก็ไม่ได้ถูกคำนวณควบคู่ในงานวิจัยดังกล่าวด้วย

งานวิจัย [15] ได้ใช้การค้นหาแบบทาบในการหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิต (SVC) และได้พิจารณาถึงผลความไม่แน่นอนจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้กำหนดขนาดของ DG ให้มีค่าคงที่ อีกทั้งไม่ได้พิจารณาถึงตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์ด้วย

จากงานวิจัยในอดีตข้างต้นสามารถเห็นได้ว่า มีการประยุกต์ใช้ DG เพื่อควบคุมแรงดัน การคำนวณขีดจำกัดจำนวนครั้งการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์) ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อรักษาแรงดันให้อยู่ภายในขีดจำกัด มีการพิจารณาผลกระทบต่อแรงดันจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และ มีการเพิ่มการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ชดเชยกำลังรีแอกทีฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมแรงดัน ซึ่งจุดเด่นของในแต่ละงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่า DG สามารถใช้ในการควบคุมแรงดัน โดยทำงานควบคู่ไปกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันอย่างมีประสิทธิภาพได้ถ้ามีการวางแผนอย่างรอบคอบ อย่างไรก็ตาม ควรมีการคำนึงถึงขีดจำกัดการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด ตลอดจนผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และควรมีการเริ่มประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่มีความล้ำหน้าทางเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการพิจารณาขนาดของอุปกรณ์ 4 ชนิดคือ DG ประเภทควบคุมได้ ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต เพื่อช่วยควบคุมแรงดันให้อยู่เข้าใกล้ระดับแรงดันที่ต้องการ ในขณะที่ขีดจำกัดจำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์ได้นำมาร่วมการคำนวณในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยอาศัยหลักการค้นหาแบบทาบชนิดปรับตัวได้ และผลจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนและระดับโหลด ได้พิจารณาในขั้นนี้ด้วยโดยอาศัยการคำนวณแบบมอนติคาร์โล [16] กระบวนการทดสอบได้กำหนดให้ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนมีค่าตัวประกอบกำลังแบบยูนิตี และค่าตัวประกอบกำลังของ DG ประเภทควบคุมได้ จะถูกเลือกจากกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด ทั้งนี้วิธีที่นำเสนอทดสอบกับระบบจำหน่าย IEEE 34 บัส และระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 21 บัส

1.3 วัตถุประสงค์

1. รวบรวมหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (DG) ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต
2. ประยุกต์ใช้หลักการกระบวนการค้นหาที่เหมาะสมที่สุดเชิงศึกษาสำนึก (Heuristic search) ในขั้นตอนการหาค่าขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG ประเภทควบคุมได้ ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต

3. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของ DG ประเภทควบคุมได้ ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบให้เข้าใกล้ค่าระดับแรงดันที่ต้องการ

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาเฉพาะขีดจำกัดของ เงื่อนไขขนาด DG ประเภทควบคุมได้ เงื่อนไขพิกัดตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เงื่อนไขพิกัดขนาดตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต เงื่อนไขพิกัดจำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดันและคาปาซิเตอร์ เงื่อนไขพิกัดแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน เงื่อนไขพิกัดขนาดคาปาซิเตอร์ เงื่อนไขขนาดพิกัดแรงดัน เงื่อนไขพิกัดหม้อแปลง และ เงื่อนไขค่าพิกัดสายส่ง
2. พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแบบ 3 เฟสสมดุล และ ทำงานในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state)
3. พิจารณาอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน 3 ชนิด คือ ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
4. ไม่พิจารณาผลจากฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้ากำลัง
5. ไม่พิจารณาผลจากสภาวะชั่วคราวของคาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
6. พิจารณาแบบจำลองของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตให้เหมือนคาปาซิเตอร์
7. พิจารณา DG ประเภทควบคุมได้ให้สามารถควบคุมกำลังการผลิตได้อย่างอิสระ
8. พิจารณาความแปรปรวนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และ ระดับโหลดรายชั่วโมง เป็นการกระจายข้อมูลแบบการแจกแจงปกติ

1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการ ทฤษฎีพื้นฐาน และแบบจำลองของ DG ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
2. ศึกษาผลกระทบเมื่อติดตั้ง DG ทำงานพร้อมกับตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ในระบบจำหน่าย
3. ศึกษาหลักการค้นหาแบบทาบูนิตปรับตัวได้ และวิธีการประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวให้สอดคล้องกับงานวิจัย

4. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยหลักการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้เพื่อหาขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
5. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเพิ่มการพิจารณาความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดของแต่ละชั่วโมง
6. ทดสอบประสิทธิภาพโปรแกรมกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 บัส และระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้เกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
2. วิธีการค้นหาขนาดที่เหมาะสมของ DG ประเภทควบคุมได้ ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต โดยอาศัยหลักการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้ โดยไม่เกิดการละเมิดขีดจำกัดที่กำหนดอย่างมีประสิทธิภาพ

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในบทต่อไป

บทที่ 2 นำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และความไม่แน่นอนจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนและระดับโหลด

บทที่ 3 วิธีการค้นหาคำตอบเชิงคี่ษาสำนึก โดยนำเสนอหลักการและแนวคิดพื้นฐานของวิธีการค้นหาคำตอบแต่ละวิธีได้แก่ อัลกอริธึมการอบอุ่นจำลอง จินเนติกอัลกอริธึม การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยคโโลนีมด และการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้

บทที่ 4 กล่าวถึงรายละเอียดวิธีการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้ ซึ่งประกอบไปด้วยแนวคิดพื้นฐานของการค้นหา และรายละเอียดขั้นตอนการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้

บทที่ 5 อธิบายขั้นตอนการหาค่าเหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและอุปกรณ์ควบคุมแรงดันโดยวิธีการค้นหาแบบทาบูนิตปรับตัวได้ วิธีการทดสอบอัลกอริทึม และสรุปขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยวิธีที่นำเสนอ

บทที่ 6 แสดงวิธีการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอ โดยยกตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึมที่ระดับโหนด ณ เวลา 7.00 น.

บทที่ 7 นำเสนอการทดสอบ และ ผลการทดสอบวิธีที่นำเสนอ

บทที่ 8 บทสรุปของวิทยานิพนธ์ และข้อเสนอแนะต่างๆ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และความไม่แน่นอนจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด

2.1 การผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว [17], [19], [20], [21]

ปัจจุบันไม่มีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าเฉพาะที่ใช้นิยามคำจำกัดความของ DG หากเพียงแต่ในมาตรฐาน IEEE Standard 1547-2008 ระบุว่าเป็นการผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 10 MW หรือ สำหรับประเทศไทยนั้น DG คือ ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer; SPP) ซึ่งโดยทั่วไป SPP มีช่วงกำลังการผลิตอยู่ที่ 10 – 90 MW และ ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer; VSPP) โดย VSPP มีช่วงกำลังการผลิตน้อยกว่า 10 MW ดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่า DG เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เนื่องจากสามารถช่วยกระจายการจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้ลดภาระการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง ช่วยชะลอระยะเวลาในการสร้างสถานีไฟฟ้าและสายส่ง ส่งผลให้ต้นทุนการก่อสร้างต่ำลง และหากติดตั้ง DG ในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสม DG สามารถช่วยยกระดับแรงดัน ลดความสูญเสียในระบบ เพิ่มคุณภาพไฟฟ้า และเพิ่มระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม ระบบจำหน่ายไม่ได้ถูกออกแบบมาให้รองรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กล่าวคือระบบจำหน่ายถูกออกแบบมาให้มีการไหลของกำลังไฟฟ้าในทางทิศเดียว (One-way power flow) ดังนั้นการเพิ่ม DG ในระบบ อาจทำให้ระบบการทำงานแบบเดิมเปลี่ยนไปหากไม่ได้ทำการวางแผนอย่างรอบคอบ เช่น DG อาจทำให้การทำงานของระบบป้องกันเปลี่ยน และอาจทำให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้า นอกจากนี้ประเด็นที่สำคัญของ DG ไม่ได้มีเพียงปัญหาต่อระบบจำหน่ายเท่านั้น แต่ยังมีปัญหาทางด้านเทคนิคด้วย กล่าวคือ จะควบคุมการทำงานของ DG ใดๆโดยเฉพาะ DG ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นเจ้าของ หรือ ค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในการรับซื้อไฟฟ้าจาก DG ซึ่งประเด็นทั้งหมดที่กล่าวนี้ยังคงได้รับการศึกษาอย่างต่อเนื่อง

2.1.1 ประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก

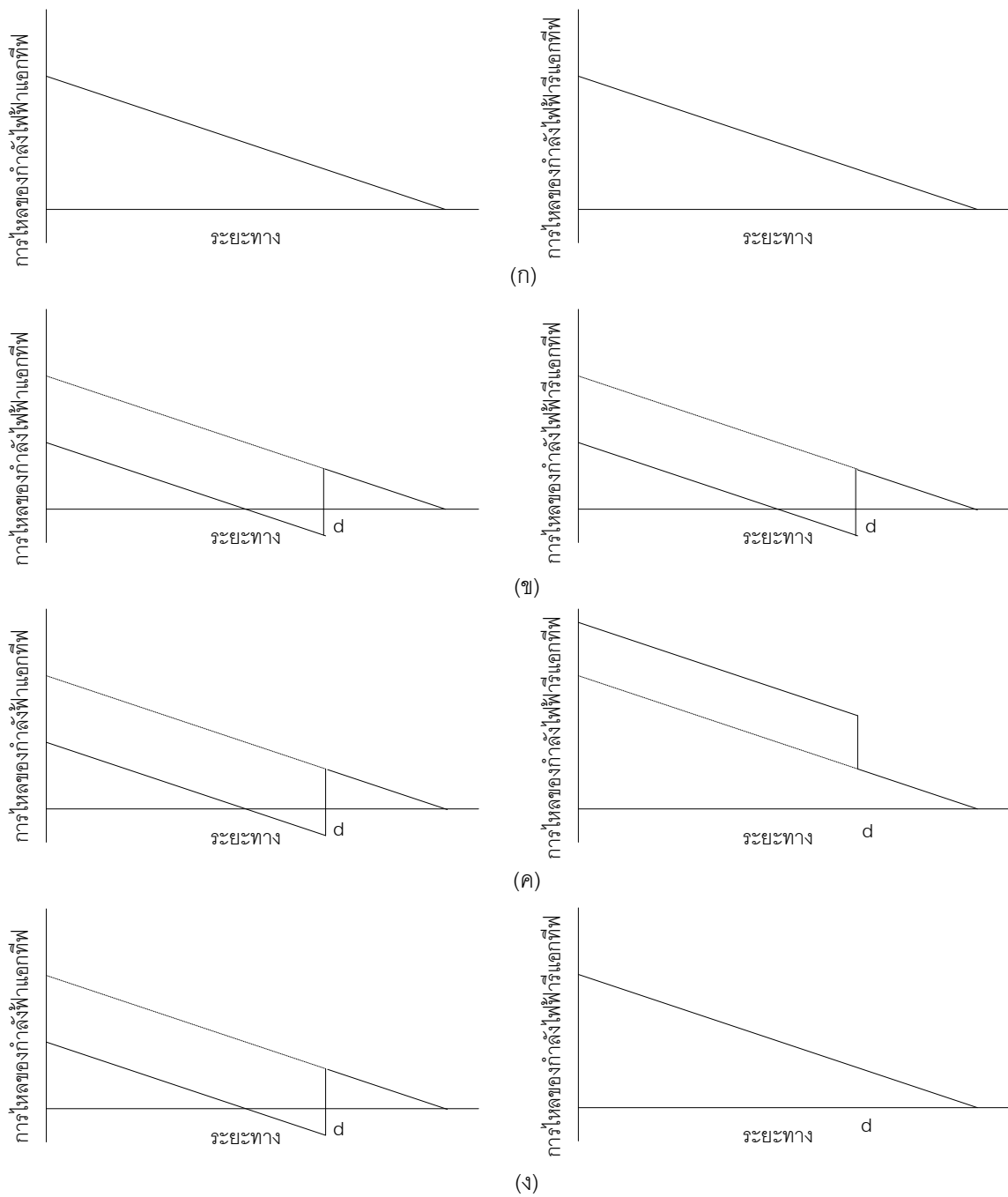
DG สามารถจำแนกประเภทได้ 3 ประเภทตามค่าตัวประกอบกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [17] - [18] ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ประเภทของ DG และค่าตัวประกอบกำลัง

ประเภท	ค่าตัวประกอบกำลัง
ซิงโครนัส	คาปาซิทีฟ หรือ อินдукทีฟ (โดยมากคาปาซิทีฟ)
อินдукชัน	อินдукทีฟ
อินเวอร์เตอร์	คาปาซิทีฟ อินдукทีฟ หรือ ยูนิตี (โดยมากยูนิตี)

การติดตั้ง DG แต่ละประเภทรันั้น ทำให้ผลการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) แยกทีฟและรีแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยเปลี่ยนแปลงจากเดิม [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้การไหลของกำลังไฟฟ้าทางบวก (เหนือแกน X) คือ ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากต้นสายไปจนสู่ปลายสายไปจน และการไหลของกำลังไฟฟ้าทางลบ (ใต้แกน X) คือทิศทางการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้าจากปลายสายไปจนสู่ต้นสายไปจน

การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบเมื่อไม่ได้ติดตั้ง DG แสดงในรูปที่ 2.1 (ก) การติดตั้ง DG แบบคาปาซิทีฟห่างจากสถานีไฟฟ้าเป็นระยะทาง d แสดงในรูปที่ 2.1 (ข) พบว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยลดลง เนื่องจาก DG จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบ ในขณะที่เมื่อติดตั้ง DG แบบอินдукทีฟห่างจากสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นระยะทาง d แสดงในรูปที่ 2.1 (ค) พบว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยลดลง แต่การไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยเพิ่มขึ้น เนื่องจาก DG แบบอินдукทีฟรับกำลังรีแอกทีฟจากระบบไฟฟ้า สำหรับการติดตั้ง DG แบบยูนิตีห่างจากสถานีไฟฟ้าเป็นระยะทาง d ในรูปที่ 2.1 (ง) พบว่ามีเพียงการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยลดลง แต่การไหลของกำลังไฟฟารีแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยยังคงมีปริมาณเท่าเดิม เนื่องจาก DG แบบยูนิตีจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้าสู่ระบบเท่านั้น



รูปที่ 2.1 การไหลของกำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟ

(ก) ไม่มี DG (ข) DG แบบคาปาซิทีฟ (ค) DG แบบอินดักทีฟ (ง) DG แบบยูนิตี

2.1.2 การพิจารณาแบบจำลองของ DG

โดยทั่วไป DG จ่ายกำลังไฟฟ้าโดยมีค่าตัวประกอบกำลังคงที่ คือ คาปาซิทีฟ อินดักทีฟ และ ยูนิตี เพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นอันเนื่องจากการจ่ายกำลังรีแอกทีฟที่ไม่คงที่เข้าสู่ระบบ เพราะฉะนั้นแบบจำลองของ DG โดยมากสามารถพิจารณาเป็น PQ บัส ซึ่งมีค่ากำลังแอกทีฟและ

รีแอกทีฟคองที อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาว่าตัวประกอบกำลังให้สอดคล้องกับ DG แต่ละประเภทด้วย [18]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณา DG เป็นสองรูปแบบ คือ DG ประเภทควบคุมได้ และ DG ประเภทควบคุมไม่ได้ (Non-dispatchable DG หรือ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน) โดย DG ประเภทควบคุมได้นั้น กำหนดให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยมีค่าตัวประกอบกำลังได้ทั้งค่าคาปาซิทีฟ อินดักทีฟ และยูนิตี อย่างไรก็ตาม DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนกำหนดให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยมีค่าตัวประกอบกำลังแบบยูนิตีเท่านั้น เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาว่า DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนสร้างปัญหาต่อระบบไฟฟ้าจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟที่ไม่คงที่เข้าสู่ระบบเท่านั้น แต่จะไม่สร้างปัญหาจากการจ่ายกำลังรีแอกทีฟที่ไม่คงที่เข้าสู่ระบบ

2.1.3 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้านครหลวง และ IEEE Std 1547-2008 [19], [20], [21]

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้คำนึงถึงมาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ไว้ด้วย ซึ่งได้ถูกนำมาใช้พิจารณารวมเข้าไปในส่วนของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้ได้แสดงมาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG จากสามมาตรฐาน คือ มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง และมาตรฐานของ IEEE Std 1547-2008 โดยสามารถนำเสนอแสดงได้ดังต่อไปนี้

2.1.3.1 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจากการเดินเครื่อง DG ให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิกาดังแสดงในตารางที่ 2.2 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ (ค่าสูงสุด)	ภาวะปกติ (ค่าต่ำสุด)	ภาวะฉุกเฉิน (ค่าสูงสุด)	ภาวะฉุกเฉิน (ค่าต่ำสุด)
115 กิโลโวลต์	120.7	109.2	126.5	103.5
69 กิโลโวลต์	72.4	65.5	75.9	62.1
33 กิโลโวลต์	34.7	31.3	36.3	29.7
22 กิโลโวลต์	23.1	20.9	24.2	19.8
380 โวลต์	418	342	418	342
220 โวลต์	240	200	240	200

จากตารางที่ 2.2 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดเกณฑ์ของระดับแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดันต่างๆ โดยระบบจำหน่ายแรงดัน 22 kV – 115 kV ในสภาวะปกติให้มีระดับแรงดันอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของระบบไฟฟ้า และในสภาวะฉุกเฉินให้มีระดับแรงดันอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ของระบบไฟฟ้า ส่วนระบบแรงดันต่ำให้มีระดับแรงดันอยู่ในช่วงประมาณ $\pm 10\%$ ของระบบไฟฟ้าทั้งในสภาวะปกติและสภาวะฉุกเฉิน

2.1.3.2 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของการไฟฟ้านครหลวง

ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจากการเดินเครื่อง DG ให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวงดังแสดงในตารางที่ 2.3 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ (ค่าสูงสุด)	ภาวะปกติ (ค่าต่ำสุด)	ภาวะฉุกเฉิน (ค่าสูงสุด)	ภาวะฉุกเฉิน (ค่าต่ำสุด)
115 กิโลโวลต์	118.0	113.0	123.0	113.0
69 กิโลโวลต์	71.0	67.0	72.5	67.0
24 กิโลโวลต์	23.6	21.8	24.0	21.6
12 กิโลโวลต์	11.8	10.9	12.0	10.8
400 โวลต์	410	371	416	362
230 โวลต์	237	214	240	209

จากตารางที่ 2.3 การไฟฟ้านครหลวงได้กำหนดเกณฑ์ของระดับแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดันต่างๆ โดยระดับแรงดันที่ต่างกันจะมีช่วงขอบเขตการทำงานที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามในสภาวะปกติ และในสภาวะฉุกเฉิน ค่าของระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละระดับแรงดัน ได้ถูกกำหนดให้อยู่ในภายในช่วง $\pm 10\%$ ของระดับแรงดัน

อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เน้นเพียงระบบทดสอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเท่านั้น ดังนั้นวิธีที่นำเสนอจึงอ้างอิงการสอบเทียบกับมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเท่านั้น

2.1.3.3 มาตรฐานการควบคุมแรงดันจากการเชื่อมต่อ DG ของ IEEE Std 1547-2008

ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจากการเดินเครื่อง DG ให้สอดคล้องกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อตามข้อกำหนดดังนี้

- 1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวห้ามควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อทั่วไป (Point of Common Coupling หรือ PCC) ด้วยตัวเอง และห้ามทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ให้บริการในโครงข่ายระบบไฟฟ้าเกินค่ากำหนดของ ANSI C84.1-2006 [22]
- 2) พิกัดแรงดันที่จุดเชื่อมต่อได้ระบุใน ANSI C84.1 Range A ได้แสดงขีดจำกัดแรงดันระดับต่างๆ ที่มีระดับแรงดันสูงกว่า 120 - 1,200 กิโลโวลต์ สำหรับระบบไฟฟ้า 60 Hz นอกจากนี้ขอบเขตแรงดันต่ำสุด/สูงสุดที่เกิดจากสภาวะไม่ปกติที่เกิดขึ้นๆ เช่น การเกิดความผิดพลาดหรือการตัดโหลด ได้ถูกรวมไว้แล้วเช่นกัน
- 3) โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดจากแรงดันปกติที่ยอมรับได้ ณ จุดเชื่อมต่อคือ $\pm 5\%$ ระบุใน ระบุใน ANSI C84.1-2006

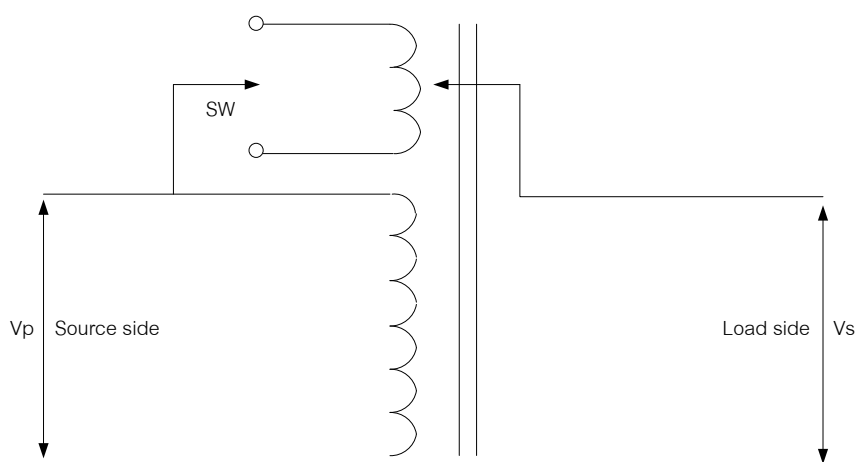
2.2 ตัวคุมค่าแรงดัน (Voltage regulator)

การไฟฟ้ามีหน้าที่สำคัญสิ่งหนึ่งคือ การจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยรักษาระดับแรงดันให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ดังนั้นผู้ผลิตไฟฟ้าจึงต้องควบคุมระดับแรงดันตลอดเวลา โดยการเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ระยะทางจากสถานีไฟฟ้าถึงจุดโหลด และระดับโหลด เป็นต้น ซึ่งในระบบจำหน่ายมักประสบปัญหาแรงดันต่ำที่ปลายทาง เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานของสายป้อนในระยะทางที่ยาวขึ้น หรือ ปัญหาแรงดันสูงเมื่อ DG ทำงานในขณะที่มีระดับโหลดต่ำ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการประยุกต์ใช้ตัวคุมค่าแรงดัน (Voltage regulator) ซึ่งคือหม้อแปลงอัตโนมัติ (Auto transformer) ที่มีตัวเปลี่ยนจุดแยก หรือ แท็ป (Taps) ให้เลือกหลายชั้นให้เลือกในปรับระดับแรงดัน โดยสามารถใช้ควบคุม

แรงดันได้ทั้งฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิได้ ปัจจุบันมีการใช้ตัวคุมค่าแรงดันอย่างแพร่หลายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า รายละเอียดของตัวคุมค่าแรงดันได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

2.2.1 หลักการพื้นฐานของตัวคุมค่าแรงดัน [8], [17], [23]

ตัวคุมค่าแรงดันหรือหม้อแปลงอัตโนมัติที่มีแท็บให้เลือกหลายชั้น โดยในระบบจำหน่ายทั่วไปตัวคุมค่าแรงดันสามารถปรับแท็บได้ 32 ชั้นๆ ละ $\frac{5}{8}$ % ทำให้ควบคุมแรงดันได้ในช่วง $\pm 10\%$ ของระดับแรงดันปกติ การทำงานของตัวคุมค่าแรงดันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าตัวคุมค่าแรงดันสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้



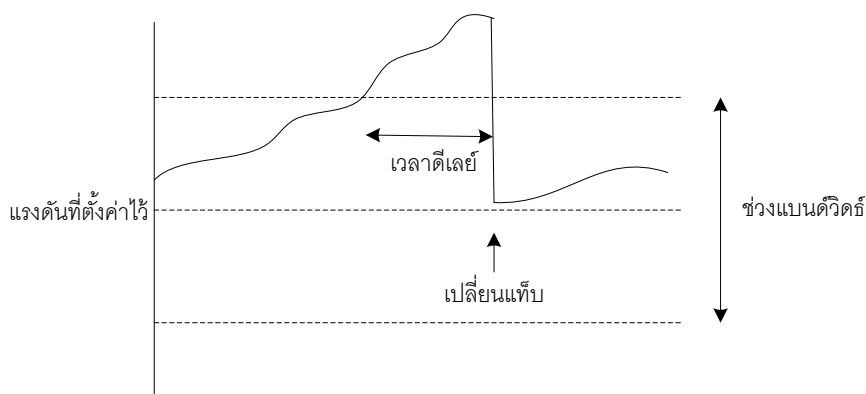
รูปที่ 2.2 การทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของหม้อแปลงด้วยตัวเปลี่ยนจุดแยกที่ทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้นั้นมีด้วยกันสองชนิดคือ

- 1) ตัวเปลี่ยนจุดแยกขณะไร้อโหลด (Off-load tap changing) จะเปลี่ยนแท็บได้เมื่อปลดหม้อแปลงออกจากระบบไฟฟ้าเสียก่อน ตัวอย่างอัตราส่วนของแท็บ เช่น $\pm 5\%$, $\pm 2.5\%$ ตัวเปลี่ยนจุดแยกประเภทนี้ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้งในสายจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 2) ตัวเปลี่ยนจุดแยกขณะมีโหลด (Tap changing under load) สามารถเปลี่ยนแท็บได้ในขณะที่หม้อแปลงจ่ายโหลดในระบบไฟฟ้า และสามารถเปลี่ยนแท็บได้ในช่วงกว้าง เช่น $\pm 20\%$ ด้วยระดับขั้นเท่ากับหรือสูงกว่า $\pm 0.5\%$ เนื่องจากแท็บชนิดนี้มีราคาสูงจึงใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิกัดกำลังสูงที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งการเปลี่ยนแท็บสามารถทำได้โดยอัตโนมัติ

ตัวคุมค่าแรงดันจะมีรีเลย์ที่ใช้ควบคุมการเปลี่ยนแท็บ โดยสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งต้องมีการตั้งค่าพื้นฐานเพื่อควบคุมการเปลี่ยนแท็บดังต่อไปนี้

- 1) ตั้งค่าแรงดัน คือ การตั้งค่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการ
- 2) ตั้งค่าช่วงแบนด์วิดท์ โดยช่วงแบนด์วิดท์ คือ ค่าผลต่างระหว่างแรงดันที่วัดได้กับแรงดันที่ต้องการ ซึ่งช่วงแบนด์วิดท์นี้ทางผู้ควบคุมต้องเป็นผู้กำหนดขึ้นเอง ทั้งนี้การเปลี่ยนแท็บจะเกิดขึ้นเมื่อค่าผลต่างดังกล่าวเกินครึ่งหนึ่งของช่วงแบนด์วิดท์ ช่วงแบนด์วิดท์ควรมีค่าอย่างน้อยเท่ากับ 2 เท่าของค่าแท็บ 1 ชั้น เช่น ตัวคุมค่าแรงดันแบบ 32 ชั้น ควรมีช่วงแบนด์วิดท์อย่างน้อยเท่ากับ 5/4 % โดยทั่วไปมักกำหนดช่วงแบนด์วิดท์ที่ 2 V และ 2.5 V แต่ไม่ควรเกิน 3 - 3.5 V
- 3) ตั้งค่าเวลาดีเลย์ โดยเวลาดีเลย์ คือ ค่าระยะเวลานับจากระดับแรงดันเกินครึ่งหนึ่งของช่วงแบนด์วิดท์ถึงเวลาที่ตัวคุมค่าแรงดันเริ่มทำการปรับแท็บ อย่างไรก็ตามหากเวลาดีเลย์นานขึ้นการเปลี่ยนแท็บจะลดลง โดยทั่วไปเวลาดีเลย์มีค่าประมาณ 30 - 60 วินาที



รูปที่ 2.3 การควบคุมการเปลี่ยนแท็บ

หากระดับแรงดันยังคงเกินขอบเขตหลังจากปรับแท็บแล้ว ตัวคุมค่าแรงดันจะทำการปรับแท็บเพิ่ม/ลดขึ้นจนกว่าระดับแรงดันถูกควบคุมให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ช่วงแบนด์วิดท์ที่มีค่าสูงขึ้นจะช่วยลดจำนวนการปรับแท็บไม่ให้ถี่เกินไป ซึ่งควรตั้งค่าช่วงแบนด์วิดท์ให้มีค่าดังที่ได้กล่าวข้างต้น ตัวคุมค่าแรงดันส่วนใหญ่มักเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) โดยสามารถควบคุมแรงดันตามทิศทางกรไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ซึ่งหากตรวจจับได้ว่าการไหลของกำลังไฟฟ้ากลับทิศ (Reverse power flow) ตัวคุมค่าแรงดันจะเปลี่ยนมาควบคุมระดับแรงดันทางฝั่งปรัภูมิแทน

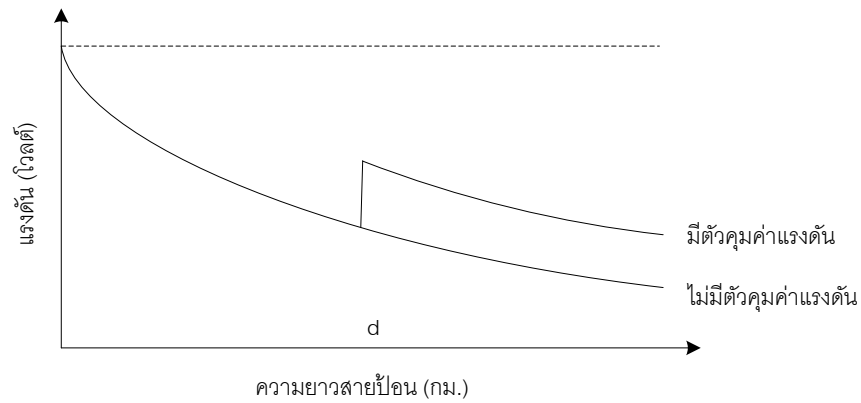
นอกจากนี้ตัวคุมค่าแรงดันยังมีตัวนับจำนวนครั้งการทำงานด้วย ซึ่งตัวนับจำนวนนี้จะช่วยเตือนว่าควรเปลี่ยนมาใช้อุปกรณ์ตัวใหม่แล้วหรือไม่ ตัวคุมค่าแรงดันถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการเปลี่ยนแท็บมากกว่าหนึ่งล้านครั้งตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งอาจมีการเปลี่ยนแท็บ 70 ครั้งต่อวันหรือ

25,550 ครั้งต่อปี ตัวนับจำนวนยังทำหน้าที่เป็นสัญญาณเตือนที่ดี คือ การใช้งานที่ถี่เกินไปสามารถบอกเป็นนัยว่ามีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้น เช่น ช่วงแบนด์วิดท์หรือเวลาดีเลย์น้อยเกินไป หรือแรงดันป้อนภูมิเกิดความแปรปรวนอย่างมาก เป็นต้น อย่างไรก็ตามหากตัวคุมค่าแรงดันทำงานเป็นจำนวนบ่อยครั้ง หน้าสัมผัสของตัวเปลี่ยนจุดอาจเสื่อมสภาพเร็วมากขึ้น ซึ่งเป็นปัญหาที่พบในทางปฏิบัติ ดังนั้นตัวคุมค่าแรงดันอาจถูกควบคุมให้มีจำนวนครั้งการทำงานเพียงวันละ 3 - 4 ครั้งเท่านั้น

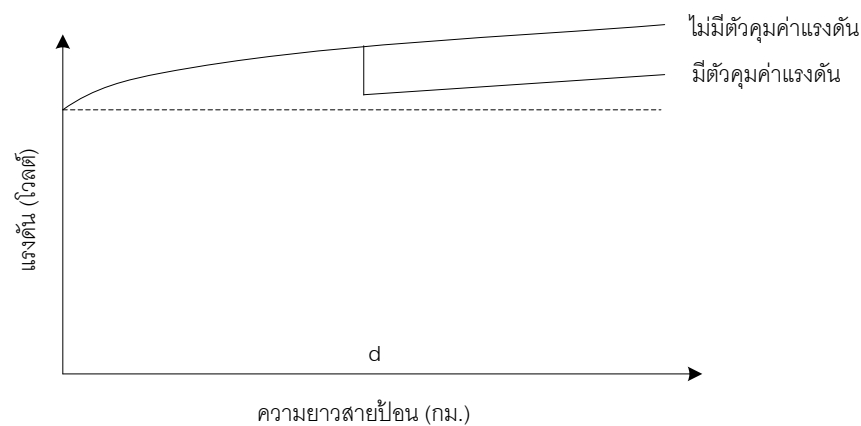
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดให้ตัวควบคุมแรงดันสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงเทียบได้ด้วยตัวเอง (Local control) โดยไม่ขึ้นอยู่กับการสั่งการจากสถานีไฟฟ้า ทั้งนี้เทียบของตัวควบคุมแรงดันและเวลาในการสวิตช์จะถูกเลือกโดยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งได้นำเสนอในบทที่ 5

2.2.2 ผลกระทบของตัวคุมค่าแรงดันต่อแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [23]

ในการประยุกต์ใช้ตัวคุมค่าแรงดันเพื่อแก้ปัญหาแรงดันปลายทางสูง หรือแรงดันปลายทางต่ำ สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงผลของแรงดันในระบบ โดยทำการติดตั้งตัวคุมค่าแรงดันที่ระยะทาง d จากสถานีไฟฟ้าย่อย พบว่าตัวคุมแรงดันมีผลกระทบเล็กน้อยต่อระดับแรงดันของสายป้อนในช่วงสถานีไฟฟ้าย่อยถึงตำแหน่งติดตั้งตัวคุมค่าแรงดัน โดยแรงดันของสายป้อนจะถูกยกสูงขึ้นหลังตำแหน่งที่ติดตั้งตัวคุมแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาแรงดันต่ำที่พบบ่อยในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และ แรงดันของสายป้อนจะถูกดึงต่ำลงหลังตำแหน่งที่ติดตั้งตัวคุมแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ อาจเกิดจากการทำงานของ DG ในช่วงโหลดต่ำ ทำให้ระดับแรงดันสูงเกินไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 การติดตั้งตัวคุมค่าแรงดันเพื่อแก้ปัญหาแรงดัน
(ก) ปัญหาแรงดันปลายทางต่ำ (ข) ปัญหาแรงดันปลายทางสูง

2.3 คาปาซิเตอร์ (Capacitor) [8], [17]

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า ปัญหาในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่พบโดยทั่วไปคือ ปัญหาแรงดันตก และ ปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ซึ่งการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านตัวต้านทานของสายป้อน โดยกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านนี้จำเป็นในการจ่ายกำลังแอกทีฟและกำลังรีแอกทีฟ อย่างไรก็ตามกำลังรีแอกทีฟนี้ไม่มีผลต่อค่าไฟฟ้า แต่จำเป็นต้องจ่ายออกไปเพื่อใช้งานในอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดเช่น โหลดชนิดเหนี่ยวนำ เป็นต้น คาปาซิเตอร์สามารถทำหน้าที่ชดเชยการจ่ายกำลังรีแอกทีฟได้ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่านสายป้อนมีปริมาณลดลง จึงทำให้การสูญเสียกำลังไฟฟ้าลดลง และส่งผลไปถึงการทำให้ระดับแรงดันสูงขึ้นด้วย ปัจจุบันคาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในการช่วยลดปัญหาการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และลดปัญหาแรงดันตก เนื่องจากประโยชน์ที่ได้รับจากการประยุกต์ใช้ และราคาต้นทุนไม่สูง อย่างไรก็ตาม

ตามหากควบคุมการใช้งานไม่เหมาะสม กำลังรีแอกทีฟจากคาปาซิเตอร์อาจส่งผลให้เกิดความสูญเสียกำลังไฟฟ้ามากขึ้น หรือ ทำให้ระดับแรงดันสูงเกินขอบเขตได้

การไฟฟ้ามักติดตั้งคาปาซิเตอร์อยู่สองตำแหน่งคือ สถานีไฟฟ้าย่อย และฟีดเดอร์ในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นประเภทติดตั้งบนพื้น (Pad-mounted) ซึ่งมีขนาดการจ่ายกำลังรีแอกทีฟที่มากขึ้น แต่ใช้พื้นที่ในการติดตั้งใหญ่ขึ้นเช่นกัน ส่วนคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในฟีดเดอร์ส่วนใหญ่เป็นประเภทติดตั้งตามเสาไฟฟ้า (Pole-mounted) ซึ่งเป็นประเภทที่ต้นทุนต่ำที่สุดที่จะติดตั้งในระบบจำหน่าย

คาปาซิเตอร์อาจติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง สวิตช์ หรือฟิวส์เพิ่มเติม เพื่อป้องกันความเสียหายจากระบบไฟฟ้าที่อาจเกิดต่อคาปาซิเตอร์ และเพื่อสะดวกต่อการซ่อมแซม อย่างไรก็ตาม จุดประสงค์ของการเลือกตำแหน่งการติดตั้งคาปาซิเตอร์มีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง คือ การติดตั้งคาปาซิเตอร์ในสถานีไฟฟ้าย่อย ต้องการการควบคุมที่แม่นยำกว่า ส่วนการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในฟีดเดอร์ระบบจำหน่ายจะติดตั้งใกล้จุดโหลดมากกว่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายกำลังรีแอกทีฟ ยกเว้นระดับแรงดันไฟฟ้า และลดความสูญเสียในสายป้อน ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในสถานีไฟฟ้าย่อย และฟีดเดอร์ในระบบจำหน่าย

ตารางที่ 2.4 คาปาซิเตอร์ในสถานีไฟฟ้าย่อย และคาปาซิเตอร์ในฟีดเดอร์ในระบบจำหน่าย [17]

	คาปาซิเตอร์ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าย่อย	คาปาซิเตอร์ติดตั้งในฟีดเดอร์ระบบจำหน่าย
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถควบคุมได้ง่าย - เลือกตำแหน่งในการติดตั้งที่เหมาะสมง่ายกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ลดการสูญเสียในสายป้อน - ลดปัญหาแรงดันตกในสายป้อน - ความจุการส่งกำลังไฟฟ้าของสายป้อนสูงขึ้น
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่ช่วยลดการสูญเสียในสายป้อน - ไม่ช่วยลดปัญหาแรงดันตก - ต้นทุนสูงกว่า 	<ul style="list-style-type: none"> - ควบคุมยากกว่า - ปัญหาจากการเลือกขนาดและตำแหน่งในการติดตั้งกลายเป็นประเด็นที่สำคัญ

อย่างไรก็ตามทางการไฟฟ้าพบว่าบางครั้งคาปาซิเตอร์ในฟีดเดอร์ระบบจำหน่ายมีความเชื่อถือได้ของการสวิตช์คาปาซิเตอร์น้อยกว่าที่กำหนด และการสวิตช์ใช้งานคาปาซิเตอร์อาจไม่สอดคล้องกับเวลาที่ระบบต้องการกำลังรีแอกทีฟมากที่สุด

ในทางปฏิบัติคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งอาจเป็น 2 แบบคือ

- 1) แบบติดตั้งถาวร (Fixed capacitor bank) คือ ชุดตัวเก็บประจุที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าตลอดเวลา
- 2) แบบสวิตช์เข้า-ออก (Switched capacitor bank) คือ ชุดตัวเก็บประจุที่สวิตช์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเมื่อต้องการใช้งาน และสวิตช์ออกจากระบบไฟฟ้าเมื่อไม่ต้องการใช้งาน

โดยคาปาซิเตอร์แบบติดตั้งถาวรสามารถติดตั้งและเลือกขนาดได้ง่ายกว่า แต่คาปาซิเตอร์แบบสวิตช์เข้า-ออก จะติดตั้งและเลือกขนาดที่เหมาะสมได้ยากกว่ามาก ซึ่งคาปาซิเตอร์แบบติดตั้งถาวรมักจะมีข้อจำกัดในสถานะที่สายป้อนมีระดับโหลดต่ำหรือสูง เนื่องจากคาปาซิเตอร์ที่ขนาดสูงเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินในช่วงที่มีโหลดต่ำ และคาปาซิเตอร์ที่ขนาดต่ำเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหาแรงดันต่ำในช่วงที่มีโหลดสูง ดังนั้นคาปาซิเตอร์ส่วนใหญ่จะเป็นแบบสวิตช์เข้า-ออก โดยถูกควบคุมจากศูนย์การควบคุมส่วนกลาง หรือศูนย์การควบคุมรายย่อยแม้ว่าจะเลือกขนาดที่เหมาะสมได้ยากก็ตาม

สำหรับทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ทั้งในสถานีไฟฟ้าและในสายจำหน่าย โดยคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในสายจำหน่ายแบ่งเป็น 2 แบบคือแบบติดตั้งถาวร และแบบสวิตช์เข้า-ออกดังกล่าวข้างต้น

2.3.1 ขนาดของคาปาซิเตอร์ [24]

IEEE Standard 18-2002 ได้ระบุถึงมาตรฐานของคาปาซิเตอร์ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้งาน ซึ่งขนาดของคาปาซิเตอร์ได้นำแสดงในตารางที่ 2.5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.5 ขนาดคาปาซิเตอร์ทั่วไปในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEEE Standard 18-2002

Volts, rms (Terminal-to-Terminal)	ขนาดคาปาซิเตอร์ (kVAr)
216	5, 7.5, 13.3, 20, และ 25
240	2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, และ 50
480, 600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60, และ 100
2,400	50, 100, 150, 200, 300, และ 400
2,770	50, 100, 150, 200, 300, 400, และ 500
4,160 และ 4,800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, และ 800

ตารางที่ 2.5 ขนาดคาปาซิเตอร์ทั่วไปในระบบจำหน่ายตามมาตรฐาน IEEE Standard 18-2002 (ต่อ)

Volts, rms (Terminal-to-Terminal)	ขนาดคาปาซิเตอร์ (kVAr)
6,640, 7,200, 7,620, 7,960, 8,320, 9,540, 9,960, 11,400, 12,470, 13,280, 13,800, 14,400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, และ 800
15,125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, และ 800
19,920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, และ 800
20,800, 21,600, 22,800, 23,800, 24,940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, และ 800

สำหรับขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6 ต่อไปนี้ [25]

ตารางที่ 2.6 ขนาดของคาปาซิเตอร์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ชนิดของคาปาซิเตอร์	ขนาดคาปาซิเตอร์ (kVAr)
แบบติดตั้งถาวร	300, 500 และ 600
แบบสวิทช์เข้า-ออก	1,200 และ 1,500

2.3.2 ผลกระทบของคาปาซิเตอร์ต่อแรงดันในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [17]

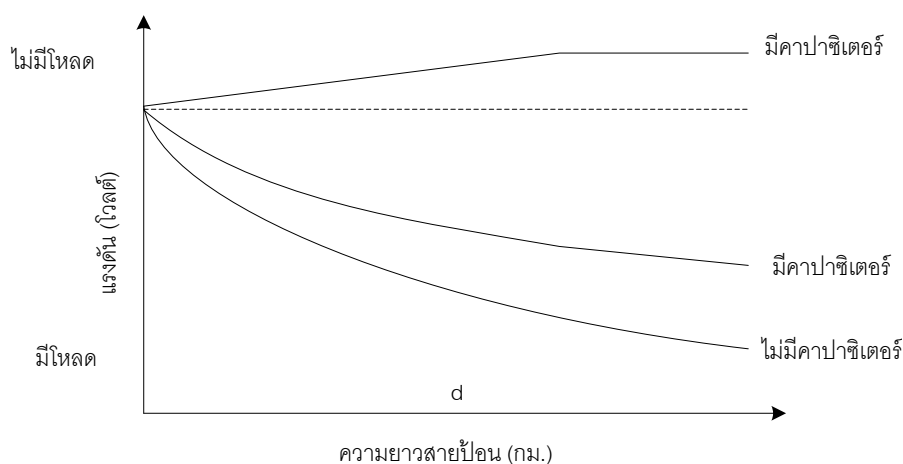
การติดตั้งคาปาซิเตอร์ส่งผลต่อระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันไปตามจุดติดตั้ง เช่น

- 1) ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง – ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ และในแต่ละผู้ใช้ไฟฟ้า
- 2) ปรับปรุงตัวประกอบกำลังและลดแรงดันตกคร่อม – ติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 3) ปรับปรุงสมดุลของกำลังรีแอกทีฟและควบคุมแรงดัน – ติดตั้งในสถานีไฟฟ้าของระบบจำหน่าย

การจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของคาปาซิเตอร์ส่งผลให้แรงดันของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง บางกรณีอาจส่งผลให้ระดับแรงดันสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดได้ จึงจำเป็นต้องวางแผนอย่างรัดกุม จากผลกระทบของการจ่ายกำลังรีแอกทีฟจากคาปาซิเตอร์

การที่จะทำให้ระดับแรงดันถูกยกขึ้นทั้งระบบได้นั้นสามารถกระทำโดยการติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่ปลายฟีดเดอร์ อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่ควรติดตั้งคาปาซิเตอร์มากที่สุด คือตำแหน่งที่

