

การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์  
ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

**OPTIMAL PLACEMENT OF LARGE-SCALE PV POWER  
GENERATION SYSTEMS IN PRIMARY DISTRIBUTION  
SYSTEMS FOR LOSS REDUCTION**

อมรเทพ แพทยานันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์  
ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

อมรเทพ แพทยานันท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย
ชื่อ – นามสกุล	นายอมรเทพ แพทยานันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

## บทคัดย่อ

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กำหนดให้มีขนาด 1 MW ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้าของระบบ ซึ่งเป็นประเด็นที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

การจำลองจะประยุกต์ใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE ทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA มีกำลังไฟฟารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบด้วยวิธีแบบที่ละบัสและวิธีการค้นหาแบบตาบ เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งเหมาะสมที่สุดในระบบ สดท้ายทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบชดเชยด้วยแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่

ผลการทดสอบพบว่าก่อนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียเท่ากับ 77.0135 kW หลังติดตั้งในบัสเหมาะสมคือบัสที่ 25 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียเท่ากับ 48.6791 kW โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบลดลงร้อยละ 36.79 ทำให้ระบบมีเสถียรภาพของแรงดันเพิ่มมากขึ้น สดท้ายผลทดสอบการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ร่วมกับระบบชดเชยด้วยแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 200 kW เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ในบัสที่ 25 ช่วงเวลา 1 วัน พบว่าระบบชดเชยของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ซึ่งช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น เทคโนโลยีของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์นั้นยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคต

**คำสำคัญ:** โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

<b>Thesis Title</b>	Optimal Placement of Large-Scale PV Power Generation Systems in Primary Distribution Systems for Loss Reduction
<b>Name - Surname</b>	Mr. Amornthep Pattayanun
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2012

## **ABSTRACT**

The distribution system is connected to main feeder using radial connection which is caused the power loss in the power system. Therefore, this thesis proposes the optimal placement of large-scale photovoltaic (PV) power generation systems in primary distribution systems for reducing the power loss and improving the voltage profile of the system.

The proposed study on this thesis is applied on the model of IEEE 33-bus radial distribution system by using at the based voltage and based apparent power that are 22 kV and 25 MVA respectively. The total real power and reactive power of system load are 3.72 MW and 2.3 MVar. This analysis is computed by MATLAB program. The trial methods of PV power plant in each bus and Tabu Search are used to find the optimal placement of the PV power plant. Then, the PV power plant with the sodium-sulfur battery is installed at the best location under low power loss condition. These are operated under the voltage stability and static loading conditions.

The simulation results found that the power loss of the IEEE 33-bus radial distribution system without PV power plant is 77.0135 kW. After installed the PV power plant into bus no. 25, the power loss is 48.6791 kW and the power loss can be reduced to 36.79 %. The last simulation result shown the 1 MW PV power plant combined with the 200 kW sodium-sulfur battery to distribution system at bus no. 25. This proposed method is to improve the power generation and to reduce power loss on power system in order to increase the power system stability and reliability. The technology of power compensating systems with sodium sulfur battery is still being developed continuously for power system applications in the future.

**Keywords:** photovoltaic power plant, optimization technique, power loss



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ได้อนุเคราะห์ให้คำปรึกษา คำแนะนำและข้อชี้แนะแนวทางต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดีในทุกๆ ด้านตลอดเวลาของการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และ ดร. ณัฐพงศ์ พันธนะ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนชี้แนะทางในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร. จักรกฤษณ์ เคลือบวัง ที่กรุณาอนุเคราะห์สละเวลาให้คำปรึกษา และข้อมูลที่สำคัญ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุกท่านที่ได้อนุเคราะห์เวลาและสถานที่ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ผู้วิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อีกทั้งศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบุพการีรวมถึงครอบครัว ตลอดจนรุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อน ๆ และบุคคลรอบตัวผู้วิจัยทุกๆ ท่าน สำหรับความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ความดีต่างๆ ขอยกให้บุคคลที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ส่วนข้อผิดพลาดใดๆ ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดไว้แต่เพียงผู้เดียว ซึ่งผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจนำไปศึกษาและทำการประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต

อมรเทพ แพทยานันท์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 ข้อยกเว้นของวิทยานิพนธ์.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.8 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง (Introduction to Electrical Power System).....	14
2.4 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่.....	23
2.5 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Analysis of Power Flow).....	66
2.6 ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow Problem).....	72
2.7 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตามู.....	76
2.8 ระบบขดเคียวกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-Sulfur Battery: NaS).....	90

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.9 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	107
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	108
3.1 บทนำ.....	108
3.2 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย .....	111
3.3 สรุปผลวิธีดำเนินการวิจัย.....	120
4 ผลการวิจัย.....	121
4.1 บทนำ.....	121
4.2 ขั้นตอนแสดงผลการวิจัย .....	121
4.3 สรุปผลการแสดงผลการวิจัย.....	156
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	158
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	158
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	160
รายการอ้างอิง.....	161
ภาคผนวก.....	164
ภาคผนวก ก ข้อมูลระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE .....	165
ภาคผนวก ข ข้อมูลการจำลองต่างๆ ที่ทำการทดสอบด้วย โปรแกรม MATLAB M-File .....	168
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	211
ประวัติผู้เขียน.....	235

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	พื้นที่ของแผงเซลล์โดยประมาณเพื่อผลิตไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์สูงสุดตามชนิดของเซลล์..... 34
2.2	ระดับการป้องกันของอุปกรณ์ไฟฟ้า..... 36
2.3	ข้อมูลที่ใช้ในการตั้งค่าความถี่ที่แตกต่างกันของประเทศในทวีปยุโรป..... 65
2.4	รอบการคำนวณที่ 1: สร้างเซตข้างเคียงโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร 0.01 ในแต่ละมิติจะได้ทั้งสิ้น 8 ตัว..... 88
2.5	รอบการคำนวณที่ 2: สร้างเซตข้างเคียงโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร 0.01 ในแต่ละมิติ จะได้ทั้งสิ้น 8 ตัว..... 89
2.6	โครงการที่มีการติดตั้งแบตเตอรี่ NaS ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของบริษัท NGK Insulators (ข้อมูลในเดือนธันวาคม 2009)..... 95
2.7	ข้อมูลของระบบแบตเตอรี่ NaS ขนาด 2,000 kW ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของบริษัท NGK Insulators ..... 104
3.1	การวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW .... 118
3.2	การวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลไฟด์ (NaS) 200 kW ..... 118
4.1	ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส..... 125
4.2	ผลการจำลองค่าต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส หลังติดตั้ง DG ..... 129
4.3	ผลการจำลองการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DG โดยใช้การค้นหาแบบทีละบัส (Trial DG) และการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดแบบตามู (TS)..... 130
4.4	ผลการทดสอบ โดย Trial DG จำนวน 32 ครั้ง ทำการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง ..... 132
4.5	ผลการทดสอบโดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ ทำการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง .. 133
4.6	ผลการทดสอบ สมรรถนะในการค้นหาต่ำสุด ..... 134
4.7	รายงานผลทดสอบ จำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ * TS Max Iter = 50 รอบ ..... 134
4.8	งานผลทดสอบ ความเร็วในการค้นหา (วินาที) ..... 134
4.9	รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_all33bus โดย Trial DG จำนวน 32 ครั้ง..... 136

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	138
4.11 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_1 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	139
4.12 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_2 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	140
4.13 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_3 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	141
4.14 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_4 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	142
4.15 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_5 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	143
4.16 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_6 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	144
4.17 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_7 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	145
4.18 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim_8 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	146
4.19 รายงานผลทดสอบค่าเฉลี่ยของ ไฟล์ tsmaim – tsmain_8 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง .....	147
4.20 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG และ Nas ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน .....	152

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง ..... 15
2.2	ระบบไฟฟ้าย่อยและการควบคุม ..... 18
2.3	ระบบการจำหน่ายแรงดันปานกลางแบบ Radial Line ..... 22
2.4	ระบบการจำหน่ายแรงดันปานกลางแบบมี Tie Line ระหว่างสายป้อน ..... 22
2.5	การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ..... 25
2.6	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar Cells) ..... 25
2.7	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ..... 26
2.8	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์และ โครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ..... 27
2.9	การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 29
2.10	ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 31
2.11	การต่อเซลล์แบบต่างๆ ..... 32
2.12	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศ ..... 32
2.13	การสูญเสียและข้อพิจารณาในการจัดเรียงแผงเซลล์ ..... 34
2.14	ไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบแรงดันต่ำ ..... 35
2.15	ไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบแรงดันสูง ..... 36
2.16	ไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบ Master – Slave ..... 37
2.17	ไดอะแกรมระบบย่อย และสตรึงอินเวอร์เตอร์ ..... 38
2.18	ไดอะแกรมของโมดูลอินเวอร์เตอร์ ..... 39
2.19	กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ..... 41
2.20	แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีความต้านทานแบบขนาน ..... 43
2.21	สตรึงของเซลล์ที่มีการต่อบายพาสไดโอด และบล็อกกิ้งไดโอด ..... 44
2.22	วงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 3×3 ..... 45
2.23	ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 56
2.24	แบบมาตรฐานของการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสและมี หม้อแปลงหลายตัวขนานกันเชื่อมต่อกับระบบ 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ของ กฟภ ..... 58
2.25	การทำงานของ SVR ในโหมด Forward ..... 60
2.26	การทำงานของ SVR ในโหมด Reversed ..... 61

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27	การทำงานของ SVR ในระบบจำหน่ายแบบมี Tie Time..... 61
2.28	ลำดับขั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีแพร่กระจายถอยหลังและ เดินหน้า ..... 67
2.29	การจัดลำดับสายส่ง..... 68
2.30	กระแสในสายส่งของระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล..... 70
2.31	การคำนวณค่ากระแสในสายส่งในแต่ละช่วง ..... 70
2.32	การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหนดแบบเดินหน้า ..... 71
2.33	ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและแบบวงกว้าง..... 78
2.34	ปฏิบัติการ ‘move’ หรือการเดินเพื่อหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน..... 79
2.35	การค้นหาคำตอบเฉพาะที่..... 79
2.36	การค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง..... 80
2.37	การหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ..... 81
2.38	การสร้างปริภูมิการค้นหา ..... 84
2.39	การสร้างเซตข้างเคียง..... 84
2.40	กลไกการค้นหาค่าเชิงปรับตัว..... 86
2.41	การทำงานของหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการค้นหาตาบ..... 87
2.42	ส่วนประกอบและโครงสร้างของเซลล์แบตเตอรี่ NaS (ซ้าย) เซลล์ NaS ที่ประกอบใน โมดูลแบตเตอรี่ (ขวา) ..... 91
2.43	สถานีย่อยของ American Electric Power (AEP) เก็บและจ่ายพลังงาน โดยแบตเตอรี่ ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์..... 96
2.44	แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 1.2 MW/7.2 MWh โดย NYPA..... 96
2.45	ความถี่ของการคายประจุและความต้านทานของเซลล์ภายในที่อุณหภูมิต่างกัน (การ ทดสอบ)..... 97
2.46	เซลล์-ความต้านทานที่เสื่อมลง และรอบของการเก็บประจุ-การคายประจุ (ข้อมูลจาก ผู้ผลิต)..... 98
2.47	แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) และความถี่ของการ คายประจุ..... 100

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.48 แบบจำลองอย่างง่าย.....	101
2.49 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเทวินิน .....	101
2.50 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบประยุกต์.....	102
2.51 การติดตั้งของระบบแบตเตอรี่ NaS ขนาด 2,000 kW.....	105
2.52 ระบบควบคุมกำลังงานขาออก ของ Wakkanai Mega Solar Project.....	106
2.53 การเลื่อนเวลาของสัญญาณเอาต์พุต (Output) ด้วยแบตเตอรี่ชนิด โซเดียมซัลเฟอ์ (NaS) .....	106
3.1 แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE .....	109
3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย.....	110
3.3 แผนผังการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DG ขนาด 1 MW เชื่อมต่อเข้าสู่แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE.....	111
3.4 แผนผังการใช้ MATLAB M-File หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DG ขนาด 1 MW โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามู.....	113
3.5 ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอ์ (NaS) ขนาด 200 kW ต่อร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย.....	116
4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส..	122
4.2 ขนาดกระแสไฟฟ้าที่สาขาต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส .....	122
4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่นัดของระบบจำหน่าย แบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส .....	123
4.4 ค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส.....	124
4.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติด DG.....	127



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6 ขนาดกระแสไฟฟ้าที่สาขาต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติด DG .....	128
4.7 การลู่เข้าสู่คำตอบโดยใช้การค้นหาแบบตามู ครั้งที่ 1 .....	135
4.8 การลู่เข้าสู่คำตอบโดยใช้การค้นหาแบบตามู ครั้งที่ 2- 30.....	135
4.9 เปรอ์เซ็นต์ที่ลดลงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ tsmain ต่างๆ.....	148
4.10 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW ขณะโหลดคงที่ ในช่วงเวลา 1 วัน.....	149
4.11 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW ในช่วงเวลา 1 วัน.....	150
4.12 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ NaS ขนาด 200 kW ขณะในช่วงเวลา 1 วัน .....	150
4.13 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW ร่วมกับ NaS ขนาด 200 kW ขณะ ในช่วงเวลา 1 วัน.....	151
4.14 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน.....	153
4.15 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง NaS ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน....	154
4.16 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG ร่วมกับ NaS ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน .....	155

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
DG	แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย
TS	การค้นหาแบบตามู
Pb	ตะกั่ว
CO	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
SO <sub>2</sub>	ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
NO <sub>x</sub>	ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน
O <sub>3</sub>	ก๊าซโอโซน
IPP	การจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 90 MW ขึ้นไป
SPP	การจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 10 MW แต่ไม่เกิน 90 MW
VSPP	การจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้ไม่เกิน 10 MW
EGAT	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
PEA	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
MEA	การไฟฟ้านครหลวง
NaS	แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์
PV	เซลล์แสงอาทิตย์
PHV	พลังงานแสงอาทิตย์
SCADA	ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า
P-N Junction	สารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด มาต่อกัน
Si	ซิลิกอน
GaAs	แกเลียมอาร์เซไนด์
CdTe	แคดเมียมเทลลูไรด์
CIGS	คอปเปอร์อินเดียมไดเซเลเนียม
QD	เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทควอนตัมดอต
Voc	แรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด
I	กระแสไฟฟ้าขาออกมีหน่วยเป็นแอมแปร์
IL	กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็นแอมแปร์
ID	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็นแอมแปร์

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$I_{SH}$	กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน Shunt มีหน่วยเป็นแอมแปร์
V	แรงดันไฟฟ้าขาออกมีหน่วยเป็นโวลต์
$R_s$	ความต้านทานอนุกรมมีหน่วยเป็นโอห์ม
$I_{sc}$	กระแสลัดวงจร
FF	ฟิลแฟกเตอร์
CIS	เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Copper indium diselenide
S	กำลังไฟฟ้าปรากฏ
STC	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามมาตรฐาน
I-V curve	กราฟกระแส-แรงดัน
$P_G^{DC}$	ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกกระแสตรงสำหรับอาร์เรย์ที่ถูกปรับสภาพ แวดล้อม
$P_{ra}$	ระดับกำลังไฟฟ้าขาออกแบบ DC ของแผงเซลล์ (W)
$V_{ocM}$	แรงดันเปิดวงจรของโมดูล (V)
$I_{scM}$	กระแสลัดวงจรของโมดูล (A)
$(I_{mM}, V_{mM})$	จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูล (A, V)
$P_{rM}$	ระดับกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูล (W)
NOCT	อุณหภูมิของเซลล์ขณะมีค่าน้อย ( $^{\circ}C$ )
$\left(\frac{\partial I_{scM}}{\partial T_c}\right), \left(\frac{\partial V_{ocM}}{\partial T_c}\right)$	ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ
$N_{cs}$	จำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันในโมดูล
G	ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
$T_A$	อุณหภูมิโดยรอบ ( $^{\circ}C$ )
ciel()	ฟังก์ชัน โดยรอบของค่าจำนวนเต็มสูงสุดถัดไป
$V_{DC}$	ความต้องการแรงดันกระแสตรง (ปกติ 55V)
$N_{sM}$	จำนวนของโมดูลที่ต้องการอนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่า $V_{DC}$
$P_{Col}$	ระดับกำลังงานของสตริงของโมดูล $N_{sM}$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$N_{pM}$	จำนวนของสตริงที่อนุกรมกันเพื่อเชื่อมต่อในแบบขนาน เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการคือ $P_{rA}$
$I_{scA}$	กระแสลัดวงจรของอาร์เรย์ (A)
$V_{ocA}$	แรงดันเปิดวงจรของอาร์เรย์ (V)
$I_{scM}$	ความต้องการแรงดันกระแสตรง (ปกติ 55V)
$N_{sM}$	จำนวนของโมดูลในสตริง
$V_{ocM}$	แรงดันเปิดวงจรของโมดูล
$P_{rA}$	ระดับกำลังขาออกแบบ DC ของอาร์เรย์
$P_{rM}$	ระดับกำลังเอาต์พุตของโมดูล
$N_s$	จำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม
$N_{cs}$	จำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมในโมดูล
$N_{sM}$	จำนวนของโมดูลในสตริง
$N_p$	จำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน
$I_A$	กระแสของอาร์เรย์ (A)
$V_A$	แรงดันของอาร์เรย์ (V)
$I_{scA}$	กระแสลัดวงจรของอาร์เรย์ (A)
$R_{sA}$	ความต้านทานอนุกรมของอาร์เรย์
$I_o$	กระแสอิ่มตัวของไดโอด (A)
$T_{cK}$	อุณหภูมิของเซลล์
$q$	$1.6 * 10^{-19}$ (coul)
$k$	$1.38 * 10^{-23}$ (j/K)
$n$	ค่าคงที่ที่ไม่ใช่ในทางอุณหพลศาสตร์ของไดโอด
$FF_{oA}$	ค่าฟิลแฟกเตอร์ของอาร์เรย์ที่ปราศจากความต้านทานอนุกรม
$P_{rAwoR}$	แสดงค่ากำลังงานเมื่ออาร์เรย์ต้องการเอาต์พุต เมื่อ $R_{sA} = 0$
$(V_{rA}, I_{rA})$	แรงดันและกระแสของอาร์เรย์ที่ระดับของกำลังงาน
$T_c$	อุณหภูมิของเซลล์ ( $^{\circ}C$ )

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$T_{c0}$	อุณหภูมิของเซลล์ทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน (ปกติ 25 องศาเซลเซียส)
$T_A$	อุณหภูมิโดยรอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )
NOCT	อุณหภูมิของเซลล์ขณะดำเนินงานที่มีค่าน้อย
$A_r$	แสดงระดับค่าของอาร์เรย์ (จุดกำลังสูงสุดทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน)
AE	แสดงค่าสำหรับอาร์เรย์ที่กำหนดสภาวะแวดล้อมให้
CHP	การผลิตไฟฟ้าด้วยระบบพลังงานความร้อนและไฟฟ้าร่วม
$S_i$	กำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหนด $i$ ( $S_i = P_i \pm jQ_i$ )
$Y_i$	ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โหนด $i$
$V_i^{(k-1)}$	แรงดันไฟฟ้าที่โหนด $i$ ณ รอบคำนวณที่ $k-1$
$k$	รอบการคำนวณ
$Z_L$	ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งช่วง $L$ ระหว่างโหนด $L_2$ และ $L_1$
$L_2$	โหนดปลายทาง
$L_1$	โหนดต้นทาง
$J$	กระแสในสาย
$k$	รอบการคำนวณ
$\Delta V_j^{(k)}$	ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าที่พอยอมรับได้ที่บัส $j$ หลังจากการคำนวณในรอบที่ $k$
$V_j^{(k)}$	แรงดันไฟฟ้าที่บัส $j$ ในรอบการคำนวณที่ $k$
$\varepsilon$	ค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับได้
OPF	ออปติมัลเพาเวอร์โพลว์
OLF	ออปติมัลโหลดโพลว์
$P(x)$	ฟังก์ชันปรับโทษ
$\Omega(x)$	เทอมปรับโทษ
$\rho$	ตัวประกอบการปรับโทษ
$P_{\text{loss}}$	กำลังสูญเสียจริงทั้งหมดของระบบจำหน่าย
$P_{gi}$	กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$
$P_{di}$	ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส $i$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$P_{DGi}$	แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายขนาด 1 MW
$N_B$	จำนวนบัสของระบบจำหน่าย
$P_{g,i}$	กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส $i$
$P_{d,i}$	ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส $i$
$Q_{g,i}$	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟผลิตที่บัส $i$
$Q_{d,i}$	ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส $i$
$N_B$	จำนวนบัส
$\theta_{i,j}$	มุมแอดมิตแตนซ์บัส $i$ ไปยังบัส $j$
$Y_{i,j}$	ขนาดแอดมิตแตนซ์บัส $i$ ไปยังบัส $j$
$V_{m,i}^{\min}$	ขอบเขตของแรงดันต่ำสุด
$V_{m,i}^{\max}$	ขอบเขตของแรงดันสูงสุด
$P_{g,i}^{\min}$	ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุด
$P_{g,i}^{\max}$	ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด
$Q_{g,i}^{\min}$	ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่ำสุด
$Q_{g,i}^{\max}$	ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูงสุด
NS	การค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง
LS	การค้นหาคำตอบเฉพาะที่
BM	แบตเตอรี่โมดูล
EMF	แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่
DOD	ความลึกของการคายประจุ
$R_o$	ค่าความต้านทานภายในคงที่
$E_o$	แรงดันขนาดเปิดวงจร
$R$	ความต้านทานภายใน
$R_c$	ความต้านทานขณะเก็บประจุ
$R_d$	ความต้านทานขณะคายประจุ
$R_{lc}$	ความต้านทานของวงรอบอายุของการเก็บและคายประจุ
$E$	แรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

k

ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

f

ความถี่ของการคายประจุ (%)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้ในภาคครัวเรือนหรือภาคอุตสาหกรรม ล้วนมีส่วนในการช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ของประเทศ ซึ่งเป็นการพัฒนาประเทศให้เจริญพร้อมที่จะก้าวไปข้างหน้า โดยเมื่อพิจารณา ถึงหลักการ ออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังควรที่จะต้องมียุทธศาสตร์ที่สำคัญ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ใน การออกแบบระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะประกอบไปด้วย คุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) เสถียรภาพกำลังไฟฟ้า (Power Stability) ความน่าเชื่อถือกำลังไฟฟ้า (Power Reliability) และความยืดหยุ่นกำลังไฟฟ้า (Power Flexible) ของระบบไฟฟ้าที่ดี ในประเทศไทยระบบการส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายส่วนใหญ่เป็นระบบการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (Radial) ซึ่งหมายถึง การต่อกระจายออกเชิงรัศมี เป็นการจัดรูปแบบวงจรที่ง่ายและมีราคาต่ำที่สุด โดยจะเป็นการจ่ายไฟฟ้าออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้กับโหลด ซึ่งการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียลนี้ จะไม่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อนที่มาจากสถานีย่อยอื่นๆ จึงเป็นข้อเสีย กล่าวคือเมื่อเกิดฟอลต์ที่สายป้อนใดจะทำให้สายป้อนนั้นไฟดับทั้งหมด [1] ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดไม่มีความน่าเชื่อถือและไม่มีความยืดหยุ่นของระบบเท่าที่ควร เป็นผลให้การส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายมีคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าที่ต่ำตามไปด้วย