ต้องการการยกกระดับแรงดัน ผลจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์เข้าในระบบไฟฟ้ากำลังแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 การติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อยกกระดับแรงดัน

จากรูปพื้นที่เหนือเส้นประคือระบบที่ไม่มีโหลด และ พื้นที่ใต้เส้นประคือระบบที่มีโหลด จะเห็นว่าคาปาซิเตอร์ส่งผลให้แรงดันเพิ่มขึ้นตลอดทั้งสายป้อน ซึ่งแตกต่างไปจากตัวคุมค่าแรงดัน โดยคาปาซิเตอร์จะยกกระดับแรงดันที่ต้นทางด้วย อย่างไรก็ตาม สำหรับการติดตั้งใช้คาปาซิเตอร์แบบปรับค่าได้ในการควบคุมระดับแรงดัน โดยทั่วไปผู้ผลิตไฟฟ้าจะจำกัดให้มีการควบคุมแรงดันได้ 3 - 4 % ของแรงดันปกติเท่านั้น

2.3.3 การควบคุมคาปาซิเตอร์ [17]

การควบคุมคาปาซิเตอร์สามารถอาศัยการควบคุมด้วยวิธีการต่างๆดังต่อไปนี้

- 1) เวลา: เป็นวิธีการควบคุมที่ง่ายที่สุด โดยตัวควบคุมจะสวิตช์ใช้งานหรือเลิกใช้งานตามเวลาที่กำหนดในแต่ละวัน และสามารถกำหนดขีดจำกัดจำนวนครั้งการสวิตช์ด้วย
- 2) อุณหภูมิ: ตัวควบคุมจะสวิตช์ใช้งานหรือเลิกใช้งานตามระดับอุณหภูมิ โดยทั่วไปจะตั้งค่าให้คาปาซิเตอร์ทำงานที่ 29.4°C ถึง 32.2°C และตั้งค่าให้หยุดทำงานที่ 23.9°C ถึง 26.7°C
- 3) แรงดัน: คาปาซิเตอร์จะสวิตช์ใช้งานหรือเลิกใช้งานตามระดับแรงดัน โดยการไฟฟ้าจะต้องกำหนดค่าแรงดันสูงสุดเหมือนในกรณีของตัวคุม) ดีวีดีต่ำสุด เวลาดีเลย์ และช่วงแบน/ เพื่อป้องกันการสวิตช์ใช้งานของคาปาซิเตอร์มากเกินไป การควบคุมวิธีนี้ (ค่าแรงดันเหมาะสำหรับการใช้งานเมื่อคาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมแรงดัน
- 4) วาร์ (VArS): คาปาซิเตอร์ใช้การวัดกำลังรีแอกทีฟเพื่อพิจารณาการสวิตช์ใช้งานหรือเลิกใช้งาน ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่แม่นยำที่สุดเพื่อให้คาปาซิเตอร์สวิตช์ทำงานในเวลาที่ต้องการต่อการชดเชยแรงดัน

- 5) ค่าตัวประกอบกำลัง: วิธีการทำงานเหมือนการควบคุมแบบวาร์ เพียงแต่การสวิตช์ใช้งานหรือเลิกใช้งานโดยการวัดค่าตัวประกอบกำลัง อย่างไรก็ตาม วิธีการควบคุมนี้ไม่เป็นที่นิยมของการไฟฟ้า
- 6) กระแสไฟฟ้า: คาปาซิเตอร์จะสวิตช์ใช้งานหรือเลิกใช้งานตามระดับกระแสไฟฟ้าที่วัดจากคาปาซิเตอร์ถึงจุดปลายฟีดเดอร์ การควบคุมวิธีนี้ให้ประสิทธิภาพได้ไม่ดีเท่าการควบคุมแบบวาร์ แต่การควบคุมวิธีนี้จะให้ผลดีในสภาวะโหลดสูง

การควบคุมคาปาซิเตอร์แบบสวิตช์เข้า-ออกที่ทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้นั้นเป็นแบบอัตโนมัติส่วนใหญ่ควบคุมโดยใช้การตั้งเวลา บางส่วนควบคุมโดยใช้การตั้งค่ากำลังรีแอกทีฟ และบางส่วนมีการติดตั้ง RTU (Remote Terminal Unit) ที่ชุดตัวเก็บประจุแบบสวิตช์เข้า-ออก

สำหรับชุดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้า เนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต้องรักษาตัวประกอบกำลังให้มีค่าสูงกว่า 90% ที่จุดซื้อขายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต จึงต้องใช้ชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าซึ่งเป็นจุดซื้อขายไฟฟ้าช่วยในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง สถานีไฟฟ้าระดับ 22 kV และ 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุแบบสวิตช์เข้า-ออก ขนาด 7.2 MVar แบ่งเป็น 3 ชุด ชุดละ 2.4 MVar ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานในทุกสถานีไฟฟ้าโดยไม่คำนึงถึงปริมาณโหลด [25]

เช่นเดียวกันกับตัวคุมค่าแรงดัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้คาปาซิเตอร์สามารถควบคุมการสวิตช์ และเลือกขนาดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ด้วยตัวเอง โดยไม่ขึ้นอยู่กับคำสั่งจากสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะถูกละเลือกเวลาการสวิตช์ และเลือกขนาดโดยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด

2.4 ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (Static Synchronous Compensator, STATCOM)

ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต หรือ STATCOM เป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ต่อขนานกับจุดเชื่อมต่อกับระบบกำลังไฟฟ้า โดยตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตสามารถควบคุมการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จุดเชื่อมต่อได้อย่างอิสระ อีกทั้งยังสามารถควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อได้ด้วย [9]

ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตสามารถช่วยในการปรับปรุงพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

- 1) สามารถควบคุมการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่จุดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า
- 2) สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าเชิงพลวัตได้ทั้งระบบส่งและระบบจำหน่าย
- 3) แก้ไขปัญหาเสถียรภาพชั่วขณะ

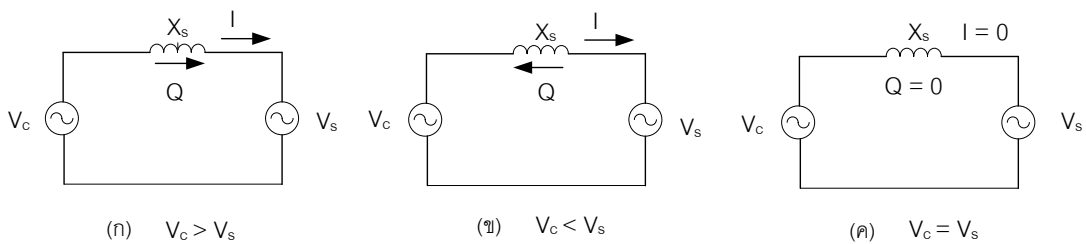
นอกจากนี้ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตยังมีประโยชน์อย่างอื่นอีก ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

- 1) ตัวขดเซียงโครนัสสถิตมีขนาดเล็ก เนื่องจากขนาดของคอนเวอร์เตอร์มีขนาดเล็ก
- 2) ตัวขดเซียงโครนัสสถิตสามารถลดขนาดของพื้นที่ในการติดตั้ง และ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้
- 3) ตัวขดเซียงโครนัสสถิตเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่อธรรมชาติน้อย

ตัวขดเซียงโครนัสสถิตทำหน้าที่คล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสในอุดมคติคือสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าสมดุล 3 เฟสที่ความถี่มูลฐาน สามารถควบคุมขนาดและมุมเฟสของแรงดันได้ แต่ตัวขดเซียงโครนัสสถิตไม่มีความเฉื่อยที่เกิดจากการหมุนของ โรเตอร์เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัส ทำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว

2.4.1 หลักการทำงานของตัวขดเซียงโครนัสสถิต [26], [27]

ตัวขดเซียงโครนัสสถิตสามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟระหว่างตัวขดเซียงโครนัสสถิตและระบบกำลังไฟฟ้าสามารถควบคุมได้โดยการปรับขนาดแรงดันของตัวขดเซียงโครนัสสถิตดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) - รูปที่ 2.6 (ค) ทั้งนี้กำหนดให้แรงดันของตัวขดเซียงโครนัสสถิตแทนด้วย V_c และ แรงดันของระบบไฟฟ้าแทนด้วย V_s ถ้าขนาดแรงดันของตัวขดเซียงโครนัสสถิตมีขนาดมากกว่าแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์จะจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟให้ระบบกำลังไฟฟ้า ในทางกลับกันถ้าขนาดแรงดันของตัวขดเซียงโครนัสสถิตน้อยกว่าแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์จะรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟจากระบบกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าแรงดันของตัวขดเซียงโครนัสสถิตมีขนาดเท่ากับแรงดันของระบบกำลังไฟฟ้า จะไม่มีการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟระหว่างกัน

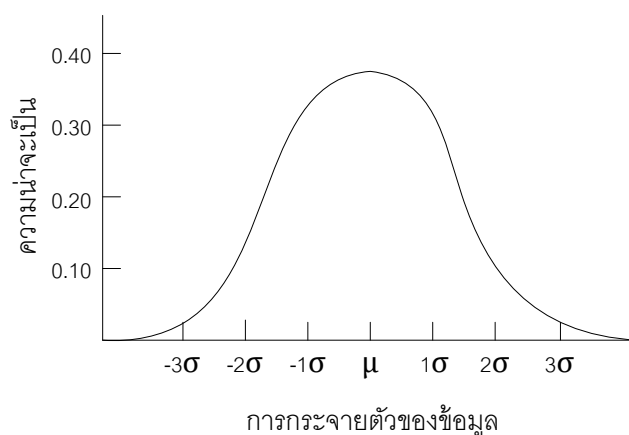


รูปที่ 2.6 การแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟระหว่างตัวขดเซียงโครนัสสถิตกับระบบกำลังไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ตัวขดเซียงโครนัสสถิตสามารถควบคุมแรงดันโดยการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ด้วยตัวเองโดยไม่ขึ้นอยู่กับการสั่งการจากสถานีไฟฟ้

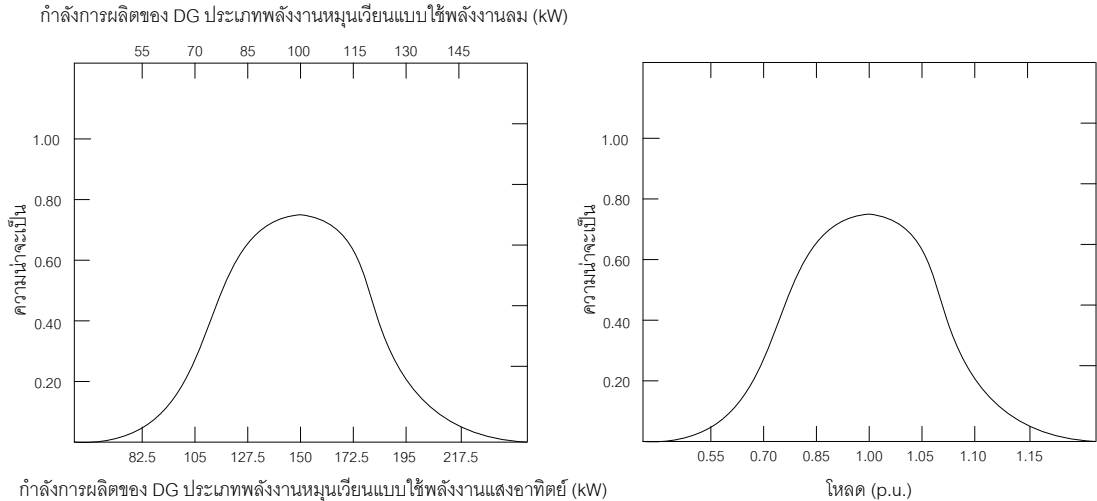
2.5 ความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณา DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนเป็น DG ชนิดที่ไม่สามารถควบคุมได้ เนื่องจากมีกำลังการผลิตไม่คงที่ โดยกำลังการผลิตจะขึ้นกับสภาวะอากาศและที่ตั้งของ DG ดังนั้นในการประยุกต์ใช้ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนในการควบคุมแรงดันจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมความไม่แน่นอนด้วย อย่างไรก็ตามความหมายของ “ความไม่แน่นอน” ในที่นี้ไม่ได้หมายถึงกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาอย่างไร้แบบแผน แต่หมายถึงความไม่แน่นอนจากปริมาณที่ถูกพยากรณ์ไว้ในแต่ละช่วงเวลา เช่น เมื่อติดตั้ง DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนในระบบไฟฟ้า กำลังการผลิตโดยเฉลี่ยสามารถทำการพยากรณ์ได้ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งค่าที่ผันผวนไปจากค่าเฉลี่ยนี้เองจะถูกพิจารณาเป็นความไม่แน่นอน นอกจากนี้ ระดับโหลดได้ถูกพิจารณาถึงความไม่แน่นอนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย เพราะถึงแม้ว่าระดับโหลดจะได้รับการพยากรณ์ในทางปฏิบัติของระบบไฟฟ้ากำลังก็ตาม (Load forecast) แต่ความต้องการใช้โหลดอาจมีการเปลี่ยนแปลงจากการพยากรณ์ได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาการกระจายข้อมูลของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโหลดเป็นแบบแจกแจงปกติ โดยการกระจายข้อมูลแบบแจกแจงปกติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของข้อมูลแบบแจกแจงปกติ

จากรูปที่ 2.7 ตัวแปร σ และ μ คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่าเฉลี่ย (Mean) ตามลำดับ โดยข้อมูลที่อยู่ภายในช่วง $\pm 1\sigma$ สามารถครอบคลุมการกระจายตัวของข้อมูลได้ประมาณ 68% ในขณะที่ข้อมูลที่อยู่ภายในช่วง $\pm 2\sigma$ สามารถครอบคลุมการกระจายตัวของข้อมูลได้ประมาณ 95% และข้อมูลที่อยู่ภายในช่วง $\pm 3\sigma$ สามารถครอบคลุมการกระจายตัวของข้อมูลได้ประมาณ 99.7% การกระจายข้อมูลของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่สมมติเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การกระจายข้อมูลของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโวลต์ แบบแจกแจงปกติ

ดังนั้นการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงต้องคำนวณผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโวลต์ด้วย โดยวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าซึ่งมีผลกระทบจากความไม่แน่นอนนั้น ได้มีงานวิจัยในอดีตมากมายเสนอถึงการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในเชิงสถิติ [28] - [30] ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้วิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โล เนื่องจากเป็นการคำนวณที่ครอบคลุมถึงเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้มากที่สุด และสามารถประยุกต์ใช้ได้กับกรณีที่มีการกระจายข้อมูลไม่เป็นแบบปกติได้อีกด้วย

2.5.1 การคำนวณแบบมอนติคาร์โล [31]

ในหัวข้อนี้วิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โล ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาแบบจำลองสโตแคสติก (Stochastic model) หรือแบบจำลองที่มีความไม่แน่นอนของข้อมูล เราสามารถใช้วิธีการมอนติคาร์โลในการคำนวณค่าคาดหวัง (Expected value) หรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม (Random variable) วิธีการมอนติคาร์โลนี้มีรากฐานมาจากกฎของตัวอย่างจำนวนมากดังแสดงในสมการที่ (2.1) ต่อไปนี้

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} = E(X) \tag{2.1}$$

โดยที่

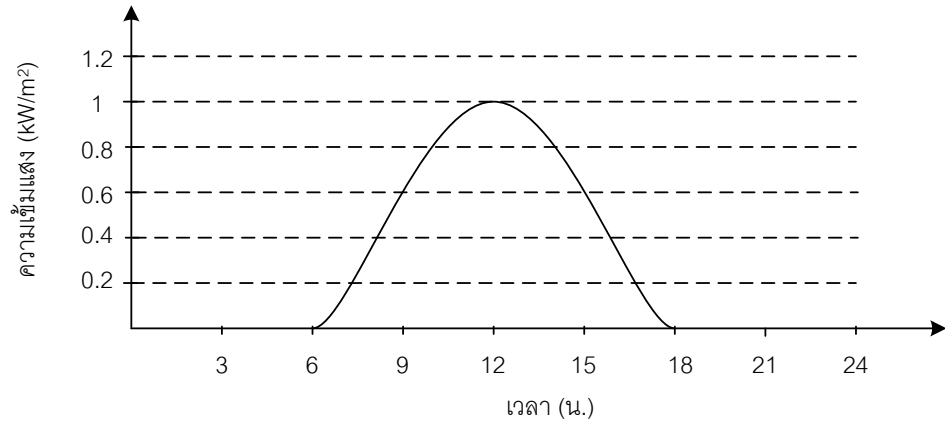
- X_i คือ ข้อมูลตัวแปรสุ่มในครั้งที่ i
- $E(X)$ คือ ค่าคาดหวัง หรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม
- N คือ จำนวนประชากร

การหาค่าเฉลี่ยของ X_i เพื่อประมาณค่า $E(X)$ เป็นกระบวนการสุ่มตัวอย่างจากการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งตัวอย่างที่ได้จากการสุ่มนี้สามารถนำไปใช้ในการจำลองการทำงานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป โดยในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าวในการสุ่มค่าของขนาด DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด

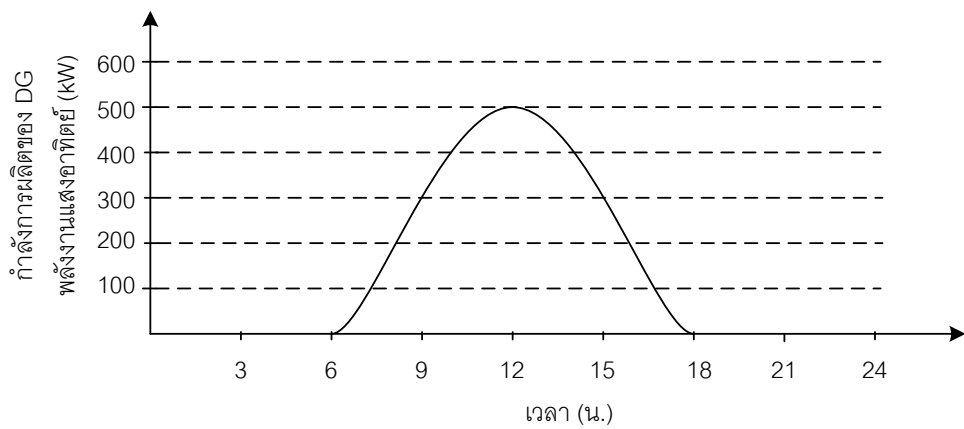
2.5.2 ลักษณะการจ่ายกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน [32]

การกำหนดลักษณะการจ่ายกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนจำเป็นต้องถูกนำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย เนื่องจากได้มีการนำ DG พลังงานหมุนเวียน 2 ชนิดมาประกอบการคำนวณ คือ DG พลังงานแสงอาทิตย์ และ DG พลังงานลม ทั้งนี้ลักษณะการจ่ายกำลังการผลิตของ DG พลังงานหมุนเวียนทั้ง 2 ชนิดจะมีความแตกต่างกันออกไป โดยการจ่ายกำลังการผลิตของ DG พลังงานแสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสง ณ เวลาขณะนั้นๆ ซึ่งหมายความว่า DG พลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในเวลากลางคืน แต่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นเรื่อยๆ จากเวลาช่วงเช้าที่มีความเข้มแสงน้อย จนถึงช่วงเวลาเที่ยงซึ่งโดยปกติมีความเข้มแสงสูงสุดของวัน แล้วการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากความเข้มแสงลดลงจากช่วงเวลาเที่ยงจนถึงช่วงเวลาเย็น สำหรับ DG พลังงานลมนั้นสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ตลอดวัน

รูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ยของ DG พลังงานแสงอาทิตย์ และ DG พลังงานลม ตลอดทั้งวันตามลำดับ และยังไม่คำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าแต่อย่างใด โดยรูปที่ 2.9 (ก) เห็นได้ว่าค่าความเข้มแสงเริ่มมีค่าตั้งแต่เวลา 6.00 น. แล้วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงเวลา 12.00 น. และลดลงตามลำดับ จนความเข้มแสงหมดลงในเวลา 18.00 น. ซึ่งจากค่าความเข้มแสงในรูปที่ 2.9 (ก) นี้ สามารถนำไปคำนวณหาขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของ DG พลังงานแสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) ทั้งนี้ค่าความเข้มแสง และขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของ DG พลังงานแสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปนี้เป็นเพียงตัวอย่างเท่านั้น เนื่องจากค่าความเข้มแสงจะมีค่าที่แตกต่างกันออกไปตามตำแหน่งที่ตั้งติดตั้งของ DG พลังงานแสงอาทิตย์ ฤดูที่ทำการวัดค่าความเข้มแสง และจุดที่ทำการวัดค่าความเข้มแสง เป็นต้น อย่างไรก็ตามลักษณะของกราฟการผลิตกำลังไฟฟ้าจาก DG พลังงานแสงอาทิตย์จากพื้นที่ต่างๆ ในโลกพบว่ามีความคล้ายกันกับกราฟที่นำเสนอ สำหรับรูปที่ 2.10 สามารถเห็นได้ว่า DG พลังงานลมสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ตลอดทั้งวัน ซึ่งต่างจาก DG พลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพียงช่วงกลางวันเท่านั้น และ DG พลังงานลมมีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าคงตัวโดยประมาณตลอดทั้งวัน

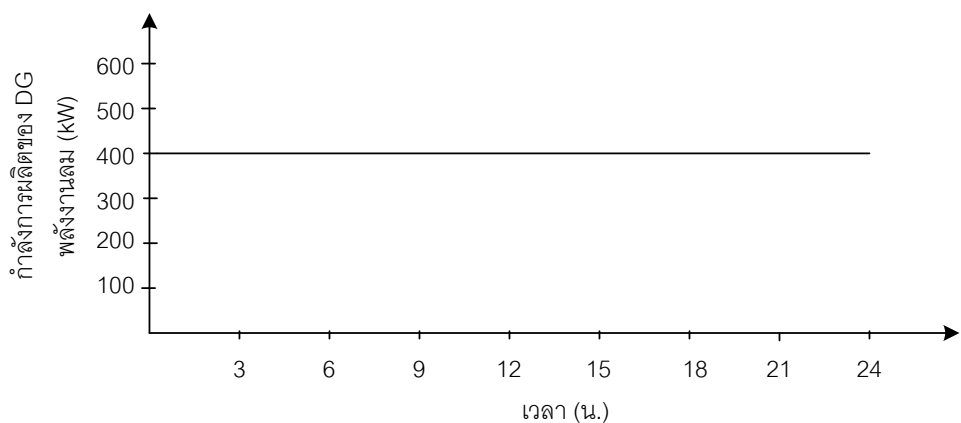


(ก)



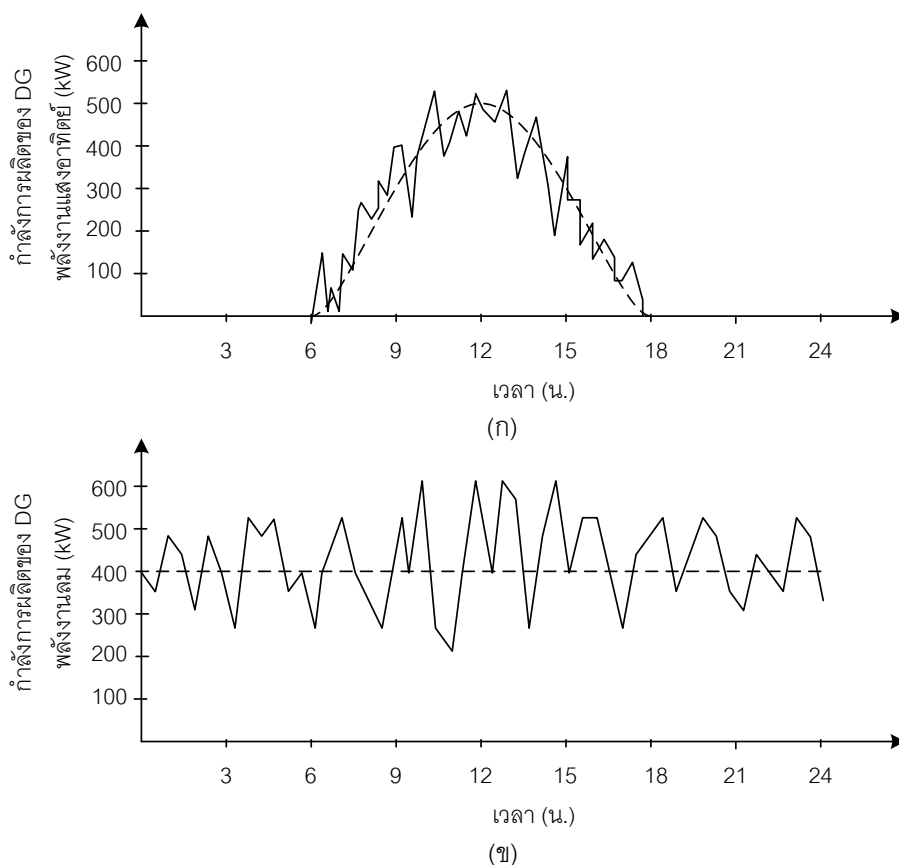
(ข)

รูปที่ 2.9 ตัวอย่างลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ยของ DG พลังงานแสงอาทิตย์
(ก) ค่าความเข้มแสงตลอดทั้งวัน (ข) กำลังการผลิตไฟฟ้าของ DG พลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างลักษณะการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ยของ DG พลังงานลม

จากรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10 ยังไม่ได้พิจารณาถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าแต่อย่างใด ซึ่งหากพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนแล้ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11 โดยความไม่แน่นอนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะผันผวนหรือเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย (เส้นประ) นั่นเอง ทั้งนี้รูปที่ 2.11 (ก) แสดงผลของความไม่แน่นอนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ DG พลังงานแสงอาทิตย์ และรูปที่ 2.11 (ข) แสดงผลของความไม่แน่นอนในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ DG พลังงานลม



รูปที่ 2.11 การจ่ายกำลังไฟฟ้าของ DG พลังงานหมุนเวียนเมื่อพิจารณาผลความไม่แน่นอน
(ก) การจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก DG พลังงานแสงอาทิตย์ (ข) การจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก DG พลังงานลม

2.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงหลักการทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต รวมถึงข้อมูลทางปฏิบัติของการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์จากทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การคำนวณแบบมอนติคาร์โลได้ถูกนำเสนอเพื่อใช้คำนวณพฤติกรรมความไม่แน่นอนจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด ซึ่งรายละเอียดการคำนวณแบบมอนติคาร์โลจะได้อีกกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษานี้

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงกระบวนการค้นหาคำตอบเชิงศึกษานี้ โดยได้กล่าวถึงรายละเอียดแนวคิดพื้นฐานของวิธีการค้นหาแต่ละวิธีได้แก่อัลกอริทึมการอบอุ่นจำลอง จินเนติก อัลกอริทึม การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค การหาค่าเหมาะที่สุดด้วย คอโลนีมด และการค้นหาแบบทาบู่ ตลอดจนการเลือกประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาคำตอบใน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.1 วิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษานี้ (Heuristic Search) [33], [34]

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการค้นหาคำตอบ (Searching) เป็นเทคนิคทางปัญญาเชิงคำนวณ ซึ่งสามารถหาคำตอบของปัญหาหลายๆอย่างที่ไม่ใช่เพียงแต่เป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยการค้นหา วิธีในการค้นหาคำตอบนั้นมีอยู่หลายวิธี แต่ละวิธีมีความเหมาะสม และมีประสิทธิภาพกับระบบที่ต้องการแก้ปัญหาที่แตกต่างกันออกไป โดยสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ การค้นหาแบบไม่ใช้ข้อมูลความรู้ (Uninformed search) และการค้นหาแบบใช้ข้อมูลความรู้ (Informed search)

การค้นหาแบบไม่ใช้ข้อมูลความรู้ เป็นกลยุทธ์การค้นหาที่ไม่มีการใช้ข้อมูลใดๆ มาช่วยประกอบการค้นหาคำตอบ ในขณะที่การค้นหาแบบใช้ข้อมูลความรู้จะมีการนำเอาข้อมูลมาช่วยในการเลือกเส้นทางการค้นหาคำตอบอย่างไรให้ดีที่สุด ซึ่งหลักการในการค้นหาแบบนี้จะเรียกว่าการค้นหาคำตอบเชิงศึกษานี้ (Heuristic search) ทั้งนี้จะเห็นได้ชัดว่าการค้นหาแบบไม่ใช้ความรู้ นั้นมีประสิทธิภาพด้อยกว่าการค้นหาแบบใช้ความรู้ อย่างไรก็ตามการค้นหาแบบไม่ใช้ความรู้ก็ยังมีประโยชน์ในบางครั้ง โดยเฉพาะสำหรับหลายๆ ระบบที่ไม่มีข้อมูลใดๆ มาใช้พิจารณาในขณะที่ทำการค้นหาคำตอบ

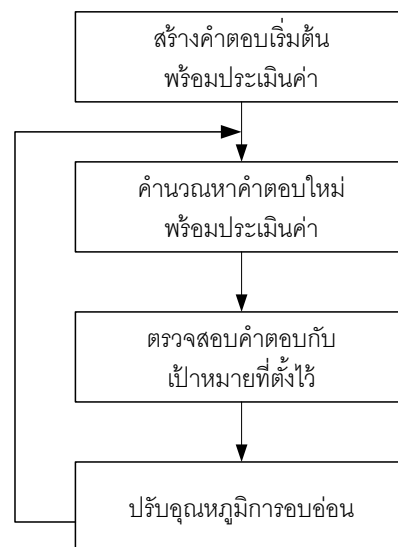
กลยุทธ์การค้นหาแบบใช้ความรู้เป็นกลยุทธ์ที่มีการนำเอาข้อมูล (ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหานั้นๆ) มาช่วยในการค้นหาคำตอบ ทำให้เหมาะสมในการแก้ปัญหาหลายๆอย่าง โดยเฉพาะปัญหาที่เป็นการค้นหาที่หาค่าที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้วิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษานี้ เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ปัญหาการหาตำแหน่งที่เหมาะสม ปัญหาการกำหนดเส้นทางการเดินทาง หรือปัญหาการจัดตารางการผลิต เป็นต้น ซึ่งยากที่จะหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solution) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปัญหานั้นมีข้อมูลป้อนเข้าปริมาณมาก การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดอาจใช้เวลาในการคำนวณนานมาก หรือเป็นไปได้ที่สามารคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษานี้จึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา

เพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่ามาก ซึ่งวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษานี้ที่นิยมใช้ใน ปัจจุบันสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1.1 อัลกอริธึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing)

อัลกอริธึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing หรือ SA) เป็นเทคนิคการค้นหา คำตอบ ซึ่งเลียนแบบกรรมวิธีการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงช้าๆ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกที่มีพลังงานภายในน้อยที่สุด คุณลักษณะดังกล่าว จะทำให้โลหะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แข็งแกร่งและทนทาน การอบอ่อนจำลองเป็นเทคนิคการ ค้นหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยสามารถเปรียบเทียบได้ว่าการควบคุมอุณหภูมิของการอบอ่อนเป็น การปรับพารามิเตอร์การค้นหาคำตอบของระบบ การลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ทำให้เหล็กมี โครงสร้างผลึกที่แข็งแกร่ง ในขณะที่เดียวกันถ้าอุณหภูมิลดลงอย่างไม่เหมาะสม โครงสร้างผลึก ดังกล่าวจะมีการจัดตัวที่ไม่เหมาะสม และโครงสร้างผลึกมีความแข็งแกร่งทนทานก็คือคำตอบที่ เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นนั่นเอง (Local optimum)

อย่างไรก็ตามแม้ว่า SA จะสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ไ้แต่เวลาใน การค้นหาคำตอบอาจไม่เหมาะสมในการใช้งานจริงก็ได้ แนวคิดพื้นฐานของอัลกอริธึมการอบอ่อน จำลองโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 อัลกอริธึมการอบอ่อนจำลอง

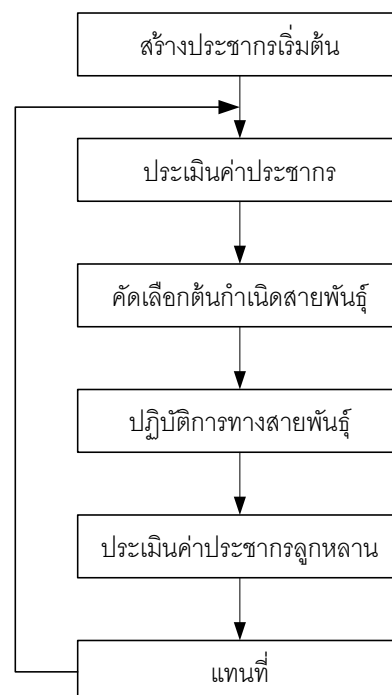
3.1.2 จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithm)

จีเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithm หรือ GA) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดโดย ใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติและหลักการทางสายพันธุ์ GA เป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่

สามารถกล่าวได้ว่ามีวิวัฒนาการอยู่ในขั้นตอนของการค้นหาคำตอบ ซึ่งปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพ และมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหาการค้นหาที่เหมาะสมที่สุด

GA ถูกพัฒนาโดยจำลองเอาแนวคิดการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในระบบชีววิทยามาใช้ ซึ่งได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง โดยมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆกันอย่างแพร่หลาย พร้อมๆกับการศึกษาและพัฒนาองค์ประกอบต่างๆ ของ GA ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ปัจจุบันจึงเห็นได้ว่า GA ได้นำไปใช้ในเกือบจะทุกสาขาวิชาเช่น การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล การประมวลผลสัญญาณภาพ ระบบควบคุม การสื่อสาร โทรคมนาคม ไฟฟ้ากำลัง การแพทย์ และการเงิน เป็นต้น

GA เป็นวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบสุ่ม (Stochastic optimization) โดยอาศัยการสมมติจุดคำตอบขึ้นมาหลายจุดก่อน แล้วประยุกต์ใช้หลักการค้นหาจุดที่เหมาะสมที่สุดซึ่งมีโอกาสที่จะอยู่รอดมากที่สุด เพื่อหาคำตอบที่ดียิ่งขึ้นในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอด สำหรับในแต่ละรุ่นของการถ่ายทอดจะมีการประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness) ของจุดคำตอบแต่ละจุด แล้วพิจารณาเลือกจุดคำตอบใหม่จากค่าความเหมาะสมนี้โดยอาศัยวิธีการคัดเลือกสายพันธุ์ วิธีการคัดเลือกดังกล่าวประกอบด้วย การคัดเลือก การข้ามสายพันธุ์และการผ่าเหล่า จุดคำตอบแต่ละจุดจะประกอบไปด้วยสตริง (String) ของตัวแปรที่ถูกเข้ารหัสไว้ เรียกว่าโครโมโซม (Chromosomes) ซึ่งสามารถถอดรหัสเป็นค่าของตัวแปรจริงได้ โดยทั่วไปนิยมเข้ารหัสตัวแปรให้เป็นระบบเลขฐานสอง ขั้นตอนการทำงานโดยทั่วไปของ GA สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ต่อไปนี้

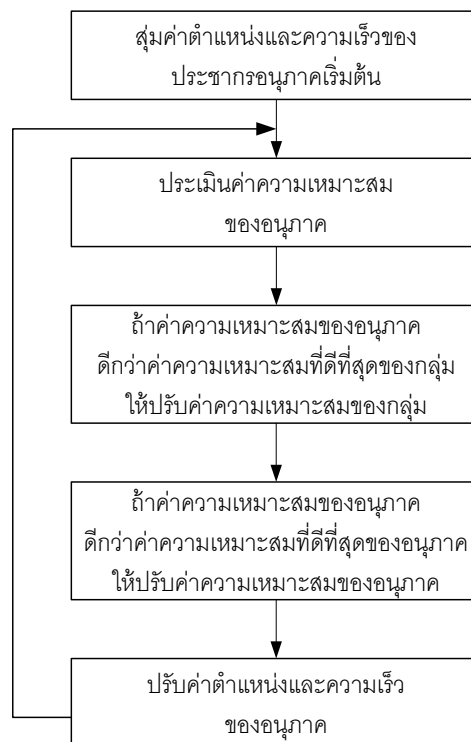


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานทั่วไปของ GA

3.1.3 การหาค่าเหมาะสมด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization หรือ PSO) เป็นอัลกอริทึมที่พัฒนามาจากการเคลื่อนที่ของฝูงปลาและฝูงนก ซึ่งการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบเป็นการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบย่อยๆ ที่เคลื่อนที่ไปด้วยกันอย่างประสานเวลา (Synchronous) ปลาหรือนกสามารถเคลื่อนที่ไปเป็นฝูง แยกตัวออกจากฝูง แล้วรวมตัวกลับเข้ามาในฝูงอีกครั้ง PSO มีคุณลักษณะหลายๆ อย่างที่เหมือนกับจินเนติกอัลกอริทึม โดย PSO มีการสุ่มสร้างประชากรเริ่มต้น และใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยการปรับประชากรนั้นๆ ในทุกรอบการคำนวณทุกๆ รุ่น อย่างไรก็ดี PSO มีความแตกต่างไปจาก GA ตรงที่ไม่มีปฏิบัติการทางสายพันธุ์คือ การทำครอสโอเวอร์ หรือ มิวเทชัน ใน PSO คำตอบของระบบถูกแทนด้วยอนุภาค ที่ซึ่งเคลื่อนที่ไปในปริภูมิค้นหา (Search space) โดยมีทิศทางเคลื่อนที่ไปตามอนุภาคที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในขณะนั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ GA แล้ว ข้อได้เปรียบของ PSO คือความง่ายของอัลกอริทึม และการปรับแต่งอัลกอริทึมด้วยจำนวนพารามิเตอร์เพียงไม่กี่ตัวเท่านั้น

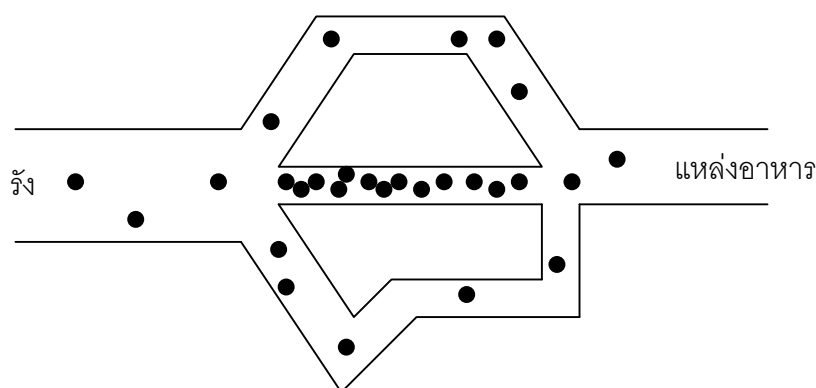
PSO ประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ งาน เช่น การหาค่าเหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันคณิตศาสตร์ และระบบควบคุมแบบฟัชซี เป็นต้น แผนผังอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.3 ต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 แผนผังอัลกอริทึมพื้นฐานของ PSO

3.1.4 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอลลอนีมด (Ant Colony Optimization)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอลลอนีมด (Ant Colony Optimization หรือ ACO) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาลำบากแบบใหม่สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงการจัดแบบยาก โดยอัลกอริทึมนี้ได้พัฒนามาจากพฤติกรรมทางสังคมของแมลงที่อยู่รวมกันเป็นฝูง โดยเฉพาะมด โดยรู้จักในชื่อของการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอลลอนีมด หรือ ACO เทคนิคนี้ได้แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการออกหาอาหารของมด มดเหล่านี้จะปล่อยฟีโรโมนตามทางที่เดินผ่าน โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำเครื่องหมายเส้นทางที่ตนเองพอใจ (เส้นทางที่สั้นกว่า) มดตัวอื่นในคอลลอนีมดจะเดินตามเส้นทางที่มีฟีโรโมนดังกล่าวพร้อมทั้งปล่อยฟีโรโมนให้สะสมระหว่างเส้นทางมากยิ่งขึ้น ซึ่งฟีโรโมนจะมีจำนวนมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางและคุณภาพของแหล่งอาหารที่พบ แล้วมดตัวอื่นก็จะตามรอยฟีโรโมนมายังแหล่งอาหารในที่สุด การปล่อยฟีโรโมนของมดสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.4 ต่อไปนี้ โดยมดแทนด้วยสัญลักษณ์จุด โดยจากรูปจะเห็นว่า ระยะทางจากรังไปสู่แหล่งอาหารที่สั้นกว่าจะมีจำนวนมดที่มากกว่า ซึ่งเปรียบเสมือนกับการค้นหาคำตอบจะมุ่งไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นหากเส้นทางนั้นมีปริมาณฟีโรโมนมาก



รูปที่ 3.4 การทดลองเส้นทางเดินของมด

3.1.5 วิธีค้นหาแบบทาบู (Tabu Search)

Fred W. Glover เป็นผู้นำเสนอเทคนิควิธีค้นหาแบบทาบู (Tabu Search หรือ TS) แนวคิดสำคัญของวิธีการหาคำตอบของ TS คือ การเพิ่มความฉลาดโดยใช้ความจำของคอมพิวเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง คอมพิวเตอร์จะทำการเรียนรู้จากการหาคำตอบครั้งที่ผ่านๆ มา การทำเช่นนี้ทำให้ TS สามารถหลุดพ้นจากจุดเหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต มีการนำ TS ไปประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดและมีการเปรียบเทียบกับวิธีค้นหาอื่นๆ พบว่า TS สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือสามารถใช้เวลาค้นหาคำตอบน้อยกว่า และนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวก

กว่า สามารถไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ ยังมีข้อด้อยเมื่อนำไปใช้แก้รูปแบบปัญหาที่มีการรบกวนสูง และใช้เวลาในการค้นหาคำตอบ ค่อนข้างนานหากมีตัวแปรป้อนเข้าจำนวนมาก ข้อแตกต่างระหว่าง TS กับวิธีการค้นหาอื่นๆ สามารถนำเสนอได้ดังนี้

- 1) วิธีการค้นหาแบบทาบู้ได้จากแนวคิดที่ว่า การค้นหาแบบฉลาดจะต้องพิจารณาถึง หน่วยความจำปรับตัว (Adaptive memory) สำหรับการค้นหาอย่างมีประสิทธิภาพ แต่ จินเนติกอัลกอริทึม และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ใช้การ สุ่ม (Random) ในการค้นหา
- 2) วิธีการค้นหาแบบทาบู้มีแนวคิดที่ว่าในบางครั้งเส้นทางที่แยก็ยังสามารถนำไปสู่คำตอบที่ดีได้ เพื่อสร้างความหลากหลายในการค้นหาคำตอบ และหาเส้นทางใหม่ที่อาจพบคำตอบได้
- 3) วิธีการค้นหาแบบทาบู้ใช้หลักการสร้างความละเอียด และความหลากหลาย โดยเพิ่ม ความละเอียดในการค้นหาบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่เคยพบ และค้นหาเพิ่มเติมใน บริเวณที่แตกต่างจากคำตอบที่ดีที่เคยพบ
- 4) วิธีการค้นหาแบบทาบู้สามารถที่จะหลีกเลี่ยงการให้คำตอบสุดท้ายที่เหมาะสมที่สุดแบบ วงแคบเฉพาะถิ่น และยังสามารถดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งได้ คำตอบที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง

วิธีการค้นหาทั้งห้าวิธีนี้มีจุดเด่นจุดด้อยและความสามารถของแต่ละวิธีที่แตกต่างกันไป ซึ่งหากประยุกต์ใช้แต่ละวิธีกับปัญหาในวิทยานิพนธ์นี้นั้นพบว่า อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลองและ การค้นหาแบบทาบู้ สามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ในรูปแบบใกล้เคียงกัน การเคลื่อนที่ ของกลุ่มอนุภาคสามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ใกล้เคียงกับคอลลินีมด ส่วนจินเนติก อัลกอริทึมจะมีความแตกต่างในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากวิธีอื่น ในตารางที่ 3.1 ได้ แสดงถึงความสามารถของแต่ละวิธีเมื่อประยุกต์ใช้กับปัญหาที่ให้ความสำคัญในวิทยานิพนธ์ฉบับ นี้ อย่างไรก็ตาม การนำเสนอในตารางนี้เป็นเพียงการคาดการณ์เท่านั้น เนื่องจากการประยุกต์ตัว แปรควบคุมของปัญหาที่สนใจให้สอดคล้องกับแนวคิดของแต่ละวิธีนั้น มีความแตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 3.1 ความสามารถของแต่ละวิธีในการประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์

การแก้ปัญหา	อัลกอริทึมการ อบอ่อนจำลอง	จินเนติก อัลกอริทึม	การเคลื่อนที่ของ กลุ่มอนุภาค	คอลลินีมด	การค้นหาแบบ ทาบู้
ทนต่อรูปแบบ ปัญหาที่มีการ รบกวนสูง	ต่ำ	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง

ตารางที่ 3.1 ความสามารถของแต่ละวิธีในการประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์ (ต่อ)