ในส่วนของปัญหาถัดมาจะเป็นการขาดแคลนของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิต พลังงานไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นน้ำมัน ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งล้วนแต่เป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติ ที่ใช้แล้วหมดไป โดยที่นับวันจะลดน้อยลงไปทุกที รวมทั้งมีราคาที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ ต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีราคาที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง และปัญหาสุดท้ายจะเกี่ยวกับปัญหาภาวะโลกร้อน (Global Warming) อันเนื่องมาจากมลภาวะทางอากาศ (Air Pollution) ไม่ว่าจะเป็น ฝุ่นละออง (Particulate Matter) ตะกั่ว (Pb) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ก๊าซออกไซด์ ของไนโตรเจน (NOx) และก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) เป็นต้น [2] โดยเกิดจากกระบวนการผลิต ในภาคอุตสาหกรรม การใช้ยานยนต์ รวมทั้งการอุปโภคและบริโภคในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วนั้นส่งผลให้โอโซนในชั้นบรรยากาศของโลกถูกทำลาย ทำให้โลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้โลกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วในข้างต้นนี้ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการส่งเสริม



การสร้าง แหล่งพลังงานทดแทนที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตที่สะอาดและปราศจากมลพิษ เพื่อทดแทน แหล่งพลังงานการผลิตไฟฟ้าแบบเก่า เมื่อมองถึงปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดแล้วในข้างต้นร่วมกับทุกๆ ปัญหา ควรมีการสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานอื่นที่เหมาะสม อาทิเช่น พลังงานลม (Wind) พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) และพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นต้น เพื่อนำมา เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดในการผลิตไฟฟ้า โดยทำการสร้างให้เหมาะสมกับบริเวณที่ๆ ต้องการ ใช้ ไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ณ. จุดนั้น จะได้เป็นการเพิ่มแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยจ่าย กำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของระบบได้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดการสร้าง แหล่งผลิตไฟฟ้า แบบเดิม ซึ่งไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นนั้น การควบคุมการส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามียุคหนึ่ง เป็น การส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (Radial) โดยที่สถานีไฟฟ้า ย่อยควรที่จะต้องสร้างอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของโหลด กล่าวก็จะเป็นแบบระบบ รวมศูนย์ (Centralized System) เพื่อช่วยในการลดระยะทางของสายส่งที่จะ ไปสู่โหลดของระบบ ลดต้นทุนของ ค่าก่อสร้างระบบสายส่งที่มีระยะทางไกลๆ รวมทั้งช่วยลดแรงดันตกที่ปลายสายส่ง อีกด้วย แต่ เนื่องจากปัญหาทางด้านราคาที่ดิน ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาถึงราคาต้นทุน ในการก่อสร้าง สถานีไฟฟ้าย่อย จึงทำให้ต้องสร้างในบริเวณที่ห่างไกลจากศูนย์กลางโหลด โดยจะทำให้เกิดความ สูญเสียของระบบการส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งแก้ไขได้โดยการเชื่อมต่อ ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation: DG) เข้ากับระบบจำหน่ายหรือก็คือ ระบบกระจายศูนย์ (Distributed System) นั่นเอง ซึ่งจะทำให้ระบบ มีความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพ กำลังไฟฟ้าของระบบการส่งและระบบจำหน่าย กำลังไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น โดยที่การเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายเข้ากับระบบจำหน่ายนั้น จะมี ข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ สามารถขายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับการไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่ง ในประเทศไทยมีการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าแบ่งตามขนาดของกำลังการผลิตได้ 3 ประเภทดังนี้ [3-5]

- 1) Independent Power Producer: IPP จ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 90 MW ขึ้น ไป
- 2) Small Power Producer: SPP จ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 10 MW แต่ไม่เกิน 90 MW
- 3) Very Small Power Producer: VSPP จ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้ไม่เกิน 10 MW
- 4) โดยที่การรับซื้อพลังงานไฟฟ้าแบ่งตามขนาดของกำลังการผลิตนั้น มีหน่วยงาน ที่ดูแล ควบคุมอยู่ 3 หน่วยงานดังนี้

1. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย: กฟผ. (Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT) ควบคุมประเภท IPP และ SPP
2. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค: กฟภ. (Provincial Electricity Authority: PEA) ควบคุมประเภท SPP และ VSPP
3. การไฟฟ้านครหลวง: กฟน. (Metropolitan Electricity Authority: MEA) ควบคุมประเภท SPP และ VSPP

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ที่มีระดับการจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าประเภท VSPP โดยเป็นการนำระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (Large-Scale PV Power Generation Systems) ซึ่งกำเนิดให้มีขนาด 1 MW มาเชื่อมต่อกับบัสที่ถูกวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่าย โดยพิจารณาถึงการทำงานของบัสที่ถูกเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ว่าเชื่อมต่อเข้าไปแล้วระบบมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอหรือไม่ ถ้าการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่บัสนั้นเพียงพอก็ไม่เป็นไร แต่ถ้าเชื่อมต่อเข้าไปแล้วการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่บัสนั้นไม่เพียงพอก็ต้องทำการชดเชย (Compensation) กำลังงานเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นประเด็นที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้

ในส่วนการวิเคราะห์แบบจำลองของระบบจำหน่ายจะใช้แบบจำลองมาตรฐานของ IEEE 33 บัส แบบเรเดียล โดยนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) มาทำการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เข้ากับระบบจำหน่าย ภายใต้งบเงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่ (Static Load) และลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss Reduction) ของระบบ ผลการทดสอบที่ได้จะทำให้มีความน่าเชื่อถือ และเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการกำหนดขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการชดเชยกำลังไฟฟ้าในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่

### 1.3 สมมุติฐานของวิทยานิพนธ์

การศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ซึ่งกำหนดให้มีขนาด 1 MW โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB M-File ทำการทดลอง (Simulation) เพื่อศึกษาวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของจุดที่จะเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เข้ากับระบบจำหน่าย แล้วจึงทำการวิเคราะห์ระบบเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ซึ่งจะทำให้มีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าที่ดีขึ้น

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาหลักการการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในรูปแบบที่เป็นระบบ ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW

1.4.2 กำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่าย ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.4.3 วิเคราะห์ออกแบบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่าย

### 1.5 ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์

1.5.1 การศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

1) ศึกษาการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ และการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่าย

2) ศึกษาการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมถึง การออกแบบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่าย

1.5.2 การวิเคราะห์แบบจำลอง

1) วิเคราะห์แบบจำลองของ IEEE 33 บัส ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB M-File เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เข้ากับระบบจำหน่าย

2) วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW เมื่อติดตั้งเข้ากับระบบจำหน่าย

1.5.3 การออกแบบระบบ

1) กำหนดขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่ายของแบบจำลองของ IEEE 33 บัส

2) ออกแบบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่าย เพื่อแก้ไขกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ

#### 1.5.4 ประเมินผลการทำงานของงานวิจัย

- 1) ทำการทดสอบระบบ
- 2) เก็บผลการทดสอบของระบบ
- 3) ประเมินผลระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่าย พร้อมทั้งปรับปรุงเพื่อเสถียรภาพที่ดีขึ้นของระบบ

#### 1.5.5 จัดทำรายงานการวิจัยและสรุปผลการดำเนินงาน

### 1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

จากการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ได้ทำการศึกษา

1.6.1 ศึกษาระดับการจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าประเภท VSPP ซึ่งกำหนดให้ระบบจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้างานนี้

- 1) ระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 8.0 เมกะวัตต์/วงจร หรือ 1 สายป้อน (Feeder)
- 2) ระบบจำหน่าย 33 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 10.0 เมกะวัตต์/วงจร หรือ 1 สายป้อน (Feeder)

1.6.2 ศึกษาระดับการจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าประเภท VSPP ซึ่งกำหนดให้ 1 สายป้อน (Feeder) โดยถ้ามีการจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ก่อนหน้าเท่าไรก็ตาม เมื่อจะทำการเชื่อมต่อแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายเข้ากับสายป้อนนั้น ผลรวมการการจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งเก่าและใหม่ต้องมีผลรวมไม่เกิน 8 MW และ 10 MW ตามระดับแรงดันของระบบจำหน่าย

1.6.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB M-File เพื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่ายโดยใช้แบบจำลองของ IEEE 33 บัสเพื่อหาดำเนินการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดที่เป็นไปได้จริง

1.6.4 ศึกษาเทคนิคที่นำมาใช้เป็นระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ที่ติดตั้งในระบบจำหน่าย เพื่อดูว่าลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบแล้ว ได้ผล ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้

## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงปัญหาของการกำหนดขนาดและหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่าย

1.7.2 เข้าใจถึงการวิเคราะห์และการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB M-File เพื่อการกำหนดขนาดและหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่าย

1.7.3 เข้าใจถึงปัญหา หลักการวิเคราะห์ และเทคนิคการออกแบบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้แก้ปัญหา กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ที่ติดตั้งเข้ากับระบบจำหน่าย

1.7.4 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และพัฒนาเสถียรภาพด้านอื่นๆ ของระบบจำหน่ายสำหรับการเพิ่มคุณภาพของกำลังไฟฟ้าในระบบให้ดีขึ้นเพื่อรองรับการพัฒนาเทคโนโลยี ทางด้านพลังงานของประเทศในอนาคต

## 1.8 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

การนำเสนอวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีองค์ประกอบที่สำคัญ 5 บท คือ บทที่ 1 จะกล่าวถึงความ เป็นมา ความสำคัญของปัญหา และแนวทางในการแก้ปัญหา โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์อาทิตย์ขนาด 1 MW หรือเรียกอีกอย่างว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation: DG) ที่มีระดับการจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าประเภท VSPP ต่อมาจะกล่าวถึง วัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขอบเขต ขั้นตอนในการดำเนินงาน ข้อจำกัด ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ตามลำดับ บทที่ 2 ศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตามู ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิด โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-Sulfur Battery: NaS) เพื่อเป็นแนวทางนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิทยานิพนธ์ โดยการสร้างแบบจำลองของ DG ที่เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แล้วนำข้อมูลมารวมกับข้อมูลต่างๆ ของระบบจำหน่ายมาใช้ในโปรแกรม MATLAB M-File เพื่อทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากกราฟและผลการจำลองระบบจำหน่าย ดูว่าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง DG เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่นๆ ก็จะเป็นบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง DG เข้าไปในระบบจำหน่าย แล้วจึงได้ข้อมูลของแบบจำลองที่เป็นอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิด โซเดียม

ซัลเฟอร์ทดสอบรวมอีกครั้ง เพื่อปรับปรุงรูปร่างของแรงดัน บทที่ 4 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองในบทที่ 3 และบทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลเชิงอภิปรายรวมถึงข้อเสนอแนะ และแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้ต่อไป

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

จากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากปัญหาการขาดแคลนของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มีราคาสูงขึ้น และความต้องการพลังงานที่สะอาด เพื่อลดมลพิษทางอากาศส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน รวมไปถึงการควบคุมการส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามีลักษณะเป็นการส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้าที่มีการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (Radial) โดยจะทำให้เกิดแรงดันตกที่ปลายสายส่งทำให้เกิดความสูญเสียต่อระบบการส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้า

การแก้ไขได้โดยทำการเชื่อมต่อของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation: DG) ที่เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เข้ากับระบบจำหน่าย ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้น และจะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ เมื่อติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม ในส่วนของการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดจะใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตราบู (Tabu Search: TS) มาช่วยในการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้ง DG ซึ่งจะทำการทดสอบบนแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา ของ IEEE ที่มีการประยุกต์การทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA รวมไปถึงการพิจารณาออกแบบระบบชดเชยจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-Sulfur Battery: NaS) มาช่วยในการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สถานะโหลดคงที่ (Static Load) ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือของระบบเพิ่มมากขึ้น จึงนำไปสู่การวิจัยและพัฒนาระบบดังกล่าวขึ้น

โดยมีองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในส่วนของทฤษฎีมีลำดับการกล่าวถึงดังต่อไปนี้ การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ ระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ปัญหาการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะสมที่สุด ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตราบู และระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ตามลำดับ

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Golder, A. S. [6] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการจำลองตัวกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic: PV) สำหรับการศึกษาาระบบจำหน่ายขนาดใหญ่ ซึ่งมาจากปัญหาของขอบเขตทางภูมิศาสตร์ที่มีเงื่อนไขที่ดีสำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบเซลล์แสงอาทิตย์ (PHV) จะเห็นได้จากจำนวนที่เพิ่มขึ้นของการติดตั้งในเชิงพาณิชย์แบบสามเฟส และการติดตั้งแบบเฟสเดียวสำหรับที่อยู่อาศัย แหล่งจ่ายแบบ PHV สามารถอธิบายเป็นแหล่งจ่ายที่ไม่สม่ำเสมอ เพราะว่าการผลิตไฟฟ้าเหล่านั้นเป็นการทำงานที่เปลี่ยนแปลงตามสภาวะแวดล้อม การเพิ่มจำนวนของแหล่งจ่ายที่ไม่สม่ำเสมอเหล่านี้ จะเป็นการเริ่มมีผลกระทบต่อระบบจำหน่าย งานนี้แนะนำเสนอการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการใช้ประโยชน์จากระบบจำหน่ายโดยการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบ PHV โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบ PHV คือการตรวจสอบและแบบจำลองจะเป็นการพัฒนาถึงการคำนวณกำลังไฟฟ้าขาออกบนพื้นฐานตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม กำลังไฟฟ้าขาออกนี้รวมแล้วจะเป็นการแก้ปัญหาของการไหลของกำลังในระบบจำหน่ายแบบไม่สมดุลโดยใช้ค่าคงที่ของ PQ หรือแบบจำลองของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบ P|V| คงที่ แบบจำลองจะได้รับการดำเนินการและการจำลองซึ่งจะเป็นการนำเสนอสำหรับการทดสอบระบบ 394 บัส เพื่อรองรับความไม่สม่ำเสมอ การจำลองชั่วโมงที่ใช้ที่สอดคล้องกัน และกราฟของโหลด 24 ชั่วโมงจะได้รับแบบอัตโนมัติ การจำลองจะดำเนินการเพื่อทำการศึกษาระบบในพื้นที่ของที่ๆ มีประวัติความต้องการของความสมดุลของเฟส ความสมดุลของสายป้อน ความเปลี่ยนแปลงของ p.f. และการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้า การวิเคราะห์จะดำเนินการเพื่อระบุปัญหาที่จะเกี่ยวข้องมากที่สุดกับวิศวกรที่ทำงานในการวางแผนและการดำเนินงานของระบบด้วยการติดตั้งแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบ PHV

Hashemi Namin, M. และ คณะ [7] ได้นำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองวิธีการควบคุมและ การวิเคราะห์ การผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ซึ่งมาจากปัญหาของการขาดแคลนเชื้อเพลิง และแหล่งพลังงานที่สะอาด โดยทำการศึกษาระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็น DC และส่วนที่เป็น AC ซึ่งจะทำการปฏิบัติ ในรูปแบบที่เป็นแบบจำลองของระบบการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ นอกเหนือจากนั้นจะเป็นการนำเสนอวิธีการควบคุม และทดสอบ ที่เป็นแบบโครงข่ายกำลังมาตรฐาน ซึ่งจะเป็นการเลือกและเป็นหัวข้อของจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ที่ใช้ในการติดตั้ง การศึกษาเอาต์พุตจะกระทำโดยการเฝ้าสังเกตผลกระทบของการแทรกหรือฉีดกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบ PV และจำนวนของการปรับปรุงตำแหน่งไปจนถึงการเสนอแนะวิธีการควบคุม โดยผลการทดสอบเอาต์พุตที่ได้จากการฉีดกำลังไฟฟ้าเข้าไปในระบบ PV ที่ Grid นั้น จะเห็นได้ชัดว่ามีการปรับปรุงที่ดี



ขึ้นในส่วนจํานวนของรูปร่างของแรงดัน บริเวณเสถียรภาพของกำลังไฟฟ้าและการลดลงอย่างมากของกำลังสูญเสีย

วิชิต เครือสุข [8] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการหาตำแหน่งและขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสม ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้การเคลื่อนที่ กลุ่มของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งมาจากปัญหาของการหาตำแหน่งและขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้การเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาค เพื่อลดกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในระบบจำหน่ายให้มีค่าต่ำสุด ซึ่งในเงื่อนไขเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายนี้มีจำนวนมากกว่าหนึ่งเครื่องและสี่แบบ ในแต่ละครั้งในการคำนวณจะต้องพิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสีย การทดสอบได้มีการเปรียบเทียบระหว่าง วิธีการเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคกับวิธีการฮิวริสติก และวิธีการคัดเลือกพันธุกรรม ซึ่งได้ทดสอบกับระบบไฟฟ้ามาตรฐาน 33 บัส และ 69 บัส ของ IEEE จากผลการทดสอบวิธีการเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคที่นำเสนอพบว่า การหาตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่มีหลายเครื่อง ได้คำตอบที่ทำให้กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในระบบไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าต่ำสุดตามแต่ละแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นโดยมีค่าแรงดันตกลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายป้อนแต่ละส่วนยังมีค่าลดลงด้วย

รัช เกิดขึ้น และ กฤตวิทย์ บัวใหญ่ [9] ได้นำเสนอเกี่ยวกับวิธีการของเทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย ซึ่งมาจากปัญหาของระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นระบบเรเดียล (Radial systems) การวิเคราะห์การไหลของโหลดก็ยังคงมีความสำคัญ เพราะคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าควรเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง การคำนวณการไหลของโหลดในระบบจำหน่ายจะช่วยทำให้ทราบระดับแรงดันที่โหนดต่างๆ ได้ นอกจากนี้คำตอบของการไหลของกำลังในระบบจำหน่ายจะช่วยทำให้การวางแผนเพื่อควบคุมระบบ ตลอดจนการขยายระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น หนึ่งการจำลองระบบเมื่อต้องเจอกับสถานะที่ไม่คาดคิดนั้นจะรู้คำตอบได้ เราก็ต้องทำการคำนวณการไหลของโหลดเช่นกัน การคำนวณการไหลของโหลด หรือการวิเคราะห์การไหลของโหลด ในระบบจำหน่ายจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าในระบบส่งจ่าย เพราะในระบบจำหน่ายจะเป็นระบบเรเดียลเสียเป็นส่วนใหญ่ แต่ในระบบส่งจ่ายจะเป็นระบบโครงข่าย อีกประการหนึ่งพารามิเตอร์สายในระบบส่งจ่ายจะประกอบด้วยความต้านทานความเหนี่ยวนำและความจุ แต่ในระบบจำหน่ายเราจะพิจารณาเพียงแค่ความต้านทานและความเหนี่ยวนำของสายเท่านั้น การคำนวณการไหลของโหลดด้วยหลักการใช้เมทริกจาโคเบียน (Jacobian-based) เช่น นิวตันราฟสัน โหลดหรือเก๊าไซเคิล

นั้น ไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของโหลดสำหรับระบบจำหน่ายที่บางครั้งเกิดปัญหาเกี่ยวกับผู้เข้าสู่คำตอบ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การไหลของโหลดในระบบจำหน่ายก็ยังมี ความสำคัญ เพราะผู้มีหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าต้องเตรียมการให้พร้อมเพื่อการจ่ายไฟฟ้าที่มี คุณภาพ และการขยายการให้บริการในอนาคต ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอเทคนิคการคำนวณการ ไหลของโหลดด้วยวิธีแพร่กระจายถอยหลังและเดินหน้า (Backward and Forward Propagations) ซึ่ง เป็นการขยายความเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ จำหน่าย ซึ่งเป็นเทคนิคการแพร่กระจายถอยหลังและเดินหน้า ในช่วงการถอยหลังนั้นอาศัยกฎ ความสัมพันธ์ของกระแสเคอร์เซอร์พอนั้นเอง ในช่วงการแพร่กระจายเดินหน้าเพื่อคำนวณแรงดันที่ โหนดที่อาศัยกฎความสัมพันธ์ของแรงดันเคอร์เซอร์พอนั้น จะเห็นว่าลำดับขั้นการคำนวณนั้นไม่ยุ่งยาก เท่าใดนัก เมื่อคำนวณแรงดันที่โหนดได้แล้ว เราก็สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในสายได้ ประโยชน์จากการนำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายนั้น สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ได้อย่างมากมาย

Pukar, M., Weerakom, O. และ Nadarajah, M. [10] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการกำหนด ตำแหน่งของ DG แบบกึ่งหั่นลมในด้านปฐมภูมิของระบบจำหน่าย เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริง ซึ่ง มาจากปัญหาของตำแหน่งที่จะติดตั้งกึ่งหั่นลมที่ใช้ผลิตไฟฟ้านั้น ถ้าตำแหน่งที่จะติดตั้งไม่เหมาะสมก็ จะทำให้ระบบมีการสูญเสียเพิ่มมากขึ้น โดยจะนำเสนอใช้วิธีการหาขนาดและตำแหน่งสำหรับ เชื่อมต่อ DG ที่ด้านปฐมภูมิของระบบจำหน่าย เพื่อลดค่ากำลังงานจริงของระบบให้ต่ำที่สุด ซึ่ง คุณลักษณะของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกึ่งหั่นลมจะถูกนำเสนอในรูปแบบที่เร่งด่วนจะใช้ในการ แก้ปัญหาการหาขนาดและตำแหน่งในการติดตั้ง DG ในส่วนของการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่ชัด จะใช้ในการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ระบบจะถูกทำการทดสอบในระบบจำหน่ายแบบเบเรเคิล 33 บัส และ 69บัส โดยการหาขนาดจะใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสองครั้งเปรียบเทียบกัน และตำแหน่งที่ติดตั้ง DG จะใช้เทคนิคการคำนวณของการประมาณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียอย่างรวดเร็ว ในการแก้ปัญหา ผลที่ได้จากการทดสอบของระบบนั้น จะถูกนำเสนอในรูปแบบของการเปรียบเทียบ ก่อนและหลังทำการติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าก่อนติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจะเกิด แรงดันตกที่ปลายสายส่งและกระแสในบางสาขาของระบบจะสูงมาก ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน ระบบค่อนข้างมาก แต่เมื่อหลังจากหาขนาดและติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบในบัสที่เหมาะสมแล้วนั้น จะ ช่วยลดระดับของแรงดัน ไฟฟ้าตกที่ปลายทางและลดระดับของกระแสไฟฟ้าในบางสาขาของระบบ ส่งผลให้สายส่งของระบบไม่ต้องรับภาระหนักเกินไป ซึ่งยังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ให้มีค่าน้อยลงได้อีกทางหนึ่งด้วย

อุเทน ลีตน และ ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์ [11] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการแก้ปัญหาการแก้ปัญหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งต่ำที่สุด โดยใช้ผลเฉลยการไหลค่าลิ่งไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่อาศัยปัญญาเชิงกลุ่ม ซึ่งมาจากปัญหาของความต้องการลดค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งให้ต่ำที่สุด ซึ่งจะแก้ปัญหามาจากการไหลค่าลิ่งไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยอาศัยปัญญาเชิงกลุ่ม (Swarm Intelligences) รูปแบบของวิธีการแก้ปัญหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์และตัวแปรในระบบไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการพิจารณาได้แก่ ค่าลิ่งไฟฟ้าจริงที่ผลิตจากโรงจักรไฟฟ้า ขนาดของแรงดันที่ถูกควบคุมโดยสถานีไฟฟ้า แท็บหม้อแปลงและค่าลิ่งไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยเปรียบเทียบการใช้เทคนิคปัญญาเชิงกลุ่ม คือ วิธีควาซีนิวตัน (Quasi-Newton) วิธีจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) วิธีฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization) และวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ (Artificial Bee Colony) เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาค่าลิ่งไฟฟ้า ซึ่งระบบที่นำมาทดสอบเป็นระบบ 6 บัส และ IEEE 30 บัส จะเห็นว่าสามารถลดค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียในสายส่ง ซึ่งทุกวิธีการค้นหาสามารถแก้ปัญหาค่าลิ่งไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ ผลเฉลยของค่าคำตอบที่ได้อยู่ในช่วงพิกัดที่ยอมรับ การให้ผลดีที่สุดนั้นขึ้นกับพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้ในแต่ละวิธีและสมรรถนะของวิธีฝูงผึ้งประดิษฐ์ ให้ค่าคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบทั่วไปมากที่สุด

ยุทธนา เอี่ยมสมบูรณ์ [12] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่เหมาะสม เพื่อลดค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยวิธีค้นหาแบบตามู ซึ่งมาจากปัญหาการขาดความเชื่อถือได้ของค่าลิ่งไฟฟ้า ประโยชน์การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่าย คือ การลดลงของค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียในระบบให้ดีขึ้น หากตำแหน่งในการติดตั้งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายได้รับการพิจารณาที่เหมาะสม ปัญหาหลักของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก คือ การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย เพื่อที่จะลดค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียและค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ ตำแหน่งจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาดกำลังผลิตโดยรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย แรงดันไฟฟ้าที่บัส ความสามารถในการรองรับกระแสของสายป้อน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายหนึ่งเครื่องสำหรับหนึ่งตำแหน่งติดตั้ง เทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาค่าลิ่งไฟฟ้าสูญเสียมีค่าต่ำสุด คือ การค้นหาแบบตามู การค้นหาแบบนี้เป็นการค้นหาเฉพาะที่ใช้หน่วยความจำเพื่อหลีกเลี่ยงคำตอบข้างเคียงเฉพาะที่และช่วยให้เคลื่อนที่ออกจากจุดเหมาะสมเฉพาะที่ การแก้ปัญหาดังกล่าวลดค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าให้มีค่าต่ำสุด และใช้วิธีการค้นหาแบบตามูร่วมกับการวิเคราะห์ค่าความเชื่อถือได้ที่ใช้เป็นตัววัดค่าความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าดับ วิธีการนี้ได้ทำการทดสอบกับระบบจำหน่ายของระบบทดสอบ RBTS บัส 2 ประกอบด้วย 36 สายป้อน 22 จุดโหลด และระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค KWA01 ประกอบด้วย 9 สายป้อน 6

จุดโหลด และ KWA06 ประกอบด้วย 28 สายป้อน 20 จุดโหลด เป็นของสถานีไฟฟ้าคลองขวาง จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายสามารถนำไปใช้เพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย ข้อสังเกตในงานวิจัยนี้ คือ ผลกระทบของลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานไม่ได้ตามเงื่อนไขเดิมหลังจากมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายเข้าไป เพราะเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีอุปกรณ์ป้องกันภายในตัว จึงส่งผลกระทบต่อลำดับการทำงานเมื่อต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับอุปกรณ์ป้องกันอื่นๆ ในระบบ

Zahrul F.Hussien และ คณะ [13] ได้นำเสนอเกี่ยวกับแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่าย ซึ่งมาจากปัญหาของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium Sulfur Battery: NaS) เป็นแหล่งสำรองพลังงานขั้นสูงและเป็นสิ่งใหม่ที่ถูกนำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในบทความได้นำเสนอแบบจำลองและการทดสอบเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับเป็นระบบสำรองพลังงานที่เป็นแบตเตอรี่ และเป็นวิธีการเพิ่มคุณภาพของระบบไฟฟ้า โดยทั่วไปแบบจำลองของแบตเตอรี่ไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ต้องมีปัจจัยที่สำคัญที่จะถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองของแบตเตอรี่ อาทิเช่น ค่าความต้านทานภายใน ผลกระทบของอุณหภูมิ แรงที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า และความถี่ของการคายประจุบนพื้นฐานของข้อมูลที่เป็นไปได้ โดยพฤติกรรมของกระแสและแรงดันไฟฟ้า และคุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ เป็นการจำลองผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ของ PSCAD/EMTDC ซึ่งแบบจำลองนั้นจะใช้ในการศึกษาของการใช้พลังงานแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ และจะถูกประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดสอบ ผลที่ได้จะมีการพิสูจน์ว่าแบบจำลองของแบตเตอรี่นั้น มีความแม่นยำในการจำลองผลของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ ซึ่งตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการศึกษาการจำลองสมรรถนะของแหล่งจ่ายกำลังงานที่เตรียมพร้อมจะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่สายส่งโดยใช้แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์นั้นจะถูกนำเสนอ โดยเป็นจุดเด่นของการประยุกต์ใช้แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ในการศึกษาผลการจำลอง ซึ่งจะถูกนำเสนอโดยการตรวจสอบความสามารถของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ในการลดแรงดันตก (Voltage Sag)

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาผู้วิจัยได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญของการศึกษาแหล่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่เป็นอิสระหรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย โดยเป็นการนำระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (Large-Scale PV Power Generation Systems) ซึ่งกำหนดให้มีขนาด 1 MW มาเชื่อมต่อกับบัสที่ถูกวิเคราะห์กำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมแล้วในระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นและความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มี

คุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าของระบบการส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น เป็นการสนับสนุนนโยบายการพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืนของประเทศชาติ โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์

## 2.3 ระบบไฟฟ้ากำลัง (Introduction to Electrical Power System)

### 2.3.1 บทนำ

การศึกษาระบบผลิตไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องเข้าใจโครงสร้างของระบบ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาในส่วนต่างๆ ของระบบที่ต้องการ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมุ่งประเด็นการศึกษาระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบที่มีการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แต่ถึงอย่างไรก็ต้องศึกษาและทำความเข้าใจระบบไฟฟ้าเบื้องต้นเสียก่อน เพราะเป็นพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

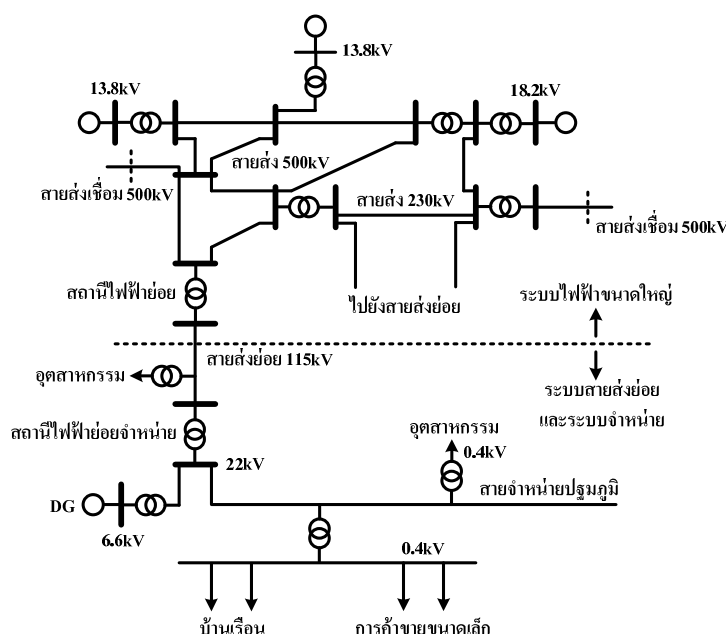
พลังงานไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นพลังงานที่มีการใช้กันมากในปัจจุบัน เหตุผลเนื่องมาจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงในราคาราคงทนที่เหมาะสม ในที่นี้จะกล่าวถึงภาพรวมของระบบกำลังไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบไปด้วย ระบบการผลิต (Generation System) ระบบการส่งจ่าย (Transmission System) ระบบการจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) และรวมถึงระบบควบคุม (Control Center) ระบบการผลิตจะได้มาจากผู้ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากหลายรายและหลายแหล่งผลิตในบางประเทศจะเปิดโอกาสให้มีการแข่งขันอย่างอิสระ การผลิตพลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน จะมีการแบ่งหรือจัดสรรเพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบหรือจ่ายโดยตรงที่ผู้ใช้ไฟฟ้า โดยมีกฎเกณฑ์ที่ชัดเจน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในระบบการผลิตนี้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลากหลายชนิด ส่วนมากจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส (Synchronous Generator) และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ จะส่งไปหาผู้ใช้ไฟฟ้าโดยผ่านโครงข่ายสายส่ง (Transmission Network) โดยโครงข่ายสายส่งนี้อาจแยกย่อยได้เป็นระบบการส่งจ่าย และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในระบบจำหน่ายอาจมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (Distributed Generators: DG) ต่อร่วมอยู่ด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้น ในปัจจุบันนี้การผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ได้รับความนิยมกันมากในประเทศไทย ได้มาจากพลังชีวมวล (Biomass) พลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) พลังงานลม (Wind Turbines) โดยมีเอกชนเข้ามาลงทุนสร้างแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนขนาดใหญ่ (Renewable Energy Power Plants) เหล่านี้กันมาก เนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายการสนับสนุนที่ชัดเจน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้ากำลังส่วนอื่นจะไม่กล่าวถึงแต่จะกล่าวถึงความหมาย และการนำไปใช้งานเบื้องต้นเท่านั้น และเช่นเดียวกันจะกล่าวถึงในส่วนการควบคุม

ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญเพื่อควบคุมคุณภาพไฟฟ้าของจำนวนแรงดันไฟฟ้า และความถี่ให้อยู่ในย่านที่กำหนดได้ตลอดเวลา [14]

### 2.3.2 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลัง (Structure of Electrical Power System)

ระบบไฟฟ้ากำลังปัจจุบันในส่วนของกำลังไฟฟ้าจะถูกผลิตในสถานผลิตไฟฟ้า และส่งเข้าสู่โครงข่ายสายส่งที่ประกอบด้วยระบบสายส่ง ระบบสายส่งย่อย (Subtransmission System) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อส่งไปให้ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต้องการระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ ที่ต้องการ



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้ากำลัง

ภาพที่ 2.1 แสดงระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้า ที่เกิดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ถูกขับโดยกังหัน ซึ่งกังหันนี้อาจมาจากพลังงานไอน้ำ พลังงานน้ำ พลังงานนิวเคลียร์ เครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสูงสุด ณ ปัจจุบันอยู่ที่ 30 kV ส่วนขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 50 MW-1500 MW เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าได้แล้ว องค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างของระบบไฟฟ้ากำลัง คือ หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) หน้าที่หลักของหม้อแปลงไฟฟ้า คือ เป็นอุปกรณ์ ที่ใช้ในการส่งถ่ายพลังงาน โดยมีการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยอัตราส่วนหม้อแปลงไฟฟ้า การปรับเพิ่มแรงดันไฟฟ้า

ในสายส่งเป็นการลดค่าการสูญเสียในสาย เมื่อมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะไกล นอกจากนี้ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ยังมีการส่งเชื่อม (Tie Line) ไปยังระบบไฟฟ้าใกล้เคียงด้วย

ระบบสายส่งจะทำหน้าที่เชื่อมระบบหลักๆ เข้าด้วยกัน ประกอบด้วยระบบการผลิต และจุดศูนย์กลางของโหลด ระบบสายส่งจะทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV 230 kV 500kV สำหรับประเทศไทย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 11-35 kV เท่านั้น หลังจากนั้นเครื่องกำเนิดจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันกับระบบสายส่ง ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มระดับ แรงดันไฟฟ้า (Step-up transformer)

ระบบสายส่งย่อยจะทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำลงมาจากแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่ง ระบบสายส่งย่อยนี้ทำหน้าที่เชื่อมไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อย (Transmission substation) เข้าสู่สถานีไฟฟ้าจ่ายจำหน่าย (Distribution substation) ของผู้ดูแลระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งปกติจะตั้งอยู่ใกล้กัน

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นส่วนสุดท้ายที่พลังงานไฟฟ้าจะเข้าสู่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย ระดับแรงดันไฟฟ้าจำหน่ายด้านปฐมภูมิ คือ ตั้งแต่มากกว่า 4 kV จนถึง 34.5 kV สำหรับแรงดันไฟฟ้าจำหน่ายด้านทุติยภูมิ จะเป็น 120 V หรือ 230 V ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดแรงดันไฟฟ้าผู้ใช้ของแต่ละประเทศ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้านี้จะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กต่อรวมอยู่ด้วย ในประเทศไทย ระบบการผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กนี้ กำลังไฟฟ้าได้รับการส่งเสริมจากรัฐบาล เพื่อที่จะลดกำลังการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil) โดยมีการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าจากเอกชนรายย่อย และเพิ่มราคาการซื้อพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) เข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยกำหนด เป็นนโยบาย ของรัฐบาลอย่างชัดเจน

### 2.3.3 แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง (Model of Electrical Power System)

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีความยุ่งยากซับซ้อน เนื่องจากมีการเชื่อมต่อกับหลายโครงข่ายของระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถจำแนกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไฟฟ้าได้เป็น 4 แบบจำลองหลัก ได้แก่

- 1) แบบจำลองระบบผลิต
- 2) แบบจำลองระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า
- 3) แบบจำลองระบบจำหน่าย
- 4) แบบจำลองโหลด

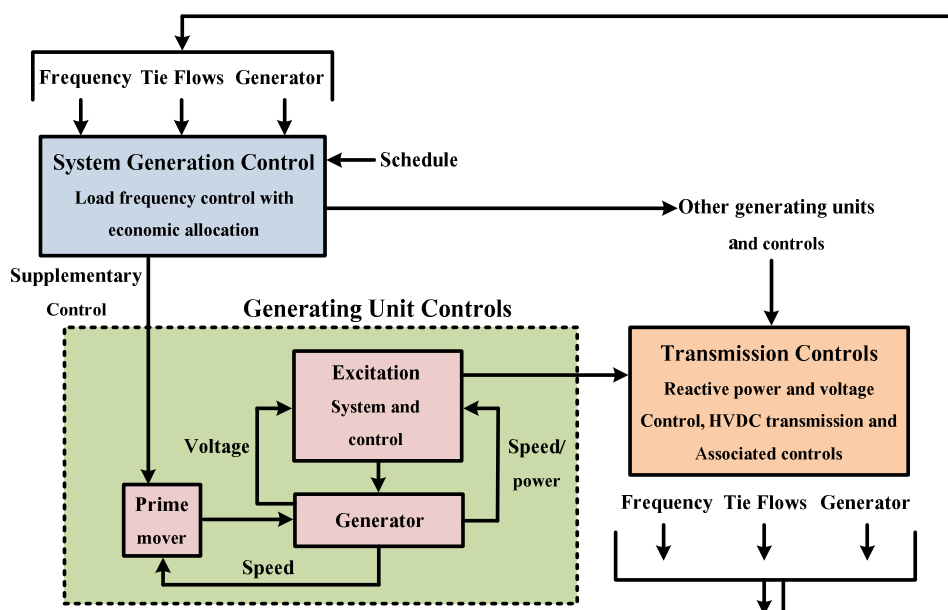
การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญในส่วนของแบบจำลองของโหลดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบนั้น คุได้จากสถานีไฟฟ้าย่อยว่ามีโหลดเท่าใด ซึ่งผลของโหลดจะมีผลกระทบต่อการควบคุมระบบไฟฟ้า โหลดทางไฟฟ้าประกอบด้วยโหลดที่มี

กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การทราบโหลดจริงและโหลดรีแอกทีฟนั้น ทำให้เราทราบความต้องการของโหลดระบบใหญ่ทั้งหมด บางครั้งต้องพยากรณ์โหลดในอนาคตด้วย เพื่อให้ควบคุมและวางแผนนั้นสัมพันธ์กับโหลดที่เป็นจริงด้วย การพยากรณ์นี้อาจสนใจในระดับหนึ่งนาที หนึ่งชั่วโมงหรือหนึ่งวันข้างหน้าก็ได้ นอกจากนี้พฤติกรรมของโหลดก็มีความสำคัญเช่นกัน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อแรงดันไฟฟ้าและความถี่ ทำให้การเตรียมการและวางแผนระบบควบคุม ทำได้ถูกต้อง

ส่วนแบบจำลองของสายส่งหรือโครงข่ายสายส่งประกอบด้วย สายส่ง สายส่งย่อยและสายจำหน่าย การแบ่งนี้เป็นไปตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน ปกติแล้วระบบสายส่งจะส่งจ่ายแบบลูป (Loop) โดยไม่เป็นแบบเรเดียล (Radial) ยกเว้นในระบบสายส่งย่อยและระบบจำหน่ายจะเป็นแบบเรเดียล สำหรับการจำลองแบบสายส่งในสภาวะการทำงานปกติ การเปลี่ยนแปลงของโหลดก็ไม่มาก ความถี่ก็ค่อนข้างคงที่ แบบจำลองสายส่งที่เป็นแบบรวม (Lumped circuit) ก็เพียงพอต่อการศึกษา แต่ถ้าหากมีผลของทรานเซียนต์ (Transient) และพลวัต (Dynamics) เกิดขึ้น เช่น เกิดผลจากฟ้าผ่า เข้ามาในระบบ สมการอนุพันธ์คลื่นไฟฟ้าก็ควรนำมาใช้ในการจำลองการทำงานจากระบบ

ในส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความถี่และกำลังไฟฟ้าจริงด้านออก แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วนั้นจะถูกควบคุมด้วยผลต่างของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสั่งให้ตัวกระตุ้น (Exciter) เพิ่มกระแสสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ความถี่และกำลังไฟฟ้าจริงนั้น ก็ควบคุมได้ที่โถวเอนอร์ (Governor) นอกจากนี้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังต้องรับข้อมูลเพื่อการผลิตที่ถูกต้องจากระบบด้วย ดังภาพที่ 2.2 จะเห็นว่าเครื่องต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะต้องรับข้อมูลเพื่อเป็นตัวกำหนดขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยชุดควบคุมทั้งสามจะทำงานประสานกันแบบออนไลน์ (Online) ชุดควบคุมกำลังผลิต (System Generation Control) จะรับข้อมูลจากการวัดจากชุดควบคุมระบบสายส่ง (Transmission Line Control) ทั้งแรงดันไฟฟ้า การไหลของกำลังไฟฟ้าและความถี่ เพื่อส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating Unit Control) ที่ควบคุมการผลิตแรงดันไฟฟ้า และความถี่ให้ได้ถูกต้อง ก่อนที่จะส่งกำลังไฟฟ้าไปที่ ชุดควบคุมสายส่ง





ภาพที่ 2.2 ระบบไฟฟ้าย่อยและการควบคุม

### 2.3.4 การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Control)

การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานจากรูปแบบพลังงานอื่นๆ เป็นพลังงานไฟฟ้าและส่งไปที่จุดผู้ใช้ซึ่งมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีระบบการเปลี่ยนแปลงพลังงานและการส่งจ่ายที่มีความน่าเชื่อถือได้และมีประสิทธิภาพสูง โดยมีความต้องการ ขั้นพื้นฐาน ดังนี้

1) ระบบไฟฟ้าสามารถที่จะรับการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้ สำหรับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกตีฟ เนื่องจากระบบไฟฟ้าไม่สามารถจัดเก็บพลังงานขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบ Spinning reserve ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกตีฟ จึงมีความจำเป็นต้องควบคุมและพิจารณาตลอดเวลา

2) ระบบไฟฟ้าควรมีการจ่ายพลังงานที่ราคาต้นทุนต่ำสุด และมีผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์น้อยที่สุด

3) คุณภาพของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าต้องอยู่ในขอบเขตของค่ามาตรฐาน โดยพิจารณาองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. ความถี่คงที่ (Constancy of Frequency)
2. แรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constancy of Voltage)

### 3. ระดับความน่าเชื่อถือ (Level of Reliability)

พื้นฐานหลักของการควบคุมระบบการผลิตต้องทำให้ปริมาณการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเพียงพอต่อความต้องการไฟฟ้า และเพียงพอต่อความสูญเสียในระบบด้วย การควบคุมที่เพียงพอนี้ จะทำให้ความถี่และส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบข้างเคียงเป็นตามต้องการ

การควบคุมในระบบสายส่งอาจมีอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าร่วมอยู่ด้วย อาทิเช่น อุปกรณ์ชดเชย FACTS (Flexible AC Transmission Line System Devices) ซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser) คาปาซิเตอร์ (Capacitors) รีแอกเตอร์ (Reactors) หม้อแปลงชนิดเปลี่ยนแทปแบบออนไลน์ (on-line Tap Changing Transformer) หม้อแปลงแบบเลื่อนเฟส (Phase Shift Transformer) และตัวควบคุมด้วย HVDC (HVDC Control) เป็นต้น ตัวควบคุมทั้งหมดเหล่านี้เพื่อที่จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า ความถี่และเงื่อนไขกำหนดอื่นๆ เป็นตามความต้องการ

การควบคุมยังขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง ถ้าหากสถานะการทำงานของระบบอยู่ในสภาวะปกติ (Normal state) เป้าหมายการควบคุมเพียงแค่ให้แรงดันไฟฟ้า และความถี่อยู่ในย่านที่ดีที่สุด แต่ถ้าหากอยู่ในสภาวะผิดปกติการควบคุมต้องพยายาม นำระบบกลับสู่สภาวะ ปกติให้ได้ ซึ่งอาจต้องมีการขอมปลดโหลดบางส่วน แรงดันไฟฟ้าและความถี่อาจอยู่ในย่านที่ไม่น่าพอใจได้

#### 2.3.5 ศูนย์การจัดการพลังงาน (Energy Management Center)

สำหรับการทำงานที่สามารถลดต้นทุนและมีความเชื่อถือได้สูง ระบบไฟฟ้าทั้งหมดจำเป็นต้องมีตัวติดตามตรวจสอบ (Monitor) ที่ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าสมัยใหม่เรียกว่า ศูนย์การจัดการพลังงาน (Energy Management System, EMS) ส่วนประกอบของศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าประกอบด้วย ระบบคอมพิวเตอร์ออนไลน์ ที่สามารถรับส่งสัญญาณระยะไกลได้ โดยจะมีการทำงานร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ทำงานหรือแจ้งสภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้าได้ทุกเหตุการณ์ ศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีระบบการแสดงผล คีย์บอร์ด และระบบเตือนภัยต่อผู้ปฏิบัติงานในศูนย์ เครื่องมือจำลองการทำงานและโปรแกรมสำเร็จรูปขั้นสูง จำเป็นต้องมีในศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการทำงานของระบบ บางครั้งเรียกศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าว่า Supervisory Control and Data Acquisition หรือ SCADA

#### 2.3.6 การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Analysis)

การทำงานของระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัติ จำเป็นต้องมีความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือได้ และต้นทุนการจัดการระบบที่เหมาะสม ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์จึงมีความจำเป็นในการออกแบบระบบ การทำงานของระบบ และการพยากรณ์ระบบล่วงหน้า เพื่อให้ได้มาซึ่งเป้าหมายที่

ต้องการ โดยมีการจำลองระบบไฟฟ้าทั้งหมดลงในคอมพิวเตอร์ และอาศัยโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ระบบตามที่ต้องการได้ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์อาจจะเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีความน่าเชื่อถือได้สูง หรือผู้ออกแบบเขียนโปรแกรมการวิเคราะห์ระบบขึ้นมาเองตามข้อกำหนดและเงื่อนไขนั้น เพื่อให้วิศวกรสามารถออกแบบและการพยากรณ์ระบบได้อย่างถูกต้อง

### 2.3.7 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority)

มีหน้าที่ในการจัดหา และจำหน่ายไฟฟ้าให้ทุกจังหวัดของประเทศไทย โดยไม่รวมกรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [15]

1) แหล่งพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีหน้าที่รับผิดชอบในพื้นที่เกือบทั้งหมดของประเทศ จึงมีแหล่งผลิตไฟฟ้าอยู่หลายแห่งหลายแบบด้วยกันตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ ดังต่อไปนี้

1. ผลิตเอง โดยทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องขับเคลื่อนกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะมีกำลังผลิตตั้งแต่ 25 kW ถึง 1250 kW ถ้าเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็กจะจ่ายไฟออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ 400/230 V โดยไม่ต้องผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดันซึ่งได้แก่ โรงจักรไฟฟ้าแบบพัฒนาการ แต่ถ้าเป็นระบบจ่ายไฟฟ้าขนาดปานกลางและขนาดใหญ่ คือมีขนาดตั้งแต่ 300 kW ถึง 1250 kW ใช้ติดตั้งในโรงจักรเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่บริเวณที่เป็นชุมชน อำเภอ หรือเมืองใหญ่ๆ ที่ต้องการกำลังผลิตสูง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้มีทั้งระบบจ่าย 400 V, 3500 V และ 11kV โดยจะต้องจ่ายไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงเพิ่มแรงดันไฟฟ้า การผลิตกำลังไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซล จะมีต้นทุนการผลิตที่สูงไม่คุ้มกับการลงทุน ดังนั้นการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจึงหันมาเชื่อมโยงระบบแรงสูงจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยแทนโรงจักรดีเซลเดิมทำให้เป็นการลดต้นทุนลง