การแก้ปัญหา	อัลกอริทึมการ อบอ่อนจำลอง	จินเนติก อัลกอริทึม	การเคลื่อนที่ของ กลุ่มอนุภาค	คอโลนีมด	การค้นหาแบบ ทาบู
ความสามารถ คำตอบที่เหมาะสม ที่สุดแบบวงแคบ	ปานกลาง	สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง
ความสามารถ คำตอบที่เหมาะสม ที่สุดแบบวงกว้าง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
ความหลากหลาย ในการค้นหา	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
การหลีกเลี่ยงจาก คำตอบที่เหมาะสม ที่สุดแบบวงแคบ	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ	สูง
ความยืดหยุ่นใน การประยุกต์ใช้งาน แก้ปัญหา	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
ระยะเวลาในการ ค้นหาคำตอบ	ต่ำ	สูง	ต่ำ	ปานกลาง	สูง

ความสามารถที่คาดการณ์ของแต่ละวิธีการค้นหา สามารถเห็นได้ว่าวิธีการค้นหาแบบทาบูมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกวิธีดังกล่าวมาทำการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งรายละเอียดของวิธีการค้นหาแบบทาบูได้ทำการอธิบายในบทที่ 4 ในลำดับถัดไป

3.2 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการค้นหาคำตอบเชิงศึกษาคำนึง ซึ่งได้กล่าวถึงหลักการและแนวคิดพื้นฐานของวิธีการค้นหาคำตอบแต่ละวิธีได้แก่ อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง จินเนติกอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอโลนีมด และการค้นหาแบบทาบู ทั้งนี้เพื่อแสดงให้เห็นถึงวิธีการค้นหาที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้ ซึ่งจากวิธีต่างๆที่ได้นำเสนอ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกใช้วิธีการค้นหาแบบทาบูมาใช้ในการแก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

บทที่ 4

วิธีการค้นหาแบบทาบู

4.1 การค้นหาแบบทาบู

การค้นหาแบบทาบู หรือ Tabu Search (TS) [36] - [38] คำว่า Tabu มีความหมายตามพจนานุกรมว่า “ต้องห้าม” วิธีการค้นหาแบบทาบูเป็นวิธีการค้นหาที่นำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งการค้นหาดังกล่าวนี้นี้สามารถประยุกต์ใช้งานกับหลายๆด้านได้อย่างไม่ยุ่งยาก ไม่ว่าจะเป็นทางธุรกิจหรือทางวิศวกรรม เนื่องจากหลักการทำงานที่ไม่ซ้ำซ้อนทำให้การประยุกต์ใช้งานค่อนข้างสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดวิธีอื่นเช่น อัลกอริธึมอบอ่อนจำลอง จินเนติกอัลกอริธึม และการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยคอลโณนิมด เป็นต้น ทำให้ TS เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและกลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

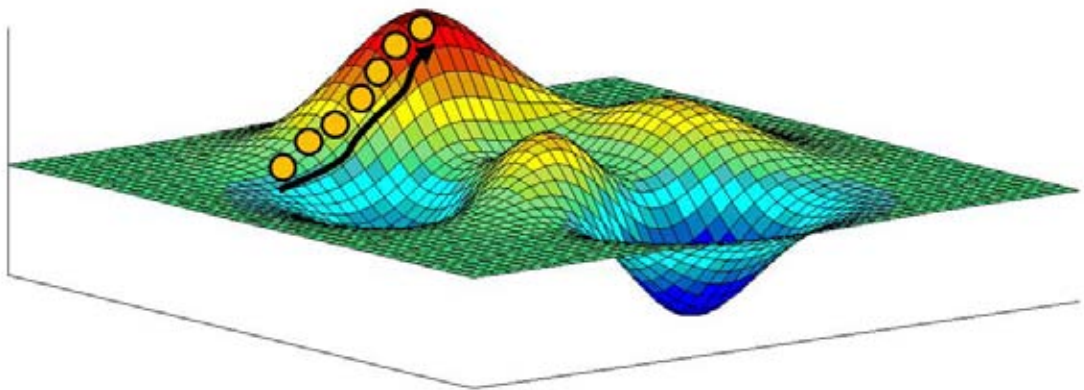
จากหลายงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา [39] - [41] ได้มีการนำ TS มาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด พบว่า TS สามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือใช้เวลาค้นหาคำตอบน้อยกว่า พัฒนาโปรแกรมได้สะดวกกว่า และสามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ ด้วยจุดเด่นหลายอย่างของวิธีการค้นหาแบบทาบู วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกวิธีดังกล่าวเพื่อทำการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งรายละเอียดของวิธี TS ได้ทำการอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.2 แนวคิดพื้นฐานของการค้นหาแบบทาบู [33], [34], [35]

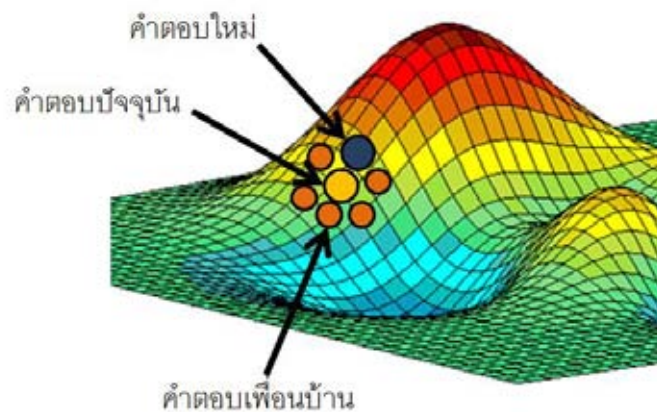
ขั้นตอนการทำงานของ TS มีแนวคิดพื้นฐาน คือ กำหนดคำตอบปัจจุบัน จากนั้นจึงค้นหาคำตอบในพื้นที่รอบข้าง แล้วเดินไปยังคำตอบที่ดีกว่าที่ถูกค้นพบ ซึ่งจะวนรอบทำงานแบบนี้ไปเรื่อยๆ โดยการค้นหาจะไม่หยุดเมื่อได้คำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น แต่จะหยุดค้นหาเมื่อครบจำนวนครั้งสูงสุดของการค้นหาที่กำหนด นอกจากนี้กลไกของ TS จะมีสถานะ “ต้องห้าม” ซึ่งเป็นขั้นตอนในการเปรียบเทียบคำตอบใหม่ที่คำนวณได้กับคำตอบที่อยู่ในสถานะต้องห้าม เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงคำตอบที่ “ซ้ำซาก” อย่างไรก็ตามสถานะต้องห้ามของคำตอบไม่จำเป็นต้องคงสภาพเช่นนั้นตลอดไป แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา

พิจารณาตัวอย่างฟังก์ชันในรูปที่ 4.1 กำหนดให้พื้นผิวในรูปเป็นผลที่ได้จากการประเมินของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่าฟังก์ชัน peaks จากโปรแกรม MATLAB) ซึ่งในที่นี้คือการหาค่าสูงสุดจากฟังก์ชันดังกล่าว (Maximization) การคำนวณหาคำตอบใหม่จากจุดของคำตอบ

ปัจจุบันใดๆ จะใช้ปฏิบัติการที่เรียกว่าการ “move” หรือ “การเดิน” สำหรับการค้นหาคำตอบในพื้นที่รอบข้าง (Neighborhood Search) นั้น จะทำการเลือกคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันจากคำตอบที่มีอยู่รอบๆ แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดขึ้นมาเป็นคำตอบใหม่ต่อไปในการเดินต่อไปดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเห็นว่าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่สูงที่สุดในบรรดาคำตอบรอบข้างทั้งหมด ทั้งนี้การกำหนดคำตอบรอบข้างนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาและการเดินในกรณีที่มีการเดินทำให้สถานะของระบบเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น นั่นคือมีคำตอบที่เข้าใกล้ค่าเหมาะสมที่สุด การค้นหาคำตอบด้วยวิธีนี้บางครั้งเรียกว่าวิธีการไต่เขา (Hill Climbing Method)



รูปที่ 4.1 ปฏิบัติการเดิน เพื่อหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน



รูปที่ 4.2 การค้นหาคำตอบเฉพาะที่

คุณสมบัติโดดเด่นที่สำคัญของ TS คือ

- 1) การหลุดพ้นจากคำตอบเหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

คำตอบที่ดีที่สุดในพื้นที่รอบข้างคือคำตอบที่มีค่าการประเมินสูงที่สุด ถ้าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบจะทำการเดินไปยังทิศทางนั้น แต่ค่า

การประเมินของคำตอบพื้นที่รอบข้างไม่ได้ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน (กล่าวคือคำตอบที่ได้ในขณะนี้ เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น) แต่ TS ยังมีกลไกยอมให้มีการเดินไปยังคำตอบใหม่ ที่มีค่าการประเมินที่ไม่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันได้ ซึ่งเป็นกลไกที่สามารถช่วยให้หลุดพ้นจากคำตอบ วงแคบเฉพาะถิ่น

2) ความสามารถในการหลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่

ในบางครั้งเส้นทางการค้นหาอาจนำไปสู่การวนรอบอยู่กับที่ ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยน เส้นทางที่นำไปสู่คำตอบที่ดีกว่าได้ ดังนั้นกลไกของ TS จึงมีการตั้งค่าสถานะของเส้นทางการเดินที่ “เพิ่งถูกใช้” ให้เป็นสถานะต้องห้าม (Tabu) เพื่อไม่ให้ใช้เส้นทางเดินนี้อีกภายในระยะเวลาที่กำหนด อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปตามระยะเวลาที่กำหนด สถานะของการเดินนั้นจะถูกลบเลิก การเป็นสถานะต้องห้าม ซึ่งจะเห็นว่า TS มีการใช้ข้อมูลของการค้นหาคำตอบในอดีตมาช่วยตัดสินใจ การเดินว่าควรจะไปในทิศทางใด กลไกที่เป็นส่วนสำคัญของโครงสร้าง TS ที่ทำให้การค้นหา คำตอบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นคือ

2.1) เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด

เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุดสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ เมื่อคำตอบหนึ่งถูกค้นพบแล้ว เส้นทางที่นำไปสู่คำตอบนี้จะถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม ซึ่งเส้นทางนี้จะไม่ถูกใช้งานอีกภายใน ระยะเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาผ่านไปตามที่กำหนดสถานะของเส้นทางเดินดังกล่าวนี้ ก็จะหลุดจากสถานะต้องห้าม กลไกนี้จึงมีส่วนทำให้ TS สามารถหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุด แบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ ถึงแม้ว่าในบางครั้งคำตอบใหม่ที่พบจะแยกว่าคำตอบที่มีอยู่ก็ตาม ทั้งนี้ เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุดต้องทำงานร่วมกับเงื่อนไขของความซ้ำซาก

2.2) เงื่อนไขของความซ้ำซาก

TS สามารถบันทึกจำนวนครั้งของการเดินหนึ่งๆ ซึ่งหากเส้นทางการเดินใดถูกเรียกใช้ เป็น จำนวนมากครั้งเกินไป หรือเกินจำนวนที่ตั้งเอาไว้ การเดินในเส้นทางนั้นจะถูกตั้งเป็นสถานะ ต้องห้าม เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ ยิ่งไปกว่านั้น เงื่อนไขนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบในการพิจารณาถึงการพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ เฉพาะถิ่นด้วย

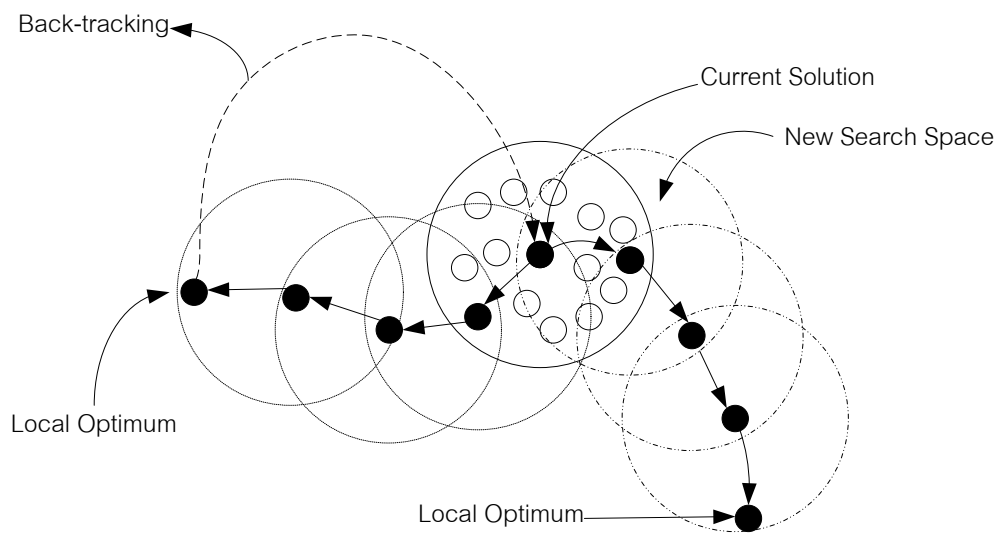
4.3 วิธีค้นหาคำตอบแบบทฤษฎีปรับตัวได้ (Adaptive Tabu Search)

จากคุณสมบัติของ TS ที่กล่าวมา อาจมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งาน บางกรณี ดังนั้นจึงมีผู้นำเอาโครงสร้างของ TS ทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อการ ประยุกต์ เช่น การค้นหาทฤษฎีปรับตัวได้ หรือ Reactive Tabu Search (RTS) และการ ค้นหาทฤษฎีปรับตัวได้ หรือ Adaptive Tabu Search (ATS) เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์

ฉบับนี้ให้ความสนใจต่อการค้นหาทามูแบบชนิดปรับตัวได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวได้เพิ่ม 2 กลไกเข้าไปในการค้นหาแบบทามูธรรมดา คือ การเดินย้อนรอยและการปรับรัศมีการค้นหา ดังแสดงต่อไปนี้

1) การเดินย้อนรอย (Back tracking)

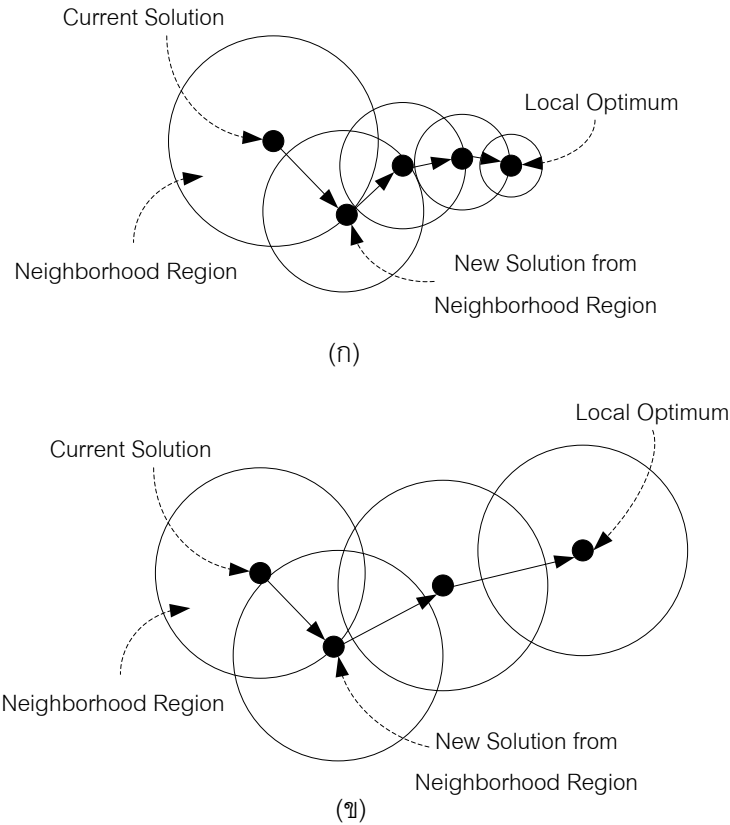
กลไกการเดินย้อนรอยเป็นขั้นตอนที่อนุญาตให้กลับไปค้นหาพื้นที่คำตอบเก่าที่เคยถูกค้นหามาแล้ว ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังค้นหาเจอคำตอบแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ซึ่งคำตอบใหม่จะเลือกจากพื้นที่คำตอบในการค้นหาครั้งแรกดังแสดงในรูปที่ 4.3 แล้วกำหนดให้เป็นจุดเริ่มต้นในการค้นหาใหม่ ในขณะที่เส้นทางค้นหาเก่าถูกกำหนดเป็นสถานะต้องห้าม จึงทำให้เกิดเส้นทางในการค้นหาใหม่ขึ้น



รูปที่ 4.3 การเดินย้อนรอยใน ATS

2) การปรับรัศมีการค้นหา (Adaptive radius)

กระบวนการปรับรัศมีการค้นหาคือการลดขอบเขตการค้นหาแต่ละรอบลง ซึ่งจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเข้าใกล้คำตอบที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง การค้นหาโดยใช้รัศมีที่กว้างอาจได้ผลของการค้นหาที่ไม่ละเอียด ซึ่งอาจทำให้การค้นหาพลาดคำตอบที่ดีกว่า แต่ถ้ารัศมีการค้นหาคำตอบมีขนาดเล็กก็จะได้คำตอบที่ละเอียดขึ้น อย่างไรก็ตามการค้นหาคำตอบก็ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเช่นกัน หรืออาจทำให้ค้นหาไม่ครอบคลุมพื้นที่ที่อาจมีคำตอบแบบวงกว้างได้ทั้งหมด ดังนั้นการปรับรัศมีการค้นหาให้เหมาะสมกับการค้นหาคำตอบในขณะใดๆ จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของการค้นหา ซึ่งใน ATS มีกลไกการปรับรัศมีการค้นหาให้เหมาะสมในระหว่างการค้นหาคำตอบแสดงดังรูปที่ 4.4 โดยใช้ค่าการประเมินเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาปรับค่ารัศมีการค้นหา เช่น เมื่อคำตอบปัจจุบันให้ค่าการประเมินที่ดีขึ้น



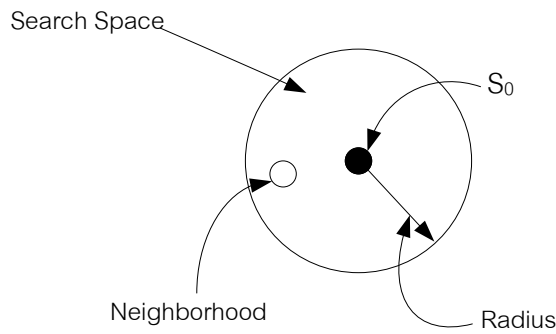
รูปที่ 4.4 (ก) การค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้ (ข) การค้นหาแบบทฤษฎีการรวมดา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประยุกต์ใช้ ATS เพื่อใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมของ DG ประเภทควบคุมได้ ตัวชดเชยเชิงโคโรนัสถิต และแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน เนื่องจากหลักการที่ไม่ซับซ้อนและคุณสมบัติที่เด่นของกลไกปรับรัศมีการค้นหาเพื่อใช้ในการค้นหาค่าตอบวงแคบเฉพาะถิ่นให้มีความละเอียดขึ้น

4.4 ขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้

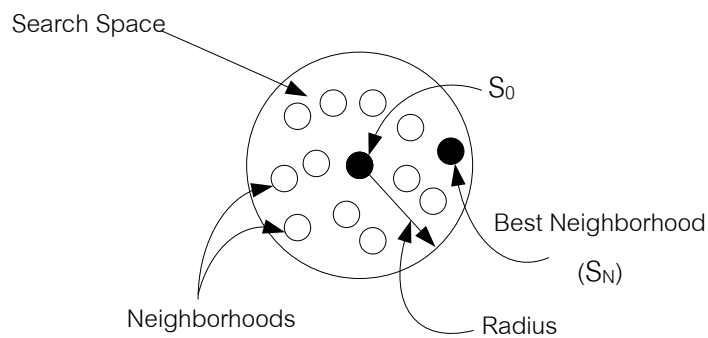
ATS เป็นวิธีการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดซึ่งปรับปรุงมาจาก TS แบบธรรมดาโดยมีกลไกเพิ่มเติมคือ กลไกเดินย่อนรอยการค้นหา และกลไกปรับรัศมีการค้นหา เพื่อเพิ่มความเร็วและความแม่นยำให้กับกระบวนการค้นหาค่าตอบ ขั้นตอนของ ATS แสดงดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดพื้นที่การค้นหา, รัศมีการค้นหา, จำนวนรอบสูงสุดในการค้นหา, ระยะเวลาของคำตอบในสถานะต้องห้าม, จำนวนครั้งสูงสุดของการเดินซ้ำซาก, Tabu list
- 2) เลือกคำตอบเริ่มต้น (S_0) ภายในพื้นที่ค้นหา แล้วกำหนดให้ S_0 เป็นคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 แล้วทำการประเมินคุณภาพคำตอบปัจจุบัน



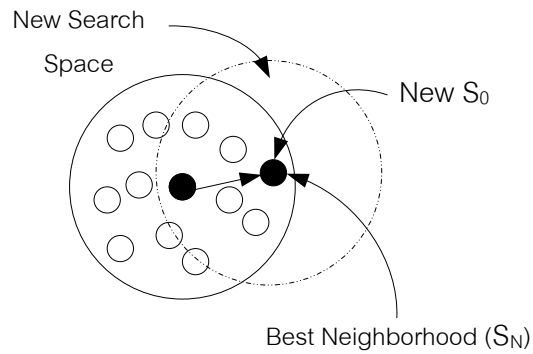
รูปที่ 4.5 การสุ่มเลือกคำตอบเริ่มต้น (S_0)

- 3) สร้างพื้นที่คำตอบรอบข้าง (Neighborhood) ของคำตอบเริ่มต้น S_0 จำนวน N คำตอบ จากนั้นทำการประเมินคุณภาพของคำตอบรอบข้างด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยกำหนดให้ S_N คือคำตอบรอบข้างซึ่งมีค่าการประเมินที่สูงที่สุด (Best neighborhood) ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การสร้างพื้นที่คำตอบรอบข้าง

- 4) เปรียบเทียบคุณภาพคำตอบของ S_N กับ S_0 ว่ามีคุณภาพคำตอบที่ดีกว่าเดิมหรือไม่ ซึ่งในกรณีสามารถแบ่งเป็นสามกรณีย่อยดังนี้คือ
 - S_N มีค่าน้อยกว่า S_0 ให้พิจารณาการเดินทางซ้ำๆ เพื่อใช้ตัดสินใจว่าเป็นคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นหรือไม่ หากใช้เริ่มกลไกการเดินย้อนรอยในขั้นตอนที่ 7 หากไม่ใช่ให้ใช้กลไกการปรับรัศมีในขั้นตอนที่ 6
 - S_N มีค่าเท่ากับ S_0 ให้พิจารณาว่าคำตอบรอบข้างที่ได้นั้น เป็นคำตอบใหม่หรือไม่
 - S_N มีค่ามากกว่า S_0 ให้กำหนด S_N มีค่าเท่ากับ S_0 ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การเดินทางไปยังคำตอบรอบข้างที่มีค่าการประเมินสูงกว่าคำตอบปัจจุบัน

- 5) ตรวจสอบจำนวนรอบของการคำนวณว่าครบรอบสูงสุดในการค้นหาหรือไม่ ถ้าครบแล้วให้หยุดการค้นหา แต่ถ้ายังไม่ครบให้ทำขั้นตอนต่อไป
- 6) ใช้กลไกปรับรัศมีการค้นหา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ก) แล้ววนกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 3
- 7) ใช้กลไกการเดินย่อนรอยเมื่อพบคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.3

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอหลักการและแนวคิดในการค้นหาคำตอบของวิธีการค้นหาแบบทามู ซึ่งวิธีการค้นหาแบบทามูได้พัฒนาอัลกอริธึมเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการค้นหา เรียกว่าการค้นหาแบบทามูชนิดปรับตัวได้ โดยขั้นตอนวิธีการค้นหาคำตอบของการค้นหาแบบทามูชนิดปรับตัวได้ถูกนำเสนอในบทนี้ ทั้งนี้หลักการและแนวคิดในของการค้นหาแบบทามูชนิดปรับตัวได้ได้นำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดในบทที่ 5 ถัดไป

บทที่ 5

การหาค่าเหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและอุปกรณ์ควบคุม

แรงดันโดยอาศัยวิธีการค้นหาแบบทาบูนิตปรับตัวได้

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงรายละเอียดของกระบวนการหาขนาดที่เหมาะสมของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดของคาปาซิเตอร์ และ ขนาดของตัวชดเชยเชิงโคจรนัสสถิต โดยใช้หลักการวิธีการค้นหาแบบทาบูนิตปรับตัวได้ ซึ่งจำนวนครั้งการสวิตซ์ใช้งานของตัวคุมค่าแรงดันและคาปาซิเตอร์ได้กำหนดให้เป็นสมการเงื่อนไขจำกัด รายละเอียดประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ ได้แก่ (1) การนิยามของตัวแปรที่ใช้สื่อความหมายในสมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือในสมการเงื่อนไขจำกัดต่างๆ (2) ขั้นตอนในการแก้ปัญหาจากวิธีที่นำเสนอ และ (3) การสอบทานผลลัพธ์จากอัลกอริทึม

5.1 นิยามตัวแปร

ก่อนกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาขนาดที่เหมาะสมของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดของคาปาซิเตอร์ และ ขนาดของตัวชดเชยเชิงโคจรนัสสถิต ตัวแปรที่ใช้ในสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไขบังคับ ได้ถูกแสดงเพื่อความเข้าใจชัดเจนดังต่อไปนี้คือ

$V_i \angle \delta_i$	คือ เฟสเซอร์ของแรงดันที่บัส i (p.u.)
$Y_{ij} \angle \theta_{ij}$	คือ สมาชิกตำแหน่งที่ (i, j) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมตริกซ์ (p.u.)
n_{bus}	คือ จำนวนบัสของระบบทดสอบ
P_{d_i}, Q_{d_i}	คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟที่บัส i (kW และ kVAR)
P_{g_i}, Q_{g_i}	คือ กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (kW และ kVAR)
P_{disp}	คือ กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ (kW)
Q_{disp}	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ (kVAR)
$\arccos(PF_{disp})$	คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของ DG ประเภทควบคุมได้
$N_{VR,sw}$	คือ จำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน
t	คือ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน
$N_{CB,sw}$	คือ จำนวนครั้งการทำงานของคาปาซิเตอร์
Q_{CB}	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ชดเชยจากคาปาซิเตอร์ (kVAR)

$Q_{STATCOM}$	คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ชดเชยจากตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (kVAr)
S_{jk}	คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลผ่านสายส่งจากบัส j ไปยังบัส k (kVA)
P_{sub}	คือ กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านหม้อแปลง ณ สถานีไฟฟ้า (kW)
E_i	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส i (p.u.)
V_i	คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i (p.u.)
L_i	คือ ปริมาณโหลดที่บัส i (p.u.)
t_1	คือ เวลาเริ่มต้น (ชั่วโมง)
t_2	คือ เวลาสิ้นสุด (ชั่วโมง)
X_s	คือ ค่ารีแอกแทนซ์ของสายส่ง (p.u.)

5.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สามารถแบ่งได้เป็นสองฟังก์ชัน วัตถุประสงค์หลัก ทั้งนี้แต่ละฟังก์ชันมีจุดประสงค์ที่ต่างกันออกไป โดยสมการที่ (5.1) เป็นฟังก์ชัน วัตถุประสงค์สำหรับการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมรายชั่วโมงของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บ ของตัวควบคุมแรงดัน คาปาซิเตอร์ และตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ที่ทำให้เกิดค่าความแตกต่างแรงดัน เฉลี่ยน้อยที่สุดในรายชั่วโมงนั้นๆ ส่วนสมการที่ (5.2) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณผลรวม ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยที่น้อยที่สุดภายในช่วงเวลาที่พิจารณา

$$\text{Min Average Voltage Difference} = \left| \frac{\sum_{i=1}^{nbus} (L_i \times \sqrt{(V_i - 1.00)^2})}{\sum_{i=1}^{nbus} L_i} \right| \quad (5.1)$$

$$\text{Min Objective function} = \sum_{t=t_1}^{t_2} \text{Average Voltage Difference} \quad (5.2)$$

อย่างไรก็ตามในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดว่า ระดับแรงดันที่สถานีไฟฟ้าย่อยจะมีค่าคงที่ หรือไม่สามารถที่จะควบคุมได้

5.1.2 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

- (1) กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟที่บัสใด ๆ ต้องสอดคล้องตามเงื่อนไขของสมการการไหลของ กำลังไฟฟ้า

$$\begin{aligned} P_{g_i} - P_{d_i} &= \sum_{j=1}^{nbus} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad i = 2, \dots, nbus \\ Q_{g_i} - Q_{d_i} &= \sum_{j=1}^{nbus} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad i = 2, \dots, nbus \end{aligned} \quad (5.3)$$

- (2) กำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่สามารถจ่ายได้

$$P_{disp}^{\min} \leq P_{disp} \leq P_{disp}^{\max} \quad (5.4)$$

(3) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่สามารถจ่ายได้

$$Q_{disp}^{\min} \leq Q_{disp} \leq Q_{disp}^{\max} \quad (5.5)$$

(4) ค่าตัวประกอบกำลังของ DG ประเภทควบคุมได้ต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่กำหนด

$$|\arccos(PF_{disp})| \leq \arccos(PF_{disp})_{\text{limit}} \quad (5.6)$$

(5) จำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดันต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่กำหนด

$$N_{VR,sw} \leq N_{VR,sw,max} \quad (5.7)$$

(6) แท็บของตัวคุมค่าแรงดันต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่กำหนด

$$t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \quad (5.8)$$

(7) จำนวนครั้งการทำงานของคาปาซิเตอร์ต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่กำหนด

$$N_{CB,sw} \leq N_{CB,sw,max} \quad (5.9)$$

(8) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ซัดเซยจากคาปาซิเตอร์ต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่จ่ายได้

$$Q_{CB} \leq Q_{CB,max} \quad (5.10)$$

(9) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ซัดเซยจากตัวซัดเซยซิงโครนัสสถิตต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่จ่ายได้

$$Q_{STATCOM}^{\min} \leq Q_{STATCOM} \leq Q_{STATCOM}^{\max} \quad (5.11)$$

(10) กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งต้องมีค่าไม่เกินพิกัดของสายส่งแต่ละเส้น

$$|S_{jk}| \leq S_{jk,max} \quad (5.12)$$

(11) กำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่าน ณ สถานีไฟฟ้าต้องมีค่าไม่เกินพิกัดหม้อแปลงของสถานีไฟฟ้า

$$|P_{sub}| \leq P_{sub,limit} \quad (5.13)$$

(12) แรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสต้องอยู่ในช่วงพิกัดที่กำหนด

$$V_{bus}^{\min} \leq V_{bus} \leq V_{bus}^{\max} \quad (5.14)$$

5.2 ขั้นตอนในการแก้ปัญหาโดยวิธีค้นหาคำตอบแบบทฤษฎีการปรับตัวได้

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีค้นหาคำตอบแบบทฤษฎีการปรับตัวได้ หรือ ATS ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งกลไกของการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้ถูกนำเสนอในหัวข้อ 4.3 โดยก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนการแก้ปัญหา ตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายขั้นตอนการทำงาน ได้ชี้แจงความหมายดังแสดงต่อไปนี้

S_0 คือ ชุดคำตอบเริ่มต้นของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวซัดเซยซิงโครนัสสถิต

N_{tabu}	คือ จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด
f_{max}	คือ จำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก
S_{best}	คือ ค่าตอบขนาดที่ดีที่สุดของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ในแต่ละรอบการค้นหา
$S_{NB,best}$	คือ ค่าตอบขนาดที่ดีที่สุดของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ในกลุ่มพื้นที่รอบข้าง
$N_{NB,DG}$	คือ จำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้างของ DG ประเภทควบคุมได้
$N_{NB,VR}$	คือ จำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้างของตัวคุมค่าแรงดัน
$N_{NB,CB}$	คือ จำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้างของคาปาซิเตอร์
$N_{NB,STATCOM}$	คือ จำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้างของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
$Tabu\ list$	คือ เซตที่เก็บเส้นทางเดินที่ต้องห้าม เพื่อใช้ตรวจสอบเส้นทางเดินที่ถูกห้ามไว้
Ans_{list}	คือ เซตที่เก็บชุดคำตอบที่ถูกค้นพบว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมแบบเฉพาะถิ่น

ขั้นตอนของการแก้ปัญหาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ ประกอบด้วยขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยใช้กลไก ATS และขั้นตอนการประเมินคุณภาพคำตอบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยใช้กลไก ATS

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนหลักในการหาค่าเหมาะสมที่สุดของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนหลักๆ ตามลำดับดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1** กำหนดค่าคำตอบเริ่มต้น (S_0) จำนวนรอบการคำนวณสูงสุด (N_{tabu}) จำนวนสมาชิกภายในพื้นที่รอบข้าง (N_{NB}) จำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก (f_{max}) และสร้างตัวแปร $Tabu\ list$
- ขั้นตอนที่ 2** กำหนดให้ชุดคำตอบเริ่มต้น S_0 ให้เท่ากับ S_{best} แล้วบันทึกค่า S_{best} ไว้ใน $Tabu\ list$ เพื่อใช้ตรวจสอบเส้นทางเดินที่ต้องห้าม
- ขั้นตอนที่ 3** ประเมินคุณภาพคำตอบของ S_{best}

สำหรับวิธีการประเมินคุณภาพของคำตอบ ได้นำเสนอในหัวข้อ 5.2.2 ขั้นตอนการประเมินคุณภาพคำตอบ

ขั้นตอนที่ 4 สร้างสมาชิกชุดคำตอบรอบข้างของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต ให้ครบตามจำนวนสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง $N_{NB,DG}$ $N_{NB,VR}$ $N_{NB,CB}$ และ $N_{NB,STATCOM}$ ที่กำหนดไว้ โดยสร้างจากพื้นที่รัศมีรอบๆ S_{best}

สำหรับวิธีการสร้างสมาชิกชุดคำตอบรอบข้างของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิตนั้น ได้อธิบายในหัวข้อ 5.2.3 ขั้นตอนการสร้างสมาชิกชุดคำตอบ

ขั้นตอนที่ 5 ประเมินคุณภาพคำตอบจากสมาชิกชุดคำตอบรอบข้างในขั้นตอนที่ 4 จากนั้นพิจารณาชุดคำตอบที่มีผลการประเมินที่ดีที่สุด แล้วกำหนดให้เท่ากับ $S_{NB,best}$

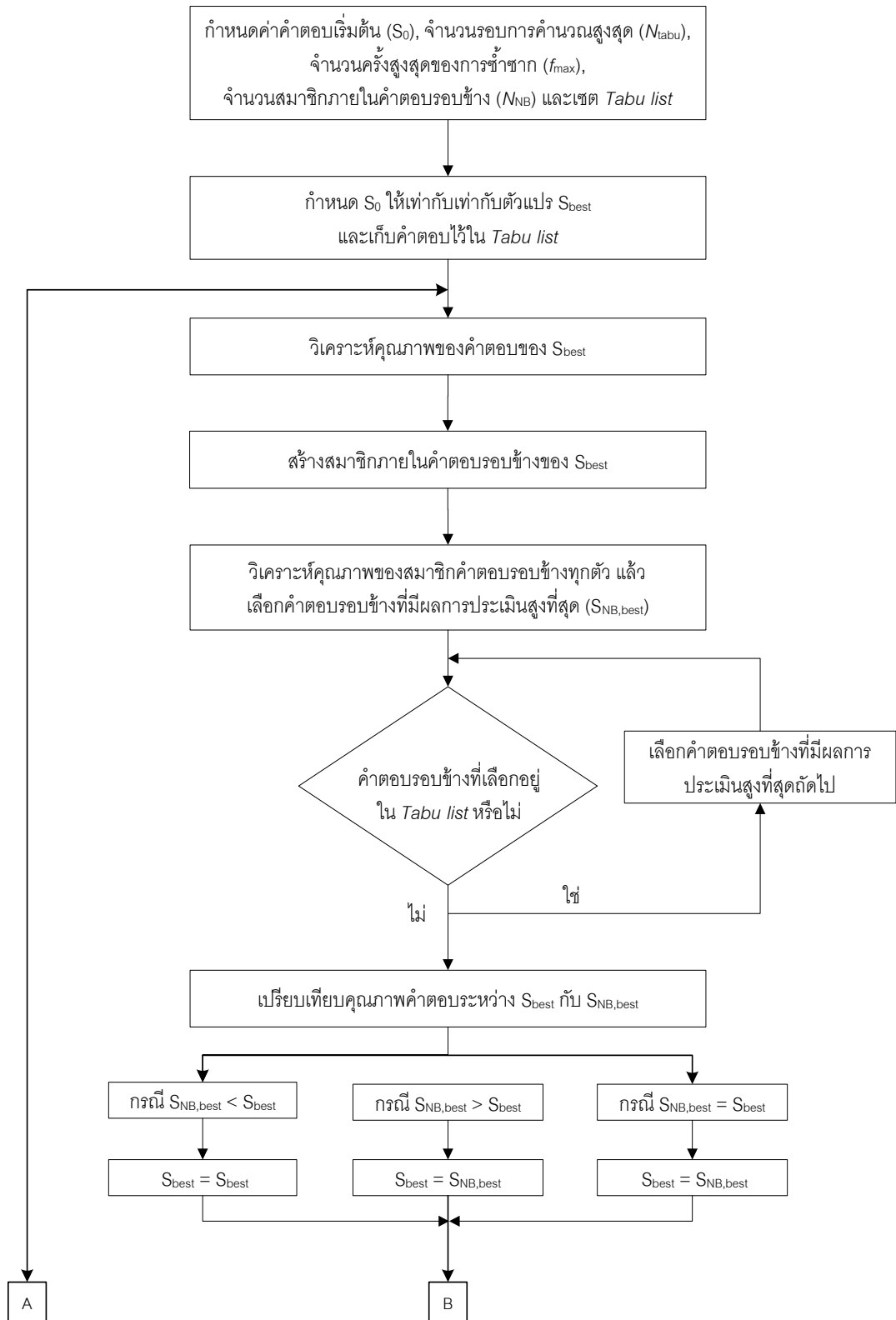
ขั้นตอนที่ 6 ทำการตรวจสอบว่า $S_{NB,best}$ มีอยู่ใน *Tabu list* หรือไม่ (มีความเป็นทาบูหรือไม่) ซึ่งหากมีปรากฏ ให้ทำการเลือกคำตอบที่มีผลการประเมินดีรองลงมาแล้วกำหนดให้เท่ากับ $S_{NB,best}$ โดยขั้นตอนนี้จะวนหาคำตอบที่ดีรองลงมาเรื่อยๆ เมื่อพบว่า $S_{NB,best}$ มีปรากฏอยู่ใน *Tabu list*

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบคุณภาพของคำตอบระหว่าง S_{best} และ $S_{NB,best}$ เพื่อพิจารณาในการกำหนดค่า S_0 เพื่อใช้ในรอบการคำนวณต่อไป โดยสามารถแยกเป็นกรณีดังนี้

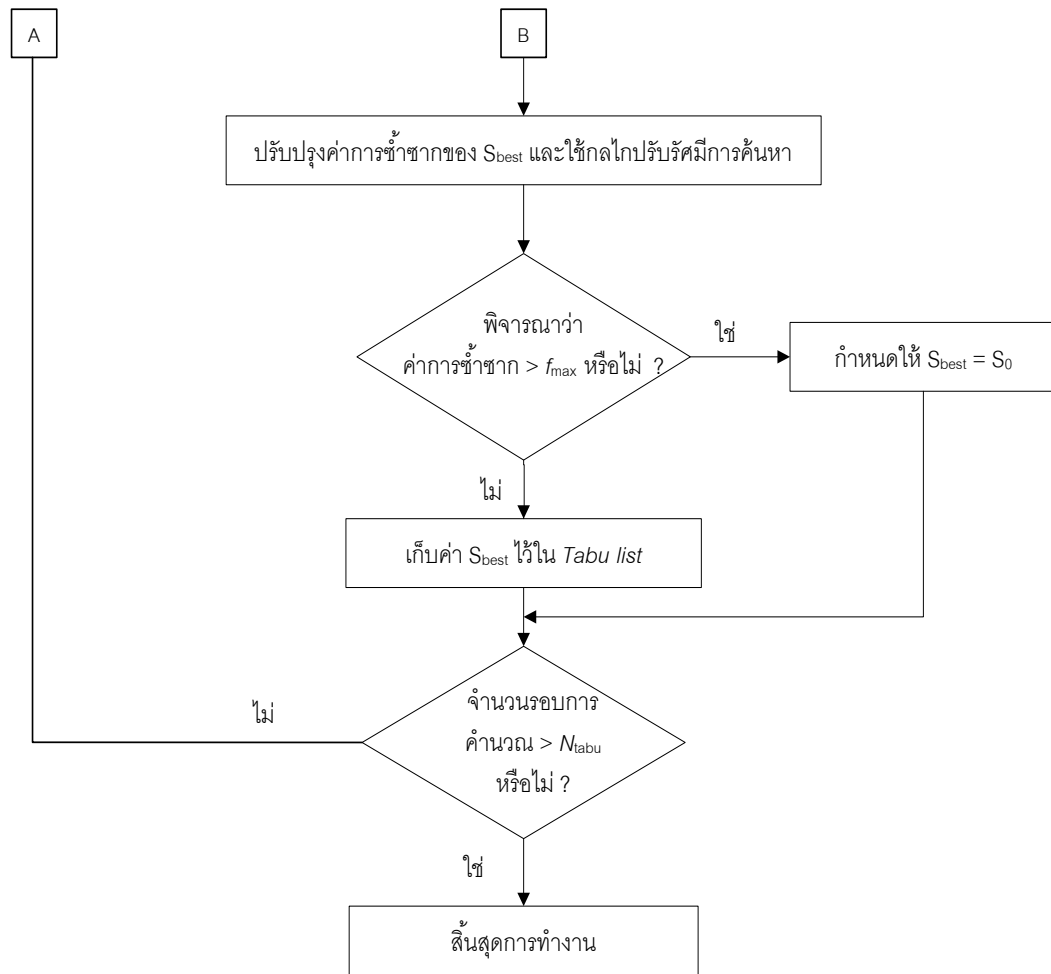
- กรณี $S_{NB,best}$ มีค่าการประเมินแยกว่า S_{best}
หมายความว่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาค้นหาปัจจุบัน ไม่ดีกว่าคำตอบเดิม ซึ่งกรณีนี้คำตอบเดิมมีโอกาสเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้นจึงกำหนดให้ S_{best} เท่ากับค่าเดิม เนื่องจาก S_{best} มีโอกาสเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น
- กรณี $S_{NB,best}$ มีค่าการประเมินดีกว่า S_{best}
หมายความว่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาค้นหาปัจจุบัน ดีกว่าคำตอบเดิมที่มีอยู่ ซึ่งกรณีนี้คือพบเส้นทางที่มีโอกาสเดินไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ดังนั้นจึงกำหนดให้ S_{best} เท่ากับ $S_{NB,best}$
- กรณี $S_{NB,best}$ มีค่าการประเมินเท่ากับ S_{best}
กรณีนี้อาจเป็นไปได้เนื่องจาก $S_{NB,best}$ มีหลายชุดคำตอบ ดังนั้นให้ทำการกำหนด S_{best} เท่ากับ $S_{NB,best}$

- ขั้นตอนที่ 8** ในกรณีที่มีการซ้ำซากของ S_{best} ให้ทำการเพิ่มค่าการซ้ำซาก และทำการตรวจสอบค่าการซ้ำซากของชุดคำตอบ S_{best} ว่ามีค่าสูงเท่ากับจำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก f_{max} หรือไม่ ถ้าไม่มีให้ข้ามไปยังขั้นตอนต่อไป แต่ถ้ามีแสดงว่า S_{best} เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น แล้วทำการเก็บ S_{best} ไว้ในเซตของชุดคำตอบ เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างในขั้นตอนสุดท้าย จากนั้นทำการกำหนดให้ S_{best} เท่ากับ S_0 ตามหลักการของกลไกการเดินย้อยนรอย
- ขั้นตอนที่ 9** บันทึกค่า S_{best} ใน *Tabu list* หากค่าการซ้ำซากน้อยกว่าจำนวนครั้งสูงสุดของการซ้ำซาก f_{max}
- ขั้นตอนที่ 10** ปรับปรุงค่าจำนวนรอบของการค้นหาเพิ่มขึ้น 1 รอบ แล้วตรวจสอบว่า รอบของการค้นหาครบตามจำนวนรอบของการค้นหาสูงสุด N_{tabu} ที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าครบแล้วให้ไปยังขั้นตอนต่อไป แต่ถ้ายังไม่ครบให้กลับไปทำซ้ำที่ขั้นตอนที่ 2
- ขั้นตอนที่ 11** พิจารณาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง โดยเลือกจากคำตอบที่มีคุณภาพดีที่สุดของ Ans_{list} ซึ่งจะอยู่ในรูปคำตอบของค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย (Average voltage difference)

จากขั้นตอนการแก้ปัญหาที่ได้อธิบายมาทั้ง 11 ขั้นตอน สามารถสรุปให้อยู่ในรูปแบบแผนผังการทำงานดังรูปที่ 5.1 ต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 แผนผังการทำงานกลไก ATS



รูปที่ 5.1 แผนผังการทำงานกลไก ATS (ต่อ)

5.2.2 ขั้นตอนการประเมินคุณภาพคำตอบ

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการในขั้นตอนที่ 3 หัวข้อ 5.2.1 ซึ่งเป็นกระบวนการในการประเมินคุณภาพของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และขนาดตัวชดเชยเชิงโคโรนัสถิต โดยขั้นตอนการประเมินคุณภาพคำตอบนั้น เป็นขั้นตอนสำคัญในการเดินไปสู่คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1** รับค่าข้อมูลของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยเชิงโคโรนัสถิต
- ขั้นตอนที่ 2** ปรับปรุงชุดข้อมูลบัส เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายส่ง ที่เป็นผลมาจากการรับค่าในขั้นตอนที่ 1 โดยในส่วนของปรับปรุงชุดข้อมูลบัสใช้เมื่อปรับปรุงข้อมูลขนาดตัวชดเชยเชิงโคโรนัสถิต และขนาดคาปาซิเตอร์ ชุดข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้เมื่อปรับปรุงข้อมูลขนาด DG ประเภทควบคุมได้ และการปรับปรุงชุดข้อมูลสายส่งใช้เมื่อปรับปรุงข้อมูลแท็บตัวคุมค่าแรงดัน

ขั้นตอนที่ 3 นำข้อมูลที่มีการปรับปรุงแล้ว มาทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson)

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบว่าการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเข้าสู่สมดุลหรือไม่

- ถ้าเข้าสู่สมดุล ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าไม่เข้าสู่สมดุล ให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่ 11

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบว่า DG ประเภทควบคุมได้ จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟ เกินพิกัดที่จ่ายได้หรือไม่

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟ แล้วข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 6 ตรวจสอบว่า DG ประเภทควบคุมได้ มีค่าตัวประกอบกำลังเกินช่วงพิกัดหรือไม่

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดค่าตัวประกอบกำลัง แล้วข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบว่าจำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์ เกินพิกัดหรือไม่

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดจำนวนครั้งการทำงานของตัวคุมค่าแรงดัน หรือคาปาซิเตอร์ แล้วข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบขนาดแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน เกินพิกัดหรือไม่

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดขนาดแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน แล้วข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 9 ตรวจสอบกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ชดเชยจากคาปาซิเตอร์ว่าเกินพิกัดที่จ่ายได้หรือไม่

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ชดเชยจากคาปาซิเตอร์ แล้วข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 10 ตรวจสอบกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ชดเชยจากตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิต เกินพิกัดที่จ่ายได้หรือไม่

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ขีดเซย์จากตัวชดเชย
ซึ่งโครนัสสถิต แล้วข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 11 ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่งแต่ละเส้น และกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่าน
หม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้า ว่าเกินพิกัดของสายส่งและหม้อแปลงหรือไม่

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลในสายส่ง และ
กำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านหม้อแปลง แล้วข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนที่ 12 ตรวจสอบระดับแรงดันที่แต่ละบัส

- ถ้าไม่เกิน ให้ข้ามไปยังขั้นตอนถัดไป
- ถ้าเกิน ให้บันทึกผลการละเมิดขีดจำกัดระดับแรงดันที่แต่ละบัส แล้วข้ามไปยังขั้นตอน
ถัดไป

ขั้นตอนที่ 13 ทำการประเมินคุณภาพคำตอบที่ได้กำหนดให้เป็น “คะแนน” ในการชี้วัด
คุณภาพของคำตอบ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะพิจารณาให้คะแนนสำหรับเงื่อนไขบังคับที่
ทั้งผ่าน/ไม่ผ่านเกณฑ์ การให้คะแนนคำตอบสามารถกำหนดได้ดังนี้

1) หากเกิดการละเมิดเงื่อนไขบังคับอย่างน้อย 1 ชนิด

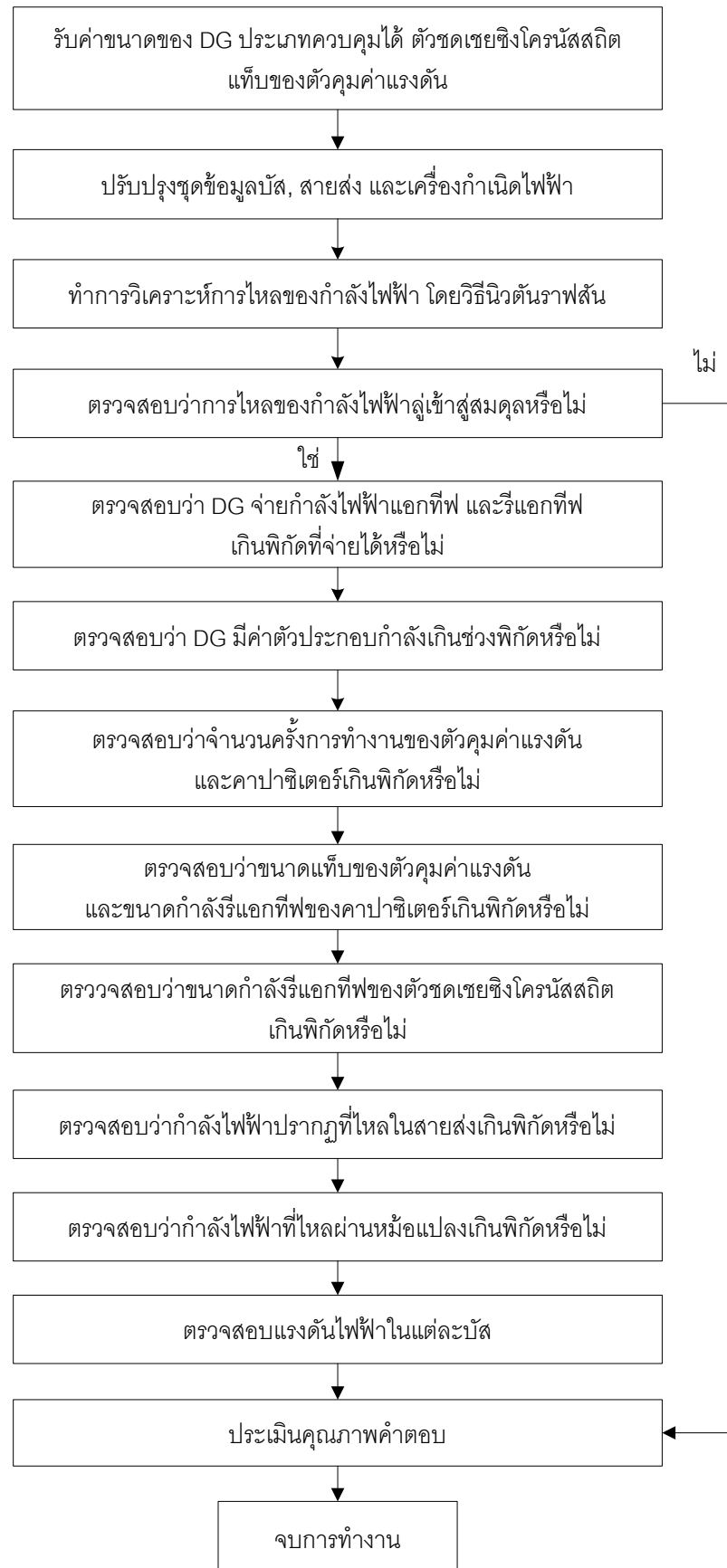
คะแนน = 100	คือ	การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าไม่เข้าสู่สมดุล
คะแนน = 11	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 11 ชนิด
คะแนน = 10	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 10 ชนิด
คะแนน = 9	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 9 ชนิด
คะแนน = 8	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 8 ชนิด
คะแนน = 7	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 7 ชนิด
คะแนน = 6	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 6 ชนิด
คะแนน = 5	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 5 ชนิด
คะแนน = 4	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 4 ชนิด
คะแนน = 3	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 3 ชนิด
คะแนน = 2	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 2 ชนิด
คะแนน = 1	คือ	เกิดการละเมิดขีดจำกัด 1 ชนิด

2) พิจารณาการประเมินค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ (5.1) ให้นำมาใช้ประกอบการประเมิน ณ ที่นี้ด้วย ซึ่งวิธีการคำนวณการประเมินค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยคือ ให้นำผลรวมในทุกๆ บัสจากค่าของผลคูณโหลดแต่ละบัสกับค่ากำลังสองของผลต่างระหว่างแรงดันแต่ละบัสกับแรงดันที่ต้องการ (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) แล้วหารด้วยผลรวมของโหลดทั้งหมดในระบบ โดยในขั้นตอนนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าเป็นบวกเสมอ

3) นำคะแนนที่ได้จาก 1) และ 2) มารวมกัน

ทั้งนี้จาก 13 ขั้นตอนที่กล่าวมา สามารถสรุปให้อยู่ในรูปแบบผังการทำงาน ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการประเมินคุณภาพคำตอบ

5.2.3 ขั้นตอนการสร้างสมาชิกชุดคำตอบ

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการหนึ่งที่อยู่ภายในขั้นตอนที่ 4 หัวข้อ 5.2.1 ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการพิจารณาการเดินที่ดีใน ATS ในการประเมินคุณภาพของขนาด DG ประเภทควบคุมได้ แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต โดยสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตันราฟสัน (Newton-Raphson) จากคำตอบ S_{best}

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบขนาดแรงดันทุกบัสของระบบ

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบผลรวมค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันในแต่ละบัสกับระดับแรงดันที่ต้องการ

สำหรับในสามขั้นตอนแรกนี้ เป็นขั้นตอนหลักเพื่อใช้ในการคาดคะเนเส้นทางที่จะเดิน ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต มีผลต่อการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งแต่ละเส้น ซึ่งการคาดคะเนนั้นสามารถยกตัวอย่างได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{3\phi} = 3 \frac{|V_j|}{X_s} (|E_i| - |V_j|) \quad (5.15)$$

โดยกำหนดในสัญลักษณ์ i และ j แทนด้วยบัสที่เชื่อมต่อกัน

จากสมการที่ (5.15) จะเห็นได้ว่า ถ้า $|E_i| > |V_j|$ บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกำลังไฟฟ้าร์เอกทีฟให้บัสที่เชื่อมต่อ แต่ถ้า $|E_i| < |V_j|$ บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะรับกำลังไฟฟ้าร์เอกทีฟ ซึ่งการคาดคะเนมีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ ตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต และคาปาซิเตอร์

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบผลต่างของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่มีสายส่งเชื่อมต่อกัน พร้อมทั้งบันทึกผลความต่างที่มากที่สุด และน้อยที่สุด

ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบผลต่างระหว่างระดับแรงดันที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดในระบบ พร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งของบัสที่มีแรงดันสูงสุด และบัสที่มีแรงดันต่ำสุด

ในขั้นตอนที่ 4 ถึงขั้นตอนที่ 5 นี้ใช้พิจารณาประกอบร่วมในการคาดคะเนเส้นทางในการเดิน กล่าวคือ ฟังก์ชันจุดประสงค์คือต้องการให้ผลลัพธ์ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้มานั้นอาจมีค่าน้อย แต่ระดับแรงดันในบัสที่เชื่อมต่อกันก็อาจมีระดับที่ต่างกันมากก็ได้ ทั้งนี้การพิจารณาแท็บของตัวคุมค่าแรงดันจะพิจารณาในสามขั้นตอนนี้ เนื่องจาก

ตัวคุมค่าแรงดันส่งผลต่อระดับแรงดันในระบบเป็นรูปคล้ายฟันเลื่อย ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนั้นในสามขั้นตอนนี้จึงต้องพิจารณากันไปด้วยกัน

ขั้นตอนที่ 6 เลือกลักษณะเส้นทางการเดิน

สำหรับลักษณะเส้นทางการเดินนั้น สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

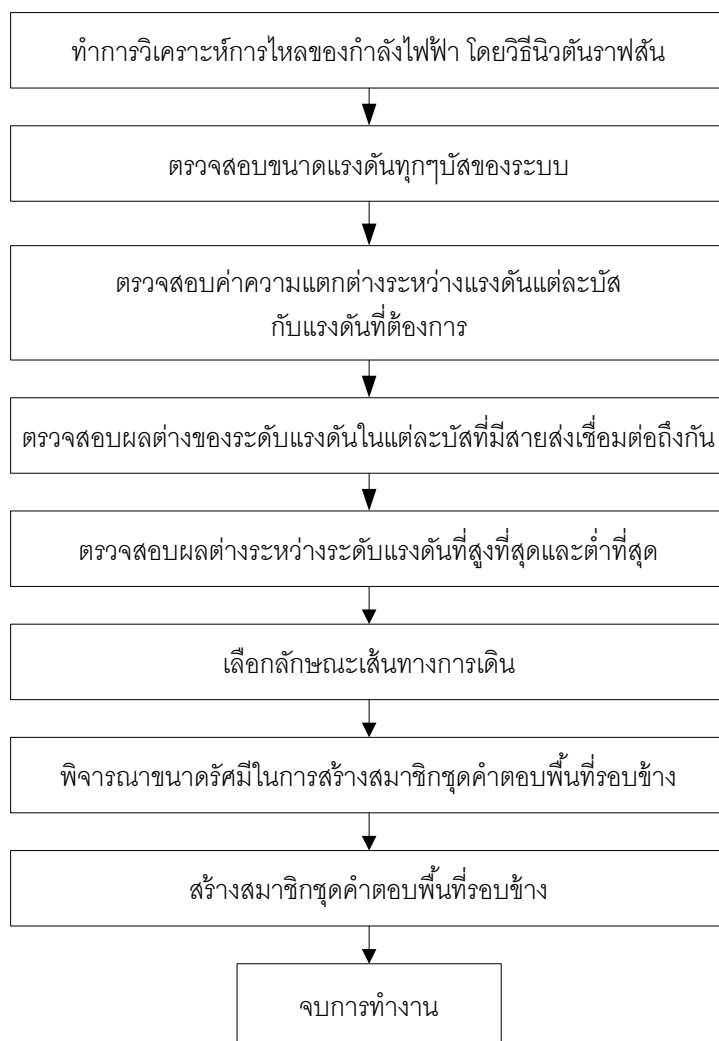
- 1) ขนาดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้จำนวน p ตัว มีวิธีเลือกการเดินได้ 2 วิธี คือจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ
- 2) ขนาดกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้จำนวน p ตัว มีวิธีเลือกการเดินได้ 3 วิธี คือจ่ายกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ รับกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ และไม่จ่าย/รับกำลังไฟฟ้าวรีแอกทีฟ
- 3) ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตจำนวน q ตัว มีวิธีเลือกการเดินได้ 3 วิธี คือจ่ายกำลังรีแอกทีฟ รับกำลังรีแอกทีฟ และไม่จ่าย/รับกำลังรีแอกทีฟ
- 4) คาปาซิเตอร์จำนวน r ตัว มีวิธีเลือกการเดินได้ 3 วิธี คือ จ่ายกำลังรีแอกทีฟ และไม่จ่ายกำลังรีแอกทีฟ
- 5) ตัวคุมค่าแรงดันตัวจำนวน s ตัว มีวิธีเลือกการเดินได้ 3 วิธี คือ ปรับแก้ขึ้น ปรับแก้ลง และไม่ปรับแก้

ดังนั้นวิธีการเลือกเดินมีทั้งหมด $2^p \times 3^p \times 3^q \times 3^r \times 3^s$ วิธี เช่นในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ซึ่งรายละเอียดได้แสดงในหัวข้อ 6.1.1 มี DG ประเภทควบคุมได้จำนวน 1 ตัว ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตจำนวน 1 ตัว และตัวคุมค่าแรงดันตัวจำนวน 2 ตัว ดังนั้นจะมีวิธีการเลือกเดินมีทั้งหมด $2^1 \times 3^1 \times 3^1 \times 3^2 = 162$ วิธี

ขั้นตอนที่ 7 พิจารณาขนาดรัศมีในการสร้างสมาชิกชุดคำตอบพื้นที่รอบข้าง

ขั้นตอนที่ 8 สร้างสมาชิกชุดคำตอบพื้นที่รอบข้าง

จากขั้นตอนการแก้ปัญหาที่ได้อธิบายมาทั้ง 8 ขั้นตอน สามารถสรุปให้อยู่ในรูปแผนผังการทำงานดังรูปที่ 5.3 ต่อไปนี้



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการสร้างสมาชิกชุดคำตอบ

5.3 การสอบทานผลลัพธ์จากอัลกอริทึม

จากคำอธิบายขั้นตอนในการแก้ปัญหาโดยประยุกต์ใช้ ATS ในข้างต้นนั้น ได้แสดงให้เห็นว่าการสร้างสมาชิกคำตอบภายในพื้นที่รอบข้าง และการกำหนดจำนวนรอบการคำนวณ เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสม เนื่องจากมีผลโดยตรงกับความแม่นยำในการค้นหา ดังนั้นคำตอบที่ได้จาก ATS จำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับคำตอบที่ผ่านการพิจารณาทุกกรณี อย่างไรก็ตามความหมายของ “การพิจารณาทุกกรณี” ในที่นี้ ไม่ได้หมายถึง การพิจารณาทุกขนาดที่เป็นไปได้ในช่วงพิกัดที่กำหนดของอุปกรณ์ตัวหนึ่ง แต่เป็นการพิจารณาขนาดที่ถูกกำหนดให้เพิ่ม/ลดอย่างมีแบบแผน ทั้งนี้เพื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ และความแม่นยำของอัลกอริทึมที่น่าเสนอ

สำหรับวิธีการค้นหาแบบพิจารณาทุกกรณี ได้ยกตัวอย่างกรณีในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนอสถิต ซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 7.1.1 โดยมี DG ประเภท

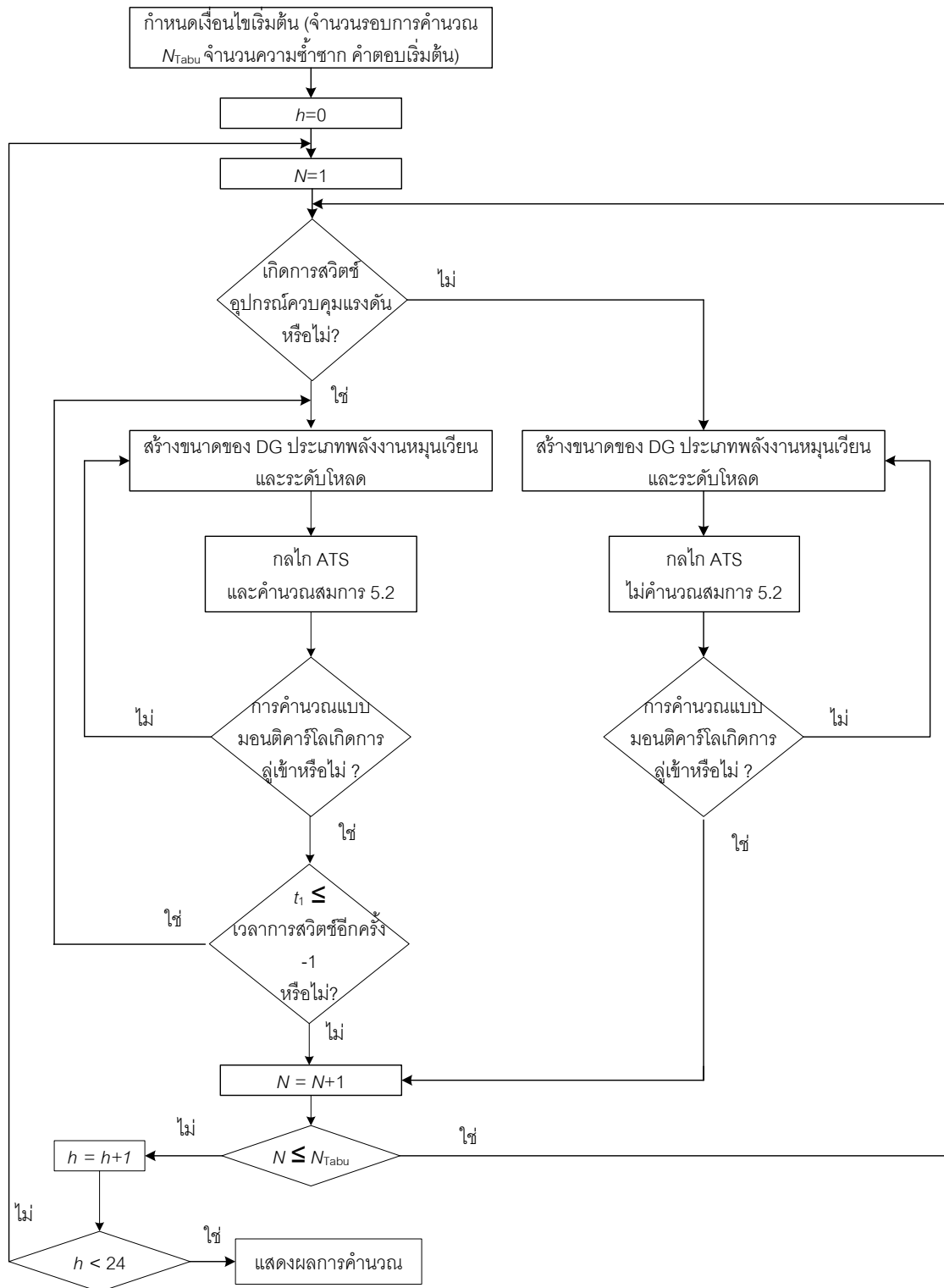
ควบคุมได้จำนวน 1 เครื่อง ตัวชุดเซียงโครนัสสถิตจำนวน 1 เครื่อง และตัวคุมค่าแรงดันจำนวน 2 เครื่อง โดยอุปกรณ์ทั้งสามชนิดถูกกำหนดให้เพิ่ม/ลดขนาดอย่างมีแบบแผน ซึ่งอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ อยู่ในช่วง 0 kW - 500 kW จำนวน 1 เครื่อง โดยกำหนดให้สามารถเพิ่มและลดกำลังการผลิตได้ครั้งละ 5 kW ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกเดินได้ 101 วิธี
- 2) ขนาดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ อยู่ในช่วง -300 kVAr - 300 kVAr จำนวน 1 เครื่อง โดยกำหนดให้สามารถเพิ่มและลดกำลังการผลิตได้ครั้งละ 5 kVAr ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกเดินได้ 121 วิธี
- 3) ขนาดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของตัวชุดเซียงโครนัสสถิต อยู่ในช่วง -3 MVar - 3 MVar จำนวน 1 เครื่อง โดยกำหนดให้สามารถเพิ่มและลดการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ครั้งละ 5 kVAr ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกเดินได้ 1,201 วิธี
- 4) แท็บตัวคุมค่าแรงดันตัวจำนวน 2 เครื่อง แต่ละตัวสามารถเปลี่ยนแท็บได้ 32 ชั้น ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกการปรับแท็บเพิ่มหรือลดได้ 1,089 วิธี

ดังนั้นวิธีการค้นหาแบบพิจารณาทุกกรณีมีทั้งหมด $101 \times 121 \times 1,201 \times 1,089 = 15,983,711,469$ วิธี โดยหากนำวิธีการทั้งหมดมาคำนวณเพื่อหาคำตอบตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์แน่นอนว่าต้องมีคำตอบที่ดีที่สุดปรากฏอยู่ในวิธีทั้งหมดนี้ ดังนั้นจึงสามารถนำไปสอบทานกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ

5.4 สรุปขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหาจากวิธีที่นำเสนอ

จากหัวข้อที่ 5.2 ขั้นตอนในการแก้ปัญหาโดยวิธีค้นหาคำตอบแบบทฤษฎีการปรับตัวได้เป็นขั้นตอนที่คำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุด ณ เวลาขณะนั้น ซึ่งต้องมีการรวมคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในสมการที่ 5.2 ทั้งนี้เพื่อหาคำตอบที่ให้เกิดค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยที่น้อยที่สุดตลอดช่วงเวลาที่สนใจ เนื่องจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ณ เวลาขณะนั้น อาจไม่ทำให้เกิดคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในช่วงเวลาถัดไปได้ นอกจากนี้การคำนวณแบบมอนติคาร์โลจำเป็นต้องรวมในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วย เพื่อคำนวณผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด ซึ่งขั้นตอนรวมทั้งหมดจากวิธีที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ต่อไปนี้



รูปที่ 5.4 ขั้นตอนรวมทั้งหมดจากวิธีที่นำเสนอ

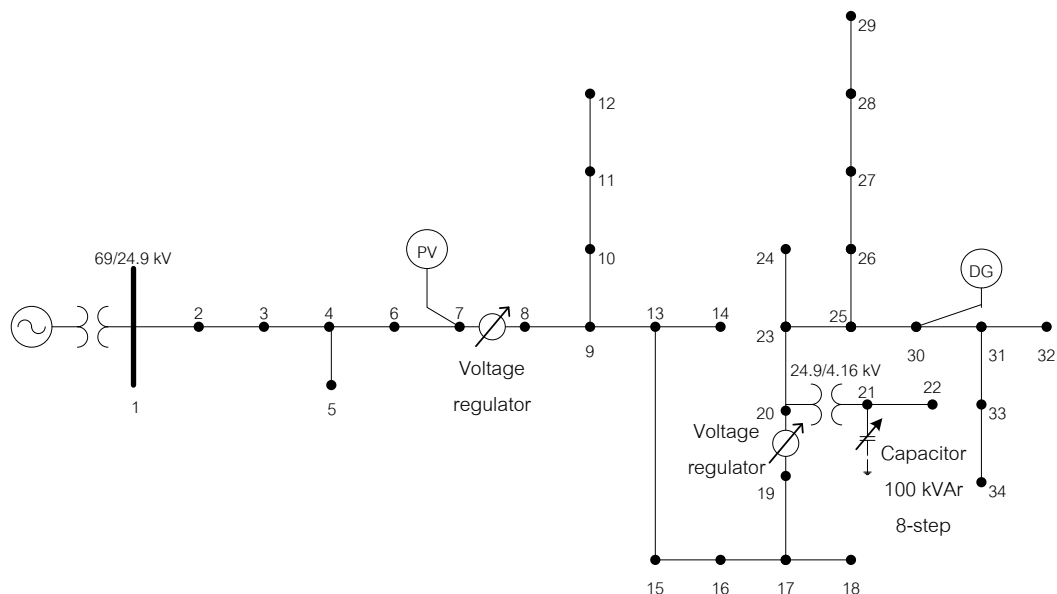
บทที่ 6

วิธีการทำงานของอัลกอริทึมวิธีที่นำเสนอ

ในบทนี้นำเสนอตัวอย่างวิธีการทำงานของอัลกอริทึมจากวิธีที่นำเสนอเพื่อสะดวกต่อการเข้าใจอัลกอริทึม พร้อมทั้งวิธีการสอบทานความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีที่นำเสนอ ทั้งนี้การทำงานของอัลกอริทึมได้แสดงเป็นตัวอย่างโดยทดสอบกับระบบทดสอบ IEEE 34-BUS

6.1 วิธีการทำงานของอัลกอริทึม

ในการสอบทานอัลกอริทึมได้ประยุกต์ใช้ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS ดังรูปที่ 6.1 โดยรายละเอียดของระบบสอบทานอัลกอริทึมมีดังต่อไปนี้คือ ระบบรับไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงขนาด 2.5 kVA ระดับแรงดันของระบบคือ 24.9 kV ยกเว้นบัส 21- บัส 22 ที่รับไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงขนาด 500 VA ซึ่งแปลงระดับแรงดันจาก 24.9 kV เป็น 4.16 kV ระบบไฟฟ้ามีการติดตั้ง DG อยู่ทั้งหมด 2 ตัว คือ DG ประเภทควบคุมได้ ขนาดกำลังผลิต 500 kW \pm 300 kVAr ติดตั้งที่บัส 30 และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่ที่บัส 7 โดยกำหนดให้จ่ายกำลังที่ 150 kW โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอน ตัวคุมค่าแรงดันสองตัวติดตั้งอยู่ระหว่างสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างบัส 7-8 และระหว่างบัส 19-20 คาปาซิเตอร์ขนาด 100 kVAr/ขั้น โดยสามารถปรับได้มากที่สุด 8 ขั้น ติดตั้งอยู่ที่บัส 21 และการทดสอบอัลกอริทึมได้เลือกใช้ระดับโหลด ณ เวลา 7.00 น. มาประกอบการคำนวณ โดยโหลดมีขนาด 825.51 kW 487.242 kVAr ซึ่งมีขนาดเป็น 70 % ของระดับโหลดสูงสุด ทั้งนี้ระดับโหลดสูงสุดได้แสดงในภาคผนวก



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบอัลกอริทึมจากวิธีที่นำเสนอ (IEEE 34-BUS)

6.1.1 ขั้นตอนของอัลกอริทึมจากวิธีที่นำเสนอ

เมื่อเข้ากระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.1 คำตอบเริ่มต้น (Initial solution) ในตัวอย่างนี้ได้กำหนดให้ในระบบไม่มีการจ่ายพลังงานจาก DG ประเภทควบคุมไม่ได้ ตัวควบคุมแรงดันทั้งสองตัว และคาปาซิเตอร์ ซึ่งผลลัพธ์ของระดับแรงดันในแต่ละบัสจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงดังตารางที่ 6.1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 ระดับแรงดันในแต่ละบัสเมื่อคำนวณจากค่าป้อนเข้าของคำตอบเริ่มต้น

บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)	บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)
1	1	18	0.9295
2	0.9989	19	0.9099
3	0.9981	20	0.9027
4	0.9844	21	0.8869
5	0.9843	22	0.8856
6	0.9686	23	0.9009
7	0.9560	24	0.9009
8	0.9477	25	0.8988
9	0.9475	26	0.8987
10	0.9473	27	0.8984
11	0.9436	28	0.8982
12	0.9428	29	0.8982
13	0.9416	30	0.8985
14	0.9416	31	0.8983
15	0.9412	32	0.8983
16	0.9299	33	0.8983
17	0.9296	34	0.8985

นอกจากระดับแรงดันแล้ว ผลลัพธ์อื่นๆที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า จำเป็นต้องนำมาวิเคราะห์คุณภาพคำตอบด้วย ซึ่งผลลัพธ์อื่นๆที่ต้องนำมาวิเคราะห์คุณภาพคำตอบได้แสดงในหัวข้อที่ 5.2.2 ทั้งนี้จากผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในตารางที่ 6.1 มีการลู่ออก ดังนั้นตารางที่ 6.2 จึงได้แสดงการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบที่ได้ของคำตอบเริ่มต้น

ตารางที่ 6.2 การวิเคราะห์คุณภาพคำตอบของคำตอบเริ่มต้น

ชนิดของค่าพิกัด	ค่าขอบเขตที่กำหนด	ค่าที่คำนวณได้	คะแนน
กำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ของ DG	500 kW	0	0
กำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟ ของ DG	± 300 kVAr	0	0
ค่าตัวประกอบกำลัง ของ DG	± 0.8	0	0
จำนวนครั้งการทำงานของตัว คุมค่าแรงดัน	3	0	0
จำนวนครั้งการทำงานของ คาปาซิเตอร์	3	0	0
ขนาดแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน	± 10	0	0
กำลังไฟฟ้าร์แอกทีฟที่ชดเชย จากคาปาซิเตอร์	0 kVAr – 1500 kVAr	0	0
กำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหนดใน สายส่งแต่ละเส้น	150 – 300 MVA	$S_{ij} < 150$ MVA	0
ระดับแรงดันที่แต่ละบัส	0.95 p.u. – 1.05 p.u.	$V_{bus} < 0.95$ p.u.	1
ผลรวมคะแนนจากการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบจากคำตอบเริ่มต้น = 1			

จากตารางที่ 6.1 เมื่อนำมาคำนวณหาค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะได้ผลลัพธ์คือ 0.0741 แล้วนำคำตอบนี้มารวมกับคะแนนที่ได้จากตารางที่ 6.2 ได้เป็นคะแนนของคำตอบเริ่มต้น คือ ค่าประเมินคำตอบเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $0.0741 + 1 = 1.0741$

เมื่อวิเคราะห์คุณภาพคำตอบเริ่มต้นแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการสร้างสมาชิกชุดคำตอบรอบข้าง โดยกระบวนการได้นำเสนอในหัวข้อที่ 5.2.3 ซึ่งมีทั้งหมด 8 ขั้นตอน ทั้งนี้ในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเหมือนตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 ข้างต้น สำหรับขั้นตอนที่ 3 ผลลัพธ์การคำนวณของผลรวมค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันในแต่ละบัสกับระดับแรงดันที่ต้องการมีค่าเท่ากับ -2.3966

เมื่อพิจารณาประกอบจากตารางที่ 6.1 และผลลัพธ์การคำนวณของผลรวมค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันในแต่ละบัสกับระดับแรงดันที่ต้องการดังแสดงข้างต้น สามารถเห็นได้ว่าระดับแรงดันต่ำ หลังจากนั้นให้สู่การสร้างสมาชิกชุดคำตอบจากวิธีที่เป็นไปได้ดังแสดงในหัวข้อที่ 5.2.3 ขั้นตอนที่ 6 โดยในตารางที่ 6.3 นำเสนอตัวอย่างค่าของสมาชิกชุดคำตอบที่สามารถสร้างขึ้นได้แล้วทำการวิเคราะห์คุณภาพคำตอบรอบข้างดังวิธีที่นำเสนอในตารางที่ 6.2 ข้างต้น

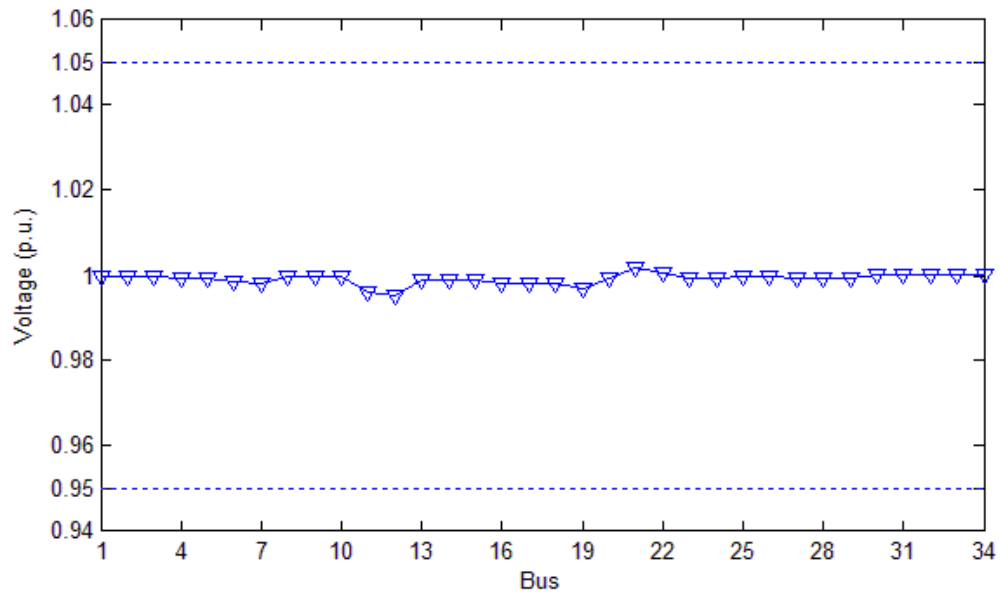
ตารางที่ 6.3 ตัวอย่างค่าของสมาชิกชุดคำตอบที่เป็นไปได้

คำตอบรอบข้าง	P_{DG} (kW)	Q_{DG} (kVAr)	Tap _{VR} บัส 7-8	Tap _{VR} บัส 19-20	$Q_{capacitor}$ (kVAr)	ค่าการ ประเมิน
คำตอบรอบข้างที่ 1	40	30	1	1	0	1.0610
คำตอบรอบข้างที่ 2	40	30	1.0125	0.9875	0	1.0429
คำตอบรอบข้างที่ 3	40	20	1.0125	1	100	1.0610
คำตอบรอบข้างที่ 4	40	20	1.0188	1.0125	100	0.0272
คำตอบรอบข้างที่ 5	30	20	1	1	100	1.0551
คำตอบรอบข้างที่ 6	30	20	1.0125	1	100	1.0406
คำตอบรอบข้างที่ 7	25	15	1.025	1.0125	100	0.0239

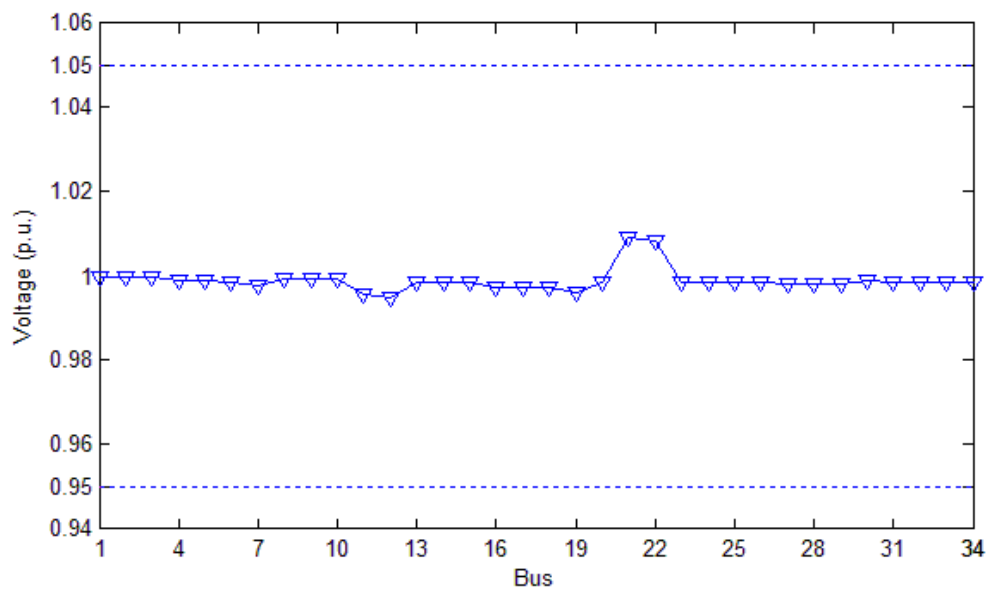
จากตารางที่ 6.3 พบว่าคำตอบรอบข้างที่ 7 มีค่าการประเมินที่ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงกำหนดค่าให้คำตอบรอบข้างที่ 7 เป็นคำตอบรอบข้างที่ดีที่สุด แล้วนำคำตอบนี้ไปเปรียบเทียบกับคุณภาพคำตอบเริ่มต้นเพื่อพิจารณาค่าดีกว่าต่อไป แล้วทำการคำนวณซ้ำต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยตารางที่ 6.4 แสดงคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นทั้งหมดที่พบในรอบการค้นหาค่าที่กำหนด และรูปที่ 6.2 – รูปที่ 6.5 แสดงกราฟระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อใช้คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่พบในการควบคุมแรงดัน

ตารางที่ 6.4 คำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นทั้งหมดที่พบ

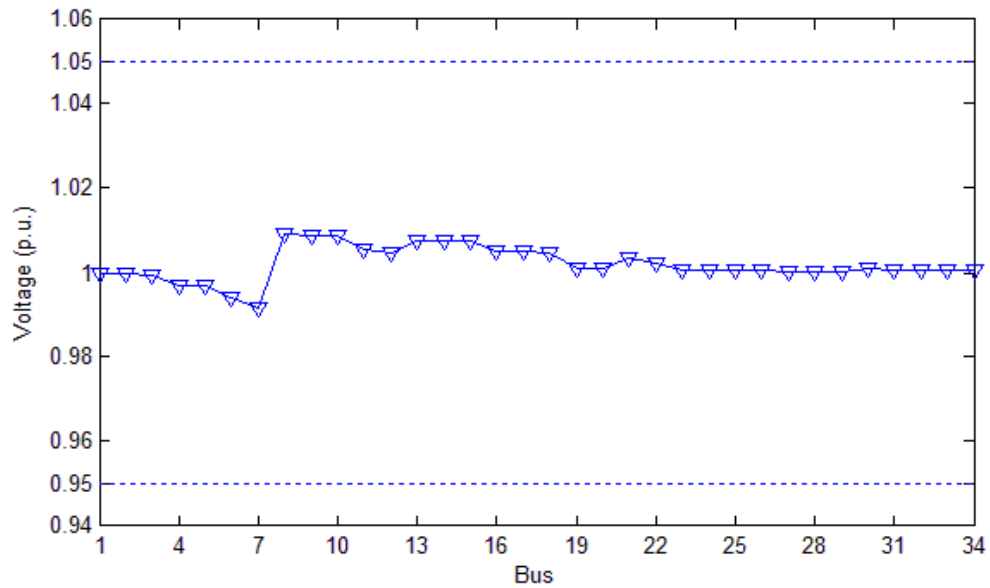
	P_{DG} (kW)	Q_{DG} (kVAr)	Tap _{VR} บัส 7-8	Tap _{VR} บัส 19-20	$Q_{capacitor}$ (kVAr)	ค่าการประเมิน
คำตอบที่ 1	400	290	1	1	200	0.0009
คำตอบที่ 2	390	190	1	1	300	0.0019
คำตอบที่ 3	390	140	1.0125	1	200	0.0031
คำตอบที่ 4	370	135	1.0125	1.006	100	0.0027



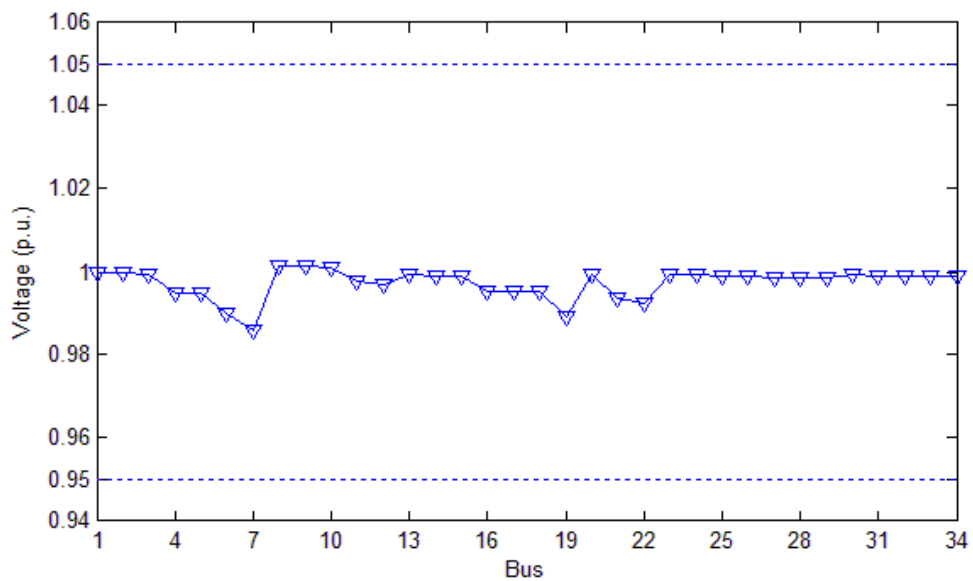
รูปที่ 6.2 ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยคำตอบที่ 1