2. ซื้อมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต กำลังไฟฟ้าส่วนใหญ่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มาจากการซื้อมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตเป็นผู้ตั้งสถานีแปลงแรงดัน และติดตั้งหม้อแปลงลดระดับแรงดันสูงจากระบบสายส่งแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งเป็นระบบแรงดัน 230 kV, 115 kV และ 69 kV แปลงลงมาเป็นแรงดันตามระบบการจำหน่ายแรงสูง ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3. ซื้อมาจากการไฟฟ้านครหลวง ในเขตจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่อยู่ใกล้เขตจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงทางการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก็จะซื้อกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง เช่นที่ จังหวัดปทุมธานี เป็นต้น

4. ซื้อมาจากการพลังงานแห่งชาติ การพลังงานแห่งชาติได้สร้างเขื่อน และโรงจักรพลังน้ำขนาด 1000 kW เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับจังหวัดแม่ฮ่องสอน และจังหวัดใกล้เคียง

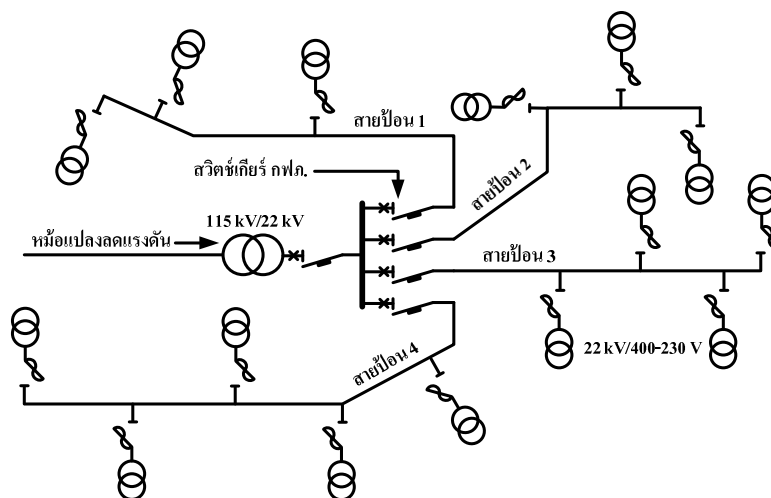
2) ระบบการจำหน่ายแรงดันปานกลาง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีระบบแรงดันจำหน่ายอยู่ 2 ระบบ ได้แก่

1. ระบบแรงดัน 22 kV Conventional Solidly Grounded System จังหวัดส่วนใหญ่เกือบทั่วทั้งประเทศจะใช้ระบบนี้ ยกเว้นจังหวัดทางภาคใต้ และบางจังหวัดในภาคเหนือ ระบบนี้เป็นแบบ 3 เฟส 3 สาย และ ระบบ 1 เฟส 2

2. ระบบแรงดัน 33 kV Multigrounded System With Overhead Ground Wire ใช้ในภาคใต้ตั้งแต่จังหวัดระนองลงไป และในจังหวัดเชียงรายกับพะเยา ระบบแรงดัน 33 kV นี้แตกต่างไปจากระบบ 22 kV Conventional Solidly Grounded System คือ นอกจากจะมีจุดต่อลงดิน Star Point ทางด้าน 33 kV ยังมีสาย Overhead Ground Wire ต่อจากจุดที่ต่อลงดินของหม้อแปลงที่สถานีไฟฟ้าย่อย พาดไว้เหนือสายเฟสทั้ง 3 สายอีก 1 สายด้วย และสาย Overhead Ground Wire นี้ก็จะต่อลงดินเอาไว้ที่เสาทุกๆ ต้นของระบบด้วย ทั้งนี้สาย Overhead Ground Wire นอกจากจะทำหน้าที่เป็นจุดต่อลงดินหลายจุดแล้ว ยังใช้เป็นเกราะป้องกันฟ้าผ่าลงสายเฟสอีกด้วย ดังนั้นในระบบ 3 เฟสของแรงดัน 33 kV จะประกอบไปด้วยสายเฟส 3 สาย และสาย Overhead Ground Wire อีก 1 สาย ส่วนระบบ 1 เฟส ก็จะประกอบไปด้วยสายเฟส 1 สาย และสาย Overhead Ground Wire 1 สาย

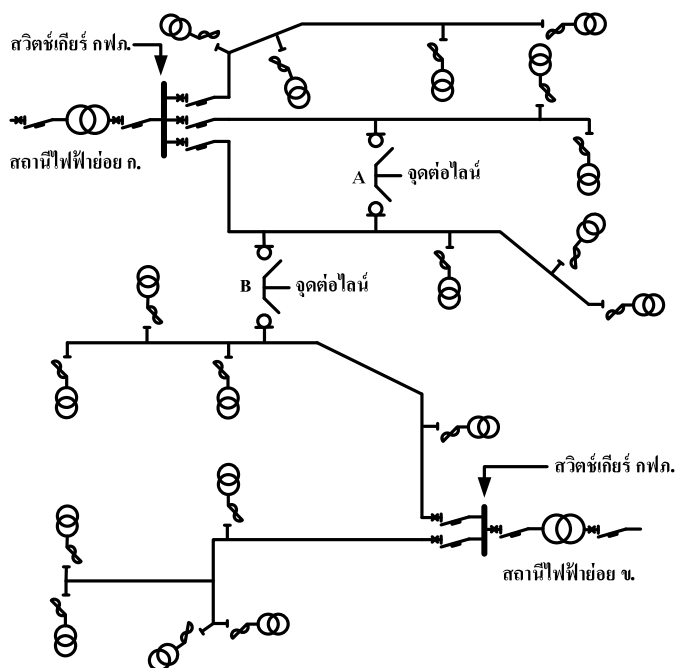
ระบบการจำหน่ายทั้ง 2 ระบบ โดยทั่วไปมีลักษณะการจ่ายเป็นแบบสายส่งเหนือศีรษะ (Overhead Aerial System) โดยมี 2 แบบ คือ แบบ Radial Line กับแบบมี Tie Line ระหว่างสายป้อนการจ่ายไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แบบ Radial Line ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.3 ที่สวิทช์เกียร์ในสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะมีสายป้อนแยกออกสู่บริเวณผู้ใช้ไฟ ซึ่งสายป้อนแต่ละชุดก็จะมีจุดต่อไฟต่อแยกไฟจ่ายโหลด โดยผ่านหม้อแปลงลดแรงดัน การจ่ายไฟแบบนี้ง่าย ราคาถูก แต่ความเชื่อถือได้มีน้อยกว่าแบบอื่น



ภาพที่ 2.3 ระบบการจำหน่ายแรงดันปานกลางแบบ Radial Line

2. แบบมี Tie Line ระหว่างสายป้อน ในบางสถานีควบคุมการจ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สายป้อนบางสายป้อนอาจมีการทำจุดต่อไลน์ (Tie Line) ระหว่างสายป้อน เช่น ที่จุด A ในภาพที่ 2.4 หรืออาจมีการทำจุดต่อไลน์กับสายป้อนใดสายป้อนหนึ่งของสถานีควบคุมการจ่ายไฟใกล้เคียง ดังแสดงที่จุด B ในภาพที่ 2.4 การมีจุดต่อไลน์จะต้องมีบริภัณฑ์ตัดตอนติดตั้งอยู่ด้วย



ภาพที่ 2.4 ระบบการจำหน่ายแรงดันปานกลางแบบมี Tie Line ระหว่างสายป้อน

3) ระบบการจำหน่ายแรงดันต่ำ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ก็จะเป็นเช่นเดียวกันกับของระบบการจำหน่ายแรงดันปานกลาง คือ เป็นแบบส่งเหนือศีรษะ (Overhead Aerial System) และจ่ายออกจากหม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) ลูกใดลูกหนึ่งเป็นรัศมีวงรอบ สำหรับบางแห่งอาจมีการทำจุดต่อไลน์ระหว่างสายป้อนของหม้อแปลงระบบการจำหน่ายเครื่องเดียวกัน และบางแห่งอาจมีการทำจุดต่อไลน์ของสายป้อน สำหรับหม้อแปลงระบบการจำหน่าย ใกล้เคียงกันด้วย เช่นเดียวกันกับระบบการจำหน่ายแรงดันปานกลางสำหรับระบบ การจำหน่ายแรงดันต่ำ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ก็จะมีอยู่ 2 ระบบดังนี้

1. ระบบการจำหน่ายแรงต่ำ 1 เฟส จะมีทั้งแบบระบบ 1 เฟส 2 สาย 230 V และ แบบ 1 เฟส 3 สาย 460/230 V โดยแบบ 3 สายนี้ จะเป็นระบบเก่า ที่จ่ายไฟให้กับไฟถนนไม่ได้จ่ายให้ตามบ้านเรือนที่อยู่อาศัย

2. ระบบการจำหน่ายแรงต่ำ 3 เฟส 4 สาย ระบบนี้มีแรงดันมาตรฐาน คือ 400/230 V

### 2.3.8 สรุป

ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งประเด็นเพื่อศึกษารูปแบบของระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบที่มีการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงองค์ประกอบของระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า รวมถึงการเชื่อมแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ที่ถูกกำหนดให้มีขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ดังจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

## 2.4 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่

### 2.4.1 บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาเรื่องความขาดแคลนพลังงานทดแทน และความต้องการพลังงานสะอาดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อลดภาวะโลกร้อนนั้น ได้เริ่มมีการพิจารณาหาแนวทางแก้ไขกันอย่างกว้างขวางเพิ่มมากขึ้น ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้แก้ไขปัญหา คือ ระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation: DG) โดยจะนำมาเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบบเรเดียล ซึ่งเมื่อพิจารณาติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม จะช่วยแก้ปัญหาดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น และยังช่วยลดกำลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลได้อีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาหลักการทํางานและโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งประเด็นเพื่อทำการสร้าง

แบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW โดยจะนำไปเชื่อมต่อเข้าร่วมกับแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เพื่อพิจารณาการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าปัญหาการไหลของกำลังที่เหมาะสมที่สุด และใช้ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตามูหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

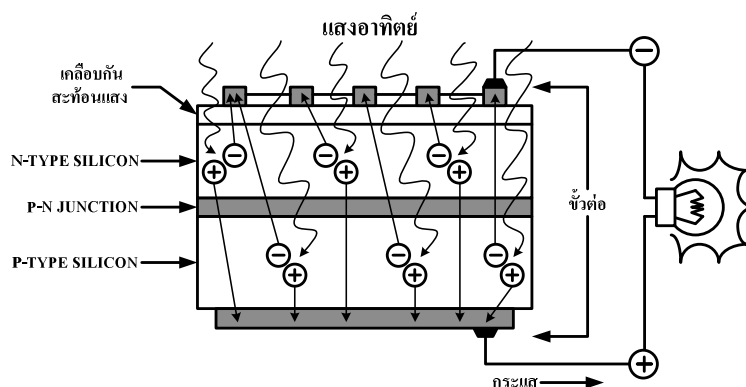
#### 2.4.2 พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Basic of Solar Cell)

แสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุด เป็นพลังงานสะอาดและมีอยู่ทั่วไป แต่การนำมาใช้ประโยชน์อาจยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากแสงอาทิตย์มีเฉพาะในตอนกลางวันตลอดจนมีความเข้มของแสงที่ไม่แน่นอน เพราะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและฤดูกาลที่เปลี่ยนไป

##### 1) หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยที่เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลก นำมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบ ที่เรียกว่า Photon จะถ่ายเทพลังงานให้กับ Electron ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของ Atom และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่อ Electron มีการเคลื่อนที่ครบวงจร ก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น

ซึ่งองค์ประกอบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ สารกึ่งตัวนำ (Semi-Conductors) 2 ชนิดมาต่อกัน ซึ่งเรียกว่า P-N Junction เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะถ่ายพลังงานให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลอิสระไปรออยู่ที่ขั้วต่อ ดังนั้นเมื่อมีการเชื่อมกับวงจรภายนอก เช่น เอาหลอดไฟฟ้ามาต่อคร่อมขั้วต่อ ก็จะเกิดการไหลของอิเล็กตรอน/โฮลที่ให้พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงกับวงจรภายนอกได้ และจะให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่ยังมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที หรือนำไปกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อใช้งานภายหลังได้ ดังภาพที่ 2.5 [16]

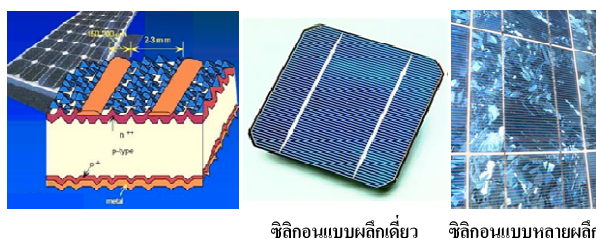


ภาพที่ 2.5 การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ 1 [16]

## 2) ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

การพัฒนาของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดต้นทุนด้านวัสดุในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้ราคาเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงแต่ต้องเพิ่มให้มีประสิทธิภาพสูง การแบ่งประเภทเซลล์แสงอาทิตย์ตามเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม [17] ดังนี้ได้แก่

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar Cells) ในกลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกมีความแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุสารกึ่งตัวนำตั้งต้น (Semiconductor Material) เช่น ซิลิกอน (Si) และแกเลียม อาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์จากผลึกซิลิกอนมีกรรมวิธีในการผลิตอยู่หลายวิธี จึงมีให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสมได้แก่ ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Cells) ซิลิกอนแบบแผ่นฟิล์มบาง (Silicon Ribbon Cells) ซิลิกอนแบบหลายผลึก (Polycrystalline silicon cells) ซิลิกอนแบบแผ่นบางหลายผลึก (Polycrystalline thin film silicon cells) เป็นต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของราคาและวัตถุประสงค์การใช้งาน มีการพัฒนาเป็นลำดับ ซึ่งได้รับการยอมรับในเชิงพาณิชย์และมีประสิทธิภาพ 10-15 เปอร์เซ็นต์ แต่ยังคงมีต้นทุนของวัสดุค่อนข้างสูงในภาพที่ 2.6 แสดงตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกในเชิงพาณิชย์

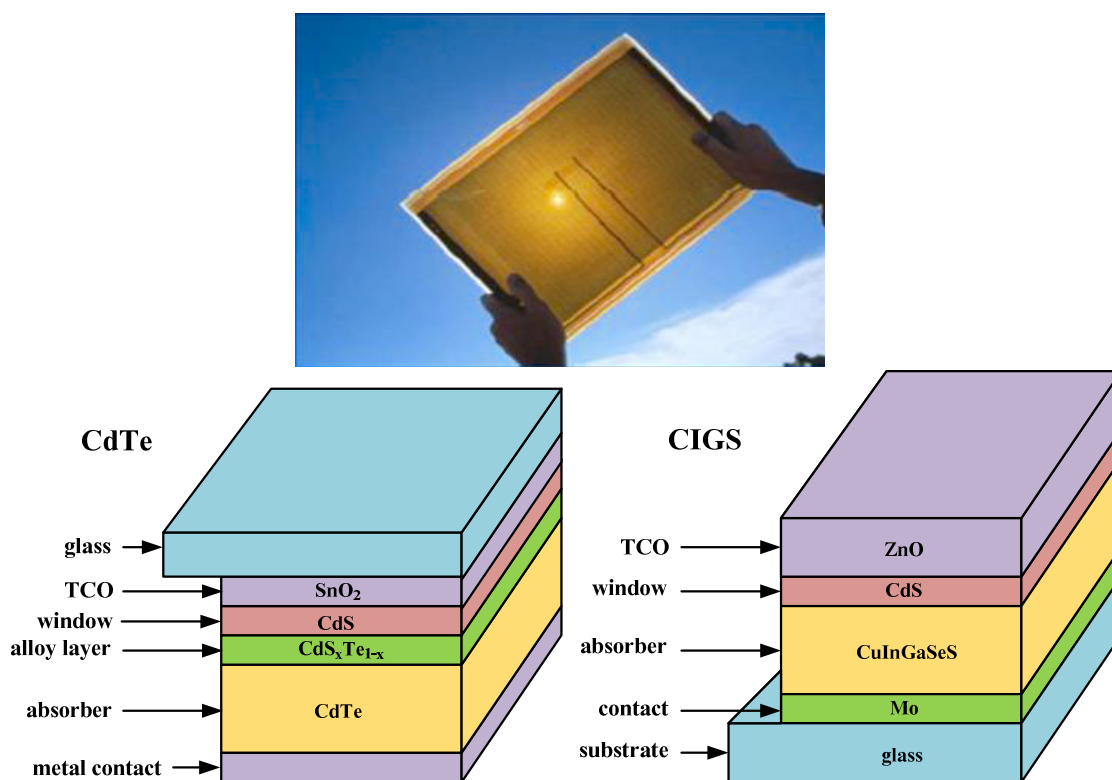


ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว ซิลิกอนแบบหลายผลึก

ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar Cells) [17]



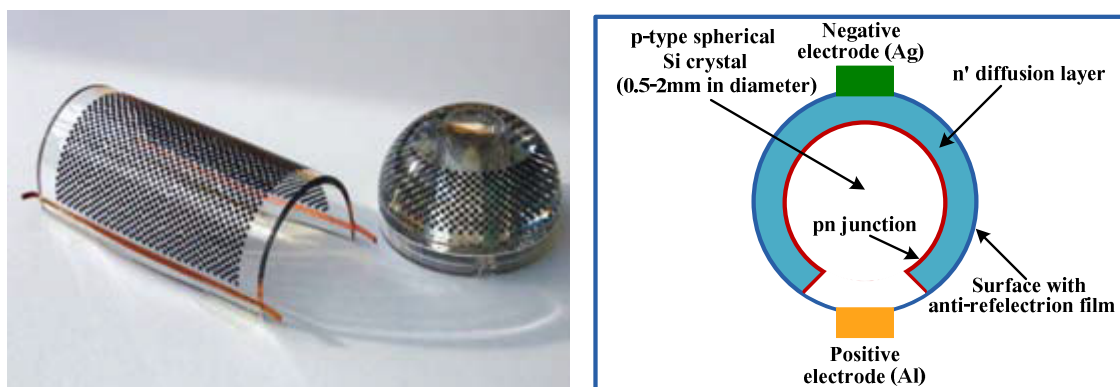
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cells) ในกลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางสามารถแบ่งออกตามเทคโนโลยีการผลิตได้แก่ เซลล์ที่ผลิตจาก อะมอर्फัสซิลิกอน เซลล์ที่ผลิตจากแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และเซลล์ที่ผลิตจากคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลเนียม (CIGS) การศึกษาวิจัยและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 6 - 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งได้รับการยอมรับและผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางสำหรับใช้ในเชิงพาณิชย์ ตัวอย่างเซลล์และไดอะแกรมองค์ประกอบภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแสดงในภาพที่ 2.7 ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของเซลล์แบบนี้จะน้อยกว่าเซลล์ชนิดผลึกซึ่งมีข้อดีคือช่วยแก้ปัญหาทางด้านราคาได้ แต่ยังคงมีข้อสงสัยด้านการติดตั้งใช้งานในสภาวะจริง อายุการใช้งาน และการเสื่อมสภาพของแผงเซลล์ในระยะยาว



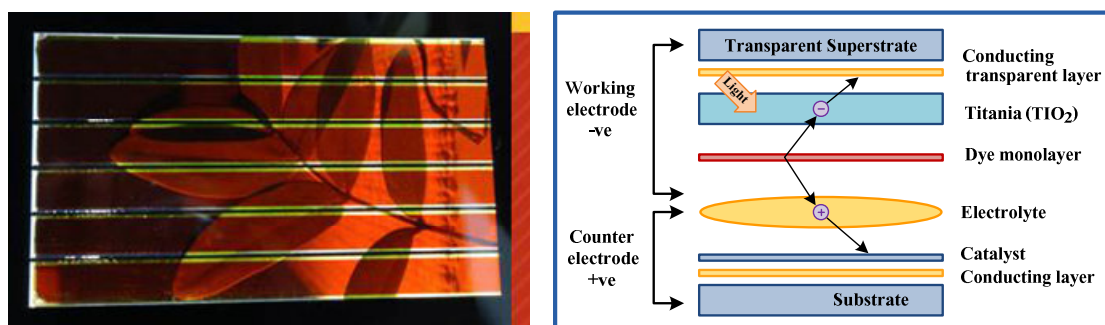
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง [17]

3. กลุ่มสุดท้ายเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาอย่างต่อเนื่องจากชนิดผลึกและชนิดฟิล์มบางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ช่วยลดการสร้างมลพิษและเพิ่มอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ หากแบ่งตามการพัฒนาเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภททรงกลม (Spherical Micro Solar Cells) เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทคายเซนซิไทซ์ (Dye-Sensitized

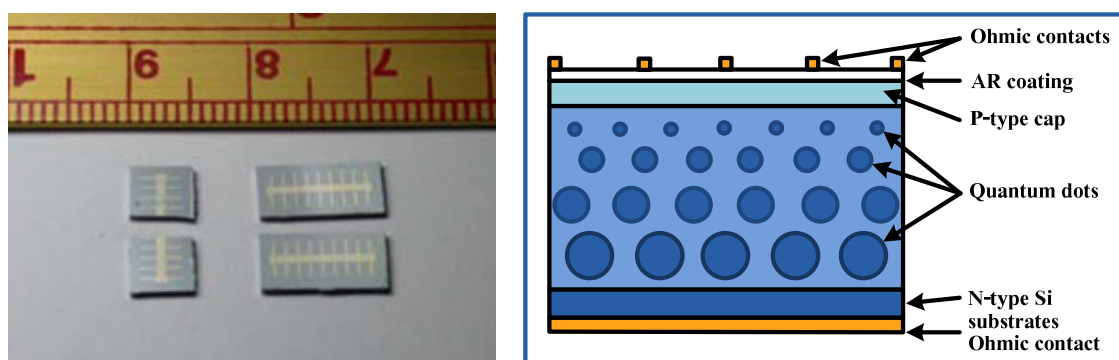
Solar Cells) และเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทควอนตัมดอต (Quantum Dot Solar Cells) ดังแสดงในภาพที่ 2.8



(ก) เซลล์แสงอาทิตย์ทรงกลม



(ข) เซลล์แสงอาทิตย์คายเซนซีไทซ์



(ค) เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอต

ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์และโครงสร้างภายในเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ [17]

จากภาพที่ 2.8 นั้นคือเซลล์แสงอาทิตย์ประเภททรานซิลคอนดักเตอร์แบบทรานซิลคอนดักเตอร์ จะสามารถรับแสงได้สามมิติ จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสงเพิ่มขึ้น และยังมีข้อดีในเรื่องของ น้ำหนักเบา กว่าแบบแผ่นราบเมื่อนำไปประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากปริมาณของซิลิกอนตั้งต้นน้อยกว่ามากทำให้ลดต้นทุนลงได้ เซลล์แสงอาทิตย์แบบทรานซิลคอนดักเตอร์ดังกล่าวปัจจุบัน มีการผลิตเชิงพาณิชย์แล้วแต่ยังไม่เป็นการแพร่หลายนัก โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคายเซนซีทีฟ มีจุดเด่นในความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีหลักการออกแบบเซลล์จากกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งมีการเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นคาร์โบไฮเดรต และก๊าซออกซิเจน จากแนวความคิดดังกล่าวจึงใช้การเคลือบผิววัสดุที่ทนทานด้วยไทเทเนียมออกไซด์ให้คล้ายกับ คลอโรพลาสต์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้มีการผลิตขายในเชิงพาณิชย์บ้าง และมีประสิทธิภาพ 3-5 เปอร์เซ็นต์ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทควอนตัมดอต (Quantum Dot Solar Cells: QD) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเทอร์โมไดนามิกส์ ของโฟตอนให้มีค่ามากที่สุดนับเป็นการพัฒนาจากข้อจำกัดของเซลล์ชนิดผลึก โดยเพิ่มประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็น 66 เปอร์เซ็นต์ (จากเดิมของวัสดุสารกึ่งตัวนำทั่วไปอยู่ที่ 31-33 เปอร์เซ็นต์) ยังไม่มีการผลิตเชิงพาณิชย์แต่ก็ประกอบด้วยหลายหน่วยงานทั้งในและต่างประเทศที่ให้ความสนใจและดำเนินการศึกษาในเรื่องดังกล่าวซึ่งในประเทศไทยโดย Semiconductor Device Research Laboratory จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยพัฒนา Multi-Stacked High Density In As Quantum Dot Molecule Solar Cells