รูปที่ 6.3 ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยคำตอบที่ 2



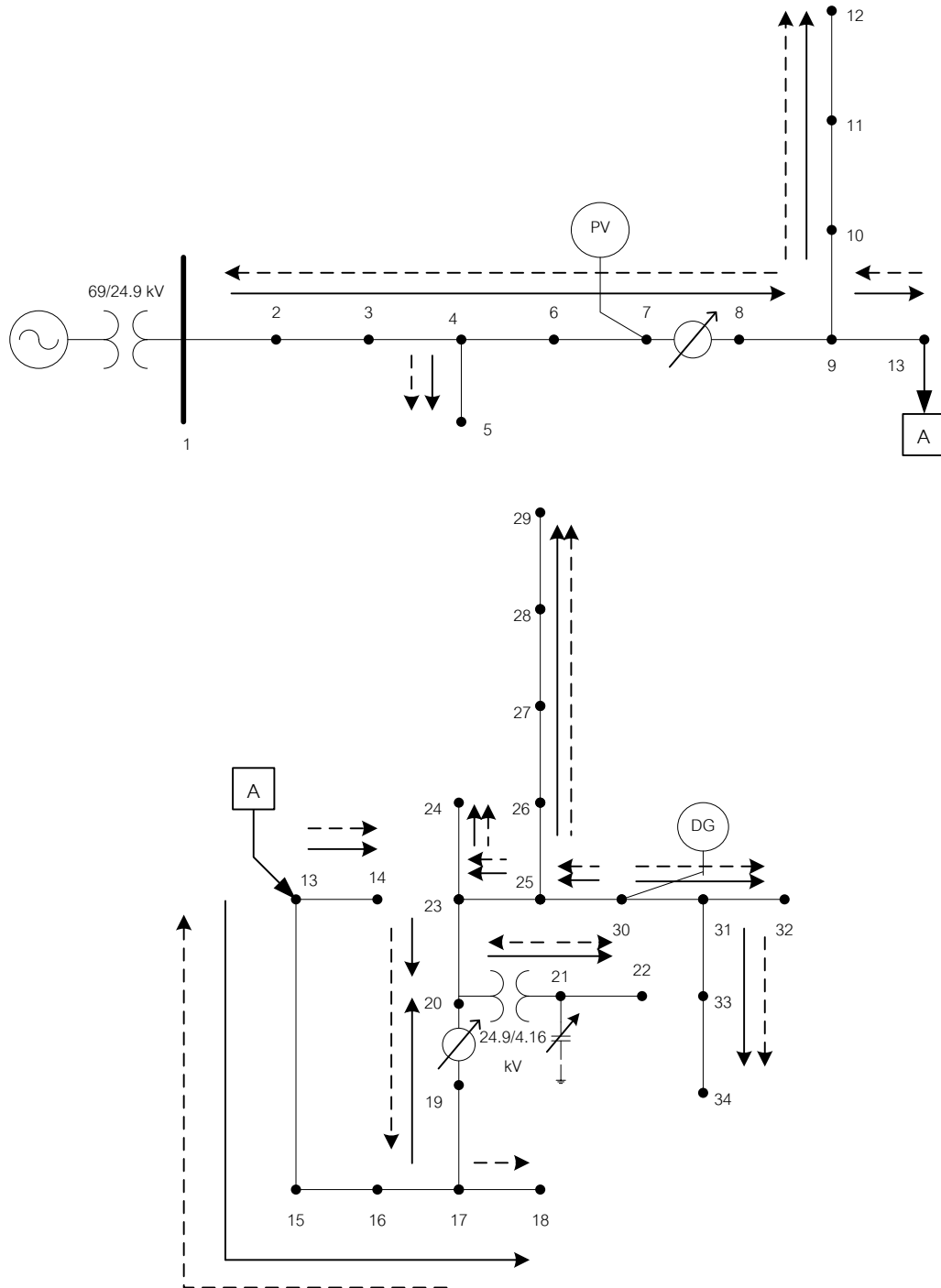
รูปที่ 6.4 ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยคำตอบที่ 3



รูปที่ 6.5 ระดับแรงดันของแต่ละบัสเมื่อควบคุมโดยคำตอบที่ 4

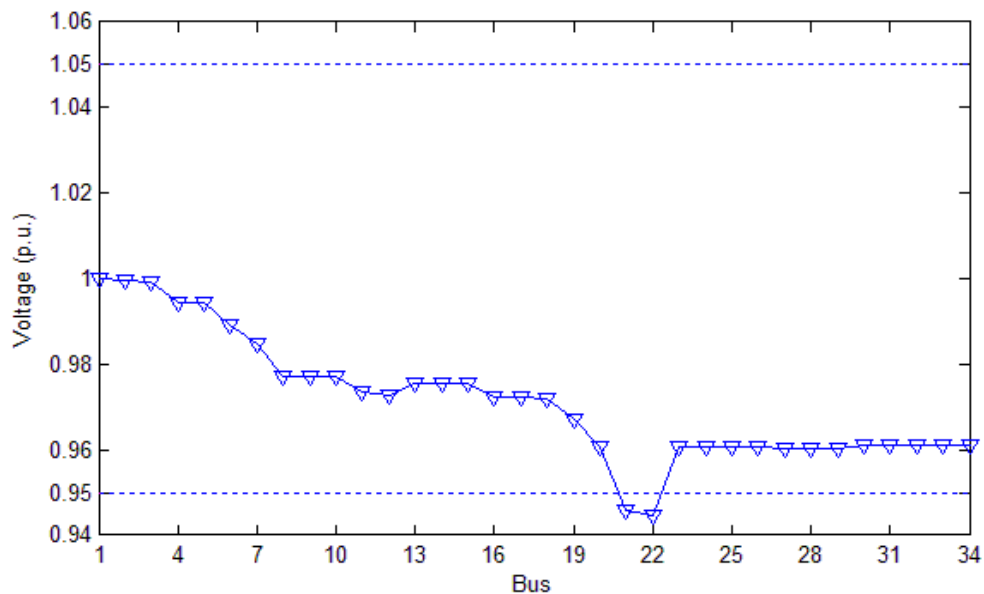
จากทั้งสี่กราฟพบว่าระดับแรงดันในแต่ละบัสมีค่าใกล้เคียงกับระดับแรงดันที่ต้องการ (ในที่นี่คือ 1 p.u.) อย่างไรก็ตามในรูปที่ 6.3 พบว่าที่บัส 21 และ บัส 22 มีระดับแรงดันที่สูงกว่าบัสอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการชดเชยกำลังไฟฟ้วารีเอกที่ฟจากคาปาซิเตอร์ที่มากเกินไป สำหรับรูปที่ 6.4 พบว่าระดับแรงดันตั้งแต่บัส 8 เป็นต้นไปมีค่าลดลงเรื่อยๆเหมือนลักษณะแรงดันทั่วไปของระบบจ่ายไฟแบบเรเดียล แต่จะพบว่ามีระดับแรงดันสูงขึ้นอย่างเห็นชัดที่ระหว่างบัส 7 และบัส 8 ทั้งนี้เนื่องมาจากผลกระทบจากตัวคุมค่าแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.5 และในรูปที่ 6.5 ที่บัส 7 - 8 และบัส 19 - 20 ก็เป็นผลกระทบจากตัวคุมค่าแรงดันด้วยเช่นกัน และรูปที่ 6.6 ต่อไปนี้

แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในกรณีที่ใช้ค่าตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่ดีที่สุด โดยเส้นลูกศร
 เส้นทึบแทนทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และเส้นลูกศรเส้นประแทนทิศทางการไหลของ
 กำลังไฟฟ้แอกทีฟ

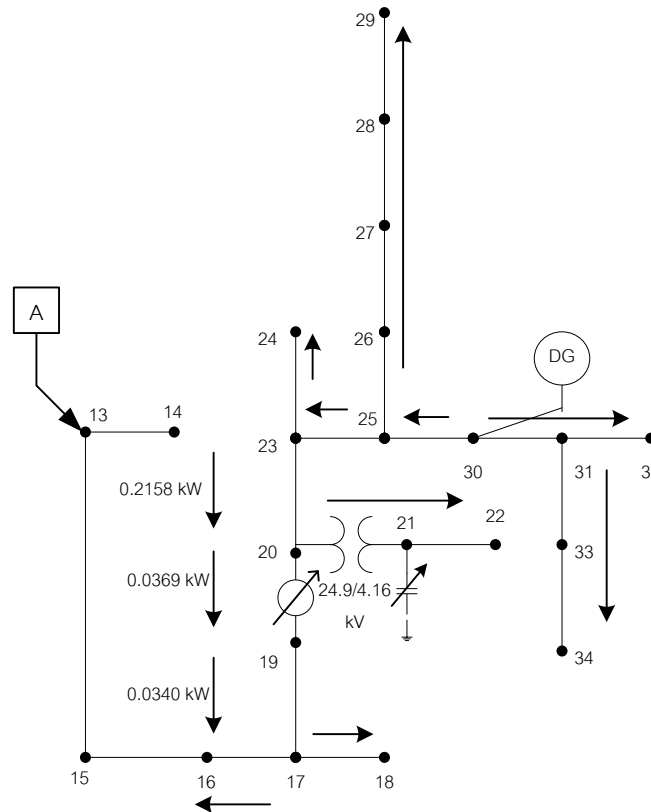


รูปที่ 6.6 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจากการใช้ค่าตอบวงแคบเฉพาะถิ่นที่ดีที่สุด

จุดที่น่าสังเกตจากรูปที่ 6.6 คือในกรณีที่เกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าย้อนกลับผ่านตัวคุมค่าแรงดัน ซึ่งปกติตัวคุมค่าแรงดันจะควบคุมแรงดันทางฝั่งทุติยภูมิตามทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟในระบบเรเดียลแบบปกติ แต่ถ้าหากเกิดการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟย้อนกลับ ตัวคุมค่าแรงดันต้องหันมาควบคุมแรงดันทางฝั่งปฐมภูมิแทน ทั้งนี้อัลกอริทึมที่น่าเสนอได้คำนึงถึงประเด็นนี้เช่นกัน เพื่อการแสดงให้เห็นผลของควบคุมแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดันอย่างชัดเจน ระบบในรูปที่ 6.1 กำหนดให้ไม่มีการชดเชยกำลังรีแอกทีฟจากคาปาซิเตอร์ ในรูปที่ 6.7 แสดงปัญหาแรงดันตกที่ปลายทางเมื่อไม่มีการชดเชยแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน โดยกำหนดให้ DG ประเภทควบคุมได้จ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟขนาด 600 kW (ซึ่งละเมิดพิกัดขนาดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ แต่ในที่นี้เพียงต้องการแสดงให้เห็นถึงผลกระทบเท่านั้น) แต่ไม่มีจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ และรูปที่ 6.8 แสดงขนาดของกำลังแอกทีฟที่ไหลผ่านตัวคุมค่าแรงดัน โดยลูกศรแสดงทิศทางการไหลของกำลังแอกทีฟ

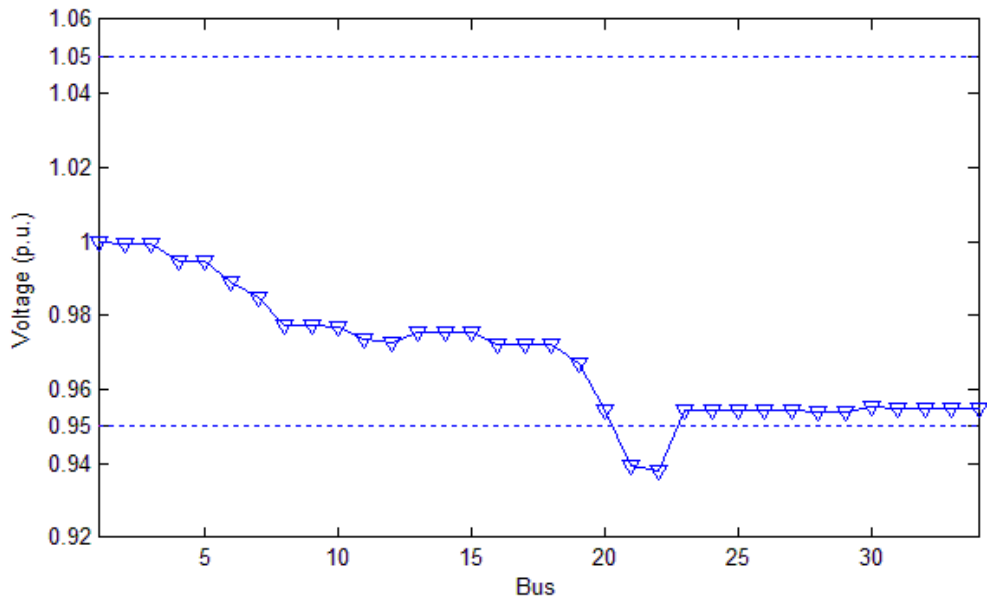


รูปที่ 6.7 ระดับแรงดันในแต่ละบัสเมื่อไม่มีการชดเชยแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน

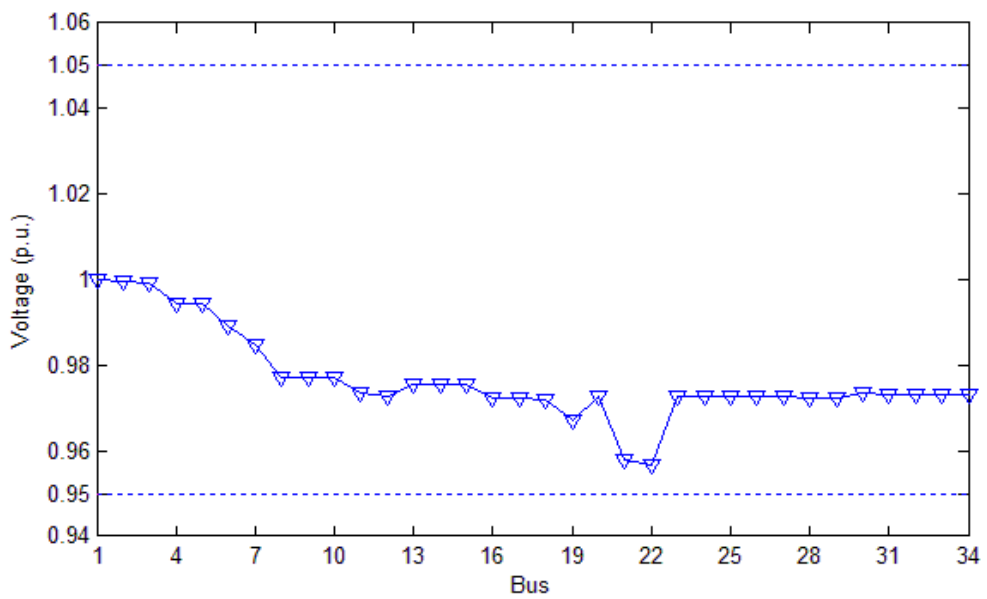


รูปที่ 6.8 การไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ

จากรูปที่ 6.7 พบว่าเกิดการละเมิดขีดจำกัดแรงดันต่ำที่บัส 21 – 22 และรูปที่ 6.8 พบว่าเกิดการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ ดังนั้นในที่นี้ได้อาศัยการชดเชยแรงดันด้วยตัวคุมค่าแรงดัน อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการควบคุมการปรับแก้ของตัวคุมค่าแรงดันที่ไม่ถูกต้อง อาจทำให้ระดับแรงดันมีค่าต่ำกว่าเดิม หรือต่ำกว่าขีดจำกัดขอบเขตแรงดันต่ำได้ ซึ่งผลกระทบจากการควบคุมที่ไม่ถูกต้องได้แสดงในรูปที่ 6.9 อย่างไรก็ตามหากการควบคุมการปรับแก้ของตัวคุมค่าแรงดันกระทำอย่างถูกต้อง (ซึ่งได้พิจารณารวมเข้าในวิธีที่นำเสนอแล้ว) ตัวคุมค่าแรงดันสามารถชดเชยแรงดันได้ตามปกติดังแสดงในรูปที่ 6.10 ทั้งนี้เก็บของตัวคุมค่าแรงดันได้กำหนดให้มีขนาด 1.006 ทั้งกรณีควบคุมตัวคุมค่าแรงดันถูกต้องและไม่ถูกต้อง โดยระดับแรงดันที่ต่ำที่สุดในกรณีที่ควบคุมตัวคุมค่าแรงดันไม่ถูกต้องคือ 0.9383 p.u. ที่บัส 22 ในขณะที่ระดับแรงดันที่ต่ำที่สุดในกรณีที่ควบคุมตัวคุมค่าแรงดันถูกต้องคือ 0.9568 p.u. ที่บัส 22



รูปที่ 6.9 ระดับแรงดันเมื่อการควบคุมการปรับแก้ของตัวคุมค่าแรงดันไม่ถูกต้อง



รูปที่ 6.10 ระดับแรงดันเมื่อการควบคุมการปรับแก้ของตัวคุมค่าแรงดันถูกต้อง

6.1.2 ผลการทดสอบจากการพิจารณาทุกกรณี

จากผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 6.4 จำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับคำตอบที่ผ่านการค้นหาแบบพิจารณาทุกกรณี เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ และความแม่นยำของอัลกอริทึม ทั้งนี้การค้นหาแบบพิจารณาทุกกรณีได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 5.3 โดยจากระบบทดสอบอัลกอริทึมในรูปที่ 6.1 สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

- 1) ขนาดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ อยู่ในช่วง 0 kW - 500 kW จำนวน 1 ตัว โดยกำหนดให้สามารถเพิ่มและลดกำลังการผลิตได้ครั้งละ 5 kW ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกเดินได้ 101 วิธี
- 2) ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของ DG ประเภทควบคุมได้ อยู่ในช่วง -300 kVAr – 300 kVAr จำนวน 1 ตัว โดยกำหนดให้สามารถเพิ่มและลดกำลังการผลิตได้ครั้งละ 5 kVAr ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกเดินได้ 121 วิธี
- 3) ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของคาปาซิเตอร์ อยู่ในช่วง 0 kVAr – 800 kVAr จำนวน 1 ตัว โดยกำหนดให้สามารถเพิ่มและลดการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ครั้งละ 100 kVAr ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกเดินได้ 9 วิธี
- 4) แท็บตัวคุมค่าแรงดันตัวจำนวน 2 ตัว แต่ละตัวสามารถเปลี่ยนแท็บได้ 32 ชั้น ดังนั้นจึงมีวิธีเลือกการเดินได้ 1,089 วิธี

ดังนั้นวิธีการค้นหาแบบพิจารณาทุกกรณีมี $101 \times 121 \times 9 \times 1,089 = 119,778,021$ วิธี โดยคำตอบจากการพิจารณาทุกกรณีได้พบคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างดังแสดงในตารางที่ 6.5 ต่อไปนี้ ซึ่งสามารถเห็นว่ามีคำตอบที่ใกล้เคียงกับวิธีที่น่าเสนอมาก

ตารางที่ 6.5 คำตอบแบบวงกว้างจากการพิจารณาทุกกรณี

	P_{DG} (kW)	Q_{DG} (kVAr)	Tap _{VR} บัส 7-8	Tap _{VR} บัส 19-20	$Q_{capacitor}$ (kVAr)	ค่าการประเมิน
คำตอบแบบวงกว้าง	415	280	1	1	200	8.5405e-004

อย่างไรก็ตาม คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างในตารางที่ 6.5 ไม่ถือว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างที่แท้จริง เนื่องจากขนาดของการเดินนั้นไม่ได้เป็นขนาดที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งหากต้องการให้การค้นหามีความละเอียดและถูกต้องมากขึ้น ค่าของขนาดการเดินควรกำหนดให้เป็นค่าที่มีความต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก

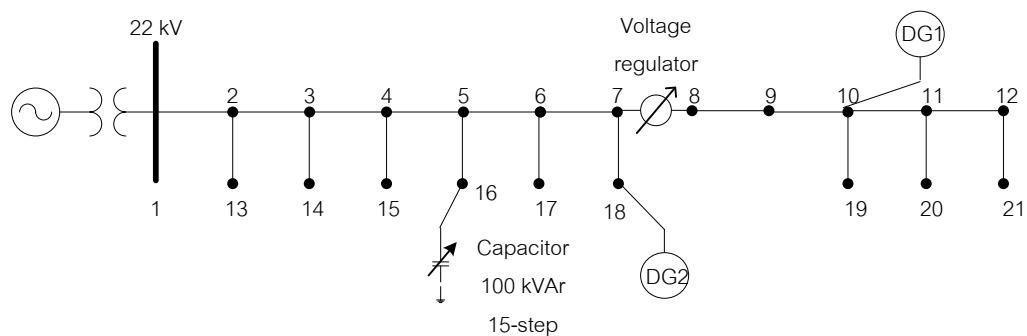
6.1.3 การพิจารณาการควบคุมแรงดันจากทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

จากหัวข้อ 5.2.3 ขั้นตอนการสร้างสมาชิกชุดคำตอบ ในสมการที่ (5.15) ซึ่งได้กล่าวถึงผลกระทบต่อแรงดันอันเนื่องมาจากทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยหากบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้บัสที่เชื่อมต่อบริเวณข้าง แสดงว่าแรงดันที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีระดับสูงกว่าแรงดันบัสรอบข้าง แต่ถ้าหากบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารับกำลังรีแอกทีฟจากบัสที่เชื่อมต่อบริเวณข้าง แสดงว่าแรงดันที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีระดับต่ำกว่าบัสรอบข้าง

ทั้งนี้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จากวิธีที่นำเสนอได้ประยุกต์ใช้สมการที่ (5.15) นี้ เป็นฟังก์ชันเสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหามากยิ่งขึ้น โดยฟังก์ชันเสริมนี้จะถูกเรียกใช้เมื่อคำตอบที่ค้นหาเข้าใกล้คำตอบที่เหมาะสมแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ฟังก์ชันเสริมนี้มีความสำคัญหลายๆด้านด้วยกัน คือ สามารถอธิบายพฤติกรรมของระดับแรงดันในระบบ สามารถตรวจจับการไหลของกำลังไฟฟ้าย้อนกลับ เป็นส่วนที่เชื่อมโยงกับพิกัดของสายส่ง ใช้เวลาในการคำนวณน้อยลง เนื่องจากคำนวณจำนวนสมาชิกพื้นที่คำตอบรอบข้างน้อยลง และยังเป็นส่วนที่สามารถต่อยอดให้โปรแกรมฉลาดมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลในการเลือกขนาดที่เหมาะสมของ DG ในกรณีที่ DG ติดตั้งมากกว่า 1 ตัวขึ้นไป

การทดสอบอัลกอริทึมได้เลือกใช้ระดับโหลด ณ เวลา 7.00 น. มาประกอบการคำนวณ โดยโหลดมีขนาด 825.51 kW 487.242 kVAr ซึ่งมีขนาดเป็น 70 % ของระดับโหลดสูงสุด ทั้งนี้ระดับโหลดสูงสุดได้แสดงในภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณที่อาศัยอัลกอริทึมดังกล่าวนี้สามารถยกตัวอย่างโดยใช้ระบบไฟฟ้าดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคดังแสดงในรูปที่ 6.11 โดยรายละเอียดของระบบสอบทานอัลกอริทึมมีดังต่อไปนี้คือ ระบบไฟฟ้ารับกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงขนาด 25 MVA ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบคือ 22 kV ระบบมีการติดตั้ง DG ประเภทควบคุมได้อยู่ทั้งหมด 2 ตัว มีขนาดกำลังผลิต 500 kW \pm 300 kVAr ติดตั้งที่บัส 10 และบัส 18 ตัวคุมค่าแรงดันติดตั้งอยู่ระหว่างสายส่งเชื่อมต่อระหว่างบัส 7 - 8 และคาปาซิเตอร์มีขนาด 100 kVAr/ชิ้น สามารถปรับได้มากที่สุด 15 ชิ้น ติดตั้งอยู่ที่บัส 16 ทั้งนี้ขนาดคาปาซิเตอร์ที่กำหนดยังไม่ได้พิจารณาถึงขนาดที่ทางกฟภ. ใช้ออยู่จริงแต่อย่างใด เนื่องจากต้องการแสดงวิธีการทำงานของอัลกอริทึมเท่านั้น และการทดสอบอัลกอริทึมได้เลือกใช้ระดับโหลด ณ เวลา 7.00 น. มาประกอบการคำนวณ โดยโหลดมีขนาด 2,463.3 kW 1,526.616 kVAr ซึ่งมีขนาดเป็น 70 % ของระดับโหลดสูงสุด ทั้งนี้ระดับโหลดสูงสุดได้แสดงในภาคผนวก

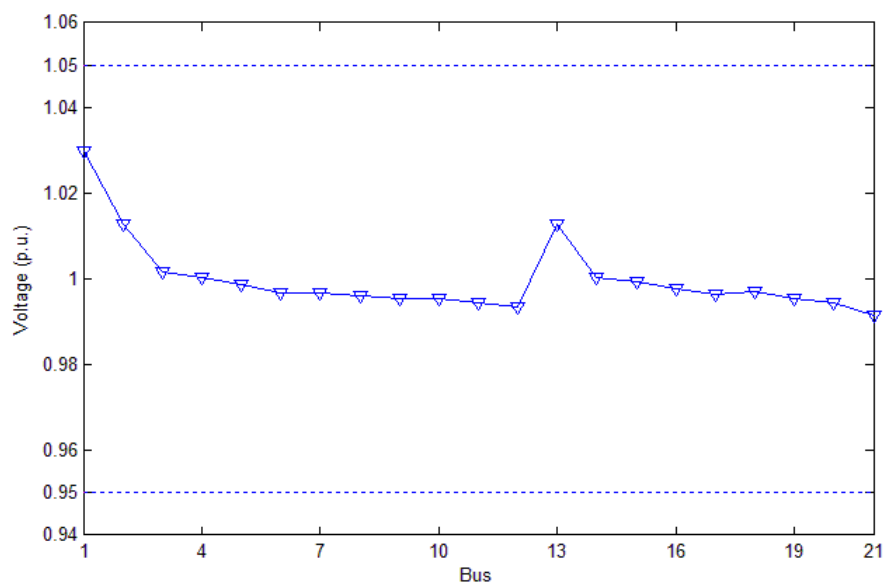


รูปที่ 6.11 ระบบทดสอบอัลกอริทึมจากวิธีที่นำเสนอ (ระบบไฟฟ้าดัดแปลงจากระบบจริงของ กฟภ.)

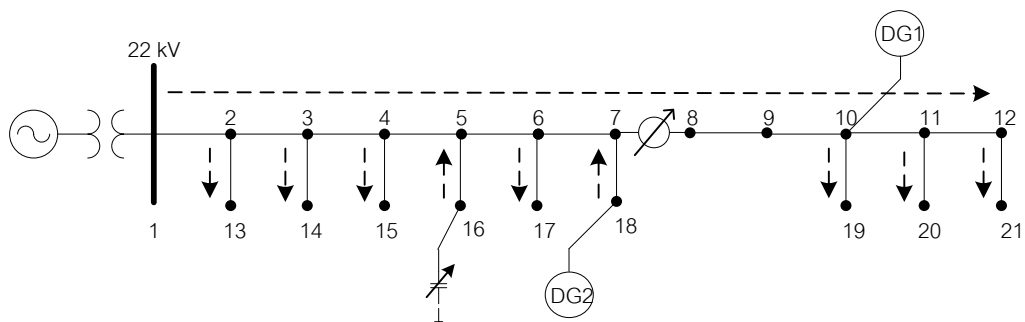
เนื่องจากผลการทดสอบของหัวข้อนี้มีจุดประสงค์ต้องการชี้ประโยชน์ของอัลกอริทึมข้างต้น ดังนั้นในตารางที่ 6.6 ได้แสดงค่าขนาดของ DG ประเภทควบคุมทั้ง 2 ตัว แท็บของตัวควบคุมแรงดัน และขนาดของคาปาซิเตอร์ ที่ทำให้ระดับแรงดันในแต่ละบัสมีค่าเข้าใกล้ระดับแรงดันที่ต้องการ (1.00 p.u.) รูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13 แสดงระดับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัส และทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบตามลำดับ

ตารางที่ 6.6 ขนาดของ DG ประเภทควบคุม 2 ตัว ขนาดของคาปาซิเตอร์ แท็บของตัวควบคุมแรงดัน และค่าการประเมิน

DG ประเภทควบคุม ได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุม ได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุม แรงดัน		ค่าการประเมิน
P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	Tap _{VR}	Q _{capacitor} (kVAr)	
350	150	300	100	1	600	0.0078



รูปที่ 6.12 ระดับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัส



รูปที่ 6.13 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

จากตารางที่ 6.6 พบว่าค่าการประเมิน 0.0078 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.13 เห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้ร้แอกที่ฟ้ไหลจากตำแหน่งของ DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18 ไปยังปลายสายป้อนของระบบที่มี DG ประเภทควบคุมได้ติดตั้ง ณ บัส 10 ซึ่งถัดจากขั้นตอนนี้แล้ว โปรแกรมคอมพิวเตอร์จากวิธีที่นำเสนอจะเรียกฟังก์ชันการทำงานสำหรับตรวจจับทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ร้แอกที่ฟ้ดังแสดงในสมการที่ (5.15) โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ผลลัพธ์ระดับแรงดันไฟฟ้าจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังตารางที่ 6.7 ดังนี้

ตารางที่ 6.7 ค่าของระดับแรงดันในแต่ละบัส

บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)	บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)	บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)
1	1.0300	8	0.9960	15	0.9993
2	1.0129	9	0.9955	16	0.9977
3	1.0017	10	0.9954	17	0.9965
4	1.0004	11	0.9944	18	0.9970
5	0.9985	12	0.9934	19	0.9953
6	0.9968	13	1.0128	20	0.9943
7	0.9967	14	1.0005	21	0.9916

จากตารางที่ 6.7 พบว่าแรงดันบัสที่ 18 > บัสที่ 7 > บัสที่ 8 > บัสที่ 9 > บัสที่ 10 และเมื่ออ้างอิงจากสมการที่ (5.15) ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้ร้แอกที่ฟ้ต้องไหลจากบัสที่ 18 เข้าสู่บัสที่ 7 และไหลต่อกจากบัสที่ 7 ไปยังบัสที่ 10 โดยจากผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าพบว่ามีผลสอดคล้องกันซึ่งได้แสดงทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ร้แอกที่ฟ้ไว้ในรูปที่ 6.6

เมื่อเรียกฟังก์ชันการทำงานสำหรับตรวจจับทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ร้แอกที่ฟ้ฟังก์ชันดังกล่าวนี้สามารถค้นหาเส้นทางเชื่อมต่อระหว่าง DG ทั้งสองตัวได้ (ในที่นี้คือบัส 7 – บัส 10 และ บัส 18) และพบว่าทางเลือกในการควบคุมแรงดันสามารถแบ่งได้ 5 ทางเลือกดังต่อไปนี้

- 1) แรงดันบัสที่ 18 > แรงดันบัสที่ 7 > แรงดันบัสที่ 8 > แรงดันบัสที่ 9 > แรงดันบัสที่ 10
- 2) แรงดันบัสที่ 18 > แรงดันบัสที่ 7 > แรงดันบัสที่ 8 > แรงดันบัสที่ 9 < แรงดันบัสที่ 10
- 3) แรงดันบัสที่ 18 > แรงดันบัสที่ 7 > แรงดันบัสที่ 8 < แรงดันบัสที่ 9 < แรงดันบัสที่ 10
- 4) แรงดันบัสที่ 18 > แรงดันบัสที่ 7 < แรงดันบัสที่ 8 < แรงดันบัสที่ 9 < แรงดันบัสที่ 10

5) แรงดันบัลต์ที่ 18 < แรงดันบัลต์ที่ 7 < แรงดันบัลต์ที่ 8 < แรงดันบัลต์ที่ 9 < แรงดันบัลต์ที่ 10

โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลตามรูปแบบทั้ง 5 นี้ทั้งหมด ทั้งนี้การประมวลผลทั้ง 5 รูปแบบสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

การคำนวณผลจากรูปแบบที่ 1 สามารถทำได้ดังนี้คือ

- 1) เพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ทั้งสองในปริมาณที่เท่าๆกัน
- 2) เพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ที่บัลต์ 18 ในปริมาณที่มากกว่าการเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ DG ที่บัลต์ 10
- 3) เพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ที่บัลต์ 18 แต่ลดการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ที่บัลต์ 10

สำหรับการคำนวณผลจากรูปแบบที่ 2 – รูปแบบที่ 5 สามารถทำได้ดังนี้คือ

- 1) เพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ที่บัลต์ 10 ในปริมาณที่มากกว่าการเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ DG ที่บัลต์ 18
- 2) เพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ที่บัลต์ 10 แต่ลดการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของ DG ที่บัลต์ 18

จากทั้ง 5 รูปแบบนี้สามารถแสดงตัวอย่างการคำนวณดังกล่าวเสนอต่อไป โดยการคำนวณของรูปแบบที่ 1 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.8 – ตารางที่ 6.11 ต่อไปนี้

ตารางที่ 6.8 คำตอบที่เป็นไปได้ในการคำนวณโดยการตรวจจับทิศทางกระแสของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของรูปแบบที่ 1

คำตอบที่เป็นไปได้	DG ประเภทควบคุม ได้ ณ บัลต์ 10		DG ประเภทควบคุม ได้ ณ บัลต์ 18		แท็ป/ขนาด ตัว ควบคุมแรงดัน		ค่าการ ประเมิน
	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	Tap _{VR}	Q _{capacitor} (kVAr)	
คำตอบที่ 1	350	150	300	100	1	600	0.0078
คำตอบที่ 2	350	170	300	120	1	600	0.0070
คำตอบที่ 3	350	160	300	200	1	600	0.0074
คำตอบที่ 4	350	140	350	200	1	600	0.0066

จากตารางที่ 6.8 พบว่าคำตอบที่ 4 มีค่าการประเมินที่ดีที่สุด และเมื่อตรวจสอบผลของระดับแรงดันจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าระดับแรงดันแต่ละบัสเป็นดังตารางที่ 6.9 ดังนี้

ตารางที่ 6.9 ค่าของระดับแรงดันในแต่ละบัส

บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)	บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)	บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)
1	1.0300	8	1.0004	15	1.0025
2	1.0147	9	0.9999	16	1.0015
3	1.0047	10	0.9998	17	1.0009
4	1.0036	11	0.9988	18	1.0016
5	1.0023	12	0.9978	19	0.9997
6	1.0012	13	1.0145	20	0.9987
7	1.0011	14	1.0035	21	0.9960

จากตารางที่ 6.9 พบว่าระดับแรงดันของบัสที่ 18 > บัสที่ 7 > บัสที่ 8 > บัสที่ 9 > บัสที่ 10 ซึ่งยังสอดคล้องกับเงื่อนไขในรูปแบบที่ 1

สำหรับการคำนวณของรูปแบบที่ 2 – รูปแบบที่ 5 สามารถกระทำได้ในรูปแบบเดียวกัน โดยในที่นี้ได้เลือกแสดงการคำนวณของรูปแบบที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 6.10 – ตารางที่ 6.11 ต่อไปนี้

ตารางที่ 6.10 คำตอบที่เป็นไปได้ในการคำนวณโดยการตรวจจับสนิททางการไหลของกำลังไฟฟ้า
รีแอกทีฟของรูปแบบที่ 2

คำตอบที่เป็นไปได้	DG ประเภทควบคุม ได้ ณ บัส 10		DG ประเภท ควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็ป/ขนาด ตัว ควบคุมแรงดัน		ค่าการ ประเมิน
	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	Tap _{VR}	Q _{capacitor} (kVAr)	
คำตอบที่ 1	350	150	300	100	1	600	0.0078
คำตอบที่ 2	350	170	300	110	1	600	0.0072
คำตอบที่ 3	350	200	320	120	1	600	0.0064
คำตอบที่ 4	350	250	300	90	1	600	0.0062

จากตารางที่ 6.10 พบว่าค่าตอบที่ 4 มีค่าการประเมินที่ดีที่สุด และเมื่อตรวจสอบผลของระดับแรงดันจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า พบว่าระดับแรงดันแต่ละบัส เป็นดังตารางที่ 6.11 ดังนี้

ตารางที่ 6.11 ค่าของระดับแรงดันในแต่ละบัส

บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)	บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)	บัส	ระดับแรงดัน (p.u.)
1	1.0300	8	0.9998	15	1.0017
2	1.0143	9	0.9995	16	1.0006
3	1.0040	10	0.9995	17	0.9998
4	1.0028	11	0.9985	18	1.0004
5	1.0014	12	0.9975	19	0.9994
6	1.0001	13	1.0141	20	0.9984
7	1.0001	14	1.0027	21	0.9957

จากตารางที่ 6.11 พบว่าระดับแรงดันของบัสที่ 18 > บัสที่ 7 > บัสที่ 8 > บัสที่ 9 > บัสที่ 10 (เมื่อพิจารณาถึงทศนิยมตำแหน่งที่ห้า) อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าตอบไม่สอดคล้องกับรูปแบบที่ 2 แต่ค่าประเมินที่ได้ดีกว่ารูปแบบที่ 1 ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจะทำการเพิ่มการจ่ายกำลังไฟฟ้ที่ฟจาก DG ณ บัสที่ 10 ให้มากขึ้น รวมถึงลดการจ่ายกำลังไฟฟ้ที่ฟจาก DG ณ บัสที่ 18 ลง ก็ไม่สามารถทำให้แรงดันบัสที่ 10 มากกว่าระดับแรงดันบัสที่ 9 ได้ เนื่องมาจากยังมีการจ่ายกำลังไฟฟ้ที่ฟจากคาปาซิเตอร์

เมื่อเสร็จสิ้นการคำนวณจากขั้นตอนการคำนวณโดยการตรวจจับทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ที่ฟทั้ง 5 นี้ การค้นหาจะกลับเข้าสู่การค้นหาแบบทวนชนิดปรับตัวแล้วทำการค้นหาค่าตอบต่อไป

6.2 สรุปผลการสอบทานอัลกอริทึม

จากผลการทดสอบอัลกอริทึมเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปสอบทานกับการพิจารณาค่าตอบแบบทุกกรณีพบว่าค่าตอบที่ได้จากอัลกอริทึมมีค่าใกล้เคียงกับค่าตอบแบบพิจารณาทุกกรณี ซึ่งสามารถยืนยันความถูกต้องของอัลกอริทึมได้ รวมถึงการควบคุมตัวคุมค่าแรงดันได้อย่างถูกต้องเมื่อเกิดการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้ที่ฟ

บทที่ 7

ผลการทดสอบวิธีที่นำเสนอ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบการหาขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดคาปาซิเตอร์ และ ขนาดตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ซึ่งมีเนื้อหาประกอบด้วย ระบบทดสอบ และผลการทดสอบ

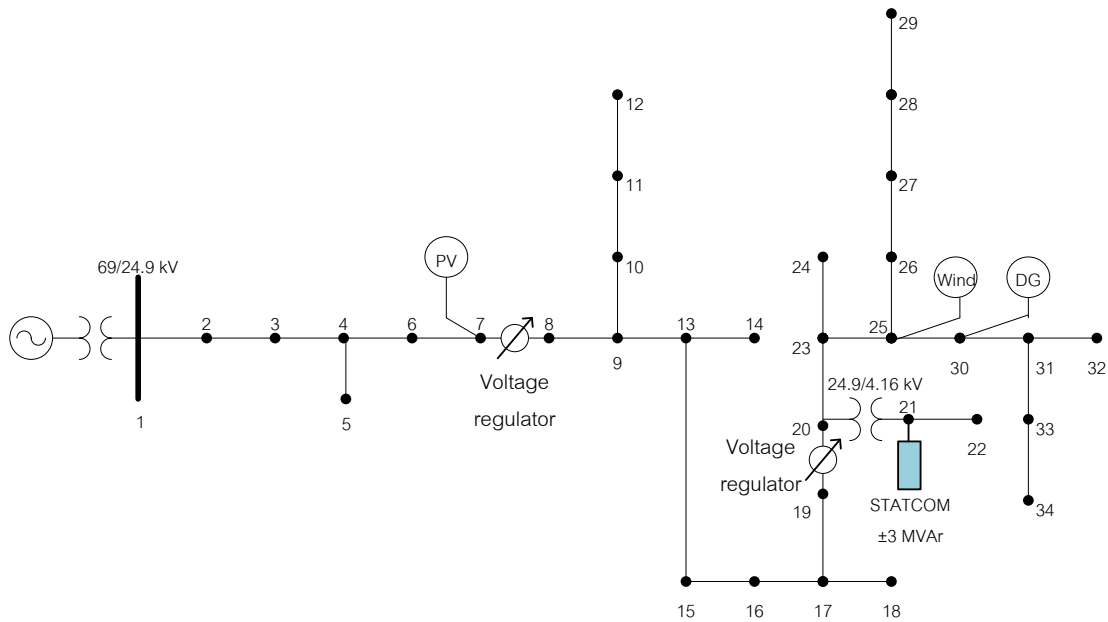
7.1 ระบบทดสอบ

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทดสอบวิธีที่นำเสนอกับระบบทดสอบ IEEE 34-BUS และระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคดังรูปที่ 7.1 และรูปที่ 7.2 ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอ โดยระบบทั้งสองนั้นมีประเด็นความแตกต่างคือ ขนาดของโหลดในระบบ ขนาดควบคุมขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ที่มากกว่า 1 ตัว และจำนวนชั้นของคาปาซิเตอร์ โดยรายละเอียดอุปกรณ์ที่ติดตั้งในแต่ละระบบสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

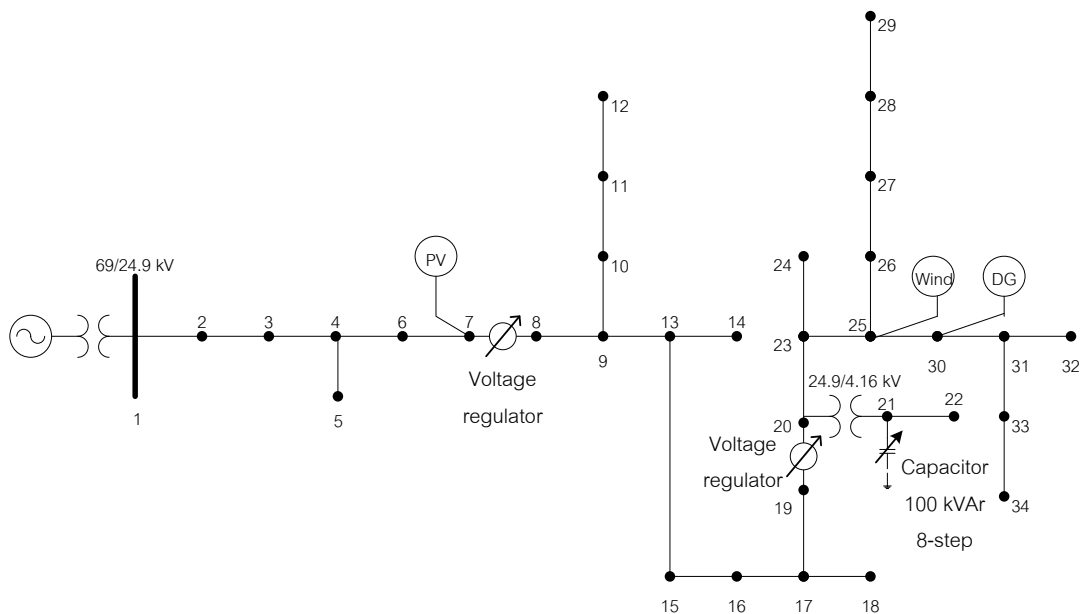
7.1.1 ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS

ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS มีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ ระบบรับไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงขนาด 2.5 kVA ระดับแรงดันของระบบคือ 24.9 kV ยกเว้นบัส 21- บัส 22 ที่รับไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงขนาด 500 VA ซึ่งแปลงระดับแรงดันจาก 24.9 kV เป็น 4.16 kV โดยโหลดสูงสุดมีขนาด 1,179.3 kW 696.06 kVAr ระบบไฟฟ้ามักมีการติดตั้ง DG อยู่ทั้งหมด 3 ตัว คือ DG ประเภทควบคุมได้ ขนาดกำลังผลิต 500 kW \pm 300 kVAr ติดตั้งที่บัส 30 DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่ที่บัส 7 โดยกำหนดให้ใช้ค่าเฉลี่ยกำลังการผลิตตลอดทั้งวันในอัตราส่วน 37.5 % ของรูปที่ 2.10 (ข) กล่าวคือ จากรูปที่ 2.10 (ข) จะเห็นว่า DG พลังงานแสงอาทิตย์มีขนาดกำลังการผลิตสูงสุด 500 kW ดังนั้นขนาดของ DG พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบทดสอบนี้มีค่าเป็น 187.5 kW นั่นเอง และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบพลังงานลมติดตั้งอยู่ที่บัส 25 มีค่าเฉลี่ยกำลังผลิตเท่ากับ 100 kW ตลอดทั้งวัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ถือว่า DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนทั้ง 2 ชนิดนี้มีการกระจายข้อมูลแบบแจกแจงปกติ โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 15% จากค่าเฉลี่ย ส่วนความไม่แน่นอนจากผลของระดับโหลดนั้น กำหนดให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5% จากค่าเฉลี่ย ตัวคุมค่าแรงดันสองตัวติดตั้งอยู่ระหว่างสายส่งเชื่อมต่อบหว่างบัส 7-8 และระหว่างบัส 19-20 สำหรับคาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ได้กำหนดให้แยกคำนวณเป็นสองกรณีคือ ระบบติดตั้งคาปาซิเตอร์ และ ระบบ

ติดตั้งตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิต ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมแรงดันจากระบบมีอุปกรณ์ที่ต่างกัน โดยคาปาซิเตอร์มีขนาด 100 kVAr/ขั้น โดยสามารถปรับได้มากที่สุด 8 ขั้น เนื่องจากจากตารางที่ 2.5 สามารถเห็นได้ว่าขนาดคาปาซิเตอร์ในระบบแรงดันไฟฟ้า 4.16 kV และ 24.9 kV มีขนาดระหว่าง 100 kVAr – 800 kVAr สำหรับตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิตได้กำหนดให้มีขนาดเท่ากับ ± 3 MVar ทั้งนี้อุปกรณ์ทั้งสองติดตั้งอยู่ที่บัส 21 เหมือนกัน



(ก)



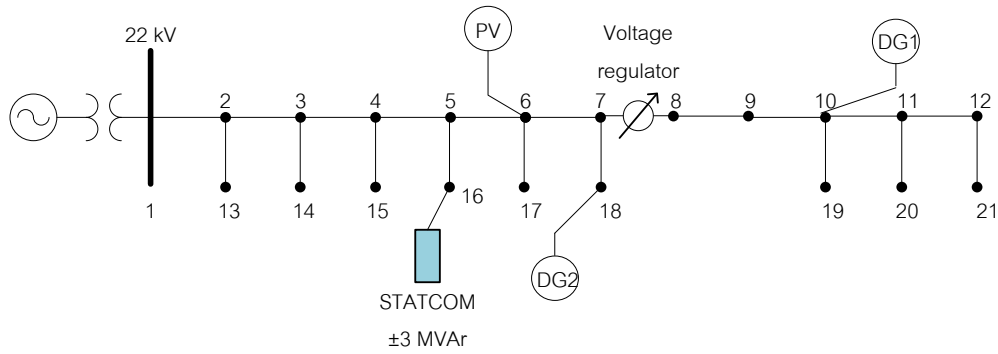
(ข)