### 3) คุณสมบัติและตัวแปรที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

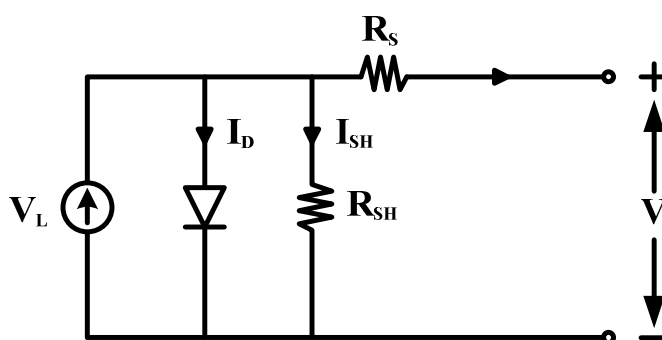
ตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานในแต่ละพื้นที่ต่างกัน และมีความสำคัญในการพิจารณานำไปใช้ในแต่ละพื้นที่ ตลอดจนการนำไปคำนวณระบบหรือคำนวณจำนวนแผงแสงอาทิตย์ที่ต้องใช้ในแต่ละพื้นที่ มีดังนี้ [18]

1. ความเข้มของแสง กระแสไฟ (Current) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง หมายความว่า เมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าแทบจะไม่แปรไปตามความเข้มของแสงมากนัก ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอก และวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 mW ต่อ ตร.ซม. หรือ 1,000 W ต่อ ตร.เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 1.5 (Air Mass 1.5) และถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศา กับพื้นโลกความเข้มของแสง จะมีค่าเท่ากับประมาณ 75 mW ต่อ ตร.ซม. หรือ 750 W ต่อ ตร.เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ AM 2 กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้ค่า AM 1.5 เป็นมาตรฐานในการวัดประสิทธิภาพของแผง

2. อุณหภูมิ กระแสไฟ (Current) จะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า (โวลต์) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5 % และในกรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของแผงแสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25°C เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open Circuit Voltage หรือ ( $V_{oc}$ ) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25°C จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25°C จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 °C เช่น อุณหภูมิ 30°C จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของแผงแสงอาทิตย์ลดลง 2.5% ( $0.5\% \times 5^{\circ}C$ ) นั่นคือแรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่  $V_{oc}$  จะลดลง 0.525 V ( $21\text{ V} \times 2.5\%$ ) เหลือเพียง 20.475 V ( $21\text{ V} - 0.525\text{ V}$ ) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าจะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย

#### 4) ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อได้รับแสงที่มีระดับความเข้มเหมาะสมต่อช่วงการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น การใช้งานต้องทราบสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มต้นที่วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 2.9 เป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) นอกจากนี้ต่อขนานกับความต้านทาน shunt และ ต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรมตามลำดับ จากการต่อวงจรสมมูลในภาพที่ 2.9 สามารถเขียน เป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.1 นั่นคือผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดมาจากกระแส ที่ได้จากแหล่งพลังงานแสงหักลบด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และกระแสที่ไหลผ่าน ความต้านทาน shunt ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านแต่ละส่วนต่างๆ ก็ทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้น [17]



ภาพที่ 2.9 การต่อวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [17]

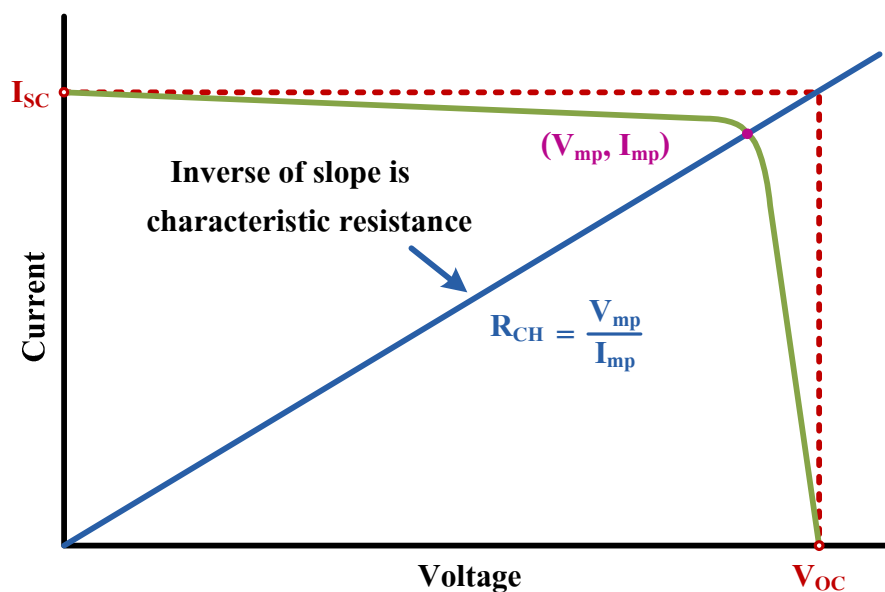
ตั้งสมการที่ 2.2 นั้นคือ แรงดันไฟฟ้า ณ จุดใดๆ เท่ากับ แรงดันไฟฟ้าที่ขาออกบวกด้วยผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานอนุกรม

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

$$V_j = V + IR_s \quad (2.2)$$

โดยที่	I	คือ กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	$I_L$	คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	$I_D$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	$I_{SH}$	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน Shunt มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	V	คือ แรงดันไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็น โวลต์
	I	คือ กระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	$R_s$	คือ ความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็น โอห์ม

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) และฟิลแฟกเตอร์ (FF) ในภาพที่ 2.10 แสดงกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรซึ่งจะทราบได้จากลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V Characteristic) นั่นคือ กระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและแรงดันไฟฟ้า ขณะที่ไม่มีกระแสเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ต่อไปคือฟิลแฟกเตอร์ เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันกับกระแสที่ จุดทำงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์และผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันเปิดวงจร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันที่จุดสูงสุดต่อกระแสที่จุดทำงานสูงสุดหรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันเปิดวงจรต่อกระแสลัดวงจร



ภาพที่ 2.10 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ [17]

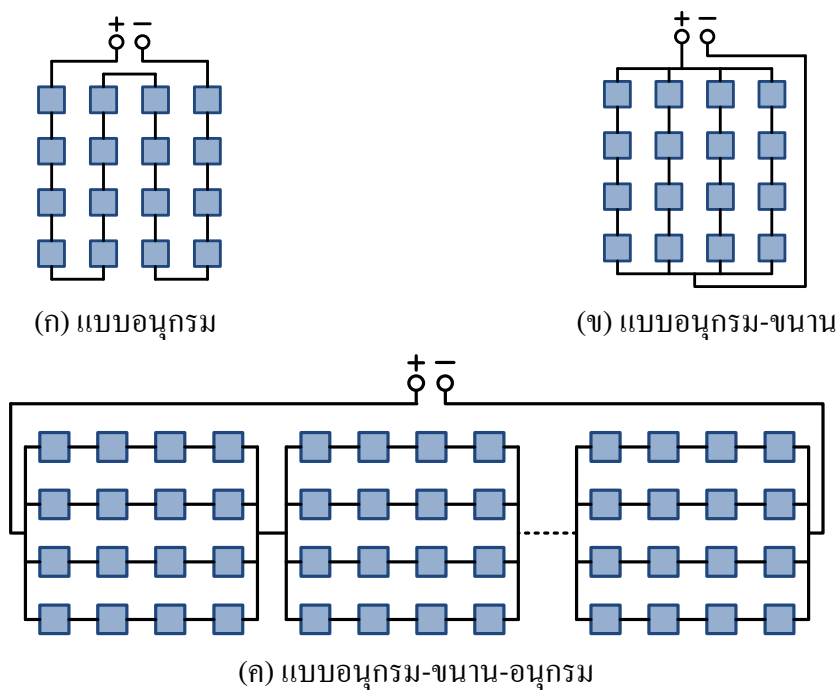
5) ลักษณะของแผงเซลล์ชนิดผลึกซิลิกอน

การต่อเซลล์นั้นมีรูปแบบการเชื่อมต่อแต่ละเซลล์เพื่อทำให้เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ 3 แบบ คือ

1. แบบอนุกรม คือ นำแต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกันเป็น 1 แถว หรือเรียกว่า 1 สตริง (string) เท่านั้น ใน 1 แผง มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าของแผงให้สูงขึ้น ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.11 (ก) มีเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกันทั้งสิ้น 16 เซลล์ และหากแต่ละเซลล์มีแรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage,  $V_{oc}$ ) อยู่ที่ประมาณ 0.6 โวลต์เท่ากันทุกเซลล์ และกระแสเท่ากัน ก็จะทำให้แผงเซลล์นี้มีแรงดัน  $V_{oc}$  เท่ากับจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมคูณกับแรงดัน  $V_{oc}$  ของเซลล์ ซึ่งในกรณีนี้ก็จะเท่ากับ 9.6 โวลต์ ส่วนกระแสที่ไหลผ่านจะไหลเท่ากับกระแสของหนึ่งเซลล์เท่านั้น

2. แบบอนุกรม-ขนาน คือ การนำแต่ละสตริงที่เซลล์ต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นแล้วนำมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มกระแสให้สูงขึ้น ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.11 (ข) จะเห็นได้ว่าแต่ละสตริงมีเซลล์ต่ออนุกรมกัน 4 เซลล์ ซึ่งทำให้มีแรงดันที่แต่ละสตริง เท่ากับ 2.4 โวลต์ และหากสมมติให้กระแสแต่ละสตริงเท่ากับ 5 แอมป์ ก็จะทำให้กระแสเอาต์พุตของแผงนี้มีค่าเท่ากับผลรวมค่ากระแสของทุกสตริงที่ต่อขนานกัน ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 20 แอมป์

3. แบบอนุกรม-ขนาน-อนุกรม คือ การนำแต่ละกลุ่มที่เชื่อมต่อกันแบบที่ 2 มาต่ออนุกรมกันตามภาพที่ 2.11 (ค) เพื่อเพิ่มทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า

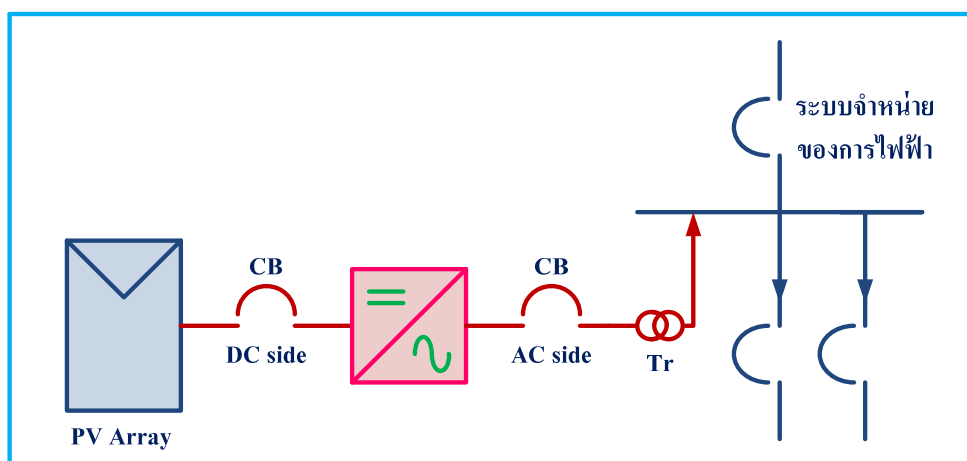


ภาพที่ 2.11 การต่อเซลล์แบบต่างๆ

#### 2.4.3 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศ

##### 1) อุปกรณ์ประกอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศ

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศ และอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบบรรยากาศ จะแสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบรรยากาศ

1. การเลือกแผงเซลล์และฟิสิกส์ระบบ พื้นที่ในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการของเจ้าของระบบ ดังนั้นจึงควรมีรายการตรวจสอบ (Checklist) สำหรับการสำรวจพื้นที่อาคาร ประกอบด้วยข้อมูลได้แก่ ความต้องการต่างๆ ของระบบ ทิศทางการติดตั้งแผงเซลล์ มุมติดตั้ง พื้นที่ใช้สอย วิธีการติดตั้งแผงเซลล์ การบังเงา ความยาวสายไฟที่ ต้องการ และตำแหน่งติดตั้งอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น จำนวนพื้นที่ของแผงเซลล์ที่ใช้สามารถคิดคำนวณคร่าวๆ โดยใช้ Rule of thumb นั่นคือ 1 กิโลวัตต์สูงสุด มีค่าประมาณ 10 ตารางเมตรของพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือสามารถใช้ตารางที่ 2.1 เพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้นตามชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจำนวนของแผงเซลล์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับความกว้างและความสูงของแผงเซลล์นั้นๆ และพื้นที่ติดตั้งบนหลังคา โดยระยะห่างระหว่างแผงเซลล์แต่ละแผงเซลล์ประมาณ 6 - 10 มิลลิเมตร ข้อพิจารณาในการเลือกแผงเซลล์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายมีดังนี้

ก. ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวเซลล์แสงอาทิตย์แบบหลายผลึก เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Copper Indium Diselenide (CIS) และ CdTe เป็นต้น

ข. ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ แผงเซลล์มาตรฐานแบบมี และไม่มีกรอบแผงเซลล์แบบกระจก (grass-grass module) เป็นต้น

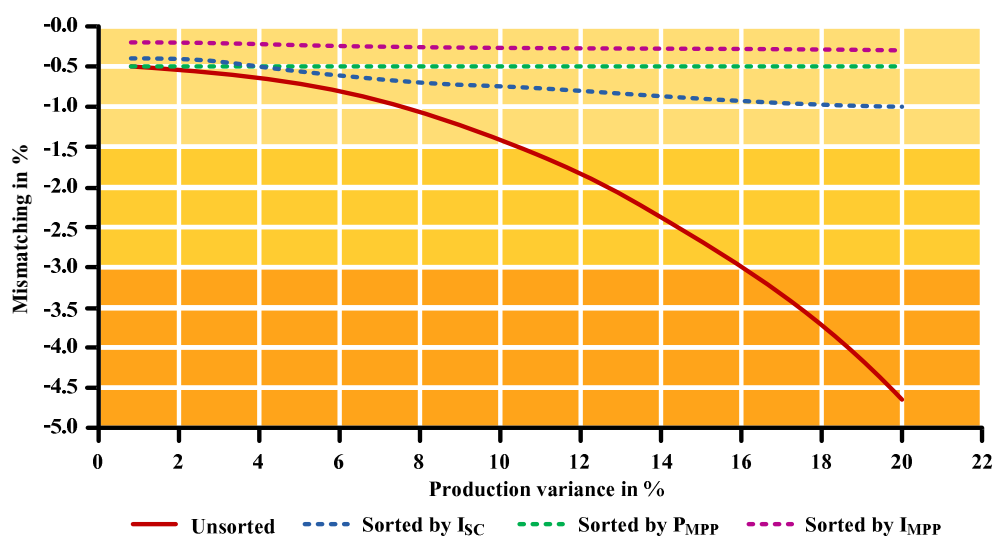
ค. การบังเงาในบริเวณโดยรอบ

2. รูปแบบระบบ พิจารณาจากอินเวอร์เตอร์ที่ต้องการใช้งาน ได้แก่ ระบบแบบรวมศูนย์ (Centralize) และระบบแบบแยกศูนย์ (Decentralized) ซึ่งส่งผลต่อวิธีการต่อวงจรแผงเซลล์เพื่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ให้มีการสูญเสียเนื่องจากความไม่สอดคล้องของอุปกรณ์ (Mismatch Losses) ผลกระทบดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 2.13 ซึ่งหากแผงเซลล์มีค่าเบี่ยงเบน (Production Variance) ของแต่ละแผงเท่ากับ  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์นำมาต่ออนุกรม (Series Unsorted) จะมี Mismatch Losses ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ หากแผงเซลล์จัดเรียงโดยใช้ผลลัพธ์ของกระแสตรงที่มีค่าเบี่ยงเบนของแต่ละแผง  $\pm 5$  เปอร์เซ็นต์จะมี Mismatch Losses เพียง 0.2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากภาพที่ 2.13 หากพิจารณาการจัดเรียงแผงเซลล์ควรพิจารณาที่กระแสที่ก้ำกึ่งสูงสุด



ตารางที่ 2.1 พื้นที่ของแผงเซลล์โดยประมาณเพื่อผลิตไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์สูงสุดตามชนิดของเซลล์ [17]

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	พื้นที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการ สำหรับ 1 กิโลวัตต์สูงสุด (ตารางเมตร)	
เซลล์แบบผลึกเดี่ยว	7 - 9	
เซลล์แบบผลึกเดี่ยวประสิทธิภาพสูง	6 - 7	
เซลล์แบบหลายผลึก	7.5 - 10	
Copper indium diselenide (CIS)	9 - 11	
Cadmium telluride (CdTe)	12 - 17	
เซลล์แบบอะมอร์ฟัส	14 - 20	

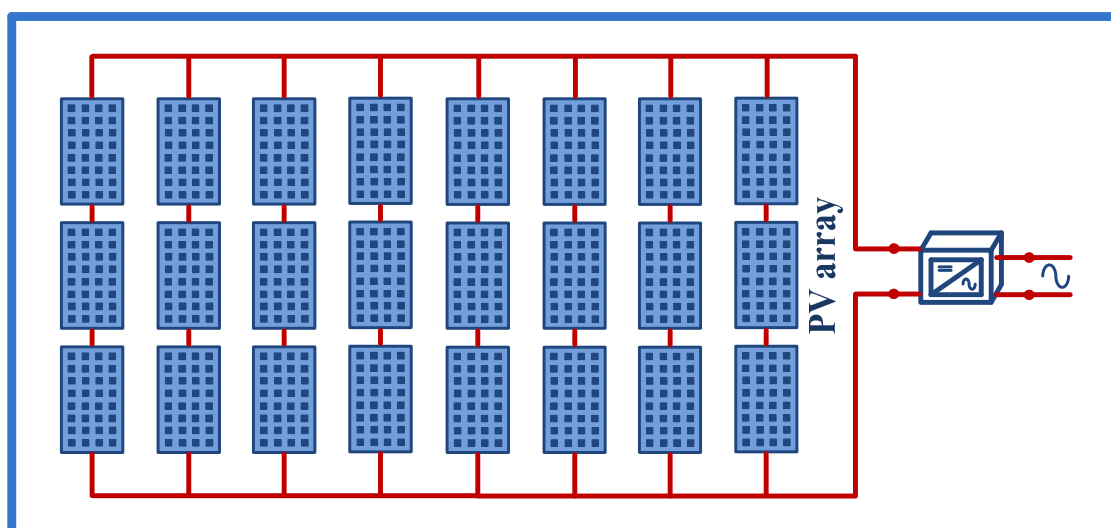


ภาพที่ 2.13 การสูญเสียและข้อพิจารณาในการจัดเรียงแผงเซลล์ [17]

อินเวอร์เตอร์สามารถใช้งานได้ทั้งในรูปแบบรวมศูนย์ แบบสตริงอินเวอร์เตอร์ (String Inverter) และแบบโมดูลอินเวอร์เตอร์ (Module Inverter) ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งานสำหรับการใช้งานในรูปแบบแยกศูนย์จะเหมาะสมกับระบบ ซึ่งแผงเซลล์มีทิศทางการติดตั้งและมุมติดตั้งแตกต่างกัน หรือระบบที่มีการบังเงา




### ก. รูปแบบรวมศูนย์ Central

**แบบแรงดันต่ำ** หากแรงดันจากแผงเซลล์อยู่ในช่วงแรงดันต่ำ ( $UDC < 120 \text{ V}$ ) การต่อวงจรแผงเซลล์ในสตริงจะใช้แผงเซลล์ไม่มาก (ประมาณ 3 ถึง 5 แผง) ภาพที่ 2.14 แสดงไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบแรงดันต่ำ ข้อดีของการต่อวงจรแผงเซลล์เมื่อสตริงสั้น คือ หากเกิดการบังเงาขึ้นจะส่งผลกระทบต่อระบบน้อยกว่าสตริงยาว เนื่องจากกระแสเหลือค้างจากสตริงอื่นๆ ที่ไม่ถูกบังเงาจะไหลไปยังอินเวอร์เตอร์ นอกจากนี้การที่แรงดันต่ำกว่า 120 โวลต์ จึงเป็นไปได้ที่จะออกแบบระบบโดยใช้อุปกรณ์ที่มีระบบการป้องกันใน Class III ได้ โดยที่ ตารางที่ 2.2 แสดงระดับการป้องกันของอุปกรณ์ไฟฟ้า ข้อเสียจะเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไหลในระบบมาก ดังนั้นสายไฟจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่หรืออินเวอร์เตอร์ต้องอยู่ใกล้กับระบบแผงเซลล์ (array) เพื่อลดผลของ Ohmic losses ทั้งนี้ การใช้งานจริงจึงเหมาะกับระบบแบบ building integrated system ซึ่งการออกแบบแผงเซลล์เฉพาะแต่ละการติดตั้งระบบ

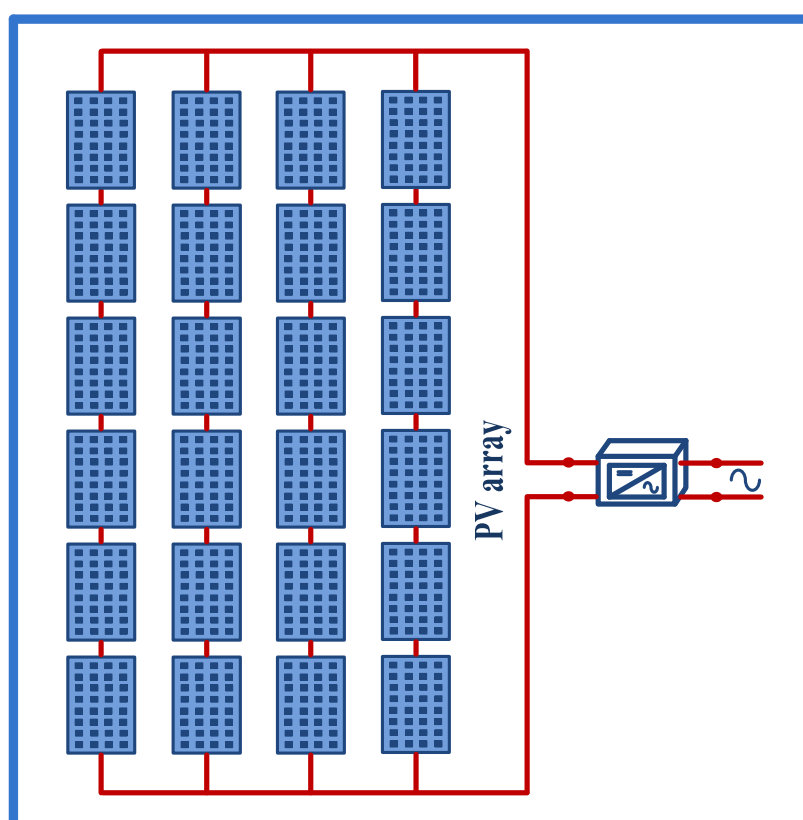


ภาพที่ 2.14 ไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบแรงดันต่ำ

ตารางที่ 2.2 ระดับการป้องกันของอุปกรณ์ไฟฟ้า [17]

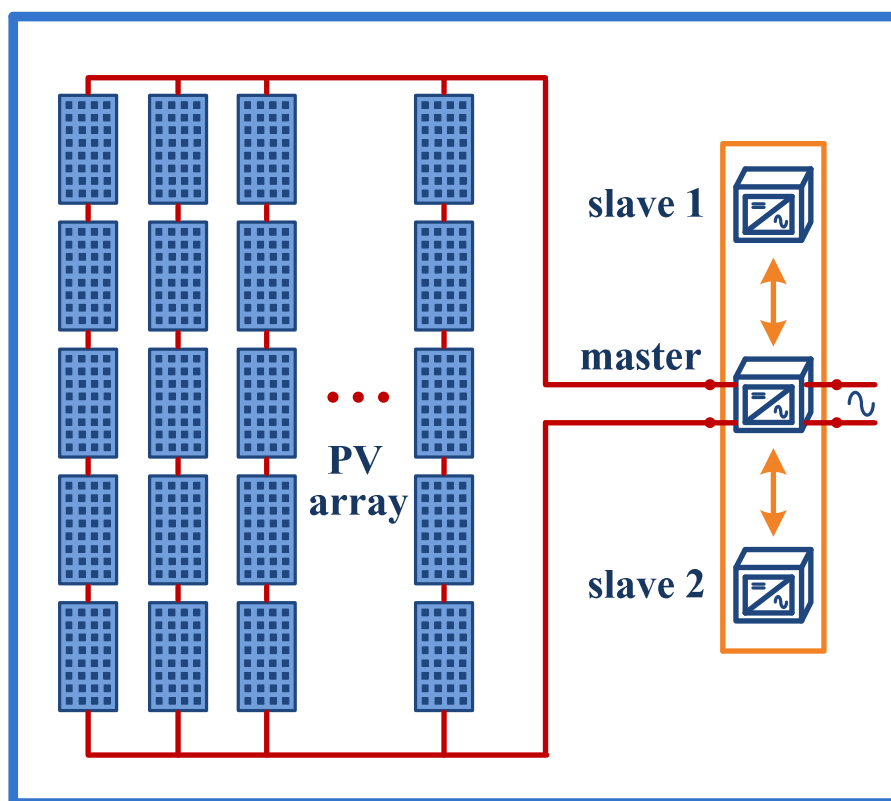
การแบ่งระดับ		สัญลักษณ์
Class II	อุปกรณ์ประเภทกราวด์	
	ฉนวนป้องกัน	
Class III	ความปลอดภัยที่แรงดันต่ำมาก (ค่าสูงสุดทางไฟฟ้ากระแสตรง 50 โวลต์ และค่าสูงสุดทางไฟฟ้ากระแสสลับ 120 โวลต์)	

**แบบแรงดันสูง** รูปแบบนี้ต้องการอุปกรณ์ที่มีระดับการป้องกัน Class II เพื่อต่อวงจรแผงเซลล์ในสตริงเป็นจำนวนมาก (UDC > 120 V) ภาพที่ 2.15 แสดงไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์แบบแรงดันสูง ข้อดีของแบบแรงดันสูงคือ สายไฟมีขนาดเล็กลงเนื่องจากกระแสในระบบน้อย สำหรับข้อเสียคือการบังเงาจะส่งผลกระทบต่อระบบเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 2.15 ไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบแรงดันสูง

แบบ **Master – Slave** ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ที่ใช้รูปแบบรวมศูนย์มักใช้อินเวอร์เตอร์ ในแบบนี้คือมีอินเวอร์เตอร์มากกว่าหนึ่งตัว โดยแบ่งพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ออกไปให้อินเวอร์เตอร์มาสเตอร์ (Master) ทำงานในช่วงความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำ จนกระทั่งความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นได้กำลังไฟฟ้ามากกว่าอินเวอร์เตอร์มาสเตอร์ทำงานได้ จึงให้อินเวอร์เตอร์สลาฟ (Slave) ทำงานภาพที่ 2.16 แสดงไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบ Master - Slave ข้อแนะนำคือ ควรให้ทำหน้าที่สลับกันเป็นรอบ (Rotating Master) เพื่อให้ทำงานที่ภาระเฉลี่ยเท่ากัน ข้อดี ของแบบ Master - Slave คือ ทำให้ประสิทธิภาพรวมของระบบในขณะความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำ ดีกว่าการใช้อินเวอร์เตอร์ เพียงตัวเดียวแต่จะทำให้ค่าลงทุนสำหรับอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น

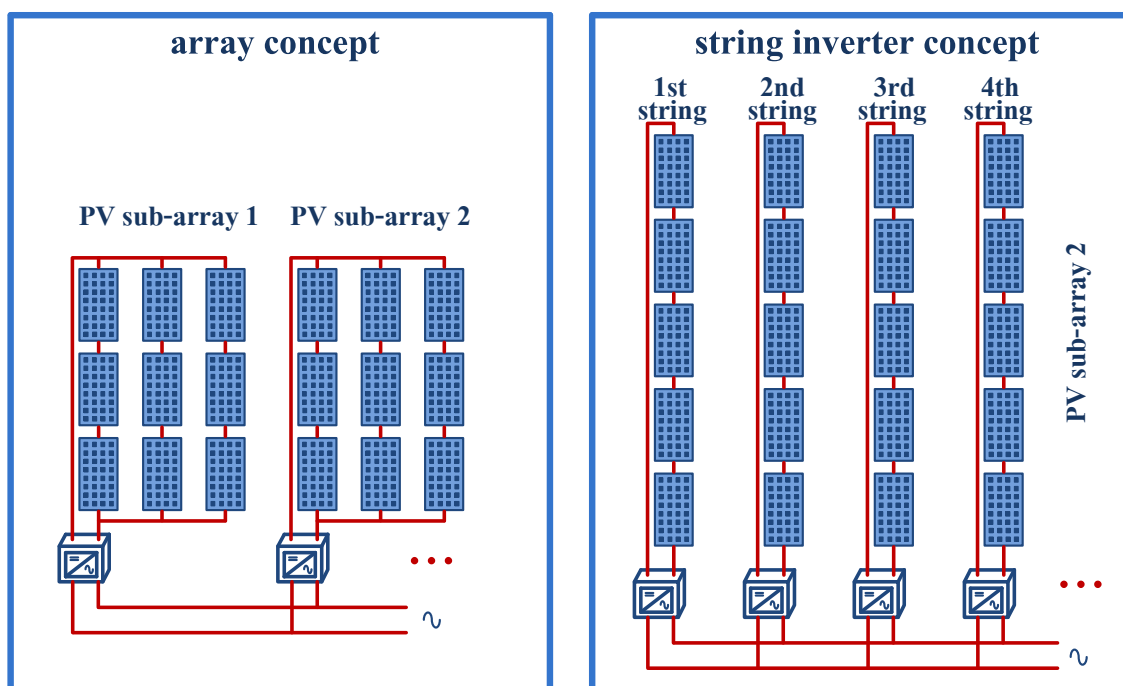


ภาพที่ 2.16 ไดอะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบ Master – Slave

ข. รูปแบบระบบย่อย และสตริงอินเวอร์เตอร์

ส่วนใหญ่ระบบขนาด 3 กิโลวัตต์ขึ้นไปนั้น นิยมใช้งานอินเวอร์เตอร์ ในรูปแบบสตริงอินเวอร์เตอร์ หากระบบใหญ่มากขึ้นหรือเป็นระบบขนาดกลางจะใช้อินเวอร์เตอร์ในรูปแบบระบบ

ย่อย โดยที่ไดอะแกรมระบบย่อยและสตริงอินเวอร์เตอร์ แสดงในภาพที่ 2.17 ข้อดีคือ ทำให้ปรับพิคกิ้งกำลังของระบบตามสภาพของความเข้มแสงอาทิตย์ได้ดี โดยในแต่ละระบบย่อยหรือสตริงต้องมีทิศทางและมุมเดียวกันในการติดตั้ง ส่วนข้อเสียคือเมื่อเกิดการบังเงาจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียมาก นั่นคือข้อดีจากการใช้งานอินเวอร์เตอร์ต่อโดยตรงกับสตริงเทียบกับรูปแบบรวมศูนย์ คือ 1. ไม่ต้องมีการเชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือกล่องเชื่อมต่อระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ (Junction Box) 2. ลดจำนวนสายไฟและไม่ต้องใช้สายเมนไฟฟ้ากระแสตรง



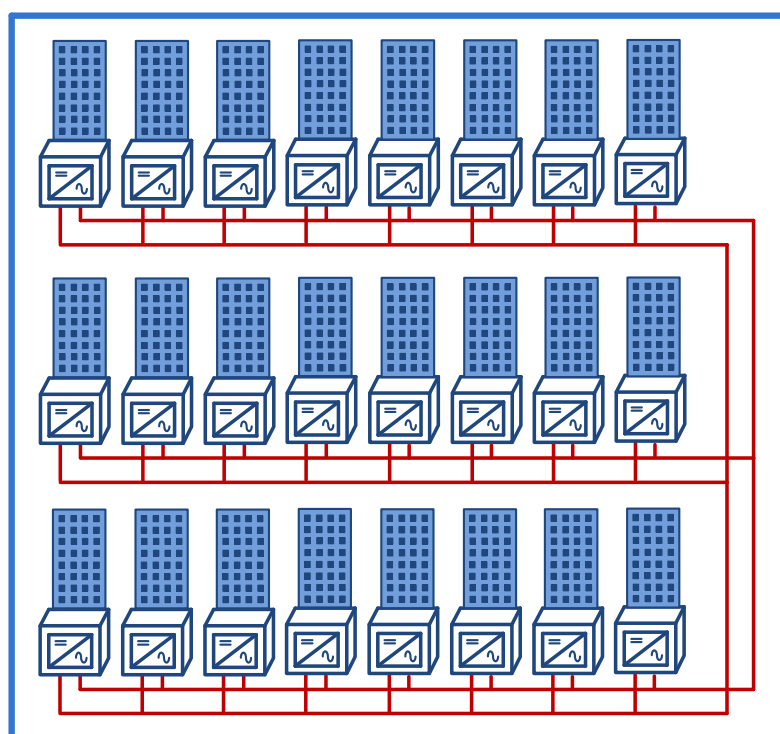
ภาพที่ 2.17 ไดอะแกรมระบบย่อย และสตริงอินเวอร์เตอร์

ก. รูปแบบโมดูลอินเวอร์เตอร์ (module inverter)

รูปแบบนี้มีแนวคิดจากความต้องการให้แต่ละแผงเซลล์ทำงานที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพรวมของระบบสูง มีวิธีการทำโดยการนำอินเวอร์เตอร์ไปติดไว้ที่แผงเซลล์แต่ละแผง ซึ่งอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้เรียกว่า AC Module มีขนาดเล็กสามารถติดตั้งไว้ภายในกล่องเชื่อมต่อ (Junction Box) ของแผงเซลล์ได้ ในภาพที่ 2.18 ไดอะแกรมของโมดูลอินเวอร์เตอร์รูปแบบนี้มีข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ระบบสามารถต่อขยายได้เรื่อยๆ ซึ่งรูปแบบอื่นไม่สามารถทำได้ ส่วนใหญ่แล้วอินเวอร์เตอร์แบบนี้มักจะถูกล่าว่าประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์ซึ่งใน

ความเป็นจริงเมื่อมองในภาพรวมของระบบแล้วนั้นประสิทธิภาพต่ำกว่าเพียงเล็กน้อยนี้จะถูกชดเชยด้วยการทำงานที่จุดกำลังสูงสุดตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม AC Module ยังมีราคาสูง

การใช้งาน AC Module ต้องมั่นใจว่าอินเวอร์เตอร์ในระบบซึ่งชำรุดเสียหายต้องสามารถเปลี่ยนใหม่ได้ง่าย ซึ่งทำให้มีการติดตามการทำงานของอินเวอร์เตอร์แต่ละตัว รูปแบบโมดูลอินเวอร์เตอร์เหมาะสำหรับระบบ Facade-Integrated โดยเฉพาะหากมีการบังเงาเป็นจุดๆ โดยรอบ



ภาพที่ 2.18 ไลอะแกรมของโมดูลอินเวอร์เตอร์

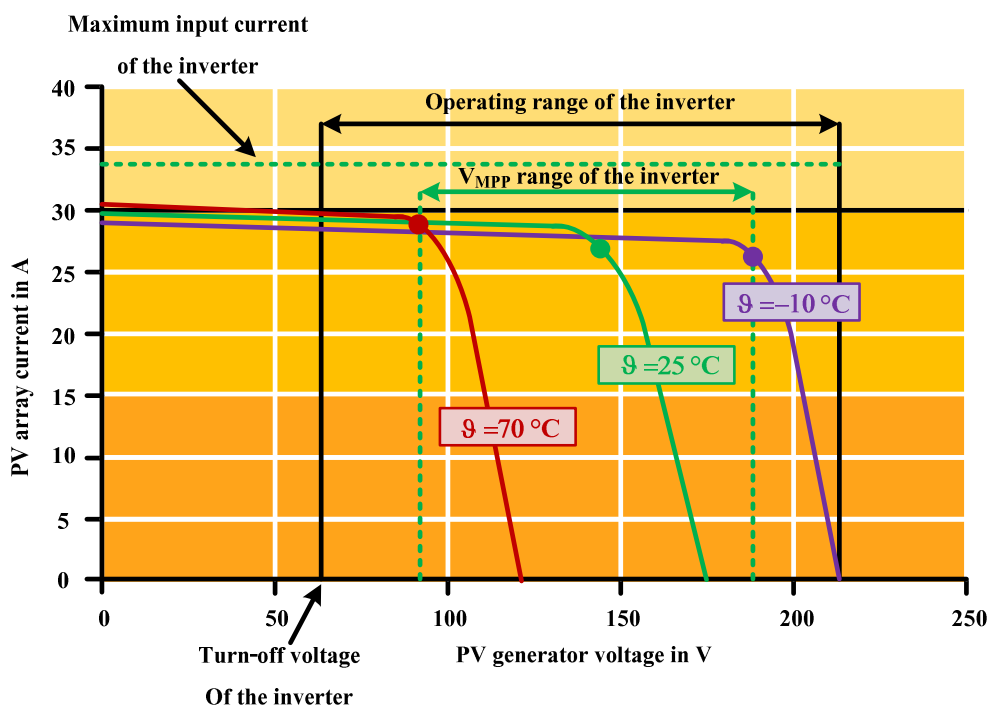
#### ง. การเลือกฟักัดอินเวอร์เตอร์

ข้อกำหนดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผู้ผลิตระบุไว้จะมีข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกฟักัดอินเวอร์เตอร์และการติดตั้ง ผู้ใช้งานควรศึกษาข้อมูลดังกล่าวด้วยเพื่อใช้ในการออกแบบการเชื่อมต่อระบบ ระบบแรงดัน และฟักัดกำลังของอินเวอร์เตอร์

การเลือกจำนวนของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องใช้และฟักัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ จำนวนของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องใช้และฟักัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ หาได้จากกำลังไฟฟ้าของระบบและรูปแบบของระบบ ตัวอย่างการเลือกอินเวอร์เตอร์ของประเทศเยอรมันจะใช้แนวทางVDEW guideline ซึ่งระบุ

ให้ระบบ 1 เฟสสามารถยอมให้ป้อนกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) เท่ากับ 4.6 kVA หากมีค่าสูงกว่านี้ ต้องใช้ระบบหลายเฟสหรือระบบ 3 เฟส นอกจากนี้ VDEW guideline ยอมให้อินเวอร์เตอร์ป้อนกำลังไฟฟ้าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าระบุ 10 เปอร์เซ็นต์เข้าสู่ระบบจำหน่าย ในการออกแบบระบบจำเป็นต้องเลือกให้แผงเซลล์ และอินเวอร์เตอร์มีความสอดคล้องเหมาะสมซึ่งกันและกัน โดยที่ให้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าระบุอยู่ในช่วงระหว่าง  $\pm 20$  เปอร์เซ็นต์ ของกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน (STC) ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์และแผงเซลล์ที่เลือกใช้และตำแหน่งของระบบ ได้แก่ สภาวะของความเข้มแสงอาทิตย์ในแต่ละพื้นที่ อาศัยความสัมพันธ์ดังนี้  $0.8 \times P_{PV} < P_{INV DC} < 1.2 \times P_{PV}$  หากเป็นอินเวอร์เตอร์ซึ่งต้องใช้งานภายนอกอาคาร อาจต้องเลือกพิกัดอินเวอร์เตอร์ให้สูงไว้ก่อนเนื่องจากอินเวอร์เตอร์อาจต้องทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ (โดยปกติข้อกำหนดทางเทคนิคจะระบุกำลังไฟฟ้าเมื่อทำงานที่อุณหภูมิปกติ 25 องศาเซลเซียส) หากใช้งานในพื้นที่พิเศษอาจต้องสอบถามกับผู้ผลิตเพิ่มเติม แต่หากแผงเซลล์เป็นเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของแผงเซลล์ซึ่งลดลงเป็นอย่างมากจากการใช้งานในช่วงเดือนแรกประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะมีประสิทธิภาพคงที่และแน่นอนว่าจะส่งผลกับการเลือกพิกัดของอินเวอร์เตอร์ โดยเฉพาะพิกัดแรงดันและพิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์

การเลือกพิกัดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ พิจารณาได้จากแรงดันจากแผงเซลล์ในหนึ่งสตริง แต่เนื่องจากแรงดันของแผงเซลล์ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของแผงเซลล์ ดังนั้นอาจต้องนำผลเหล่านี้มาพิจารณาในการเลือกพิกัดแรงดันของอินเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปแรงดันของแผงเซลล์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ ให้พิจารณาจากกราฟกระแส-แรงดัน (I-V curve) ของแผงเซลล์ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และ MPP tracker ของอินเวอร์เตอร์ทำงานที่ จุดกำลังสูงสุดเสมอ ดังภาพที่ 2.19 จะเห็นว่าจุดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ เปลี่ยนตามอุณหภูมิโดยมีช่วงแรงดันในการทำงานในช่วงหนึ่ง



ภาพที่ 2.19 กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ [17]

จากภาพที่ 2.19 สังเกตว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงแรงดันของแผงเซลล์จะเพิ่มขึ้น ซึ่งแรงดันสูงสุดของแผงเซลล์คือ แรงดันขณะเปิดวงจรหากอินเวอร์เตอร์หยุดการทำงานแล้ว เช่นระบบจำหน่ายเกิดฟอลต์ขึ้นและอินเวอร์เตอร์ทำงานอีกครั้งจะทำให้แผงเซลล์อยู่ในสถานะเปิดวงจร ดังนั้นพิกัดแรงดันอินพุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์ (Maximum DC Input Voltage) ต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่ง คืออินเวอร์เตอร์ต้องไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นจำนวนแผงเซลล์ที่มากที่สุด ในหนึ่งสตริงหาได้จากพิกัดแรงดันอินพุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์หารด้วยแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์ที่อุณหภูมิต่ำสุดซึ่งแผงเซลล์ทำงาน (ประเทศเยอรมันกำหนดที่ -10 องศาเซลเซียส) สามารถคำนวณหาแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้จากค่า AV (หน่วยเป็นมิลลิโวลต์/องศาเซลเซียส) ของแผงเซลล์ซึ่งผู้ผลิตแผงเซลล์จะระบุมาให้และแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์ที่สถานะมาตรฐาน

เมื่ออุณหภูมิของแผงเซลล์เพิ่มสูงขึ้น (อุณหภูมิมิระหว่างหลังคา กับแผงเซลล์อาจสูงถึง 60 องศาเซลเซียส) ซึ่งอาจจะเกิดเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์สูงมากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้แรงดันของแผงเซลล์ลดลงต่ำกว่าที่ระบุไว้ในสถานะมาตรฐาน หากแรงดันของแผงเซลล์ต่ำกว่าพิกัดแรงดันต่ำสุดของ



อินเวอร์เตอร์นั้น อินเวอร์เตอร์อาจจะหยุดการทำงาน ดังนั้นจำนวนแผงเซลล์ ที่น้อยที่สุดในหนึ่งสตริง หาได้จากพิกัดแรงดันอินพุตต่ำสุดของอินเวอร์เตอร์ (Minimum DC Input Voltage)หารด้วยแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์ที่อุณหภูมิสูงสุดซึ่งแผงเซลล์ทำงาน (ประเทศเยอรมันกำหนดที่ 70 องศาเซลเซียส) ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาและระบบ facade-integrated อาจจะมีอุณหภูมิสูงถึง 100 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทไหลเวียนของอากาศภายหลังแผงเซลล์ นอกจากนี้การบังเงายังทำให้แรงดันของแผงเซลล์ลดลงอีกด้วย ซึ่งควรใช้โปรแกรมจำลองผลของแรงดันเพื่อให้ได้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจด้วย

#### จ. การหาจำนวน string

ในขั้นตอนสุดท้ายของการเลือกพิกัดของอินเวอร์เตอร์ควรแน่ใจว่ากระแสสูงสุดของแผงเซลล์ไม่เกินกว่ากระแสอินพุตสูงสุด ของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นจำนวนสตริงสูงสุดจึงเท่ากับกระแสอินพุตสูงสุดของอินเวอร์เตอร์หารด้วยกระแสสูงสุดในแต่ละสตริง

#### 2) แบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Array Model)

โดยจะเป็นการพัฒนาแบบจำลองด้วยการคำนวณกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของ  $P_G^{DC}$  ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และชุดปรับสภาพแวลลุ่ม [6]

$$P_G^{DC} = P_G^{DC} (\text{ระดับของแผงเซลล์ การปรับสภาพแวลลุ่ม}) \quad (2.3)$$

แบบจำลองนี้จะใช้ในการวางแผนและดำเนินการจำกัดจำนวนของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์และการปรับสภาพแวลลุ่มจะเป็นการหาเอาต์พุต โดยที่ในส่วนอินพุตที่ใช้จะเป็นขนาดและรูปแบบการเชื่อมต่อของแผงเซลล์หรืออาร์เรย์ (Array) ซึ่งจะเป็นการจำกัดระดับของกำลังไฟฟ้า การปรับสภาพแวลลุ่มจะเป็นการจำกัดค่าการรับรังสีของระบบของแผงเซลล์ ด้วยการหาค่ากำลังการผลิตของกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิโดยรอบ ซึ่งจะมีผลกระทบอย่างมากในการจัดการแรงดัน ซึ่งรายการของอินพุตของแบบจำลองมีรายละเอียดดังนี้

- ระดับกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์ หรืออาร์เรย์:

$P_{ra}$  คือ ระดับกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของอาร์เรย์ (W)

- ข้อกำหนดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์:

$V_{ocM}$  คือ แรงดันเปิดวงจรของโมดูล (V)

$I_{scM}$  คือ กระแสลัดวงจรของ โมดูล (A)

$(I_{mM}, V_{mM})$  คือ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูล (A, V)

$P_{rM}$  คือ ระดับกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูล (W)

NOCT คือ อุณหภูมิของเซลล์ขณะทำงานปกติ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\left(\frac{\partial I_{scM}}{\partial T_c}\right), \left(\frac{\partial V_{ocM}}{\partial T_c}\right)$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ

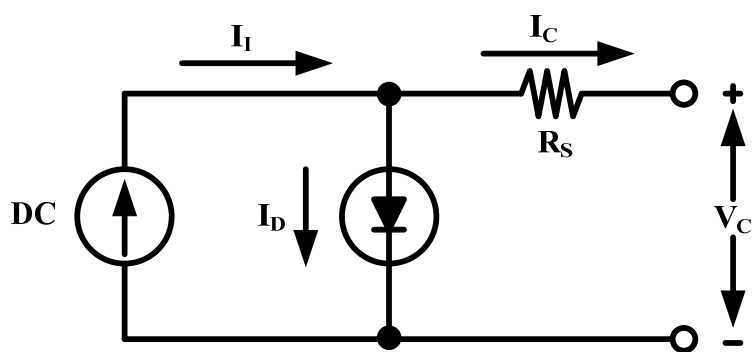
$N_{cs}$  คือ จำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันในโมดูล

- เงื่อนไขการปรับสภาพแวดล้อม:

$G$  คือ ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$T_A$  คือ อุณหภูมิโดยรอบ ( $^{\circ}\text{C}$ )

1. สมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช่ในทางอุดมคติ



ภาพที่ 2.20 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีความต้านทานแบบขนาน [6]

$$I_c = I_1 - I_o \left( e^{\frac{(V_c + I_c R_s)q}{nkT_{ck}}} - 1 \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ

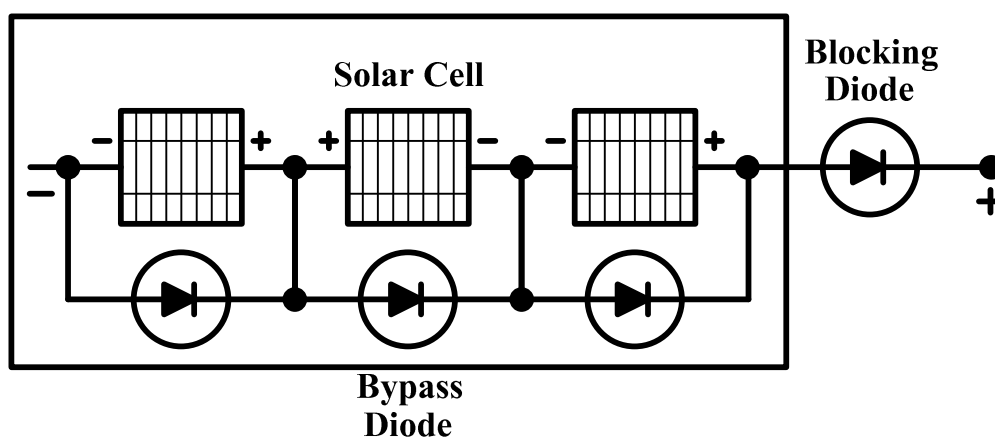
- $I_c$  คือ กระแสไฟฟ้าของเซลล์ (A)
- $I_{sc}$  คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ (A)
- $I_1$  คือ กระแสโฟโตนิกของเซลล์ (A)
- $I_o$  คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด (A)
- $V_c$  คือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์ (V)
- $R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรม
- $q$  คือ  $1.6 * 10^{-19}$  (coul)
- $k$  คือ  $1.38 * 10^{-23}$  (j/K)
- $T_{ck}$  คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)

$n$  คือ ค่าคงที่ที่ไม่ใช่ในทางอุดมคติของไดโอด

Note:  $I_l = I_{sc}$

แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่คิดผลกระทบของความต้านทานแบบขนานเพราะมีค่านี้น้อยมาก แสดงดังภาพที่ 2.20 การอธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าของวงจรนี้จะแสดงดังสมการที่ 2.4 ซึ่งก็คือรูปแบบวงจรที่จะใช้ในการจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของสมการที่ 2.4 สามารถกำหนดได้จากพารามิเตอร์ที่ระบุไว้ สมการนี้เป็นการสร้างบล็อกพื้นฐานของแบบจำลองของอาร์เรย์โดยจะนำมาใช้สร้างบล็อกของอาร์เรย์จริง สมการขณะนี้อาจต้องมีการแก้ไขเพื่อให้เป็นรูปแบบการทำงานของอาร์เรย์

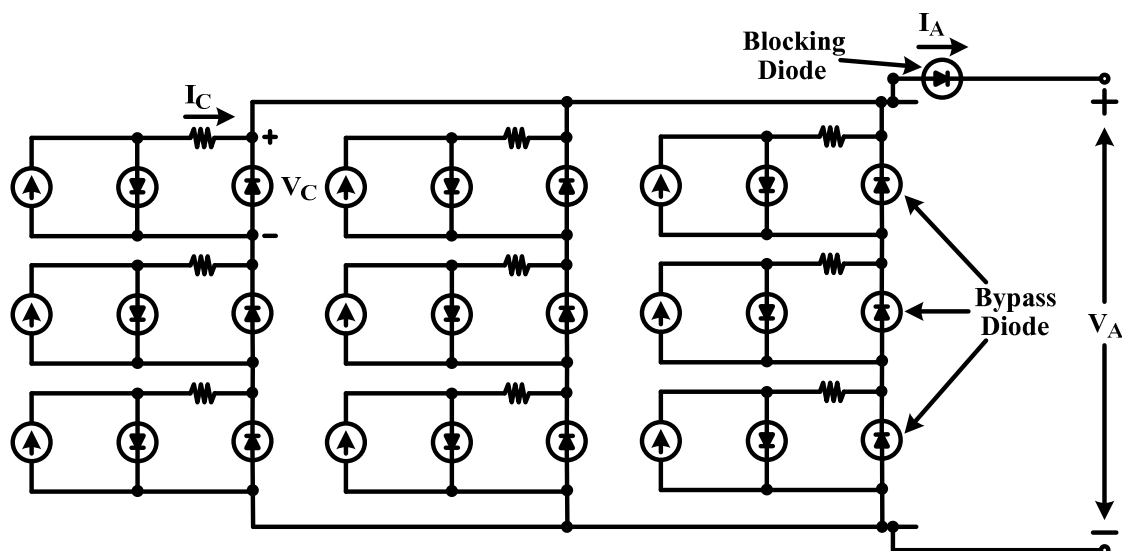
2. การแปลงสมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นสมการคุณลักษณะแบบอาร์เรย์



ภาพที่ 2.21 สตริงของเซลล์ที่มีการต่อบายพาสไดโอด และบล็อกกิ้งไดโอด [6]

โดยที่วัตถุประสงค์ของแบบจำลองของอาร์เรย์ จะสมมติให้กระแสและแรงดันของแต่ละเซลล์ในอาร์เรย์เป็นแบบภาพที่ 2.21 โดยมีเหตุผลที่สำคัญสองประการคือประการแรกจะช่วยให้มั่นใจว่าไดโอดที่ต่อแบบบายพาสไว้จะไบอัสย้อนกลับและจะถือว่าเป็นการเปิดวงจร และไดโอดที่ต่อแบบบล็อกกิ้งไว้จะไบอัสข้างหน้าและจะถือว่าเป็นการลัดวงจร ประการที่สองเพื่อให้แน่ใจว่าในส่วนของเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการที่ (2.4) นั้น อาจถูกปรับลดขนาดในลักษณะเชิงเส้นบนพื้นฐานของการเชื่อมต่อแบบอนุกรมและแบบขนานของเซลล์ เพราะพารามิเตอร์ของเลขชี้กำลัง  $V_c$ ,  $I_c$  และ  $T_{ck}$

จะเหมือนกันสำหรับแต่ละเซลล์ สำหรับแบบจำลองของอาร์เรย์แสงอาทิตย์นั้น วงจรจะประกอบด้วยชุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้ประโยชน์จากการเชื่อมต่อแบบอนุกรมและแบบขนานดังแสดงในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 วงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 3×3 [6]

ซึ่งในทางอุดมคติบล็อกกิ้งไดโอด และบายพาสไดโอดจะมีค่า

$I_A$  คือ กระแสไฟฟ้าของอาร์เรย์ (A)

$V_A$  คือ แรงดันไฟฟ้าของอาร์เรย์ (V)

โดยทำการสมมติฐานอย่างง่าย คือ โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบด้วยการเชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว

โมดูลแสงอาทิตย์จำนวนมากใช้สำหรับระบบกริด จะประกอบด้วย 72 เซลล์ เชื่อมต่อในรูปแบบของแผงที่ใช้คือ โมดูลของ Shell รุ่น SQ ขนาด 150 W สมมติฐานอย่างง่ายของขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและสมการคุณลักษณะนั้นใช้เป็นแบบจำลองขั้นสุดท้ายของอาร์เรย์ ด้วยสมมติฐานนี้ในอาร์เรย์สามารถอธิบายง่ายๆ ได้ว่า  $N_s \times N_p$  ของกริดของเซลล์จะดังแสดงภาพที่ 2.22 โดยที่  $N_s$  อธิบายถึงจำนวนของเซลล์ในสตรึง และ  $N_p$  อธิบายถึงจำนวนรวมของสตรึงในอาร์เรย์ ในขณะที่ความเป็นความจริง โมดูลที่มีอยู่จะประกอบด้วยการเชื่อมต่อเซลล์แบบขนาน โดยทั่วไปจะใช้สำหรับการใช้งานที่แรงดันไฟฟ้าต่ำเช่นระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพียงอย่างเดียว มีการสำรองพลังงานด้วยแบตเตอรี่ และไม่ได้นำมาใช้เพื่อเป็นการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบกริด

เนื่องจากผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของการเชื่อมต่อแบบอนุกรม และผลรวมของกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมต่อแบบขนานสามารถประยุกต์ใช้ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} I_A &= N_p I_c \\ I_{scA} &= N_p I_{sc} \\ V_A &= N_s V_c \\ V_{ocA} &= N_s V_{oc} \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $N_s$  คือ จำนวนของการเชื่อมต่อเซลล์แบบอนุกรม

$N_p$  คือ จำนวนของการเชื่อมต่อเซลล์แบบขนาน

$I_{scA}$  คือ กระแสลัดวงจรของอาร์เรย์ (A)

$V_{ocA}$  คือ แรงดันเปิดวงจรของอาร์เรย์ (V)

จากเดิม  $I_1 = I_{sc}$  และทำการแทนค่าเหล่านี้ในสมการที่ (2.4) ซึ่งผลที่ได้จะแสดงดังสมการที่ 2.6

$$I_A = I_{scA} - N_p I_0 \left( e^{\frac{(V_A + I_A R_{sa})q}{nN_s k T_c k}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

รูปแบบที่แสดงข้างต้นเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับโดยทั่วไปสำหรับการปรับสมการคุณลักษณะของเซลล์เพื่อสร้างสมการคุณลักษณะของอาร์เรย์ โดยอินพุตของแบบจำลองจะใช้เพื่อพัฒนารูปแบบการรวมพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ โมดูลแสงอาทิตย์แทนที่จะเป็นแบบเซลล์เดี่ยว และทำให้วิธีการปรับนี้จะต้องปรับเปลี่ยนรายการสำหรับอินพุตของโมดูล สิ่งเหล่านี้จะถูกรวบรวมไว้ในส่วนของการเปลี่ยนสมการคุณลักษณะแบบเซลล์ไปเป็นสมการคุณลักษณะแบบอาร์เรย์

3. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างแบบจำลองดังต่อไปนี้

ก. การรูปแบบการเชื่อมต่อของอาร์เรย์ (Array)

รูปแบบการเชื่อมต่อแบบอาร์เรย์หมายถึงจำนวนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อในรูปแบบอนุกรมสำหรับสตริง และจำนวนของสตริงที่ขนานกันใช้สำหรับรูปแบบของอาร์เรย์ สมการคุณลักษณะของอาร์เรย์ต้องการรูปแบบการเชื่อมต่อของโมดูล เพื่อระบุ  $N_s$  และ  $N_p$  แต่ข้อมูลนี้ไม่สามารถใช้ได้ ดังนั้นการกำหนดแบบจำลองจึงเป็นรูปแบบการเชื่อมต่อที่เหมาะสมจากระดับพลังงาน

ที่ต้องการและรายละเอียดของอุปกรณ์ ในหลายกรณี ข้อมูลเฉพาะระบบผู้วางแผนงานหรือ ผู้ปฏิบัติงานจะมีความเกี่ยวข้องกับรูปแบบการเชื่อมต่อที่เป็นระดับกำลังไฟฟ้าขาออก  $P_{rA}$  ของอาร์เรย์ อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกสร้างขึ้น โดยการปรับสมการของเซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ เพื่ออธิบายรูปแบบการเชื่อมต่ออาร์เรย์ที่ต้องการ ดังนั้นจะได้สมการที่ (2.7) ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อกำหนดรูปแบบของการเชื่อมต่อ

$$\begin{aligned} N_{sM} &= \text{ciel}(V_{DC} / V_{mM}); \\ P_{Col} &= N_{sM} \cdot P_{rM}; \\ N_{pM} &= \text{ciel}(P_{rA} / P_{Col}); \\ \text{Actual}P_{rA} &= N_{sM} \cdot N_{pM} \cdot P_{rM}; \end{aligned} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\text{ciel}()$  คือ ฟังก์ชันโดยรอบของค่าจำนวนเต็มสูงสุดถัดไป

$V_{DC}$  คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงปกติที่ต้องการ (ปกติ 500 V)

$N_{sM}$  คือ จำนวนของโมดูลที่ต้องการอนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่า  $V_{DC}$

$P_{Col}$  คือ ระดับกำลังไฟฟ้าของ 1 สตริงของโมดูล  $N_{sM}$

$N_{pM}$  คือ จำนวนของสตริงที่อนุกรมกันเพื่อเชื่อมต่อในแบบขนาน

เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ คือ  $P_{rA}$  ประการแรกจำนวนขั้นต่ำของโมดูลที่อนุกรมกัน  $N_{sM}$  นั้นมีจำเป็นเพื่อให้บรรลุความต้องการแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ระดับปฏิบัติการจะถูกกำหนด ประการที่สองระดับพลังงานของสตริงของโมดูล  $P_{Col}$  นี้จะถูกคำนวณ ประการที่สามจำนวนขั้นต่ำของสตริง นั้นมีจำเป็นเพื่อให้บรรลุความต้องการกำลังไฟฟ้า  $N_{pM}$  จะถูกกำหนด และประการที่สี่ระดับพลังงานที่แท้จริงของระบบที่จะถูกรวมเข้ากับการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเป็นการคำนวณ

การสร้างรูปแบบอาร์เรย์พลังงานแสงอาทิตย์ในลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องนั้น ขณะที่ระดับกำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์โดยรวมเท่านั้นที่สามารถเพิ่มขึ้นในขั้นตอนที่สอดคล้องกับขนาดของระดับกำลังไฟฟ้าของ 1 สตริงของโมดูล ดังนั้นสำหรับระดับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการจะเป็นการออกแบบอาร์เรย์ด้วยระดับที่มากกว่าหรือเท่ากับกำลังขาเข้าโดยผู้ใช้งาน วิธีการจะเป็นการพิจารณาแบบดั้งเดิม ตั้งแต่การศึกษาผลกระทบในระบบของการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ เช่นความไม่สมดุลของเฟสความต้องการโดยรวมที่เพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงของกราฟเส้นโค้งขณะที่ระดับพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบเพิ่มขึ้น โดยเป็นข้อสังเกตว่าระดับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นขอบเขตเพราะในส่วนที่เกินจากการประมาณไว้ไม่เกินกำลังไฟฟ้าของ 1 สตริงของโมดูล ขนาดของ 1 สตริงของโมดูลจะเป็นการจำกัด เพราะมันขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้าของวิธีการ

ปรับสถานะของกำลังไฟฟ้า ผลกระทบของการประเมินค่าสูงเกินไปจะเป็นการลดลงที่มีความสำคัญอย่างมาก โดยจากข้อเท็จจริงที่ว่าการใช้ประโยชน์บนพื้นฐานของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของแต่ละบัสจะแสดงให้เห็นถึงการรวมกันของบัส เช่น บนขั้วของหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งจะหมายถึงจำนวนของโหลด ดังนั้นบนระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะแสดงถึง การรวมกันทั้งหมดของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะหมายถึงบัส และสำหรับระบบที่รวมกันมากเกินไปนี้จะเป็นการจำกัด 1 สตริงของโมดูล

ข. แปลงสมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นสมการคุณลักษณะของอาร์เรย์ (Array)

เมื่อรูปแบบการเชื่อมต่อเป็นการกำหนดสมการคุณลักษณะที่ต้องปรับขึ้นเพื่ออธิบายพฤติกรรมของอาร์เรย์ทั้งหมดนี้จะทำตามสมการที่ (2.5) และ (2.6) อย่างไรก็ตามมันเป็นสิ่งสำคัญสำหรับที่จะทำให้ทราบค่า  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  และ  $P_r$  จะได้รับจากระดับของโมดูล ดังนั้นขั้นตอนที่มีการแก้ไขในการปรับระดับที่เหมาะสมจากระดับของโมดูลถึงระดับของอาร์เรย์

$$\begin{aligned} I_{scA} &= I_{scM} \cdot N_{sM} \\ V_{ocA} &= V_{ocM} \cdot N_{sP} \\ P_{rA} &= N_{sM} \cdot N_{sP} \cdot P_{rM} \end{aligned} \quad (2.8)$$

- เมื่อ  $I_{scA}$  คือ กระแสลัดวงจรของอาร์เรย์ (A)  
 $V_{ocA}$  คือ แรงดันเปิดวงจรของอาร์เรย์ (V)  
 $I_{scM}$  คือ กระแสลัดวงจรของโมดูล (A)  
 $V_{ocM}$  คือ แรงดันเปิดวงจรของโมดูล (V)  
 $N_{sM}$  คือ จำนวนของโมดูลที่ต้องการอนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่า  $V_{DC}$   
 $P_{rA}$  คือ ระดับกำลังไฟฟ้ากระแสตรงขาออกของอาร์เรย์ (W)  
 $P_{rM}$  คือ ระดับกำลังไฟฟ้าขาออกของโมดูล (W)

จำนวนของเซลล์ในการอนุกรมเป็นการผลิตของจำนวนของเซลล์ที่อนุกรมในโมดูล  $N_{cs}$  และจำนวนของโมดูลในสตริง  $N_{sM}$  โดยที่จำนวนของการเชื่อมต่อแบบขนานของเซลล์เป็นเพียงตัวเลขของสตริงที่ขนานกันของ โมดูล

$$\begin{aligned} N_s &= N_{cs} \cdot N_{sM} \\ N_p &= N_{sP} \end{aligned} \quad (2.9)$$

- เมื่อ  $N_s$  คือ จำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบอนุกรม  
 $N_{cs}$  คือ จำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมในโมดูล  
 $N_{sM}$  คือ จำนวนของโมดูลในสตริง  
 $N_p$  คือ จำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน

เมื่อการคำนวณเหล่านี้ได้รับการดำเนินการแทนค่าที่เหมาะสมสามารถทำได้ดังสมการที่ 2.10 จะเป็นรูปแบบของสมการคุณลักษณะของกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่จะใช้แบบจำลองของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์

$$I_A = I_{scA} - N_p I_0 \left( e^{\frac{(V_A + I_A R_{sA})q}{n N_s k T_{cK}}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

- เมื่อ  $I_A$  คือ กระแสของอาร์เรย์ (A)  
 $V_A$  คือ แรงดันของอาร์เรย์ (V)  
 $I_{scA}$  คือ กระแสลัดวงจรของอาร์เรย์ (A)  
 $N_p$  คือ จำนวนของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน  
 $R_{sA}$  คือ ความต้านทานอนุกรมของอาร์เรย์  
 $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัวของไดโอด (A)  
 $T_{cK}$  คือ อุณหภูมิของเซลล์ (K)  
 $q$  คือ  $1.6 * 10^{-19}$  (coul)  
 $k$  คือ  $1.38 * 10^{-23}$  (j/K)  
 $n$  คือ ค่าคงที่ที่ไม่ใช่ในทางอุดมคติของไดโอด

ค. แก้ปัญหาพารามิเตอร์ของสมการคุณลักษณะของอาร์เรย์ (Array) ซึ่งมีรายละเอียดของขั้นตอนการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

คำนวณค่าความต้านทานอนุกรมของอาร์เรย์  $R_{sA}$ : ความต้านทานอนุกรมของอาร์เรย์จะจำลองเป็นการรวมกันของตัวต้านทานกลุ่มหนึ่งคือที่สมมติให้การทำงานของแต่ละเซลล์มีความสม่ำเสมอ ภายใต้สมการคุณลักษณะที่ถูกปรับสภาพแวดล้อมของทุกๆ เซลล์ จะเป็นการระบุในอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่แผ่นข้อมูลจำเพาะสำหรับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ให้ค่าของความ



ด้านทานอนุกรมสำหรับค่าความต้านทานอนุกรมสามารถคำนวณได้จากพารามิเตอร์ที่มีให้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาพการทดสอบมาตรฐาน พารามิเตอร์ที่จำเป็นจากการคำนวณค่าความต้านทานอนุกรมคือค่า  $V_{ocA}$ ,  $I_{scA}$  และ  $P_{rA}$  โดยที่พารามิเตอร์เหล่านี้หมายถึงอาร์เรย์ทั้งหมด ดังนั้นความต้านทานอนุกรมของอาร์เรย์ทั้งหมดจะได้รับการคำนวณโดยตรง

นอกจากนี้การคำนวณต่อไปนี้จะทำให้การใช้การหาพารามิเตอร์ของค่าฟิลแพกเตอร์ดังนี้

$$FF_A = \frac{V_{rA} I_{rA}}{V_{ocA} I_{scA}} \quad (2.11)$$

ค่าฟิลแพกเตอร์ของอาร์เรย์ให้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังไฟฟ้าขาออกและการผลิตของแรงดันลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจร ในขณะที่ค่าฟิลแพกเตอร์ไม่เคร่งครัดในการวัดค่าของประสิทธิภาพ ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของอาร์เรย์ การวัดนี้จะเป็นประโยชน์เพราะมันมีความเป็นไปได้ที่จะประมาณค่า  $FF_{oA}$  ซึ่งการกำหนดค่าฟิลแพกเตอร์ของอาร์เรย์ที่  $R_{sA} = 0$  ใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.12

$$FF_{oA} = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{1 + v_{oc}} \quad (2.12)$$

$$v_{oc} = \frac{V_{ocA} q}{N_s nkT_{cK}}$$

เมื่อ  $FF_{oA}$  คือ ค่าฟิลแพกเตอร์ของอาร์เรย์ที่ปราศจากความต้านทานอนุกรม

$V_{oc}$  คือ แรงดันเปิดวงจร (V)

$V_{ocA}$  คือ แรงดันเปิดวงจรของอาร์เรย์ (V)

ความสำคัญที่ตามมาคือ  $V_{ocA}$  และ  $I_{scA}$  ยังคงเหมือนเดิมในทั้งสองกรณีของอาร์เรย์ที่มีและไม่มี ความต้านทานอนุกรม ซึ่งช่วยให้เราสามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 2.11) และสังเกตการกำหนดสมการที่ 2.12 ซึ่งเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของความต้านทานอนุกรม โดยที่ตามมาสำหรับค่าของ  $R_{sA}$  จะถูกอธิบายดังนี้

$$\begin{aligned}
P_{rA} &= V_{rA} I_{rA} \\
P_{rA} &= P_{rAwoR} - I_{rA}^2 R_{sA} \\
P_{rA} &= P_{rAwoR} \left( 1 - \frac{I_{rA}}{V_{rA}} R_{sA} \right) \\
\frac{I_{rA}}{V_{rA}} &\approx \frac{I_{scA}}{V_{ocA}}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

เมื่อ  $P_{rAwoR}$  คือ แสดงค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่อาร์เรย์ต้องการถ้า  $R_{sA} = 0$   
 $(V_{rA}, I_{rA})$  คือ แรงดันและกระแสของอาร์เรย์ที่ระดับของกำลังไฟฟ้า

การประมาณค่าแสดงดังสมการที่ 2.13 เป็นการสมมติบนพื้นฐานรูปร่างของคุณลักษณะกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
P_{rA} &= P_{rAwoR} \left( 1 - \frac{I_{scA}}{V_{ocA}} R_{sA} \right) \\
FF &= \frac{P_{rA}}{V_{ocA} I_{scA}} = \frac{P_{rAwoR} \left( 1 - \frac{I_{scA}}{V_{ocA}} R_{sA} \right)}{V_{ocA} I_{scA}} = FF_0 \left( 1 - \frac{I_{scA}}{V_{ocA}} R_{sA} \right)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

โดยที่การแก้ปัญหสำหรับ  $R_{sA}$  จะแสดงไว้ดังสมการที่ 2.15

$$R_{sA} = \frac{V_{ocA}}{I_{scA}} - \frac{P_{rA}}{FF_0 I_{scA}^2} \tag{2.15}$$

ทางเลือกของวิธีการสำหรับการคำนวณของความต้านทานอนุกรม โดยวิธีการมีความต้องการที่จะใช้การกำหนดโดยสังเกตอย่างมากในคุณลักษณะกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์หรืออาร์เรย์ ดังนั้นจะเป็นสิ่งที่ทำไม่ได้สำหรับการใช้งานในขั้นตอนวิธีนี้เพราะรายละเอียดข้อมูลที่จำเป็นมักจะใช้งานไม่ได้