รูปที่ 7.1 (ก) ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เมื่อติดตั้งตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิต

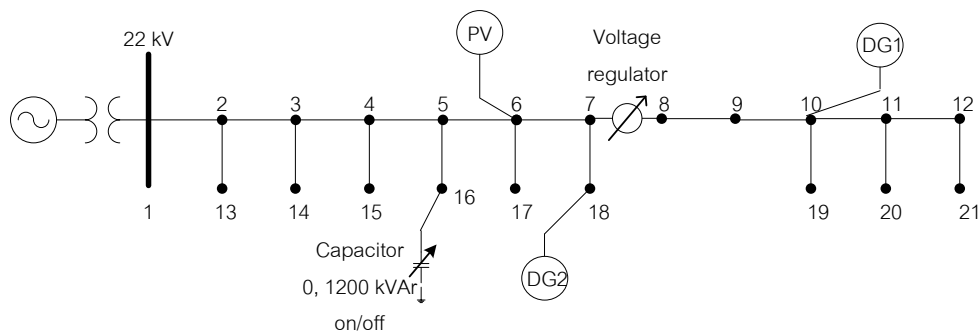
(ข) ระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์

7.1.2 ระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ในระบบที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นระบบที่สถานีพนมสารคามสายป้อนที่ 2 รับกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงขนาด 25 MVA โดยมีระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบเท่ากับ 22 kV โหลดสูงสุดมีขนาด 3,519 kW 2,180.88 kVAr ระบบมีการติดตั้ง DG ประเภทควบคุมได้ 2 ตัว แต่ละตัวมีขนาดกำลังผลิต 800 kW \pm 600 kVAr โดยติดตั้งที่บัส 10 และบัส 18 DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่ที่บัส 6 และกำหนดให้มีค่าเฉลี่ยกำลังการผลิตตลอดทั้งวันเหมือนดังรูป 2.10 (ข) ในงานวิจัยนี้ได้ถือว่า DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนมีการกระจายข้อมูลแบบปกติ โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 15% จากค่าเฉลี่ย ส่วนความไม่แน่นอนจากผลของระดับโหลดนั้น กำหนดให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5% จากค่าเฉลี่ย ตัวคุมค่าแรงดันติดตั้งอยู่ระหว่างสายส่งเชื่อมต่อระหว่างบัส 7-8 สำหรับคาปาซิเตอร์ และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ได้กำหนดให้แยกคำนวณเป็นสองกรณี คือ ระบบติดตั้งคาปาซิเตอร์ และ ระบบติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ทั้งนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมแรงดันจากระบบมีอุปกรณ์ที่ต่างกัน โดยคาปาซิเตอร์มีขนาด 1,200 kVAr สามารถเลือกใช้งานหรือไม่ใช้งาน และ ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตมีขนาด \pm 3 MVar ทั้งนี้อุปกรณ์ทั้งสองติดตั้งอยู่ที่บัส 16 เหมือนกัน



(ก)



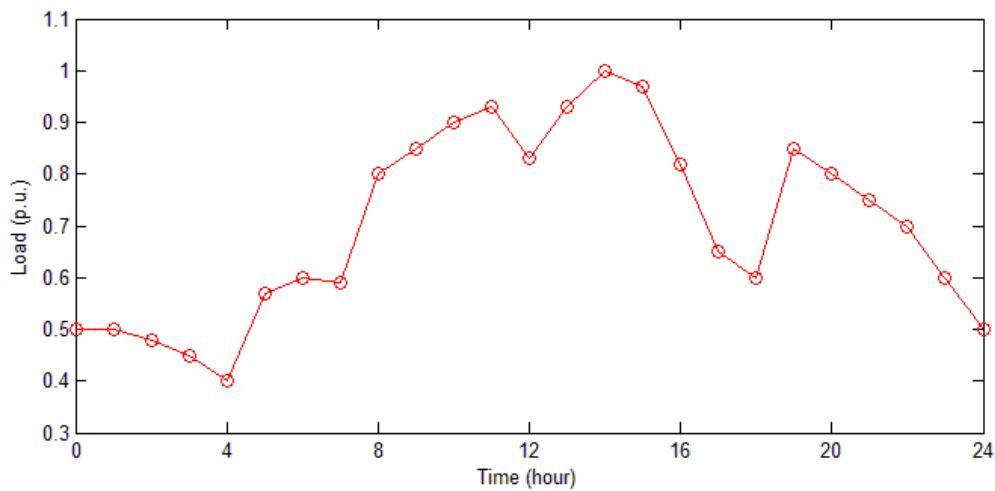
(ข)

รูปที่ 7.2 (ก) ระบบไฟฟ้าดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต

(ข) ระบบไฟฟ้าดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์

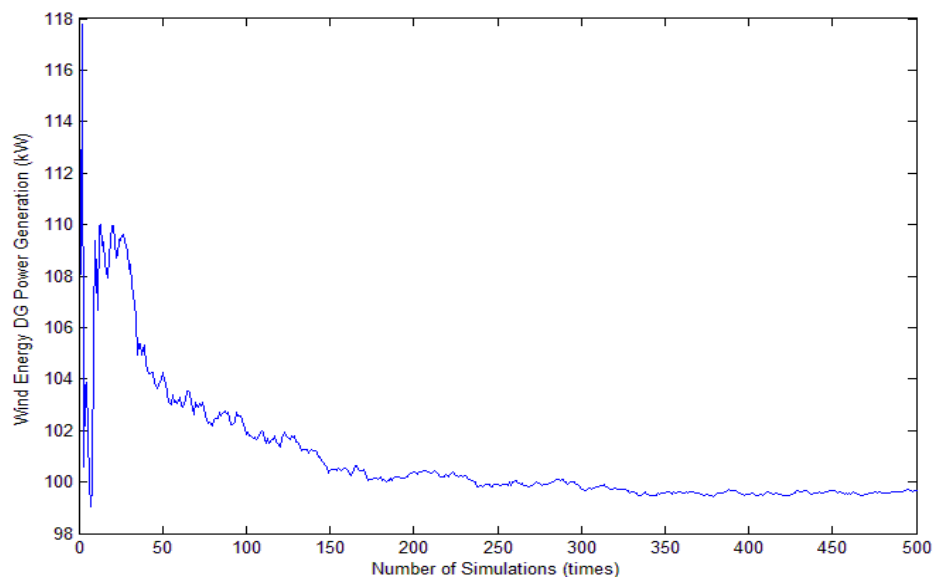
7.2 รูปแบบการนำเสนอผลการทดสอบ

ก่อนเข้าสู่การนำเสนอรูปแบบการนำเสนอผลการทดสอบ เพื่อความชัดเจนมากขึ้นต่อกระบวนการคำนวณ จึงได้นำเสนอข้อมูลป้อนเข้าที่สำคัญ 2 ชนิด คือรายละเอียดของระดับโหลดรายชั่วโมง และความไม่แน่นอนจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน ทั้งนี้รายละเอียดของระดับโหลดรายชั่วโมงได้สมมติให้ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงในทางปฏิบัติ [17] ดังแสดงในรูปที่ 7.3 อย่างไรก็ตามการคำนวณจะมีความแม่นยำและใกล้เคียงเชิงปฏิบัติมากยิ่งขึ้นหากใช้ข้อมูลโหลดจริง ซึ่งระดับโหลดดังรูปนั้นได้ประยุกต์ใช้ทั้งในระบบทดสอบ IEEE 34-BUS และระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



รูปที่ 7.3 ระดับโหลดรายชั่วโมง

สำหรับการจำลองความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด ได้ประยุกต์ใช้วิธีคำนวณแบบมอนติคาร์โล โดยในรูปที่ 7.4 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์จากการคำนวณค่ากำลังเฉลี่ยของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบใช้พลังงานลมในจำนวน 500 รอบ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อจำนวนรอบการคำนวณที่มากขึ้น กราฟจะลู่เข้าสู่ค่าเฉลี่ยที่กำหนด ดังนั้นจำนวนรอบการคำนวณแบบมอนติคาร์โลควรกำหนดเป็นจำนวนรอบที่ทำให้ค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ค่าใกล้ค่าเฉลี่ยที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ทำการคำนวณแบบมอนติคาร์โลไปเรื่อยๆ จนกระทั่งผลลัพธ์ลู่เข้าสู่ค่าเฉลี่ยที่กำหนด สำหรับการคำนวณค่ากำลังเฉลี่ยของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ และระดับโหลด ผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบเดียวกันกับรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 กำลังเฉลี่ยของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบใช้พลังงานลมเมื่อใช้วิธีคำนวณแบบมอนติคาร์โล

ในการนำเสนอผลการทดสอบนั้น เนื่องจากผลการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลมีปริมาณมาก ประกอบกับการทดสอบนั้นได้คำนวณผลลัพธ์ตลอดทั้งวัน ดังนั้นจึงได้เลือกผลการทดสอบเวลา 14.00 น. และ 18.00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่มีระดับโหลดสูงที่สุด และเป็นเวลาที่ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบแสงอาทิตย์หยุดทำงานตามลำดับ อย่างไรก็ตามการนำเสนอสมควรนำเสนอผลในช่วงเวลาที่มีระดับโหลดต่ำที่สุดด้วย เนื่องจากเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าสูงซึ่งเป็นปัญหาที่ทางการไฟฟ้าพบประจำ แต่การนำเสนอในที่นี้ต้องการเน้นให้เห็นในเรื่องแรงดันตกมากกว่าแรงดันเกิน ทั้งนี้การคำนวณในแต่ละช่วงเวลาจะมีวิธีการคำนวณในรูปแบบเดียวกันกับช่วงเวลาที่เลือกมานำเสนอ

- รูปแบบกรณีการนำเสนอผลการทดสอบของทั้งสองช่วงเวลานั้นแบ่งออกเป็น 7 กรณีดังนี้
- กรณี 1) กรณีพื้นฐาน
 - กรณี 2) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
 - กรณี 3) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และ DG
 - กรณี 4) ผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโหลด
 - กรณี 5) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
 - กรณี 6) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์
 - กรณี 7) ผลจากวิธีที่นำเสนอ เมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบบอชอนจำลอง

ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กำหนดให้คำนวณแบบจำลองของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตเหมือนกับคาปาซิเตอร์ เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองชนิดทำหน้าที่คล้ายกันคือการชดเชยกำลังไฟฟ้ร้แอกทีฟ ดังนั้นในส่วนของการนำเสนอผลการทดสอบจากกรณีที่ 2 – 4 จึงกำหนดให้ผลกระทบจากคาปาซิเตอร์ และ จากตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตมีผลลัพธ์ที่เหมือนกัน

ผลการทดสอบจากระบบทดสอบ IEEE 34-BUS และระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้แสดงในหัวข้อที่ 7.3 และ 7.4 ตามลำดับ

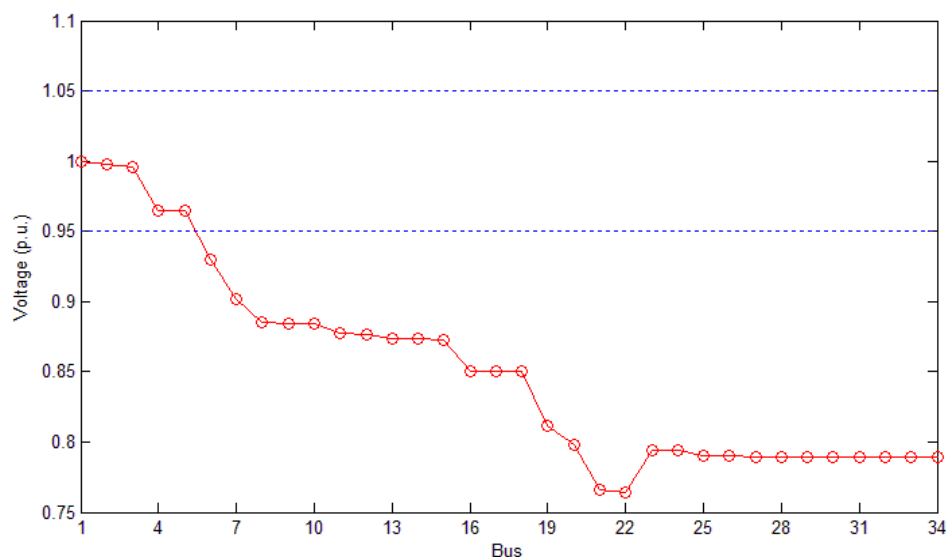
7.3 ผลการทดสอบจากระบบทดสอบ IEEE 34-BUS

7.3.1 ผลการทดสอบจากระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เวลา 14.00 น.

กรณี 1) กรณีพื้นฐาน

ในระบบไม่มีการเชื่อมต่อ DG ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต โดยยังไม่พิจารณาผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลด รูปที่ 7.5 แสดงระดับแรงดันของระบบ

ซึ่งพบว่าเกิดการละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำที่หลายบัสเนื่องจากมีระดับโหลดสูง การละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำจะเริ่มตั้งแต่บัสที่ 6 จนถึงบัสที่ 34 โดยบัสที่ 22 มีระดับแรงดันต่ำที่สุดในระบบ ตารางที่ 7.1 แสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 7.5 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE กรณีพื้นฐาน เวลา 14.00 น.

ตารางที่ 7.1 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกันของระบบทดสอบ IEEE กรณีพื้นฐาน เวลา 14.00 น.

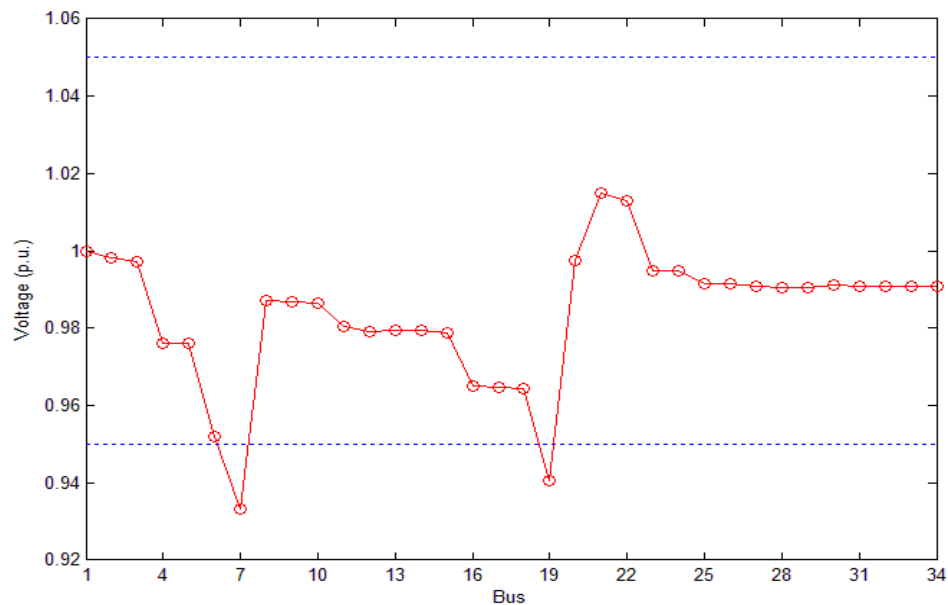
ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.1403
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0383 p.u.

กรณี 2) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต

เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ในระบบทดสอบ ดังตำแหน่งแสดงในรูปที่ 7.1 โดยยังไม่มี DG เชื่อมต่อในระบบ และยังไม่พิจารณาถึงผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลดเช่นเดียวกับกรณีพื้นฐาน ตัวคุมค่าแรงดันทั้งสองตัวปรับแก้เป็น 1.0625 และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟปริมาณ 500 kVAr รูปที่ 7.6 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแรงดันสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้ โดยตัวคุมค่าแรงดันจะยกแรงดันของบัสที่อยู่ติดกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 7.6 ในส่วนที่มีลักษณะเหมือนฟันเลื่อยที่บัส 7 - 8 และบัส 19 - 20 ในขณะที่คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต จะยกแรงดันขึ้นทั้ง

ระบบ ในตารางที่ 7.2 ได้นำแสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน

อย่างไรก็ตามการชดเชยแรงดันยังไม่เพียงพอต่อการรักษาระดับแรงดันให้อยู่ภายในขอบเขตจำกัดได้ เนื่องจากยังเกิดการละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำที่บัส 7 และบัส 19 ซึ่งมีขนาดแรงดัน 0.9332 p.u. และ 0.9405 p.u. ตามลำดับ



รูปที่ 7.6 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต เวลา 14.00 น.

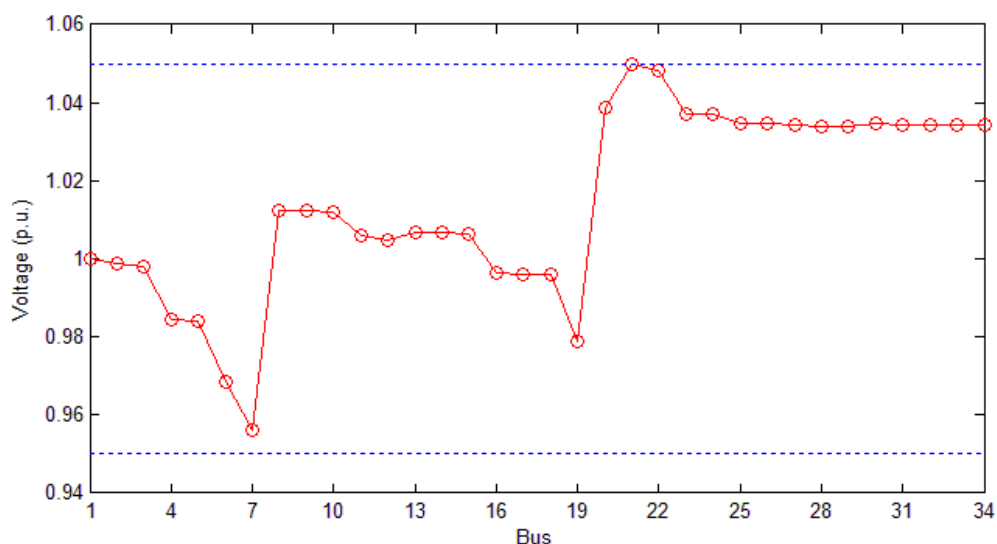
ตารางที่ 7.2 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกันของระบบทดสอบ IEEE กรณี 2) เวลา 14.00 น.

ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0169
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0570 p.u.

กรณี 3) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และ DG

เมื่อเพิ่มการเชื่อมต่อ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนทั้งสองชนิด และ DG ประเภทควบคุมได้รวมเข้าในกรณีที่ 2) ตามตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยที่กำหนดให้ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนทั้งสองชนิดจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ย และ DG ประเภทควบคุมได้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟหรือรีแอกทีฟได้เรื่อยๆ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้า ณ บัสหนึ่งมีค่าเท่ากับขีดจำกัดแรงดันที่กำหนด โดยกำหนดให้มีค่าตัวประกอบกำลังมีขนาดคงที่เท่ากับ

0.875 แบบคาปาซิทีฟ จากรูปที่ 7.7 เห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้นเนื่องจาก โดยบัส 21 มีขนาดแรงดันเท่ากับขีดจำกัดแรงดันสูงสุด ในขณะที่บัส 7 และบัส 19 ที่เกิดการละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำในกรณีนี้ 2) นั้นได้ถูกรักษาในระดับแรงดันภายในขอบเขตแรงดันต่ำ ตารางที่ 7.3 ได้แสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้



รูปที่ 7.7 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 14.00 น.

ตารางที่ 7.3 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.

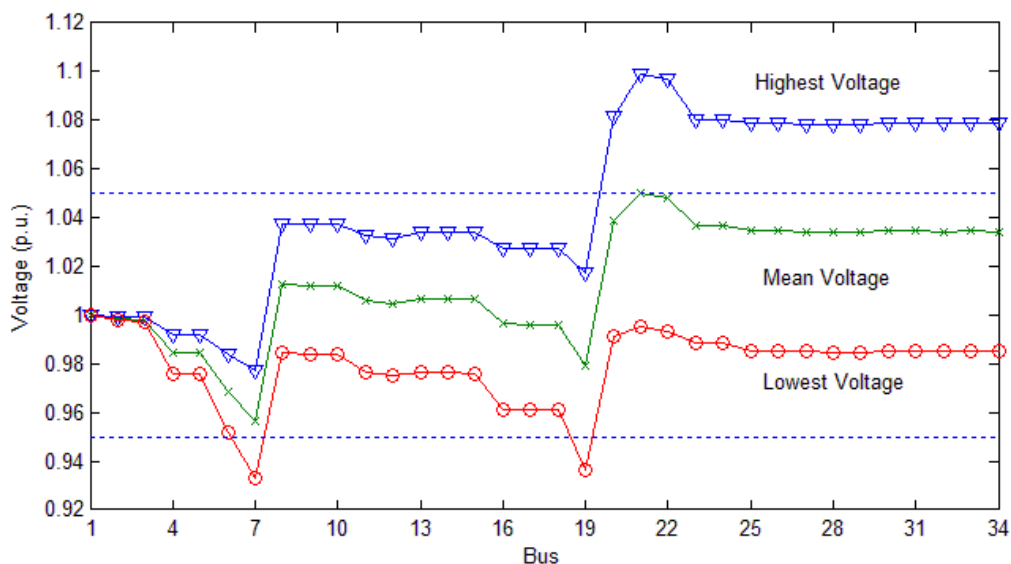
ชนิดของ	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0212
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0598 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	146 kW, 0.875 capacitive

อย่างไรก็ตาม กรณีที่นำเสนอทั้ง 3 กรณีข้างต้นนี้ เพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจาก DG ตัวควบคุมแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยเชิงโครน์สสถิต เท่านั้น โดยผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดยังไม่ได้ถูกพิจารณา

กรณี 4) ผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโหลด

จากผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 7.7 สามารถเห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้นเนื่องจากการติดตั้ง DG และอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน ในกรณีนี้จะคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนรวมเข้า

ไปจากกรณีที่ 3) ด้วย ซึ่งจากผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการละเมิดแรงดันขึ้นที่หลายบัสดังแสดงในรูปที่ 7.8 โดยได้นำเสนอเฉพาะค่าขอบเขตบน/ล่าง และค่าเฉลี่ยของระดับแรงดัน ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างเป็นผลกระทบจากการที่การคำนวณแบบมอนติคาร์โลสุ่มได้ขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ในตารางที่ 7.4 ได้แสดงค่าความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันขึ้นในระบบ



รูปที่ 7.8 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด เวลา 14.00 น.

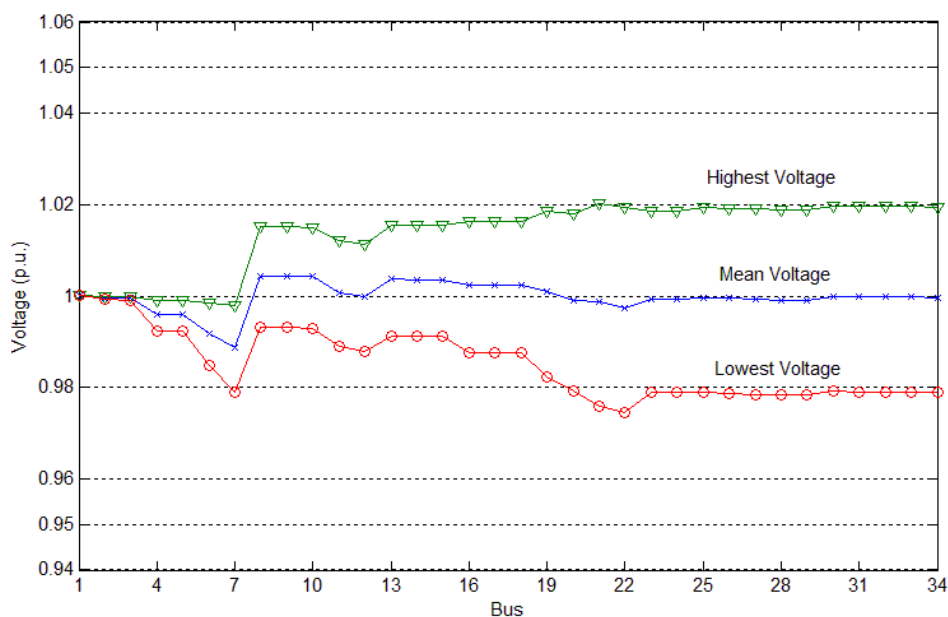
ตารางที่ 7.4 ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.

ระดับแรงดัน	ความน่าจะเป็น
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันต่ำ (0.95 p.u.)	0.104
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันสูง (1.05 p.u.)	0.614

อย่างไรก็ตาม ค่าความน่าจะเป็นดังแสดงในตารางที่ 7.4 เป็นความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันในกรณีทดสอบนี้เท่านั้น ไม่ใช่ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการละเมิดแรงดันเมื่อติดตั้ง DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนในทุกๆ กรณี โดยค่าความน่าจะเป็นในกรณีนี้คำนวณได้จากจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดการละเมิดแรงดันต่อจำนวนเหตุการณ์ที่คำนวณทั้งหมด ทั้งนี้ในกรณีข้างต้นเพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจากความไม่แน่นอน และ ผลจากการทำงานพร้อมกันระหว่าง DG ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยเชิงโครน์สสถิตเท่านั้น ซึ่งในกรณีต่อไปได้นำแสดงผลจากวิธีที่นำเสนอ

กรณี 5) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต

ในกรณีนี้ ระบบทดสอบได้มีการติดตั้งตำแหน่งของตัวคุมค่าแรงดัน ตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต DG ประเภทควบคุมได้ และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนเหมือนในกรณีที่ 4) แต่ไม่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ ซึ่งจากปัญหาดังแสดงในรูปที่ 7.8 ที่เกิดระดับแรงดันต่ำกว่า/สูงกว่าขอบเขตจำกัด อย่างไรก็ตามแรงดันของระบบสามารถถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตจำกัดเมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอ รวมไปถึงระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสในระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการด้วย (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) ดังแสดงในรูปที่ 7.9 ซึ่งได้แสดงค่าเฉลี่ยและค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าลู่เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าลู่เข้าของระดับโหลด นอกจากนี้แม้ว่าจะเกิดความไม่แน่นอนจากขนาดกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดจากค่าเฉลี่ยที่กำหนด ระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงถูกรักษาไว้ในขอบเขตระดับแรงดันที่กำหนดไว้ดังแสดงโดยเส้นขอบเขตบน/ล่าง ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้นเป็นผลกระทบจากขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ทั้งนี้ในวิธีการที่นำเสนอนั้น ผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ โดยตารางที่ 7.5 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกันขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และ ขนาดของตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต



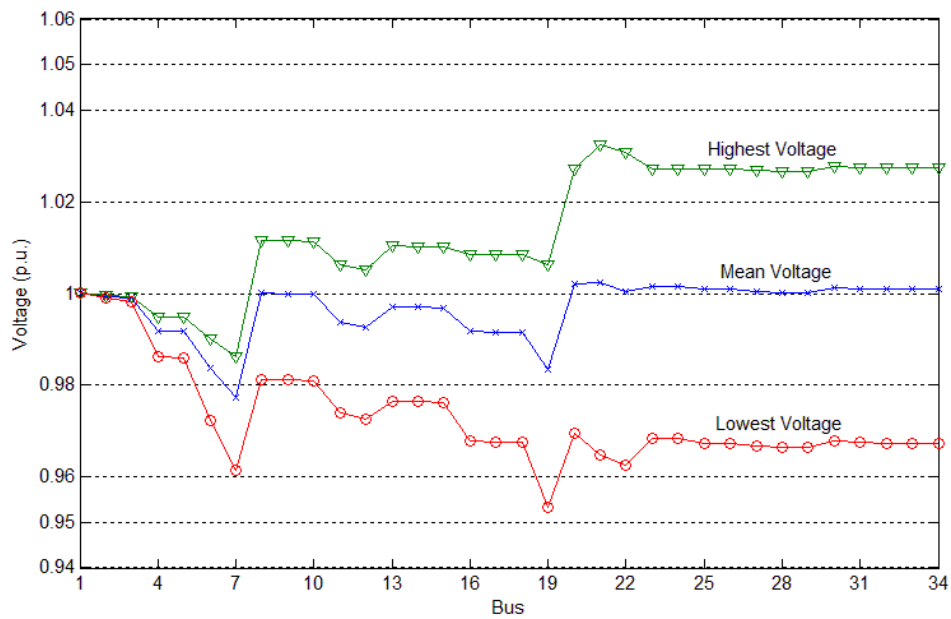
รูปที่ 7.9 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 14.00 น.

ตารางที่ 7.5 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0029
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0232 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	500 kW, 0.8575 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.025
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1.0125
ขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต	320 kVAr

กรณี 6) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์

ในกรณีนี้ได้แสดงถึงผลจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ แทนที่ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ทั้งนี้ได้กำหนดให้มีเงื่อนไขตามกรณีที่ 5) ยกเว้นเพียงแต่ให้เปลี่ยนจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตที่บัส 21 เป็นการติดตั้งคาปาซิเตอร์แทน โดยกำหนดให้คาปาซิเตอร์มีขนาด 100 kVAr/ชั้น โดยสามารถปรับได้มากที่สุด 8 ชั้น หรือมีพิกัดมากที่สุด 800 kVAr รูปที่ 7.10 แสดงค่าเฉลี่ย และค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าลู่เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าลู่เข้าของระดับโหลด ซึ่งเห็นได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสในระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) สำหรับเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถเห็นได้ว่า แม้จะมีการพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบยังคงถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ทั้งนี้ในวิธีการที่นำเสนอ นั้น ผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของคาปาซิเตอร์ จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ โดยตารางที่ 7.6 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และ ขนาดของคาปาซิเตอร์



รูปที่ 7.10 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 14.00 น.

ตารางที่ 7.6 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 14.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0038
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0289 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	475 kW, 0.8455 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.025
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1.0188
ขนาดของคาปาซิเตอร์	300 kVAr

จากตารางที่ 7.5 และ ตารางที่ 7.6 พบว่าการติดตั้งตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิตได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย) ที่ดีกว่า และผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกันมีค่าน้อยกว่ากรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์อีกด้วย (ซึ่งหมายถึงแรงดันในระบบมีการแกว่งน้อยกว่า) อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของกรณีที่ใช้ตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิตมีค่ามากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขนาดกำลังการผลิตแต่ละครั้งของตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิตมีค่าน้อยกว่าคาปาซิเตอร์ กล่าวคือตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิตมีขนาดกำลังการผลิตแต่ละครั้งเท่ากับ 5 kVAr ในขณะที่คาปาซิเตอร์มีขนาดเท่ากับ 100 kVAr โดยตารางที่ 7.7 แสดงถึงการเปรียบเทียบคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิตและจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 7.7 การเปรียบเทียบค่าตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต
และจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบทดสอบ IEEE

ชนิด	ติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต	ติดตั้งคาปาซิเตอร์
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0029	0.0038
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุด ของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0232 p.u.	0.0289 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	500 kW, 0.8575 capacitive	475 kW, 0.8455 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.025	1.025
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1.0125	1.0188
ขนาดของกำลังไฟฟ้าร้แยกทีฟ	320 kVAr	300 kVAr

กรณี 7) ผลจากวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง

ในกรณีนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และสมรรถภาพของการค้นหาแบบทากับการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง ทั้งนี้เนื่องจากอัลกอริทึมของการค้นหาทั้งสองนั้นมีความใกล้เคียงกันค่อนข้างมาก โดยกลไกของการค้นหาทั้งสองสามารถเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 7.8 ต่อไปนี้

ตารางที่ 7.8 ข้อเปรียบเทียบกลไกระหว่างการค้นหาแบบทากับการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง

กลไกของการค้นหา	การค้นหาแบบทาบ	การค้นหาแบบบออ่อนจำลอง
การพิจารณาเส้นทางการเดินทาง คำตอบรอบข้าง	มี	มี
กลไกการปรับรมีการค้นหา	มี	มี
การหลุดจากคำตอบที่เหมาะสม ที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น	มี	มี
การมีหน่วยความจำปรับตัวได้ เพื่อ ใช้ประกอบการพิจารณาคำตอบ	มี	ไม่มี
กลไกการเดินย้อนรอย	มี	ไม่มี

จากตารางที่ 7.8 สามารถเห็นความแตกต่างของการค้นหาทั้งสองคือ การค้นหาแบบทานูมีหน่วยความจำปรับตัวได้ ในขณะที่การค้นหาแบบบออ่อนจำลองไม่มี ซึ่งกลไกนี้ทำให้การค้นหาแบบทานูมีข้อได้เปรียบว่าสามารถมีเส้นทางในการหาคำตอบได้หลากหลายมากขึ้น และทำให้ไม่เกิดการค้นหาแบบวนอยู่กับที่ ส่วนการมีกลไกการเดินย้อนรอนั้นทำให้การค้นหาแบบทานูสามารถมีเส้นทางใหม่ในการหาคำตอบ รวมทั้งการย่นระยะเวลาในการใช้กลไกเพื่อหลุดจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นด้วย การขาดกลไกทั้งสองนี้ของการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง ทำให้การค้นหาแบบบออ่อนจำลองอาจต้องใช้เวลาในการค้นหาคำตอบมากขึ้น รวมทั้งอาจได้คำตอบที่ไม่หลากหลาย

ทั้งนี้การเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการค้นหาแบบทานู และการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง กำหนดให้มีเงื่อนไขตามกรณี 5) โดยผลลัพธ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการค้นหาแบบทานูได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่า ตลอดจนพบจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นมากกว่าด้วย

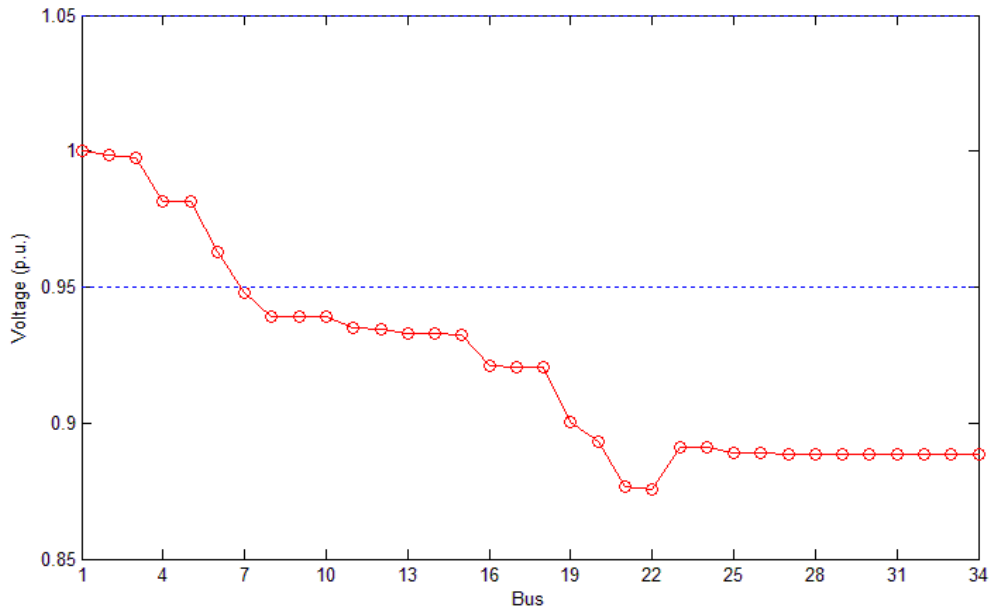
ตารางที่ 7.9 การเปรียบเทียบคำตอบจากการค้นหาแบบทานู และการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง
ในระบบทดสอบ IEEE

ชนิด	การค้นหาแบบทานู	การค้นหาแบบบออ่อนจำลอง
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0029	0.0045
จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นที่พบ	5	1

7.3.2 ผลการทดสอบจากระบบทดสอบ IEEE 34-BUS เวลา 18.00 น.

กรณี 1) กรณีพื้นฐาน

ในระบบไม่มีการเชื่อมต่อ DG ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิต โดยยังไม่พิจารณาผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลด รูปที่ 7.11 แสดงระดับแรงดันของระบบ ซึ่งพบว่าเกิดการละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำที่หลายบัสเนื่องจากมีระดับโหลดสูง การละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำจะเริ่มตั้งแต่บัสที่ 6 จนถึงบัสที่ 34 โดยบัสที่ 22 มีระดับแรงดันต่ำที่สุดในระบบ อย่างไรก็ตามแรงดันในแต่ละบัสจะมีค่าสูงกว่า ณ เวลา 14.00 น. เนื่องจากมีระดับโหลดที่ต่ำกว่า ตารางที่ 7.10 แสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน



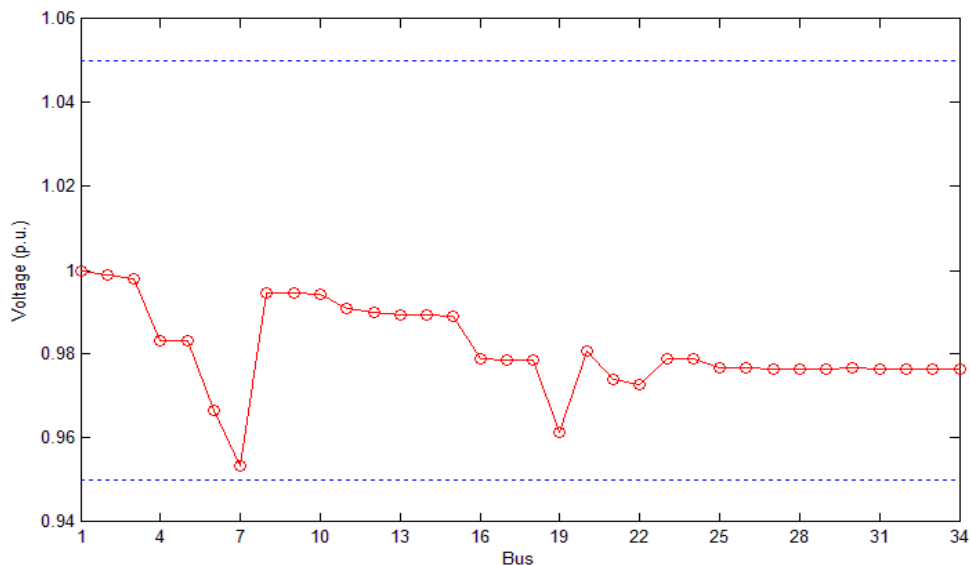
รูปที่ 7.11 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE กรณีพื้นฐาน เวลา 18.00 น.

ตารางที่ 7.10 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกันของระบบทดสอบ IEEE กรณีฐาน เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0741
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0203 p.u.

กรณี 2) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต

เช่นเดียวกันกับเวลา 14.00 น. เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตในระบบทดสอบดังตำแหน่งแสดงในรูปที่ 7.1 โดยยังไม่มี DG เชื่อมต่อในระบบ และยังไม่พิจารณาถึงผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลดเช่นเดียวกับกรณีพื้นฐาน ตัวคุมค่าแรงดันติดตั้งระหว่างบัส 7 - 8 ปรับแท็บเป็น 1.05 ส่วนตัวคุมค่าแรงดันติดตั้งระหว่างบัส 19 - 20 ปรับแท็บเป็น 1.025 และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตจ่ายกำลังรีแอกทีฟปริมาณ 100 kVAr รูปที่ 7.12 แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตสามารถช่วยยกระดับแรงดันให้สูงขึ้น และรักษาระดับแรงดันภายในขอบเขตได้ โดยบัสที่ 7 มีระดับแรงดันต่ำที่สุดที่ขนาด 0.9532 p.u. ในตารางที่ 7.11 ได้นำแสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน



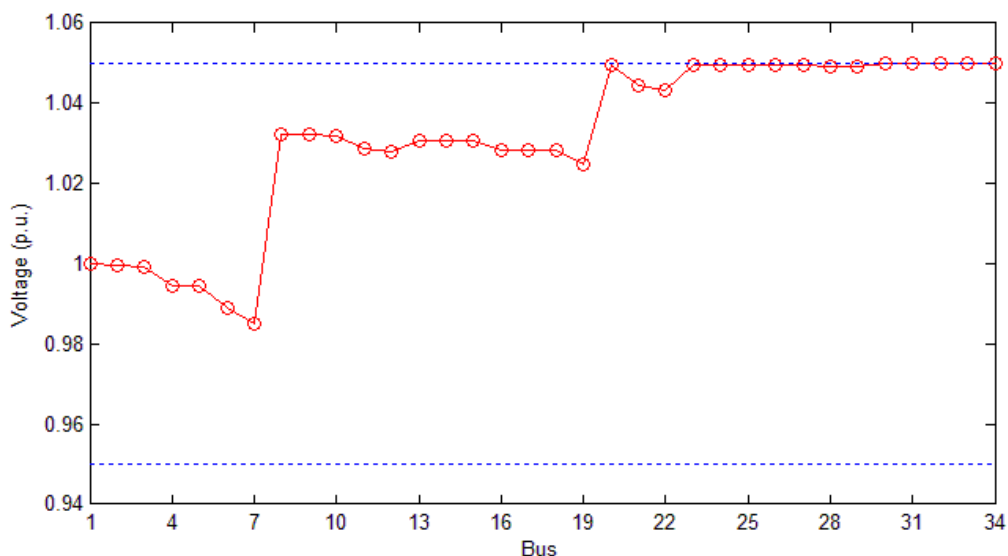
รูปที่ 7.12 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต เวลา 18.00 น.

ตารางที่ 7.11 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกันของระบบทดสอบ IEEE กรณี 2) เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0177
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0414 p.u.

กรณี 3) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และ DG

เมื่อเพิ่มการเชื่อมต่อ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนทั้งสองชนิด และ DG ประเภทควบคุมได้รวมเข้าในกรณีที่ 2) ตามตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.1 อย่างไรก็ตามในเวลา 18.00 น. DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้ถูกกำหนดให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้า ในขณะที่ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนแบบพลังงานลมมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ย และ DG ประเภทควบคุมได้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟหรือรีแอกทีฟได้เรื่อยๆ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้า ณ บัสหนึ่งมีค่าเท่ากับขีดจำกัดแรงดันที่กำหนด โดยกำหนดให้มีค่าตัวประกอบกำลังมีขนาดคงที่เท่ากับ 0.875 แบบคาปาซิทีฟ เช่นเดียวกันกับเวลา 14.00 น. จากรูปที่ 7.13 เห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้นเนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าลดลง โดยบัส 30 มีขนาดแรงดันเท่ากับขีดจำกัดแรงดันสูงสุด ทั้งนี้ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน สามารถแสดงในตารางที่ 7.12



รูปที่ 7.13 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 18.00 น.

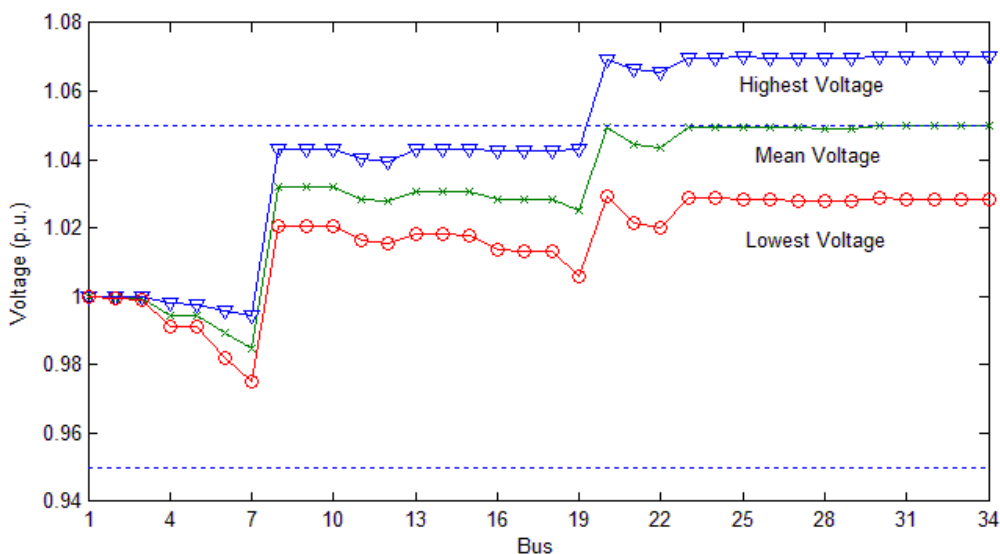
ตารางที่ 7.12 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.

ชนิดของ	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0313
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0473 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	344 kW, 0.875 capacitive

อย่างไรก็ตาม กรณีที่นำเสนอทั้ง 3 กรณีข้างต้นนี้ เพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจาก DG ตัวควบคุมแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตเท่านั้น โดยผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดยังไม่ได้ถูกพิจารณา

กรณี 4) ผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโหลด

จากผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 7.13 สามารถเห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้นเนื่องจากการติดตั้ง DG และอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน ในกรณีนี้จะคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนรวมเข้าไปจากกรณีที่ 3) ด้วย ซึ่งจากผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการละเมิดแรงดันขึ้นที่หลายบัสดังแสดงในรูปที่ 7.14 โดยได้นำเสนอเฉพาะค่าขอบเขตบน/ล่าง และค่าเฉลี่ยของระดับแรงดัน ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างเป็นผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดเมื่อเกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ในตารางที่ 7.13 ได้แสดงค่าความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันขึ้น



รูปที่ 7.14 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด เวลา 18.00 น.

ตารางที่ 7.13 ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.

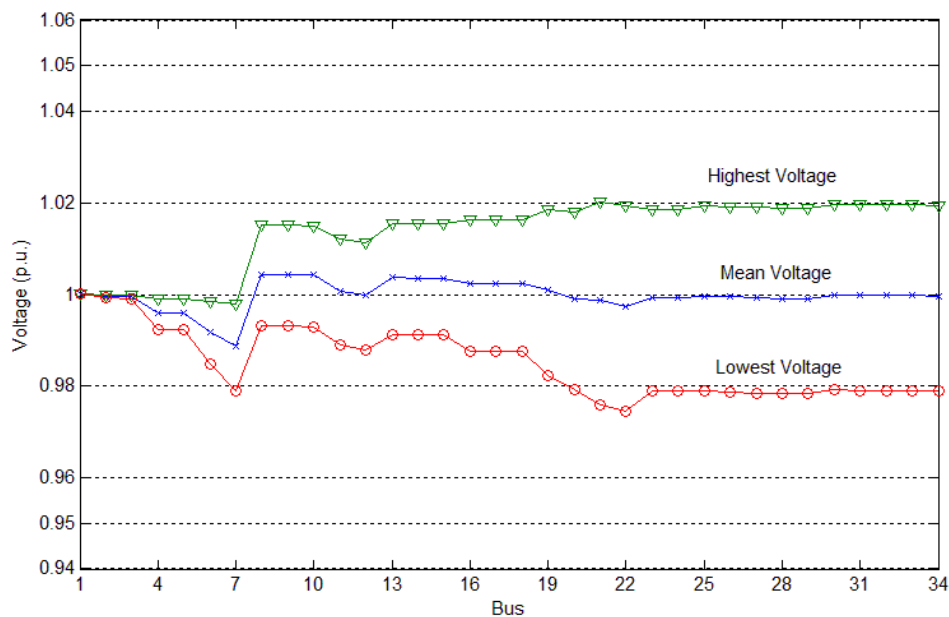
ระดับแรงดัน	ความน่าจะเป็น
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันต่ำ (0.95 p.u.)	0
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันสูง (1.05 p.u.)	0.397

อย่างไรก็ตาม ค่าความน่าจะเป็นดังแสดงในตารางที่ 7.13 เป็นความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันในกรณีทดสอบนี้เท่านั้น ไม่ใช่ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการละเมิดแรงดันเมื่อติดตั้ง DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนในทุกๆกรณี โดยค่าความน่าจะเป็นในกรณีนี้คำนวณได้จากจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดการละเมิดแรงดันต่อจำนวนเหตุการณ์ที่คำนวณทั้งหมด ทั้งนี้ในกรณีข้างต้นเพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจากความไม่แน่นอน และ ผลจากการทำงานพร้อมกันระหว่าง DG กับตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต เท่านั้น ซึ่งในกรณีต่อไปได้นำแสดงผลจากวิธีที่นำเสนอ

กรณี 5) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต

ในวิธีที่นำเสนอ นั้น ระบบทดสอบได้มีการติดตั้งตำแหน่งของตัวคุมค่าแรงดัน ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต DG ประเภทควบคุมได้ และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนเหมือนในกรณีที่ 4) แต่ไม่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ ซึ่งจากปัญหาดังแสดงในรูปที่ 7.14 ที่เกิดระดับแรงดัน สูงกว่าขอบเขตจำกัด อย่างไรก็ตามแรงดันของระบบสามารถถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตจำกัดเมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอ รวมไปถึงระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสในระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่

ต้องการด้วย (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) ดังแสดงในรูปที่ 7.15 ซึ่งได้แสดงค่าเฉลี่ยและค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าผู้เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าผู้เข้าของระดับโหลด นอกจากนี้แม้ว่าจะเกิดความไม่แน่นอนจากขนาดกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดจากค่าเฉลี่ยที่กำหนด ระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงถูกรักษาไว้ในขอบเขตระดับแรงดันที่กำหนดไว้ดังแสดง โดยเส้นขอบเขตบน/ล่าง ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้นเป็นผลกระทบจากขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย และเช่นเดียวกันกับ ณ เวลา 14.00 น. ในวิธีการที่นำเสนอ นั้น ผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และ ขนาดของตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิต จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ โดยตารางที่ 7.14 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และ ขนาดของตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิต



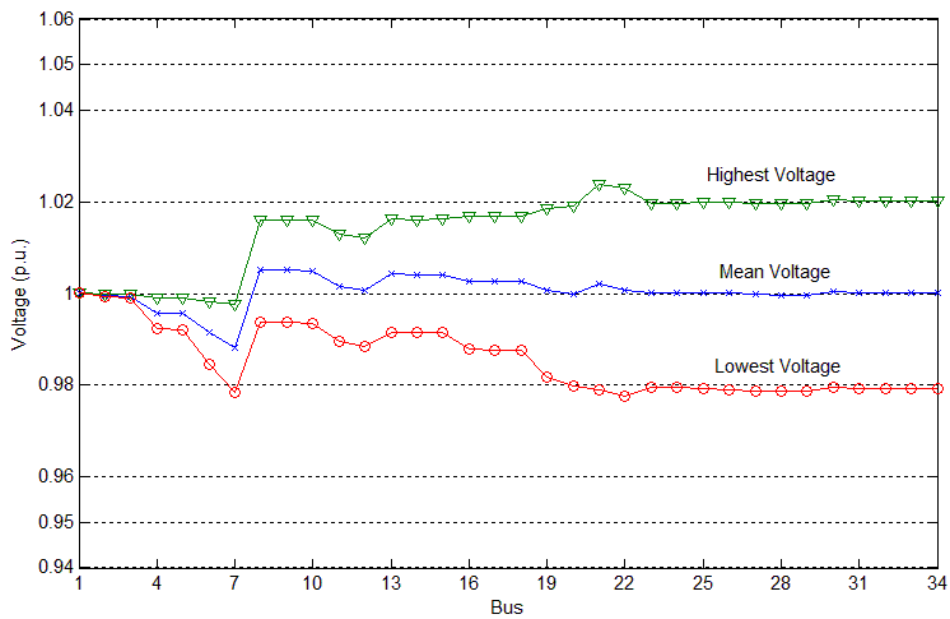
รูปที่ 7.15 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 18.00 น.

ตารางที่ 7.14 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0020
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0158 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	470 kW, 0.9822 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.0188
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1
ขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต	170 kVAr

กรณี 6) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์

ในกรณีนี้ได้แสดงถึงผลจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ แทนที่ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ทั้งนี้ได้กำหนดให้มีเงื่อนไขตามกรณีที่ 5 ยกเว้นเพียงแต่ให้เปลี่ยนจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตที่บัส 21 เป็นการติดตั้งคาปาซิเตอร์แทน โดยกำหนดให้คาปาซิเตอร์มีขนาด 100 kVAr/ชั้น โดยสามารถปรับได้มากที่สุด 8 ชั้น หรือมีพิกัดมากที่สุด 800 kVAr รูปที่ 7.16 แสดงค่าเฉลี่ย และค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าลู่เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าลู่เข้าของระดับโหลด ซึ่งเห็นได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสในระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) สำหรับเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถเห็นได้ว่า แม้จะมีการพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบยังคงถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ทั้งนี้ในวิธีการที่นำเสนอ นั้น ผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของคาปาซิเตอร์ จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ โดยตารางที่ 7.15 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วยแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดของคาปาซิเตอร์ ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 7.16 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบทดสอบ IEEE เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 18.00 น.

ตารางที่ 7.15 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบทดสอบ IEEE เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0020
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0169 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	400 kW, 0.9578 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.0188
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1
ขนาดของคาปาซิเตอร์	200 kVAr

จากตารางที่ 7.14 และ ตารางที่ 7.15 พบว่าการติดตั้งตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิตได้ผลลัพธ์ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยเท่ากับกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ แต่มีค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกันน้อยกว่ากรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ (ซึ่งหมายถึงแรงดันในระบบมีการแกว่งน้อยกว่า) อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของกรณีที่ใช้ตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิตมีค่ามากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากขนาดกำลังการผลิตแต่ละครั้งของตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิตมีค่าน้อยกว่าคาปาซิเตอร์ กล่าวคือตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิตมีขนาดกำลังการผลิตแต่ละครั้งเท่ากับ 5 kVAr ในขณะที่คาปาซิเตอร์มีขนาดเท่ากับ 100 kVAr โดยตารางที่ 7.16 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยเชิงโคโรนัสสถิตและจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 7.16 การเปรียบเทียบค่าตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต
และจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบทดสอบ IEEE

ชนิด	ติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต	ติดตั้งคาปาซิเตอร์
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0020	0.0020
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุด ของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0158 p.u.	0.0169 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	470 kW, 0.9822 capacitive	400 kW, 0.9578 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.0188	1.0188
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1	1
ขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	170 kVAr	200 kVAr

ทั้งนี้ผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.4 สามารถสรุปมาเป็นตัวอย่างผลการทดสอบได้ในตารางที่ 7.17 - 7.18 โดยตารางที่ 7.17 เป็นผลการทดสอบจากระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ส่วนตารางที่ 7.18 เป็นผลการทดสอบจากระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ โดยตารางทั้งสองแสดงค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างที่คำนวณได้จากกระบวนการค้นหา ทั้งนี้ในตารางที่ 7.17 ได้แสดงถึงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าตัวประกอบกำลังของ DG ประเภทควบคุมได้ ค่าแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต สำหรับตารางที่ 7.18 ได้แสดงถึงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าตัวประกอบกำลังของ DG ประเภทควบคุมได้ ค่าแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 7.17 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต

เวลา	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน		
		กำลังไฟฟ้าแยกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบกำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	ขนาดตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (kVAr)
0.00 น.	0.0017	475	0.9825 capacitive	1	1	195
1.00 น.	0.0016	480	0.9810 capacitive	1	1	185
2.00 น.	0.0015	465	0.9776 capacitive	1	1	160
3.00 น.	0.0015	460	0.9772 capacitive	1	1	125
4.00 น.	0.0015	440	0.9876 capacitive	1	1	100
5.00 น.	0.0018	460	0.9171 capacitive	1	1	195
6.00 น.	0.0019	480	0.9162 capacitive	1	1	210
7.00 น.	0.0016	480	0.9231 capacitive	1	1	190
8.00 น.	0.0021	485	0.8813 capacitive	1.0188	1	260
9.00 น.	0.0023	490	0.8644 capacitive	1.0188	1	290
10.00 น.	0.0026	490	0.8529 capacitive	1.0188	1	340
11.00 น.	0.0026	500	0.8799 capacitive	1.0188	1.0125	290
12.00 น.	0.0024	460	0.8983 capacitive	1.0188	1.0125	215

ตารางที่ 7.17 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน		
		กำลังไฟฟ้าแยกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบกำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	ขนาดตัวชดเชยซิงโครนัส สถิต (kVAr)
13.00 น.	0.0026	475	0.8849 capacitive	1.025	1.0125	275
14.00 น.	0.0029	500	0.8575 capacitive	1.025	1.0125	320
15.00 น.	0.0034	500	0.8575 capacitive	1.025	1.0125	345
16.00 น.	0.0021	490	0.8758 capacitive	1.0188	1	275
17.00 น.	0.0022	490	0.9798 capacitive	1.0188	1	195
18.00 น.	0.0020	470	0.9822 capacitive	1.0188	1	170
19.00 น.	0.0023	500	0.8575 capacitive	1.0188	1.0063	265
20.00 น.	0.0022	485	0.8775 capacitive	1.0188	1.0063	235
21.00 น.	0.0021	455	0.8845 capacitive	1.0188	1.0063	205
22.00 น.	0.0020	445	0.9159 capacitive	1.0188	1.0063	185
23.00 น.	0.0017	440	0.9858 capacitive	1.0188	1.0063	150
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยรวมตลอดวัน = 0.0506						

ตารางที่ 7.18 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน		
		กำลังไฟฟ้าแยกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบกำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	คาปาซิเตอร์ (kVAr)
0.00 น.	0.0018	450	0.9784 capacitive	1	1	200
1.00 น.	0.0017	445	0.9757 capacitive	1	1	200
2.00 น.	0.0017	420	0.9778 capacitive	1	1	200
3.00 น.	0.0016	390	0.9843 capacitive	1	1	200
4.00 น.	0.0015	370	0.9985 capacitive	1	1	200
5.00 น.	0.0019	460	0.9243 capacitive	1	1	200
6.00 น.	0.0019	480	0.9091 capacitive	1	1	200
7.00 น.	0.0017	465	0.9186 capacitive	1	1	200
8.00 น.	0.0023	465	0.8925 capacitive	1.0188	1	300
9.00 น.	0.0024	485	0.8699 capacitive	1.0188	1	300
10.00 น.	0.0028	465	0.8768 capacitive	1.0188	1.0125	300
11.00 น.	0.0028	485	0.8622 capacitive	1.0188	1.0125	300
12.00 น.	0.0026	430	0.9336 capacitive	1.0188	1.0125	300

ตารางที่ 7.18 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบทดสอบ IEEE 34-bus เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์ (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน		
		กำลังไฟฟ้าแยกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบกำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	คาปาซิเตอร์ (kVAr)
13.00 น.	0.0027	485	0.8737 capacitive	1.0188	1.0125	300
14.00 น.	0.0038	475	0.8455 capacitive	1.025	1.0188	300
15.00 น.	0.0040	480	0.8831 capacitive	1.025	1.0188	300
16.00 น.	0.0023	465	0.8688 capacitive	1.0188	1	300
17.00 น.	0.0020	435	0.9454 capacitive	1.0188	1	200
18.00 น.	0.0020	400	0.9578 capacitive	1.0188	1	200
19.00 น.	0.0041	500	0.8575 capacitive	1.0188	1	200
20.00 น.	0.0038	500	0.8575 capacitive	1.0188	1	200
21.00 น.	0.0021	485	0.8737 capacitive	1.0188	1	200
22.00 น.	0.0020	440	0.8821 capacitive	1.0188	1	200
23.00 น.	0.0020	400	0.9578 capacitive	1.0188	1	200
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยรวมตลอดวัน = 0.0575						

กรณี 7) ผลจากวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบบ่ออ่อนจำลอง

ในกรณีนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และสมรรถภาพของการค้นหาแบบทามูกับการค้นหาแบบบ่ออ่อนจำลอง ทั้งนี้การเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้จากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบ่ออ่อนจำลอง กำหนดให้มีเงื่อนไขตามกรณีที่ 5) โดยผลลัพธ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.19 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการค้นหาแบบทามูได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าตลอดจนพบจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นมากกว่าด้วย

ตารางที่ 7.19 การเปรียบเทียบค่าตอบจากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบ่ออ่อนจำลอง
ในระบบทดสอบ IEEE

ชนิด	การค้นหาแบบทามู	การค้นหาแบบบ่ออ่อนจำลอง
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0020	0.0057
จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นที่พบ	3	1

อย่างไรก็ตามตารางที่ 7.9 และตารางที่ 7.19 แสดงการเปรียบเทียบเฉพาะผลลัพธ์ในกรณีเฉพาะเวลา 14.00 น. และ 18.00 น. เท่านั้น โดยหากเปรียบเทียบผลลัพธ์ตลอดทั้งวันซึ่งเป็นคำตอบแบบวงกว้างสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการค้นหาแบบทามูได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าค่อนข้างมาก

ตารางที่ 7.20 การเปรียบเทียบค่าตอบแบบวงกว้างจากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบ่ออ่อนจำลองในระบบทดสอบ IEEE

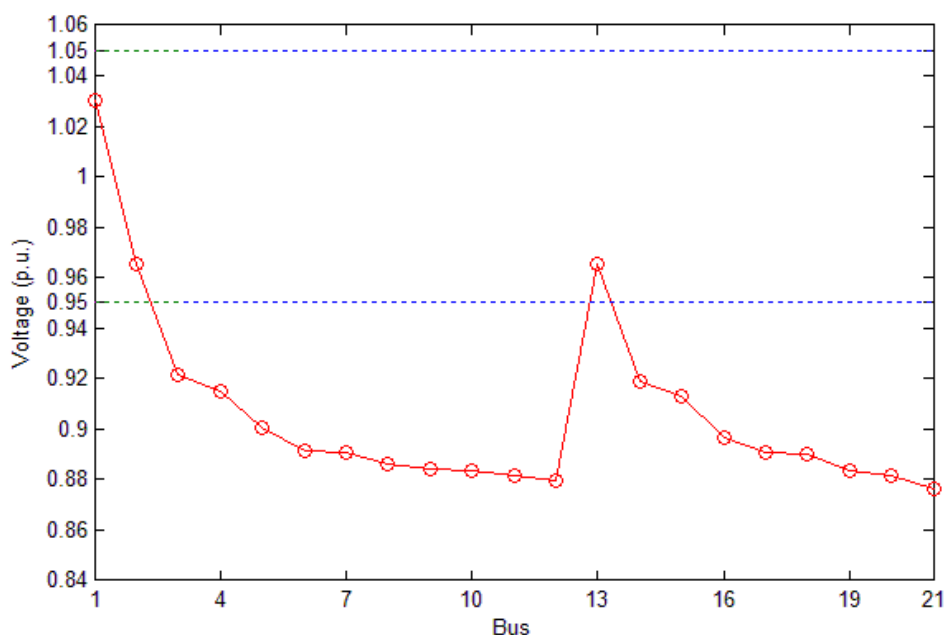
ชนิด	การค้นหาแบบทามู	การค้นหาแบบบ่ออ่อนจำลอง
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0506	0.1362

7.4 ผลการทดสอบจากระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

7.4.1 ผลการทดสอบจากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เวลา 14.00 น.

กรณี 1) กรณีพื้นฐาน

ในระบบไม่มีการเชื่อมต่อ DG ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัส โดยยังไม่พิจารณาผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลด รูปที่ 7.17 แสดงระดับแรงดันของระบบ ซึ่งพบว่าเกิดการละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำที่หลายบัสเนื่องจากมีระดับโหลดสูง การละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำจะเริ่มตั้งแต่บัสที่ 3 จนถึงบัสที่ 34 โดยบัสที่ 21 มีระดับแรงดันต่ำที่สุดในระบบ ตารางที่ 7.21 แสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน ทั้งนี้ระบบทดสอบมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยต่างจากกรณีระบบทดสอบ IEEE 34 บัส กล่าวคือในกรณีนี้สถานีไฟฟ้าย่อยมีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1.03 p.u. ซึ่งเป็นระดับแรงดันจริงที่ใช้ แต่ของระบบทดสอบ IEEE สถานีไฟฟ้าย่อยมีระดับแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1 p.u.



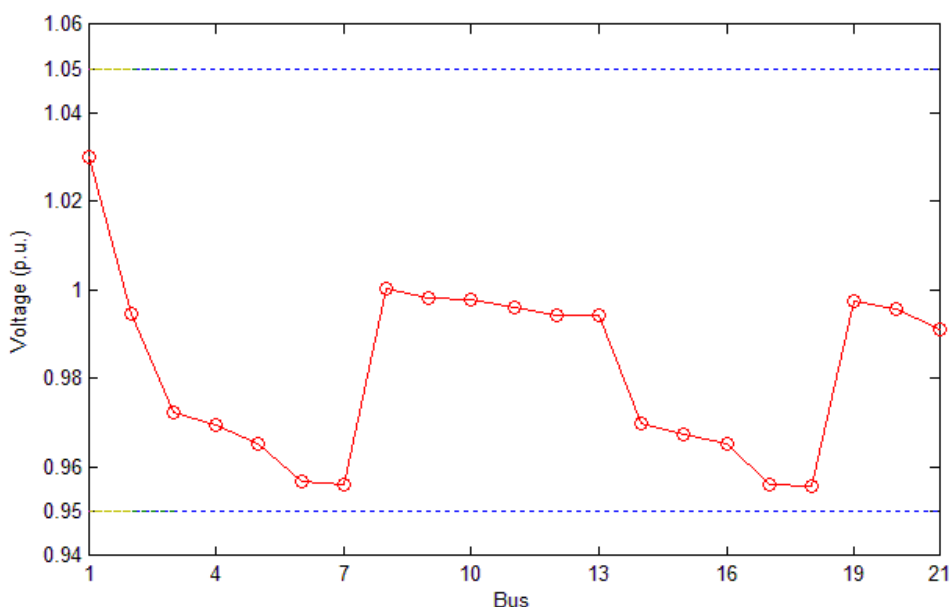
รูปที่ 7.17 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณีพื้นฐาน เวลา 14.00 น.

ตารางที่ 7.21 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณีพื้นฐาน เวลา 14.00 น.

ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0905
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0646 p.u.

กรณี 2) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัส

เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสในระบบทดสอบดังตำแหน่งแสดงในรูปที่ 7.2 โดยยังไม่มี DG เชื่อมต่อในระบบ และยังไม่พิจารณาถึงผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลดเช่นเดียวกับกรณีพื้นฐาน ตัวคุมค่าแรงดันปรับแก้เป็น 1.05 และขนาดของคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสติดตั้งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟปริมาณ 2 MVar ทั้งนี้ขนาดของคาปาซิเตอร์ไม่ได้คำนึงถึงพิกัดขนาดแต่อย่างใด เนื่องจากต้องการชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของคาปาซิเตอร์และตัวชดเชยซิงโครนัสติดตั้งเท่านั้น รูปที่ 7.18 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแรงดันทั้งสองชนิดสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้ ในตารางที่ 7.22 ได้นำแสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยและผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน



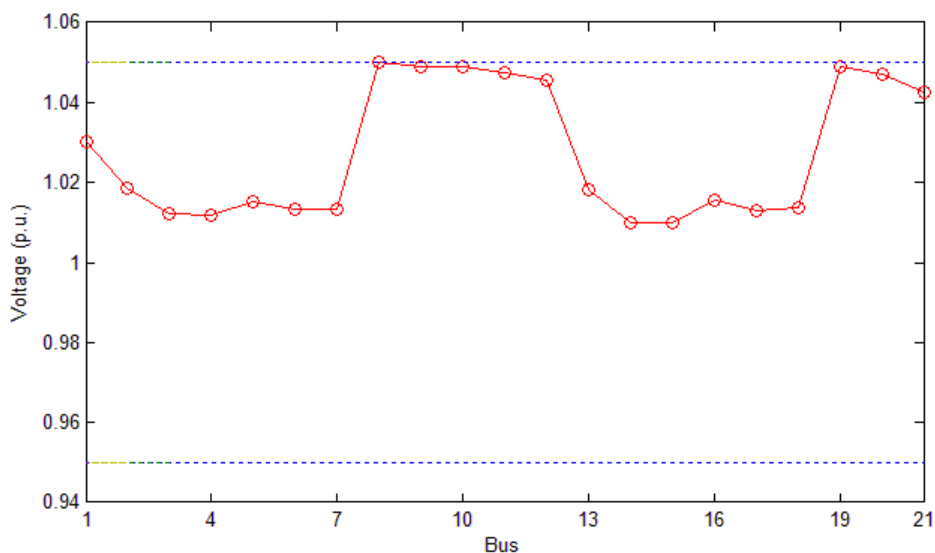
รูปที่ 7.18 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสติดตั้ง ณ เวลา 14.00 น.

ตารางที่ 7.22 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณี 2) เวลา 14.00 น.

ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0217
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0443 p.u.

กรณี 3) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และ DG

เมื่อเพิ่มการเชื่อมต่อ DG ประเภทพลังงานแสงอาทิตย์ และ DG ประเภทควบคุมได้ จำนวน 2 ตัวรวมเข้าในกรณีที่ 2) ตามตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.2 โดยที่กำหนดให้ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าเฉลี่ย และกำหนดให้ DG ประเภทควบคุมได้ทั้ง 2 ตัวสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟหรือรีแอกทีฟได้เรื่อยๆ จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้า ณ บัสหนึ่งมีค่าเท่ากับขีดจำกัดแรงดันที่กำหนด โดยกำหนดให้มีค่าตัวประกอบกำลังมีขนาดคงที่เท่ากับ 0.875 แบบคาปาซิทีฟ จากรูปที่ 7.19 เห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้นเนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟจากสถานีไฟฟ้าลดลง ทั้งนี้ ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน และ ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้สามารถแสดงในตารางที่ 7.23



รูปที่ 7.19 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยตัวอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 14.00 น.

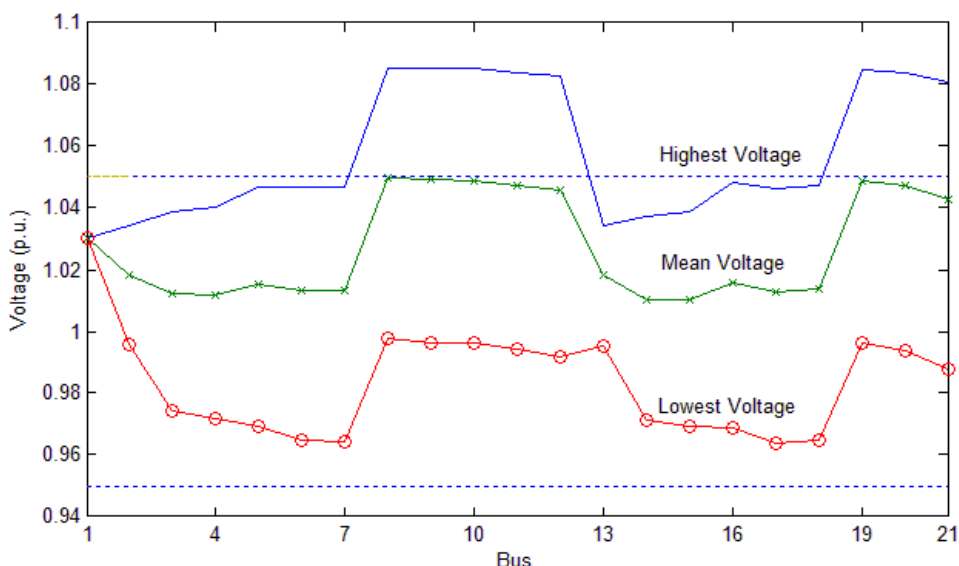
ตารางที่ 7.23 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.

ชนิดของ	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0274
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0366 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10	484.4 kW, 0.875 capacitive
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18	484.4 kW, 0.875 capacitive

อย่างไรก็ตาม กรณีที่นำเสนอทั้ง 3 กรณีข้างต้นนี้ เพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจาก DG ตัวควบคุมแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยเชิงโครนัสเท่านั้น โดยผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดยังไม่ได้ถูกพิจารณา

กรณี 4) ผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโหลด

จากผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 7.19 สามารถเห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้นเนื่องจากการติดตั้ง DG และอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน ในกรณีนี้จะคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนรวมเข้าไปจากกรณีที่ 3) ด้วย ซึ่งจากผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าการละเมิดแรงดันขึ้นที่หลายบัสดังแสดงในรูปที่ 7.20 โดยได้นำเสนอเฉพาะค่าขอบเขตบน/ล่าง และค่าเฉลี่ยของระดับแรงดัน ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างเป็นผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดเมื่อเกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ในตารางที่ 7.24 ได้แสดงค่าความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันขึ้น



รูปที่ 7.20 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด เวลา 14.00 น.

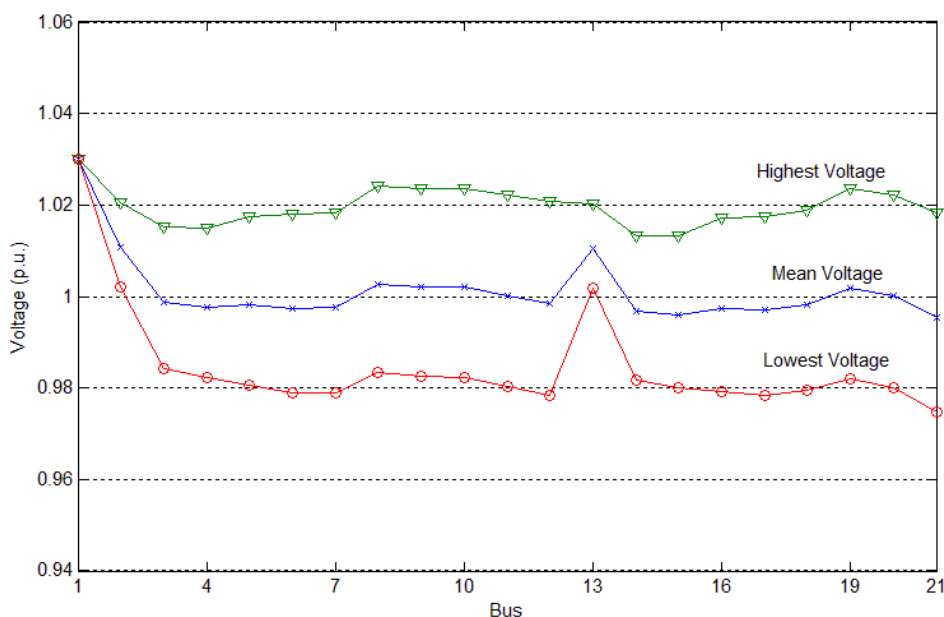
ตารางที่ 7.24 ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.

ระดับแรงดัน	ความน่าจะเป็น
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันต่ำ (0.95 p.u.)	0
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันสูง (1.05 p.u.)	0.265

อย่างไรก็ตาม ค่าความน่าจะเป็นดังแสดงในตารางที่ 7.24 เป็นความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันในกรณีทดสอบนี้เท่านั้น ไม่ใช่ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการละเมิดแรงดันเมื่อติดตั้ง DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนในทุกๆ กรณี โดยค่าความน่าจะเป็นในกรณีนี้คำนวณได้จากจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดการละเมิดแรงดันต่อจำนวนเหตุการณ์ที่คำนวณทั้งหมด ทั้งนี้ในกรณีข้างต้นเพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจากความไม่แน่นอน และ ผลจากการทำงานพร้อมกันระหว่าง DG ตัวควบคุมแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสเท่านั้น ซึ่งในกรณีต่อไปได้นำแสดงผลจากวิธีที่นำเสนอ

กรณี 5) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต

ในกรณีทดสอบนี้ ระบบได้มีการติดตั้งตำแหน่งของตัวคุมค่าแรงดัน ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต DG ประเภทควบคุมได้ และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนเหมือนในกรณีที่ 4) แต่ไม่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ ซึ่งจากปัญหาดังแสดงในรูปที่ 7.20 ที่เกิดระดับแรงดันสูงกว่าขอบเขตจำกัดสามารถถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตจำกัดเมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอ รวมไปถึงระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสในระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการด้วย (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) ดังแสดงในรูปที่ 7.21 ซึ่งได้แสดงค่าเฉลี่ยและค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าลู่เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าลู่เข้าของระดับโหลด นอกจากนี้แม้ว่าจะเกิดความไม่แน่นอนจากขนาดกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดจากค่าเฉลี่ยที่กำหนด ระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงถูกรักษาไว้ในขอบเขตระดับแรงดันที่กำหนดไว้ดังแสดงโดยเส้นขอบเขตบน/ล่าง ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้นเป็นผลกระทบจากขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ทั้งนี้ในวิธีการที่นำเสนอ ผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ ตารางที่ 7.25 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ประกอบไปด้วย ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกันขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และ ขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต



รูปที่ 7.21 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอเวลา 14.00 น.

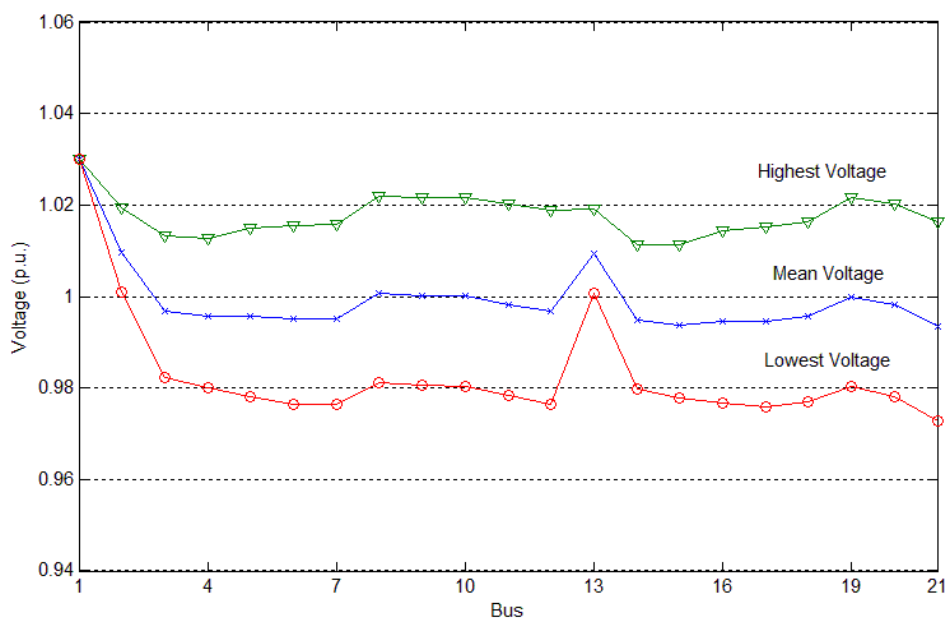
ตารางที่ 7.25 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0065
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0197 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10	575 kW, 0.8706 capacitive
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18	535 kW, 0.8440 capacitive
เท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.0063
ขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต	1.285 MVar

กรณี 6) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์

ในกรณีนี้ได้แสดงถึงผลจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ โดยใช้เงื่อนไขตามกรณีที่ 5) แต่เปลี่ยนจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตที่บัส 16 เป็นการติดตั้งคาปาซิเตอร์แทน ซึ่งได้กำหนดให้คาปาซิเตอร์มีขนาด 1,200 kVar/ชั้น สามารถปรับขึ้นเดียว แสดงค่าเฉลี่ย และค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยเส้นที่บแสดงค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าคู่เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าคู่เข้าของระดับโหลด สำหรับเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้นเป็นผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถเห็นได้ว่า แม้จะมีการพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนและระดับโหลด ระดับ

แรงดันไฟฟ้าของระบบยังคงถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ทั้งนี้ในวิธีการที่นำเสนอ นั้น ผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และ ขนาดของคาปาซิเตอร์ จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ โดยตารางที่ 7.26 แสดงผลลัพธ์ที่ได้ จากวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของคาปาซิเตอร์



รูปที่ 7.22 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอเวลา 14.00 น.

ตารางที่ 7.26 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 14.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0074
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0205 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10	615 kW, 0.8507 capacitive
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18	460 kW, 0.8251 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1.0063
ขนาดของคาปาซิเตอร์	1.2 MVar

จากตารางที่ 7.25 และ ตารางที่ 7.26 พบว่าการติดตั้งตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิตได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย) ที่ดีกว่า และผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อถึงกันมีค่าน้อยกว่ากรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์อีกด้วย (ซึ่งหมายถึง

แรงดันในระบบมีการแกว่งน้อยกว่า) โดยตารางที่ 7.27 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตและจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 7.27 การเปรียบเทียบค่าตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตและจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.

ชนิด	ติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัส	ติดตั้งคาปาซิเตอร์
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0065	0.0074
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0197 p.u.	0.0205 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	575 kW, 0.8706 capacitive	615 kW, 0.8507 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	535 kW, 0.8440 capacitive	460 kW, 0.8251 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1.0063	1.0063
ขนาดของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ	1.285 MVar	1.2 MVar

กรณี 7) ผลจากวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบบ่อน้ำจาลอง

ในกรณีนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และสมรรถภาพของการค้นหาแบบทามูกับการค้นหาแบบบ่อน้ำจาลอง ทั้งนี้การเปรียบเทียบค่าตอบที่ได้จากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบ่อน้ำจาลอง กำหนดให้มีเงื่อนไขตามกรณีที่ 5 โดยผลลัพธ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.28 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการค้นหาแบบทามูได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าตลอดจนพบจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นมากกว่าด้วย

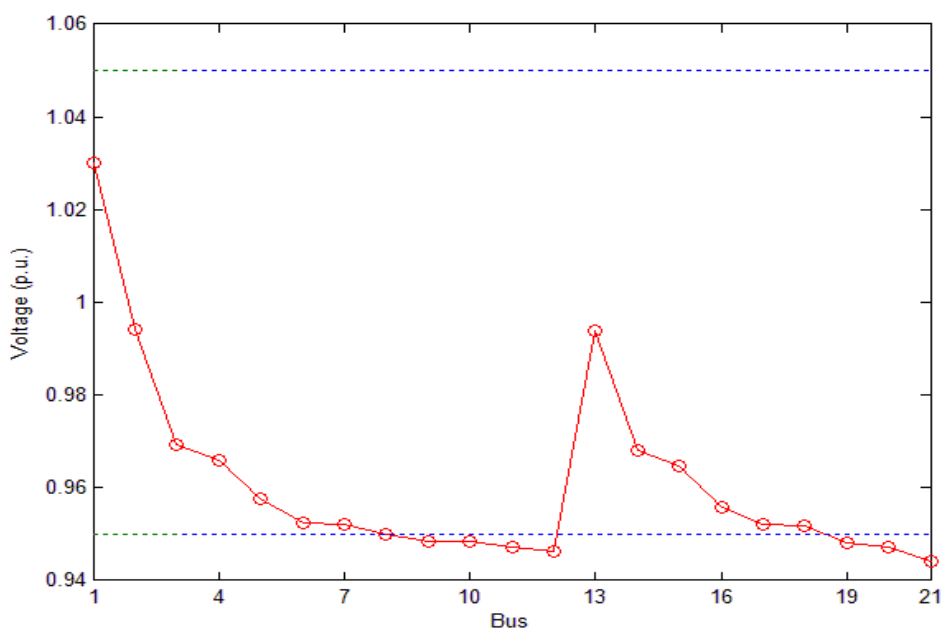
ตารางที่ 7.28 การเปรียบเทียบค่าตอบจากการค้นหาแบบทามู และการค้นหาแบบบ่อน้ำจาลองในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.

ชนิด	การค้นหาแบบทามู	การค้นหาแบบบ่อน้ำจาลอง
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0065	0.0105
จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นที่พบ	3	1

7.4.2 ผลการทดสอบจากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เวลา เวลา 18.00 น.

กรณี 1) กรณีพื้นฐาน

ในระบบไม่มีการเชื่อมต่อ DG ตัวคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสโดยยังไม่พิจารณาผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลด รูปที่ 7.23 แสดงระดับแรงดันของระบบ ซึ่งพบว่าเกิดการละเมิดขอบเขตแรงดันต่ำบางบัสที่สายส่งย่อย ซึ่งแรงดันในแต่ละบัสจะมีค่าสูงกว่า ณ เวลา 14.00 น. เนื่องจากมีระดับโหลดที่ต่ำกว่า ตารางที่ 7.29 แสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน



รูปที่ 7.23 ระดับแรงดันแต่ละบัสของของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณีพื้นฐาน เวลา 18.00 น.

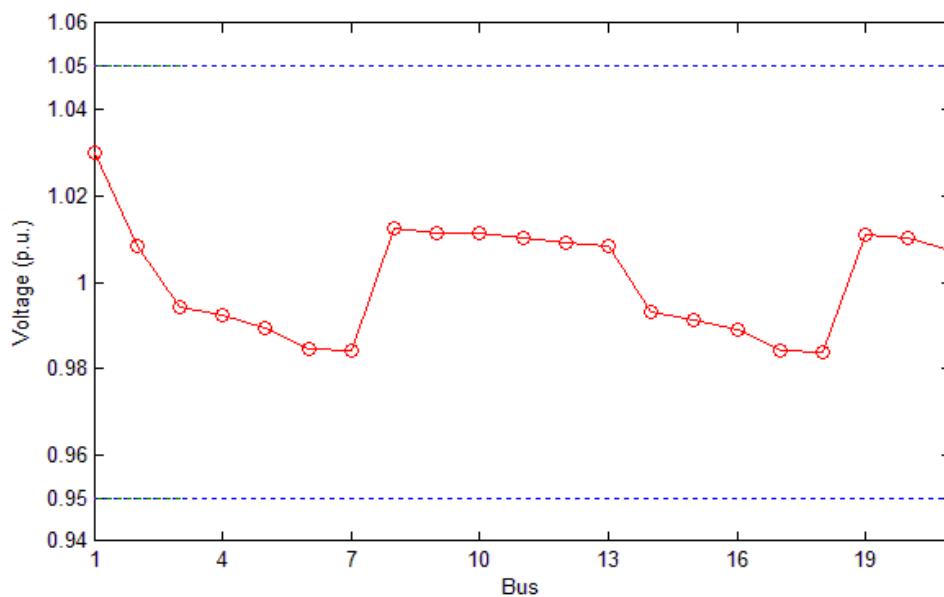
ตารางที่ 7.29 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน กรณีฐานของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0405
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0360 p.u.

กรณี 2) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัส

เช่นเดียวกันกับเวลา 14.00 น. เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสในระบบทดสอบดังตำแหน่งแสดงในรูปที่ 7.2 โดยยังไม่มี DG เชื่อมต่อในระบบ และยังไม่พิจารณาถึงผลจากความไม่แน่นอนของระดับโหลดเช่นเดียวกับกรณีพื้นฐาน ตัวคุมค่าแรงดัน

ปรับแก้เป็น 1.05 และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสจ่ายกำลังไฟฟ้วาร์แอกทีฟ 1 MVar ทั้งนี้ขนาดของคาปาซิเตอร์ไม่ได้คำนึงถึงพิกัดขนาดแต่อย่างใด เนื่องจากต้องการชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของคาปาซิเตอร์และตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตเท่านั้น รูปที่ 7.24 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแรงดันทั้งสองชนิดสามารถยกระดับแรงดันให้สูงขึ้นได้ ในตารางที่ 7.30 ได้นำแสดงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน



รูปที่ 7.24 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อตัวคุมค่าแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต เวลา 18.00 น.

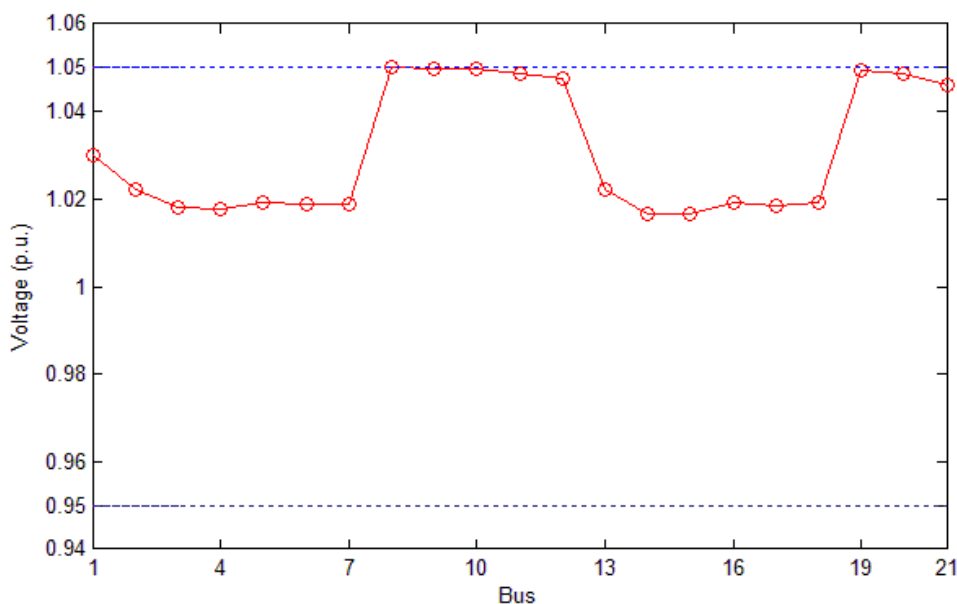
ตารางที่ 7.30 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. กรณี 2) เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0132
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0287 p.u.

กรณี 3) ผลกระทบต่อแรงดันจากตัวคุมค่าแรงดัน คาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัส และ DG

เมื่อเพิ่มการเชื่อมต่อ DG ประเภทพลังงานแสงอาทิตย์ และ DG ประเภทควบคุมได้จำนวน 2 ตัวรวมเข้าในกรณีที่ 2) ตามตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7.2 อย่างไรก็ตามได้กำหนดให้ DG พลังงานแสงอาทิตย์ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้า และกำหนดให้ DG ประเภทควบคุมได้ทั้ง 2 ตัวสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟหรือรีแอกทีฟได้เรื่อยๆ จนกระทั่ง

แรงดันไฟฟ้า ณ บัสหนึ่งมีค่าเท่ากับขีดจำกัดแรงดันที่กำหนด โดยกำหนดให้มีค่าตัวประกอบกำลัง มีขนาดคงที่เท่ากับ 0.875 แบบคาปาซิทีฟ จากรูปที่ 7.25 เห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้น เนื่องจากการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟจากสถานีไฟฟาลดลง ทั้งนี้ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย และค่าผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน สามารถแสดงในตารางที่ 7.31



รูปที่ 7.25 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อเชื่อมต่อ DG ประเภทควบคุมได้ และประเภทพลังงานหมุนเวียน พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เวลา 18.00 น.

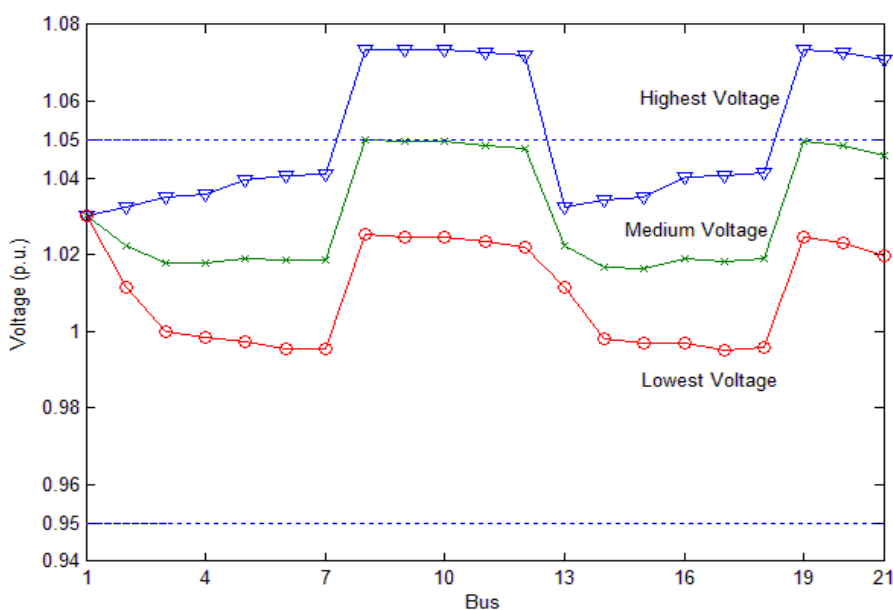
ตารางที่ 7.31 ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน และขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.

ชนิดของ	ผลจากการคำนวณ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0306
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อถึงกัน	0.0313 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10	362 kW, 0.875 capacitive
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18	362 kW, 0.875 capacitive

อย่างไรก็ตาม กรณีที่นำเสนอทั้ง 3 กรณีข้างต้นนี้ เพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจาก DG ตัวควบคุมแรงดัน และคาปาซิเตอร์/ตัวชดเชยซิงโครนัสเท่านั้น โดยผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับไหลดยังไม่ได้ถูกพิจารณา

กรณี 4) ผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และโหลด

จากผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 7.25 สามารถเห็นได้ว่าระดับแรงดันถูกยกสูงขึ้นเนื่องจากการติดตั้ง DG และอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน ในกรณีนี้จะคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนรวมเข้าไปจากกรณีที่ 3) ด้วย ซึ่งจากผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าเกิดการละเมิดแรงดันขึ้นที่หลายบัสดังแสดงในรูปที่ 7.26 โดยได้นำเสนอเฉพาะค่าขอบเขตบน/ล่าง และค่าเฉลี่ยของระดับแรงดัน ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างเป็นผลกระทบจากความไม่แน่นอนระดับโหลดเมื่อเกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย และ DG ประเภทพลังงานแสงอาทิตย์ถูกกำหนดให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้า ตารางที่ 7.32 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันขึ้น



รูปที่ 7.26 ระดับแรงดันแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อคำนึงถึงผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด เวลา 18.00 น.

ตารางที่ 7.32 ความน่าจะเป็นในการเกิดการละเมิดแรงดันของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.

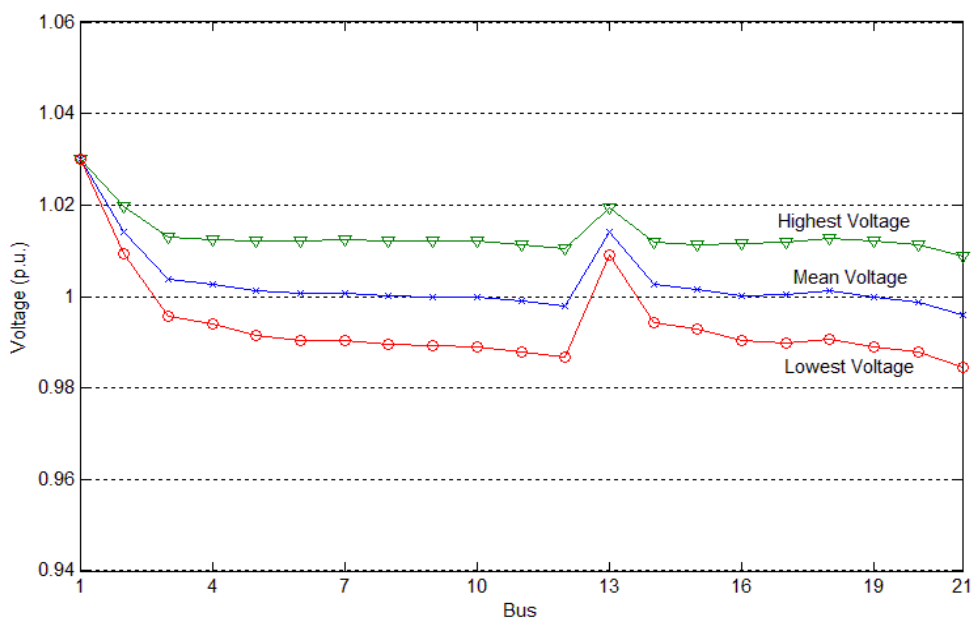
ระดับแรงดัน	ความน่าจะเป็น
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันต่ำ (0.95 p.u.)	0
เกิดการละเมิดพิกัดแรงดันสูง (1.05 p.u.)	0.242

อย่างไรก็ตาม ค่าความน่าจะเป็นดังแสดงในตารางที่ 7.32 เป็นความน่าจะเป็นที่อาจเกิดการละเมิดแรงดันในกรณีทดสอบนี้เท่านั้น ไม่ใช่ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการละเมิดแรงดันเมื่อติดตั้ง DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนในทุกๆ กรณี โดยค่าความน่าจะเป็นในกรณีนี้คำนวณได้

จากจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดการละเมิดแรงดันต่อจำนวนเหตุการณ์ที่คำนวณทั้งหมด ทั้งนี้ในกรณีข้างต้นเพียงต้องการชี้ให้เห็นผลกระทบจากความไม่แน่นอน และ ผลจากการทำงานพร้อมกันระหว่าง DG กับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันเท่านั้น ซึ่งในกรณีต่อไปได้นำแสดงผลจากวิธีที่นำเสนอ

กรณี 5) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิต

ในกรณีทดสอบนี้ ระบบทดสอบได้มีการติดตั้งตำแหน่งของตัวคุมค่าแรงดัน ตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิต DG ประเภทควบคุมได้ และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนเหมือนในกรณีที่ 4) แต่ไม่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ ซึ่งจากปัญหาดังแสดงในรูปที่ 7.26 ที่เกิดระดับแรงดันสูงกว่าขอบเขตจำกัด สามารถถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตจำกัดเมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอ รวมไปถึงระดับแรงดันไฟฟ้าของทุบัสในระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการด้วย (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) ดังแสดงในรูปที่ 7.27 ซึ่งได้แสดงค่าเฉลี่ยและค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าลู่เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าลู่เข้าของระดับโหลด นอกจากนี้แม้ว่าจะเกิดความไม่แน่นอนจากขนาดกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดจากค่าเฉลี่ยที่กำหนด ระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงถูกรักษาไว้ในขอบเขตระดับแรงดันที่กำหนดไว้ดังแสดงโดยเส้นขอบเขตบน/ล่าง ซึ่งเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้นเป็นผลกระทบจากขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ในวิธีการที่นำเสนอ นั้นผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิต จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ โดยตารางที่ 7.33 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยชิ่งโครนัสสถิต



รูปที่ 7.27 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ เวลา 18.00 น.

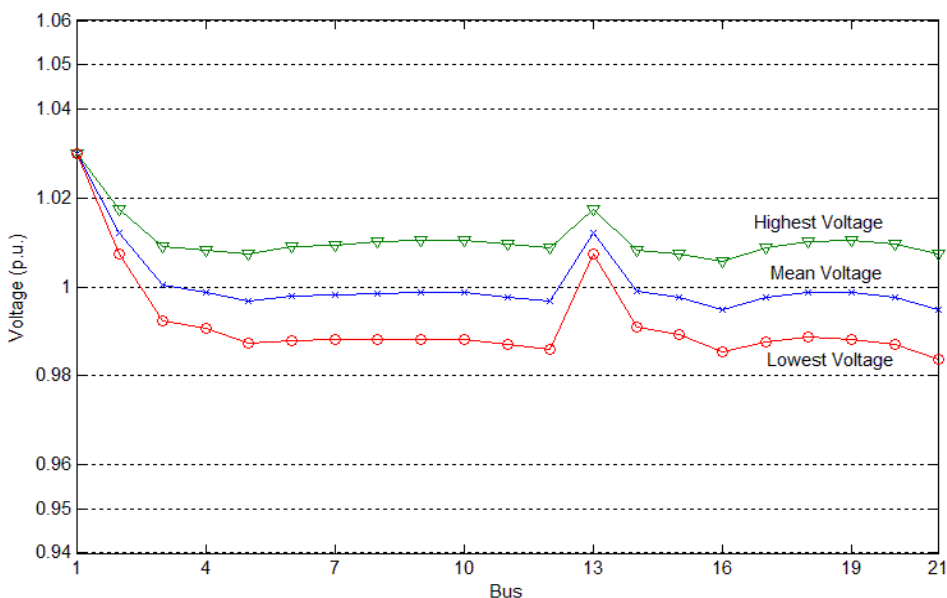
ตารางที่ 7.33 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0061
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0158 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10	425 kW, 0.9007 capacitive
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10	400 kW, 0.9119 capacitive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1
ขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต	490 kVAr

กรณี 6) ผลจากวิธีที่นำเสนอ ในระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์

ในกรณีนี้ได้แสดงถึงผลจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ แทนที่ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต ทั้งนี้ได้กำหนดให้มีเงื่อนไขตามกรณีที่ 5) ยกเว้นเพียงแต่ให้เปลี่ยนจากการติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิตที่บัส 16 เป็นการติดตั้งคาปาซิเตอร์แทน ซึ่งได้กำหนดให้คาปาซิเตอร์มีขนาด 1,200 kVAr/ชั้น สามารถปรับขึ้นเดียว รูปที่ 7.28 แสดงค่าเฉลี่ย และค่าขอบเขตบน/ล่างของระดับแรงดันไฟฟ้า โดยค่าเฉลี่ยของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการคำนวณด้วยค่าคู่เข้าของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และค่าคู่เข้าของระดับโหลด ซึ่งเห็นได้ว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกบัสในระบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ (ในที่นี้คือ 1.00 p.u.) สำหรับเส้นขอบเขตบน/ล่างนั้น

เป็นผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าเมื่อขนาดของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่เกิดการเบี่ยงเบนมากที่สุดจากค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถเห็นได้ว่า แม้จะมีการพิจารณาผลกระทบจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนและระดับโหลด ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบยังคงถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด ทั้งนี้ในวิธีการที่นำเสนอ นั้น ผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิต จะไม่ได้ถูกกำหนดค่า แต่จะถูกคำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ โดยตารางที่ 7.34 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกัน ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิต



รูปที่ 7.28 ระดับแรงดันในแต่ละบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เมื่อใช้วิธีที่นำเสนอ ณ เวลา 18.00 น.

ตารางที่ 7.34 ผลจากการใช้วิธีที่นำเสนอในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ. เวลา 18.00 น.

ชนิด	ผลจากวิธีที่นำเสนอ
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0059
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0160 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10	605 kW, 0.8867 inductive
DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18	455 kW, 0.8475 inductive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	1
ขนาดของคาปาซิเตอร์	0 MVar

จากตารางที่ 7.33 และตารางที่ 7.34 พบว่าการติดตั้งคาปาซิเตอร์ได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย) ที่ดีกว่า แต่มีผลต่างที่มากที่สุดของระดับแรงดันในแต่ละบัสที่เชื่อมต่อกันมีค่ามากกว่ากรณีติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิตเล็กน้อย โดยตารางที่ 7.35 แสดงถึงการเปรียบเทียบคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต และจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 7.35 การเปรียบเทียบคำตอบจากการติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต และจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.

ชนิด	ติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัส	ติดตั้งคาปาซิเตอร์
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0061	0.0059
ผลต่างระดับแรงดันที่มากที่สุดของบัสที่เชื่อมต่อกัน	0.0158 p.u.	0.0160 p.u.
DG ประเภทควบคุมได้	425 kW, 0.9007 capacitive	605 kW, 0.8867 inductive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	400 kW, 0.9119 capacitive	455 kW, 0.8475 inductive
แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 19-20	1	1
ขนาดของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	490 kVAr	0 MVar

ทั้งนี้ผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงซึ่งได้แสดงในหัวข้อที่ 5.4 สามารถสรุปมาเป็นตัวอย่างผลการทดสอบได้ในตารางที่ 7.36 - ตารางที่ 7.37 โดยตารางที่ 7.36 เป็นผลการทดสอบจากระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต ส่วนตารางที่ 7.37 เป็นผลการทดสอบจากระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ โดยตารางทั้งสองแสดงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างที่คำนวณได้จากกระบวนการค้นหา ทั้งนี้ในตารางที่ 7.36 ได้แสดงถึงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าตัวประกอบกำลังของ DG ประเภทควบคุมได้ ค่าแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของตัวชดเชยเชิงโครนัสสถิต สำหรับตารางที่ 7.37 ได้แสดงถึงค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและค่าตัวประกอบกำลังของ DG ประเภทควบคุมได้ ค่าแท็บของตัวคุมค่าแรงดัน และขนาดของคาปาซิเตอร์

ตารางที่ 7.36 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดตัวชดเชย ซิงโครนัสสถิต (kVAR)
0.00 น.	0.0066	350	0.9540 capacitive	210	0.9029 capacitive	1	465
1.00 น.	0.0066	345	0.9527 capacitive	210	0.9029 capacitive	1	470
2.00 น.	0.0064	345	0.9445 capacitive	200	0.9119 capacitive	1	360
3.00 น.	0.0065	330	0.9398 capacitive	180	0.9564 capacitive	1	325
4.00 น.	0.0065	230	0.9097 capacitive	175	0.9191 capacitive	1	285
5.00 น.	0.0064	350	0.8682 capacitive	215	0.8112 capacitive	1	535

ตารางที่ 7.36 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดตัวชดเชย ซิงโครนัสสถิต (kVAr)
6.00 น.	0.0063	385	0.8779 capacitive	265	0.8200 capacitive	1	565
7.00 น.	0.0063	355	0.8919 capacitive	250	0.8346 capacitive	1	560
8.00 น.	0.0060	530	0.8807 capacitive	450	0.8824 capacitive	1	930
9.00 น.	0.0060	565	0.8928 capacitive	495	0.8742 capacitive	1	985
10.00 น.	0.0060	565	0.9110 capacitive	445	0.9186 capacitive	1	1120
11.00 น.	0.0061	575	0.8738 capacitive	455	0.8805 capacitive	1	1225

ตารางที่ 7.36 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดตัวชดเชย ซิงโครนัสสถิต (kVar)
12.00 น.	0.0061	535	0.8928 capacitive	450	0.9023 capacitive	1	915
13.00 น.	0.0063	550	0.8846 capacitive	530	0.8807 capacitive	1.0063	1,085
14.00 น.	0.0065	575	0.8706 capacitive	535	0.8440 capacitive	1.0063	1,285
15.00 น.	0.0062	550	0.8812 capacitive	525	0.8394 capacitive	1.0063	1,335
16.00 น.	0.0059	560	0.8716 capacitive	450	0.8824 capacitive	1	955
17.00 น.	0.0061	450	0.8944 capacitive	405	0.8965 capacitive	1	515

ตารางที่ 7.36 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดตัวชดเชย ซิงโครนัสสถิต (kVAr)
18.00 น.	0.0061	425	0.9007 capacitive	400	0.9119 capacitive	1	490
19.00 น.	0.0059	580	0.8562 capacitive	540	0.9075 capacitive	1	1,085
20.00 น.	0.0058	550	0.8437 capacitive	520	0.9013 capacitive	1	905
21.00 น.	0.0058	515	0.8420 capacitive	480	0.9055 capacitive	1	785
22.00 น.	0.0059	485	0.8465 capacitive	430	0.8818 capacitive	1	645
23.00 น.	0.0061	410	0.8900 capacitive	365	0.8770 capacitive	1	485
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยรวมตลอดวัน = 0.1484							

ตารางที่ 7.37 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดคาปาซิเตอร์ (kVAr)
0.00 น.	0.0059	430	0.8732 capacitive	395	0.8922 capacitive	1	0
1.00 น.	0.0059	430	0.8775 capacitive	400	0.8899 capacitive	1	0
2.00 น.	0.0060	395	0.8876 capacitive	390	0.8944 capacitive	1	0
3.00 น.	0.0060	350	0.8629 capacitive	300	0.8944 capacitive	1	0
4.00 น.	0.0062	335	0.9275 capacitive	265	0.9522 capacitive	1	0
5.00 น.	0.0060	550	0.8879 capacitive	430	0.8335 capacitive	1	0

ตารางที่ 7.37 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์ (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดคาปาซิเตอร์ (kVAr)
6.00 น.	0.0059	605	0.8867 capacitive	455	0.8475 capacitive	1	0
7.00 น.	0.0058	585	0.8805 capacitive	445	0.8807 capacitive	1	0
8.00 น.	0.0066	395	0.8498 capacitive	320	0.8420 capacitive	1	1,200
9.00 น.	0.0065	475	0.8575 capacitive	380	0.8605 capacitive	1	1,200
10.00 น.	0.0062	515	0.8457 capacitive	420	0.8548 capacitive	1	1,200
11.00 น.	0.0063	565	0.8602 capacitive	460	0.8275 capacitive	1	1,200

ตารางที่ 7.37 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์ (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดคาปาซิเตอร์ (kVAr)
12.00 น.	0.0067	395	0.8594 capacitive	320	0.8774 capacitive	1	1,200
13.00 น.	0.0062	565	0.8668 capacitive	460	0.8583 capacitive	1	1,200
14.00 น.	0.0074	615	0.8507 capacitive	460	0.8251 capacitive	1.0063	1,200
15.00 น.	0.0069	595	0.8556 capacitive	450	0.8021 capacitive	1.0063	1,200
16.00 น.	0.0065	425	0.8708 capacitive	385	0.8634 capacitive	1	1,200
17.00 น.	0.0059	615	0.8476 capacitive	520	0.8407 capacitive	1	0

ขตารางที่ 7.37 สรุปตัวอย่างผลการทดสอบจากวิธีที่นำเสนอตลอด 24 ชั่วโมงในระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์ (ต่อ)

เวลา	ค่าความแตกต่าง แรงดันเฉลี่ย	DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 10		DG ประเภทควบคุมได้ ณ บัส 18		แท็บ/ขนาด ตัวควบคุมแรงดัน	
		กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	กำลังไฟฟ้า แอกทีฟ (kW)	ค่าตัวประกอบ กำลัง	แท็บตัวคุมค่าแรงดัน ณ บัส 7-8	ขนาดคาปาซิเตอร์ (kVAr)
18.00 น.	0.0057	570	0.8488 capacitive	480	0.8480 capacitive	1	0
19.00 น.	0.0081	800	0.8000 capacitive	800	0.8000 capacitive	1.0063	0
20.00 น.	0.0080	690	0.8265 capacitive	785	0.8337 capacitive	1.0063	0
21.00 น.	0.0079	590	0.8342 capacitive	420	0.8604 capacitive	1.0063	0
22.00 น.	0.0076	630	0.8442 capacitive	585	0.8353 capacitive	1.0063	0
23.00 น.	0.0074	510	0.8619 capacitive	455	0.8764 capacitive	1.0063	0
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยรวมตลอดวัน = 0.1576							

กรณี 7) ผลจากวิธีที่นำเสนอเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง

ในกรณีนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และสมรรถภาพของการค้นหาแบบทาบกับการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง ทั้งนี้การเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากการค้นหาแบบทาบ และการค้นหาแบบบออ่อนจำลอง กำหนดให้มีเงื่อนไขตามกรณีที่ 5) โดยผลลัพธ์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.38 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการค้นหาแบบทาบได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าตลอดจนพบจำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นมากกว่าด้วย

ตารางที่ 7.38 การเปรียบเทียบคำตอบจากการค้นหาแบบทาบ และการค้นหาแบบบออ่อนจำลองในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.

ชนิด	การค้นหาแบบทาบ	การค้นหาแบบบออ่อนจำลอง
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.0061	0.0083
จำนวนคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นที่พบ	5	1

อย่างไรก็ตามตารางที่ 7.28 และตารางที่ 7.38 แสดงการเปรียบเทียบเฉพาะผลลัพธ์ในกรณีเฉพาะเวลา 14.00 น. และ 18.00 น. เท่านั้น โดยหากเปรียบเทียบผลลัพธ์ตลอดทั้งวันซึ่งเป็นคำตอบแบบวงกว้างสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.39 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการค้นหาแบบทาบได้ผลลัพธ์ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีกว่าค่อนข้างมาก

ตารางที่ 7.39 การเปรียบเทียบคำตอบแบบวงกว้างจากการค้นหาแบบทาบ และการค้นหาแบบบออ่อนจำลองในระบบไฟฟ้าดัดแปลง กฟภ.

ชนิด	การค้นหาแบบทาบ	การค้นหาแบบบออ่อนจำลอง
ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย	0.1484	0.2309

7.5 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่าปัญหาแรงดันเกินขอบเขตจำกัดที่อาจเกิดเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด สามารถถูกควบคุมให้อยู่ภายในขอบเขตจำกัดได้ และผลลัพธ์ที่ได้ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (ค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ย) แสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันของแต่ละบัสมีค่าใกล้เคียงกับระดับแรงดันที่ต้องการมาก ซึ่งหมายความว่าผลลัพธ์ขนาดของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวควบคุมค่าแรงดัน และ คาปาซิเตอร์/ตัวควบคุมซิงโครนัสสถิต สามารถควบคุมให้การแกว่งของแรงดันในระบบมีค่าน้อยมาก

นอกจากนี้ผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งตัวชุดเซียงโครนัสสถิต และคาปาซิเตอร์ได้นำแสดงในที่นี้ด้วย ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า การติดตั้งตัวชุดเซียงโครนัสสถิตสามารถควบคุมแรงดันให้มีค่าใกล้เคียงกับระดับแรงดันที่ต้องการได้มากกว่ากรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากตัวชุดเซียงโครนัสสถิตไม่มีพิกัดจำนวนครั้งการทำงาน และมีขนาดในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่หลากหลายกว่าคาปาซิเตอร์ อย่างไรก็ตามแม้ว่าตัวชุดเซียงโครนัสสถิตสามารถควบคุมแรงดันได้ดีกว่า แต่หากการทำงานของคาปาซิเตอร์และตัวคุมค่าแรงได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสม ก็สามารถใช้เพียงคาปาซิเตอร์และตัวคุมค่าแรงต้นในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าก็ได้ เนื่องจากตัวชุดเซียงโครนัสสถิตมีราคาค่อนข้างสูง อีกทั้งคาปาซิเตอร์และตัวคุมค่าแรงต้นยังเป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้าด้วย

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการค้นหาคำตอบของวิธีที่ได้นำเสนอ การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการค้นหาที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบ และการค้นหาแบบอบอ่อนจำลองได้นำเสนอมาในที่นี้ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการทั้งสองมีอัลกอริทึมคล้ายคลึงกันค่อนข้างมาก ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้พบว่าวิธีการค้นหาแบบทาบสามารถมาผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าระดับแรงดันที่ต้องการมากกว่า (ผลลัพธ์จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยกว่า) และยังสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบได้มากกว่าการค้นหาแบบอบอ่อนจำลองอีกด้วย

บทที่ 8

สรุป

8.1 สรุปผลการวิจัย

ปัญหาความไม่แน่นอนของระดับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลดที่ไม่คงที่ ตลอดจนการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมแรงดันในระบบพร้อมกับ DG อาจทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าละเมิดขอบเขตจำกัดได้ รวมทั้งสามารถส่งผลให้เกิดความผันผวนต่อระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดของคาปาซิเตอร์ ขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต และการเลือกเวลาในการสวิตช์ใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายให้มีระดับแรงดันเข้าใกล้กับระดับแรงดันที่กำหนด โดยใช้กระบวนการค้นหาแบบทาบูนิตปรับตัวได้ วิธีการค้นหามีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความแตกต่างแรงดันเฉลี่ยที่น้อยที่สุด และเพื่อครอบคลุมการคำนวณปัญหาจากความไม่แน่นอนจาก DG ประเภทพลังงานหมุนเวียน และระดับโหลด โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โล วิธีการแก้ปัญหาที่นำเสนอได้ทดสอบกับระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 34 บัส และระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขนาดที่เหมาะสมของ DG ประเภทควบคุมได้ แท็บของตัวคุมค่าแรงดัน ขนาดของคาปาซิเตอร์ และขนาดของตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต สามารถควบคุมแรงดันให้เข้าใกล้ค่าแรงดันที่ต้องการ (1.00 p.u.) ตามสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตลอดจนไม่ละเมิดเงื่อนไขขีดจำกัดที่ใช้ในกระบวนการหาเหมาะสมที่สุด โดยเฉพาะขีดจำกัดของจำนวนการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ตัวชดเชยซิงโครนัสสถิต มีความสามารถในการใช้ควบคุมแรงดันมากกว่าคาปาซิเตอร์ เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดในการสวิตช์ใช้งาน และสามารถเลือกขนาดการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้หลากหลายกว่า

2) วิธีการค้นหาที่นำเสนอ สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ อย่างไรก็ตามก็ตามผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปสอบทานกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างที่ได้จากการพิจารณาทุกกรณี ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่ใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่ามาก

3) DG ประเภทควบคุมได้ในงานวิจัยไม่สามารถคำนวณเป็น PV บัสได้ เนื่องจากทำให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดค่าตัวประกอบกำลัง

4) การคำนวณโดยวิธีมอนติคาร์โลเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ใช้เวลาการคำนวณนาน ซึ่งอาจไม่จำเป็นในงานวิจัยนี้ เนื่องจากระดับโหลด และ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนถูกกำหนดให้มีการกระจายตัวของข้อมูลแบบแจกแจงปกติ

8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1) ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาในระดับโหลด โดยการกำหนดขึ้นมาให้มีค่าใกล้เคียงกับระดับโหลดจริง ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำของการคำนวณและให้มีความใกล้เคียงเชิงปฏิบัติมากขึ้น ควรใช้ข้อมูลโหลดจริง ตลอดจนขนาดกำลังการผลิตของ DG ประเภทพลังงานหมุนเวียนควรใช้ข้อมูลกำลังการผลิตจริงเช่นกัน

2) วิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้วิธีการค้นหาเพียงหนึ่งวิธีเท่านั้นคือการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้ อย่างไรก็ตาม ได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการค้นหาแบบบอซอนจำลอง (ซึ่งวิธีการค้นหาแบบบอซอนจำลอง ได้ดัดแปลงมาจากส่วนหนึ่งของการค้นหาแบบทฤษฎีการปรับตัวได้) จึงควรเพิ่มการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการค้นหาแบบอื่นๆด้วย

3) วิธีการค้นหาที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดเชิงผสมผสานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงควรรวมการคำนวณผลจากปัญหาแรงดันกระเพื่อม หรือแรงดันตกชั่วขณะเข้าไปในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4) DG ประเภทควบคุมได้ถูกกำหนดให้เป็นพาวเวอร์แฟคเตอร์คอนโทรลโหมด (ค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟ และรีแอกทีฟคงที่) ซึ่งหากใช้เพื่อจุดประสงค์การควบคุมแรงดันแล้ว ควรสามารถกำหนดให้เป็นโวลเตจคอนโทรลโหมดได้ (พิจารณาแบบจำลองของ DG เป็น PV บัส)

5) เนื่องจากวิธีการแก้ปัญหาแรงดันตก หรือระดับแรงดันผันผวนในระบบมีหลายวิธี ซึ่งสามารถนำวิธีเหล่านี้มาผสมผสานกัน เพื่อให้เกิดความหลากหลายของคำตอบ โดยควรเพิ่มวิธีการประยุกต์ เช่น การติดตั้งตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิตร่วมกับการติดตั้งคาปาซิเตอร์ หรือ การติดตั้งตัวชดเชยกำลังรีแอกทีฟแบบสถิตร่วมกับการติดตั้งตัวชดเชยซึ่งโครนัสสถิตเป็นต้น

6) หากกำหนดความไม่แน่นอนของข้อมูลเป็นแบบการกระจายตัวแบบปกติ การคำนวณแบบมอนติคาร์โลอาจไม่จำเป็นในการคำนวณปัญหาจากความไม่แน่นอน ทั้งนี้อาจใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบจำกัดขอบเขตแทนได้ (boundary load flow) เนื่องจากใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า

รายการอ้างอิง

- [1] พลังงาน, กระทรวง. Energy Statistics 2011 [ออนไลน์].2554.แหล่งที่มา:
http://www.eppo.go.th/info/1summary_stat.htm [2554, กรกฎาคม].
- [2] IET Power and Energy Series 31 Embedded Generation, pp. 1-4.
- [3] Electrical Power Systems Quality Second Edition, pp. 373-375.
- [4] Kojovic, L.A. Impact of DG on Voltage Regulation. Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Conference, 2002, pp. 97-102.
- [5] Barker, P. Over-voltage Considerations in Applying Distributed Resources on Power Systems. Proc. IEEE PES Summer Meeting Conference, 2002, pp. 109-114.
- [6] Dai, C., Baghzouz, Y. On the Voltage Profile of Distribution Feeders with Distributed Generation. Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting Conference, 2003, pp.1136-1140.
- [7] Grainger, J.J., Stevenson, W.D. Power System Analysis, International ed. McGraw-Hill. Publishing Co., 1994, p. 218.
- [8] Saadat, H. Power System Analysis 2nd ed. McGraw-Hill. Publishing Co., 2004, pp. 83-168.
- [9] Mathur, R.M., Varma, R.K. Thyrister-base FACTS controllers for electrical transmission systems, Wiley-IEEE, 2002.
- [10] Chaitusaney, S., Yokoyama, A. Contribution of Distributed Generation to Voltage Regulation under Stochastic Attribute of Renewable Energy Resources. IEEE Power System Technology International Conference, 2006.
- [11] Senjyu, T., Miyazato, Y., Yona, A., Urasaki, N., Funabashi, T. Optimal Distribution Voltage Control and Coordination With Distributed Generation. Power Delivery IEEE Transactions, Vol.23, April 2008, pp. 1236-1242.
- [12] Senjyu, T., Miyazato, Y., Yona, A., Urasaki, N., Funabashi, T. Optimal Control of Distribution Voltage with Coordination of Distribution Installations. Proc. IEEE PES General Meeting Conference, 2007, p. 1.

- [13] Senjyu, T., Miyazato, Y., Touma, S., Yona, A., Funabashi, T., Kim, C. Optimal Control of Distribution Voltage Profile by Considering the Number of Operation of the Distribution Installations. Proc. IEEE PES General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century Conference, 2008, p. 1.
- [14] Teng, J., Chen, C., Chen, C., Liu, Y. Optimal Capacitor Control for Unbalanced Distribution Systems with Distributed Generations. Proc. IEEE Sustainable Energy Technologies Conference, 2008, pp. 755-760.
- [15] Mori, H., Tani, H. Two-Stage Tabu Search for Determining Optimal Allocation of D-FACTS in Radial Distribution Systems with Distributed Generation. Proc. IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002, pp. 56-61.
- [16] Jrgensen, P., Tande, J.O. Probabilistic Load Flow Calculation using Monte Carlo Techniques for Distribution Network with Wind Turbines. Proc. Harmonics And Quality of Power Conference, 1998, pp. 1146-1151.
- [17] Short, T. Electric Power Distribution Handbook, Boca Raton: CRC Press LLC, 2004, pp. 693-705.
- [18] Chaitusaney, S. Impact and Contribution of Distributed Generation to System Reliability and System Voltages in Distribution Systems. A dissertation of the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 2007.
- [19] IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE Std 1547-2003, pp.1-128, 2003.
- [20] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551. [ออนไลน์].แหล่งที่มา : http://thaienergypowerplants.com/dn/connection_code.pdf. [2554, กุมภาพันธ์ 5].

- [21] การไฟฟ้านครหลวง. ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบ
โครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551. [ออนไลน์].แหล่งที่มา :
<http://www.mea.or.th/internet/Elecvalue/VSPV/Vconnect.pdf>. [2554,
 พฤศจิกายน 16].
- [22] ANSI C84.1-2006, American National Standard for Electric Power Systems and
 Equipment – Voltage Rating (60 Hertz).
- [23] บัณฑิต เอื้ออาภรณ์. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่ง
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [24] IEEE Standard for Shunt Power Capacitor. IEEE Std 18-2002, pp.1-24, 2002.
- [25] ชาญณรงค์ บาลมงคล. การควบคุมแรงดัน/กำลังรีแอกทีฟ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า,
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2011.
- [26] Singh, B., Saha, R., Chandra, A., Al-Haddad, K. Static synchronous
 compensators (STATCOM): a review. IET Power Electronics, 22nd, April
 2008.
- [27] กรกฎ วงษ์นิยม และ นนบบุญ หุนเจริญ. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้อุปกรณ์
 ชดเชยขิงโครนัสสถิตเพื่อเพิ่มสมรรถนะเสถียรภาพแรงดันเชิงพลวัต. การประชุม
วิชาการวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33, 2010.
- [28] Borkowska, B. Probabilistic load flow. IEEE Trans. Apparatus and Systems, Vol.
 PAS-93, 1974, pp. 752-759.
- [29] Klitin, A. Stochastic load flows. IEEE Trans. Apparatus and Systems, Vol. PAS-
 94, 1975, pp. 299-309.
- [30] Vorsic, J., Muzek, V., Skerbinek, G. Stochastic load flow analysis. Proc. IEEE 6th
Mediterranean Electrotechnical Conference, 1991, pp. 1445-1448.
- [31] Doucet, A., Freitas, N., Gordon, N. Sequential Monte Carlo methods in practice,
 Springer, 2001.
- [32] Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A. Renewable Energy Technology
Economics and Environment, Springer, 2007, pp. 41-49.
- [33] อาทิตย์ ศรีแก้ว. ปัญญาเชิงคำนวณ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักวิชา
 วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2009.

- [34] Soliman, A., Mantawy, A. Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power System, Springer, 2012, pp. 208-230.
- [35] ศรัณยู ตริยะโชติ. การแบ่งแยกบัสที่เหมาะสมเพื่อลดกระแสลัดวงจรในระบบส่งไฟฟ้ากำลังโดยใช้วิธีค้นหาอนุชนิตปรับตัวได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2010.
- [36] Glover, F. Tabu search – Part I. ORSA Journal on Computing, Vol. 1, no. 3, 1989, pp. 190–206.
- [37] Glover, F. Tabu Search – Part II. ORSA Journal on Computing, Vol. 2, no. 1, 1990, pp. 4–32.
- [38] Glover, F., Laguna, M. Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [39] Puansdownreong, D., Areerak, K.N., Srikaew, A., Sujitjorn, S., Totarong, P. System Identification via Adaptive Tabu Search. Proc. IEEE International Conference Industrial Technology, Vol. 2, 2002, pp. 915-920.
- [40] Mori, H., Ogita, Y. A Parallel Tabu Search Based Method for Reconfigurations of Distribution Systems. Proc. IEEE PES Summer Meeting Conference, 2000, pp.73-78.
- [41] Nara, K., Hayashi, Y., Ikeda, K., Ashizawa, T. Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators. Proc. Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, 2001, pp. 918-923.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

ข้อมูลการทดสอบ

เนื้อหาในภาคผนวกกล่าวถึงข้อมูลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วยข้อมูลระบบทดสอบ IEEE 34 bus และข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากระบบจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ก. ข้อมูลระบบทดสอบมาตรฐาน 34 บัส

ระบบทดสอบ IEEE 34 bus ที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้รับการดัดแปลงระดับโหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา ในหัวข้อนี้ได้เสนอข้อมูลบัส ข้อมูลวงจรสายส่งและหม้อแปลง โดยแสดงในรูปแบบตาราง ระบบทดสอบกำหนดให้มีค่าฐานกำลังไฟฟ้าเป็น 2.5 MVA มีหม้อแปลงไฟฟ้า 2 ตัว คือ หม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขนาด 2.5 kVA และหม้อแปลงไฟฟ้าที่สายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างบัส 20 – บัส 21 ขนาด 500 VA ระดับแรงดันของระบบคือ 24.9 kV ยกเว้นบัส 21-บัส 22 ที่มีระดับแรงดัน 4.16 kV และระบบมีโหนดขนาด 1,179.3 kW 696.06 kVAr

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 34 bus

Bus	Type	P_d (kW)	Q_d (kVAr)	B_s (kW)	G_s (MVA)	basekV	Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	3	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
2	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
3	1	36.66	19.34	0	0	24.9	1.05	0.95
4	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
5	1	10.66	5.34	0	0	24.9	1.05	0.95
6	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
7	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
8	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
9	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
10	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
11	1	22.66	11.34	0	0	24.9	1.05	0.95
12	1	90	46.66	0	0	24.9	1.05	0.95
13	1	3.34	1.34	0	0	24.9	1.05	0.95
14	1	26.66	13.34	0	0	24.9	1.05	0.95
15	1	2.66	1.34	0	0	24.9	1.05	0.95

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลบั๊สของระบบทดสอบ IEEE 34 bus (ต่อ)

Bus	Type	P_d (kW)	Q_d (kVAr)	B_s (kW)	G_s (MVA)	basekV	Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
16	1	34.66	15.34	0	0	24.9	1.05	0.95
17	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
18	1	2.66	1.34	0	0	24.9	1.05	0.95
19	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
20	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
21	1	0	0	0	0	4.16	1.05	0.95
22	1	300	150	0	0	4.16	1.05	0.95
23	1	10	4.66	0	0	24.9	1.05	0.95
24	1	1.34	0.66	0	0	24.9	1.05	0.95
25	1	21.34	11.34	0	0	24.9	1.05	0.95
26	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
27	1	276	213.34	0	0	24.9	1.05	0.95
28	1	30	15.34	0	0	24.9	1.05	0.95
29	1	55.34	39.34	0	0	24.9	1.05	0.95
30	1	137.34	80.66	0	0	24.9	1.05	0.95
31	1	54.66	28.66	0	0	24.9	1.05	0.95
32	1	44.66	27.34	0	0	24.9	1.05	0.95
33	1	0	0	0	0	24.9	1.05	0.95
34	1	18.66	9.34	0	0	24.9	1.05	0.95

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบ IEEE 34 bus

Fbus	Tbus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Ratio	Angle	Rated (MVA)
1	2	0.0026	0.00270	0	0	0	1.4
2	3	0.0018	0.0018	0	0	0	1.4
3	4	0.0327	0.0331	0	0	0	1.4
4	5	0.0124	0.0066	0	0	0	1.4
4	6	0.0381	0.0385	0	0	0	1.4
6	7	0.0302	0.0306	0	0	0	1.4
7	8	0	0.0457	0	1	0	1.4

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบทดสอบ IEEE 34 bus (ต่อ)

Fbus	Tbus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Ratio	Angle	Rated (MVA)
8	9	0.0005	0.0003	0	0	0	1.4
9	10	0.0037	0.0019	0	0	0	1.4
10	11	0.1029	0.0546	0	0	0	1.4
11	12	0.0294	0.0156	0	0	0	1.4
9	13	0.015	0.0111	0	0	0	1.4
13	14	0.0065	0.0034	0	0	0	1.4
13	15	0.0012	0.0009	0	0	0	1.4
15	16	0.0300	0.0222	0	0	0	1.4
16	17	0.0008	0.0006	0	0	0	1.4
17	18	0.0499	0.0265	0	0	0	1
17	19	0.0541	0.0399	0	0	0	1
19	20	0	0.0457	0	1	0	1
20	21	0.0950	0.2040	0	0	0	1
21	22	0.0107	0.0109	0	0	0	1
20	23	0.0072	0.0053	0	0	0	1
23	24	0.0035	0.0018	0	0	0	1
23	25	0.0086	0.0063	0	0	0	1
25	26	0.0004	0.0003	0	0	0	1
26	27	0.0020	0.0015	0	0	0	1
27	28	0.0053	0.0039	0	0	0	1
28	29	0.0008	0.0006	0	0	0	1
25	30	0.0030	0.0022	0	0	0	1
30	31	0.0039	0.0029	0	0	0	1
31	32	0.0013	0.0009	0	0	0	1
31	33	0.0004	0.0003	0	0	0	1
33	34	0.0071	0.0053	0	0	0	1

ข. ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระบบไฟฟ้ากำลังของ กฟภ. ที่นำมาใช้ทดสอบเป็นระบบพหุมาตรการ สายป้อนที่ 2 ซึ่งได้ถูกลดรูปเพื่อวิเคราะห์ระดับแรงดันระบบไฟฟ้า ในหัวข้อนี้ได้เสนอข้อมูลบัส ข้อมูลวงจรสายส่งและหม้อแปลง โดยแสดงในรูปแบบตาราง กำหนดให้มีค่าฐานกำลังไฟฟ้าเป็น 10 MVA มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขนาด 25 MVA ระดับแรงดันของระบบคือ 22 kV และระบบมีโหลดขนาด 3,519 kW 2,180.88 kVAr

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้าดัดแปลงการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Bus	Type	P_d (kW)	Q_d (kVAr)	B_s (kW)	G_s (kVAr)	basekV	Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
1	3	0	0	0	0	22	1.05	0.95
2	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
3	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
4	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
5	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
6	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
7	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
8	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
9	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
10	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
11	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
12	1	0	0	0	0	22	1.05	0.95
13	1	132.75	82.2711	0	0	22	1.05	0.95
14	1	420.00	260.2926	0	0	22	1.05	0.95
15	1	656.25	406.7072	0	0	22	1.05	0.95
16	1	930.00	576.3622	0	0	22	1.05	0.95
17	1	420.00	260.2926	0	0	22	1.05	0.95
18	1	180	111.5540	0	0	22	1.05	0.95
19	1	210.00	130.1463	0	0	22	1.05	0.95
20	1	90	55.7770	0	0	22	1.05	0.95
21	1	480	297.4773	0	0	22	1.05	0.95

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลสายส่งและหม้อแปลงของระบบไฟฟ้าดัดแปลงการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Fbus	Tbus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Ratio	Angle	Rated (MVA)
1	2	0.0737	0.1397	0	0	0	250
2	3	0.0529	0.1003	0	0	0	250
3	4	0.0086	0.0163	0	0	0	150
4	5	0.0257	0.0487	0	0	0	300
5	6	0.0271	0.0514	0	0	0	175
6	7	0.0030	0.0057	0	0	0	175
7	8	0.0206	0.0391	0	1	0	175
8	9	0.0128	0.0242	0	0	0	175
9	10	0.0015	0.0028	0	0	0	175
10	11	0.0140	0.0266	0	0	0	175
11	12	0.0156	0.0296	0	0	0	175
2	13	0.0122	0.0095	0	0	0	175
3	14	0.0345	0.0267	0	0	0	175
4	15	0.0196	0.0152	0	0	0	175
5	16	0.0228	0.0177	0	0	0	175
6	17	0.0083	0.0064	0	0	0	175
7	18	0.0117	0.0091	0	0	0	175
10	19	0.0056	0.0043	0	0	0	175
11	20	0.0081	0.0154	0	0	0	175
12	21	0.0438	0.0339	0	0	0	175

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายโอฬาริก อัครนภ เกิดวันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2551 จากนั้นได้ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552

ในระหว่างการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต นายโอฬาริก อัครนภ ได้รับทุน สนับสนุนจากโครงการ AOTULE (Asia Oceania Top University League on Engineering) เพื่อ ทำงานวิจัย ณ Tokyo Institute of Technology ประเทศญี่ปุ่น นอกจากนี้ ยังได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วย วิจัยห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง (Power System Laboratory Research: PSRL) ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในงานวิจัย/โครงการที่ปรึกษาต่างๆ ได้แก่ (1) โครงการ มาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้า (2) แผนการพัฒนาระบบสมรรถนะการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาค (3) การกำหนดดัชนีวัดผลการดำเนินงานหลักของระบบสมรรถนะการไฟฟ้า และ (4) การ ประชุมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) ในเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าแก่วิศวกรชูดาน