คำนวณค่าของอาร์เรย์ขณะแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรที่มีการปรับสภาพแวดล้อม: ส่วนนี้อธิบายเกี่ยวกับกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรของอาร์เรย์จะเป็นการแปลงจากระดับค่าของ  $I_{scAr}$  และ  $V_{ocAr}$  ค่าที่เหมาะสมจะได้จากสภาวะแวดล้อมของ  $I_{scAE}$  และ

$V_{ocAE}$  ซึ่ง  $I_{scAE}$  ถูกแทนที่โดยตรงในสมการที่ 2.10 และทั้งสอง  $I_{scAE}$  และ  $V_{ocAE}$  ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด  $I_0$  ในภายหลังต่อจากส่วนนี้ ในขณะที่กระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรไม่สามารถอธิบายจุดการทำงานของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงการทำงานปกติจุดการทำงานจะถูกกำหนดจากพารามิเตอร์เหล่านี้ ดังนั้นสำหรับวัตถุประสงค์ของการอภิปรายซึ่งมีความเหมาะสมที่จะสมมติว่าสภาพแวดล้อมมีผลกระทบต่อกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรจะคล้ายกับผลกระทบบนการทำงานของกระแสและแรงดันไฟฟ้าตามลำดับของอาร์เรย์

โดยที่ระดับค่าของ  $I_{scM}$  และ  $V_{ocM}$  จะหาค่าที่เหมาะสมได้จากการสังเกตที่สภาวะทดสอบมาตรฐานดังสมการที่ 2.16 และจะดูได้ในแผ่นข้อมูลจำเพาะของ โมดูล

$$\begin{aligned} G &= 1000 \text{ W/m}^2 \\ T_A &= 25^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (2.16)$$

คลื่นความถี่ของชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Spectrum) = AM 1.5

กระแสไฟฟ้าที่ผลิตโดยเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับรังสีที่ตกกระทบโดยตรงบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกระแสที่ผลิตโดยอาร์เรย์เป็นสัดส่วนของพลังงานขาเข้าในรูปแบบของรังสีแสงอาทิตย์ แรงดันขาออกของอาร์เรย์มีผลกระทบอย่างหนักจากอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพราะความสามารถในการจัดการแรงดันไฟฟ้าของวัสดุของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุ

อุณหภูมิการทำงานปกติของเซลล์หรือค่า NOCT เป็นค่าที่กำหนดโดยการสังเกตภายใต้การแยกชุดของจากสภาวะการทดสอบมาตรฐานของ  $800 \text{ W/m}^2$ ,  $20^\circ\text{C}$  และ AM 1.5 ซึ่งจะถูกใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของเซลล์ที่เป็นการทำงานของอุณหภูมิโดยรอบ

$$T_c = T_a + \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \cdot G (\text{W/m}^2) \quad (2.17)$$

ดังแสดงในสมการที่ 2.18 โดยที่พลังงานขาออกในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานขาเข้าในรูปแบบของการฉายรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่มีขนาดเล็ก  $\left(\frac{\partial I_{scA}}{\partial T_c}\right)$  บนอันดับของค่าไมกิมิลลิแอมป์ต่อองศาเซลเซียส สำหรับการสังเกตของการรับรู้ของอุณหภูมิที่แตกต่าง

$$I_{scAE} = \frac{I_{scAr}}{1000} G + \left( \frac{\partial I_{scA}}{\partial T_c} \right) (T_c - T_{c0}) \quad (2.18)$$

- เมื่อ  $T_c$  คือ อุณหภูมิของเซลล์ ( $^{\circ}C$ )  
 $T_{c0}$  คือ อุณหภูมิของเซลล์ทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน (ปกติ  $25^{\circ}C$ )  
 $T_A$  คือ อุณหภูมิโดยรอบ ( $^{\circ}C$ )  
 NOCT คือ อุณหภูมิปกติของเซลล์ขณะทำงาน  
 $A_r$  คือ แสดงระดับค่าของอาร์เรย์ (จุดกำลังสูงสุดทดสอบที่สภาวะมาตรฐาน)  
 $A_E$  คือ แสดงค่าสำหรับอาร์เรย์ที่ถูกกำหนดสภาพแวดล้อม

แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของอาร์เรย์ภายใต้การกำหนดสภาพแวดล้อมจะเป็นการคำนวณดังสมการที่ 2.19

$$V_{ocAE} \approx V_{ocAr} + \left( \frac{\partial V_{ocA}}{\partial T_c} \right) (T_c - T_{c0}) + \frac{kT_{cK}}{q} \ln \left( \frac{I_{scAE}}{I_{scAr}} \right) \quad (2.19)$$

โดยเมื่ออุณหภูมิของเซลล์เพิ่มขึ้นความสามารถของแรงดันไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำในเซลล์จะลดน้อยลงและทำให้แรงดันที่ตกคร่อมในเซลล์ลดลง ซึ่งสามารถกำหนดโดยผ่านการจัดการของวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิจะเป็นการใส่ค่าสำหรับการพิจารณาสังเกตผลกระทบ ซึ่งเป็นที่มาของสมการนี้

ค่าสำหรับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสเปิดวงจรที่กำหนดสภาพแวดล้อม ค่าเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาสำหรับกระแสอิ่มตัวของไดโอดที่แพร่กระจายออกมา

คำนวณกระแสอิ่มตัวของไดโอดที่แพร่กระจาย  $I_0$ : ทำการแทนที่สำหรับการทำงานภายใต้การกำหนดสภาพแวดล้อมดังสมการที่ 2.10 สามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$I_A = I_{scAE} - N_p I_0 \left( e^{\frac{(V_A + I_A R_{sa})q}{nN_s k T_{cK}}} - 1 \right) \quad (2.20)$$

พารามิเตอร์  $I_0$  จะเป็นการกำหนดโดยการปรับตั้งค่าสมการในสภาวะเปิดวงจร เพื่อแก้ปัญหาสำหรับค่า  $I_0$

$$\begin{aligned}
I_A &= 0 \\
V_A &= V_{ocAE} \\
I_0 &= \frac{I_{scAE}}{N_p \left( e^{\frac{V_{ocAE}q}{nN_s kT_{ck}}} - 1 \right)}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

คำนวณค่าสมการคุณลักษณะของกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน จากนั้นทำการหาค่า  $P_G^{DC}$  : โดยที่สมการคุณลักษณะนั้นจะใช้ในการสร้างแบบจำลองอาร์เรย์พลังงานแสงอาทิตย์ จะกระทำซ้ำในสมการที่ 2.22

$$I_A = I_{scAE} - N_p I_0 \left( e^{\frac{(V_A + I_A R_{sA})q}{nN_s kT_{ck}}} - 1 \right) \tag{2.22}$$

ตัวแปร  $I_A$  เกิดขึ้นสองครั้งดังสมการที่ 2.22 ดังนั้นจึงไม่มีการแก้ปัญหาที่ไม่ซ้ำกันของสมการนี้ เพื่อที่จะหาทางออกของวิธีการที่ถูกต้องมีความจำเป็นที่ต้องรู้สถานะเริ่มต้นโดยแบบจำลองนี้จะใช้จุดเปิดวงจรที่ 0 และ  $V_{ocAE}$  เพื่อวัตถุประสงค์นี้ ซึ่งจะสามารถกำหนดโดยการตั้งค่าของ  $I_A$  ให้เป็นศูนย์ ดังในสมการที่ 2.22

$$V_{ocAE} = \left( \frac{nN_s kT_{ck}}{q} \right) \ln \left( \frac{I_{scAE}}{I_0 N_p} + 1 \right) \tag{2.23}$$

โดยที่ 0 และ  $V_{ocA}$  เป็นการเริ่มต้นแก้ปัญหของเทคนิคการกระทำซ้ำ ดังที่แสดงในสมการที่ 2.24 จะเป็นการใช้ในการคำนวณคุณลักษณะของกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์

$$\begin{aligned}
V_A &= V_{ocAE}; \\
I_A &= 0; \\
\text{while } V_A &> 0 \\
V_A &= V_A - \text{small\_step};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_A &= I_{scA} - N_p I_0 \left( e^{\frac{(V_A + I_{Al} R_{SA})q}{nN_s k T_{CK}}} - 1 \right); \\
&\text{while } \text{abs}(I_{Al} - I_A) > \text{epsilon} \\
I_{Al} &= I_{Al} + (I_A - I_{Al}) / 10; \\
I_A &= I_{scA} - N_p I_0 \left( e^{\frac{(V_A + I_{Al} R_{SA})q}{nN_s k T_{CK}}} - 1 \right); \\
&\text{end} \\
I_{Al} &= I_A; \\
&\text{end}
\end{aligned} \tag{2.24}$$

จากสมการที่ 2.24 การแก้ปัญหาเริ่มต้นสำหรับ  $I_A$  จะเป็นอินพุตของสมการที่  $I_{Al}$  โดยค่าของ  $V_A$  จะลดลงตามขั้นตอนที่เล็กทีละน้อย และการกระทำซ้ำจะดำเนินการจนกว่าค่าของ  $I_A$  และ  $I_{Al}$  จะอยู่ภายในค่าเอพซิลอนที่ยอมรับได้ เมื่อแก้ปัญหาจะถูกกำหนดขั้นตอนคือการกระทำซ้ำแล้วซ้ำอีกจนถึงจุดลัดวงจรจะเป็นกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ซึ่งก็คือรูปแบบที่เกิดขึ้นสำหรับอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่กำหนดสภาพแวดล้อมใดๆ ก็ตาม

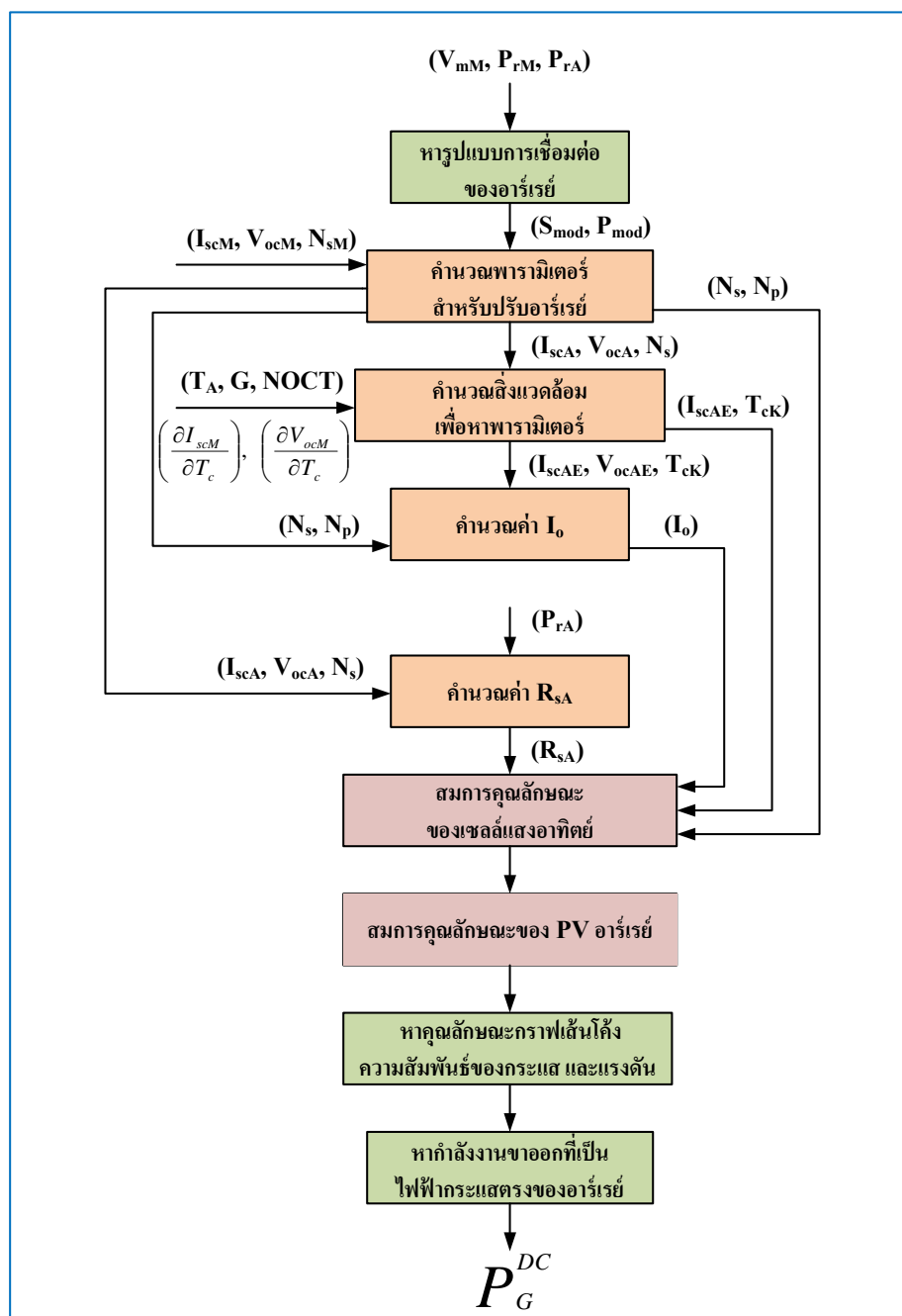
เวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้าจะเป็นการคำนวณจากกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยการคูณเวกเตอร์ที่เก็บไว้ของกระแส และแรงดันไฟฟ้า โดยที่กำลังไฟฟ้าขาออกแบบกระแสตรงของอาร์เรย์จะถูกกำหนดให้เป็นองค์ประกอบสูงสุดของเวกเตอร์ของกำลังไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
\hat{P} &= \hat{I}\hat{V} \\
P_G^{DC} &= P_{\max AE} = \max(\hat{P});
\end{aligned} \tag{2.25}$$

โดยจะสันนิษฐานว่าอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในระบบทางกายภาพเอาต์พุตของอาร์เรย์อาจไม่ใช่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด อย่างไรก็ตามเอาต์พุตของพลังงานแสงอาทิตย์จะถูกป้อนเข้าระบบ MPPT ซึ่งมั่นใจได้ว่าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะถูกป้อนเข้าอินเวอร์เตอร์แบบแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นการอธิบายจำนวนของแบบจำลองสำหรับพฤติกรรมของทั้งอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ และ ตัวติดตามจุดที่เกิดพลังงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracker: MPPT) ซึ่งการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบ MPPT จะถูกนำเข้าสู่การอธิบายโดยใช้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพของชุดปรับสถานะของกำลังไฟฟ้า (Power Conditioning Unit: PCU)

4. แผนภาพของขั้นตอนสำหรับการคำนวณกำลังไฟฟ้าขาออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผนภาพที่แสดงดังในภาพที่ 2.23 จะอธิบายแบบจำลองของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดสมการที่จะดำเนินการในแบบจำลองและความสัมพันธ์ของอินพุต และเอาต์พุต เหล่านี้



ภาพที่ 2.23 ขั้นตอนการคำนวณของแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

### 3) มาตรฐานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบริษัทจำหน่าย

มาตรฐานนี้จะขึ้นอยู่กับ ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริษัทจำหน่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551 จะรับซื้อพลังงานไฟฟ้าแบ่งตามขนาดของกำลังการผลิตได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาที่ การรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตขนาดเล็ก (Very Small Power Producer: VSPP) โดยมีจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้ไม่เกิน 10 MW แบ่งได้ 2 รูปแบบ ดังนี้ [19]

1. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน เช่น Photovoltaic, Wind Turbine Hydro Power

2. การผลิตไฟฟ้าด้วยระบบพลังงานความร้อนและไฟฟ้ารวม (Cogeneration หรือ Combined Heat and Power: CHP)

ก. ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริษัทจำหน่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551 มีข้อกำหนดหลักที่ต้องทำความเข้าใจดังนี้

- ปริมาณกำลังไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการที่จ่ายหรือรับจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- หลักเกณฑ์การพิจารณาทางเทคนิค
- ระบบมาตรวัดไฟฟ้าและอุปกรณ์ประกอบ
- รูปแบบการเชื่อมต่อและระบบป้องกัน
- การควบคุมคุณภาพไฟฟ้า
- ระบบควบคุมระยะไกล
- ระบบการติดต่อสื่อสาร
- การเพิ่มกำลังการผลิตหรือขยายระบบไฟฟ้า

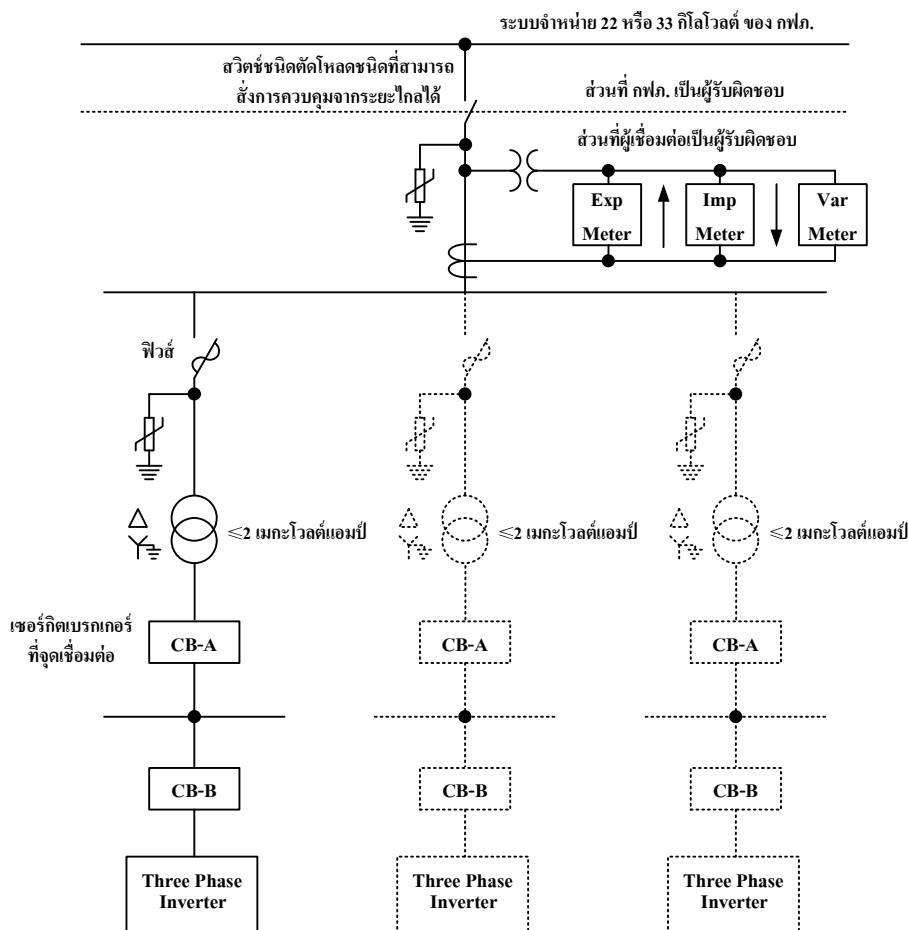
ข. ปริมาณกำลังไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการที่จ่ายหรือรับจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า

- ระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 8.0 เมกะวัตต์/ วงจร
- ระบบจำหน่าย 33 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 10.0 เมกะวัตต์/ วงจร
- ระบบจำหน่าย 380/220 โวลต์
- กำลังไฟฟ้าเกินกว่าที่กำหนดในข้อ ก. หรือ ข. ให้เชื่อมต่อกับระบบส่ง 69 หรือ 115 กิโลโวลต์ ตามความเหมาะสม ทั้งนี้ไม่เกิน 180 เมกะวัตต์/ วงจร

โดยที่แบบมาตรฐานของการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส และมีหม้อแปลงหลายตัวขนานกันเชื่อมต่อกับระบบ 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ของ กฟภ. ดังแสดงในภาพที่ 2.24



รูปแบบการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส และมีหม้อแปลงไฟฟ้าหลายตัวขนานกันเชื่อมต่อกับระบบ 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ของ กฟภ.



#### หมายเหตุ

อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสจะต้องมีหน้าที่การทำงานขั้นต่ำสำหรับ

1. ป้องกันแรงดันต่ำ / ป้องกันแรงดันเกิน (27/59)
2. ป้องกันกระแสเกินด้านเฟสและกราวด์ (50/51 50N/51N)
3. ป้องกันความถี่ต่ำ / ป้องกันความถี่เกิน (81)
4. จึงโครินซ์ (25)
5. ป้องกันการจ่ายไฟแบบแยกตัวอิสระ (Anti-islanding protection) เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61727 และ IEC 62116 หรือที่ กฟภ. ยอมรับ
6. ถ้าขนาดอินเวอร์เตอร์รวมมากกว่า 2 เมกะวัตต์ หรือขนาดหม้อแปลงเครื่องหนึ่งเครื่องใดมากกว่า 2 เมกะโวลต์แอมป์ ต้องติดตั้งระบบป้องกันทางด้านแรงดัน 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ และสวิตช์ตัดไหลชนิดที่สามารถควบคุมจากระยะไกลได้

ภาพที่ 2.24 แบบมาตรฐานของการเชื่อมต่อของผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสและมีหม้อแปลงหลายตัวขนานกันเชื่อมต่อกับระบบ 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ของ กฟภ. [19]

#### 2.4.4 ผลกระทบจากพลังงานหมุนเวียนต่อระบบไฟฟ้า

เป็นการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องข้อจำกัดทางด้านเทคนิคของระบบส่งและระบบจำหน่ายไฟฟ้าในการรับไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนที่มีลักษณะกระจัดกระจาย

และไม่สม่ำเสมอ รวมทั้งการบริหารจัดการระบบไฟฟ้าที่มีพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น (High Penetration of Renewable Energy) ในต่างประเทศ [20]

เครื่องผลิตไฟฟ้าที่จุดจำหน่าย หรือเครื่องกำเนิดแบบกระจาย (Distribution Generation: DG) แบ่งได้ตามลักษณะวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้ดังนี้

- เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaic: PV)
- กังหันลม (wind)
- พลังน้ำ (Hydro)
- ถ่านหิน (Coal)
- ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas)
- ชีวมวล (Plant Material and waste)

#### 1) ข้อจำกัดทางเทคนิคในการรับไฟจาก DG

การนำ DG เข้ามาเชื่อมต่อในระบบจำหน่ายจะเป็นการเพิ่มแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดัน กระแสฟอลต์ ค่าความสูญเสียทางไฟฟ้า และการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน ในความรุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตำแหน่งของ DG และสัดส่วนการจ่ายกำลังไฟฟ้าของ DG เมื่อเทียบกับโหลดของระบบ (DG Penetration) ส่วนอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวน DG จะขึ้นอยู่กับนโยบายหรือมาตรฐานการเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่าย การศึกษาผลกระทบของ DG ที่มีต่อระบบจำหน่ายจะสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

#### 2) ผลกระทบของ DG ที่มีต่อระดับแรงดัน

DG เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจริง ที่มีตัวประกอบกำลัง (Power Factor) คงที่ ซึ่งการมีกำลังไฟฟ้าจริงจ่ายเข้าสู่ระบบที่ตำแหน่งใด จะทำให้แรงดันที่ตำแหน่งนั้นสูงขึ้นได้ ถ้า DG เป็น Induction Generator จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบ แต่ดึงกำลังรีแอกทีฟออกจากระบบ แต่ถ้า DG เป็น Synchronous Generator จะสามารถปรับตัวประกอบกำลังให้จ่ายหรือดึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟก็ได้ จึงสามารถใช้เป็น Voltage Regulator ได้

ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลที่ไม่มี DG จะมีระดับแรงดันที่ลดลงเรื่อยๆ จากสถานีไฟฟ้า ย่อยต้นทาง การควบคุมระดับแรงดันจะใช้คาปาซิเตอร์ หรือ Step-Type Voltage Regulator (SVR) หรือการเปลี่ยนค่า Tap ของหม้อแปลง ซึ่งในระบบจำหน่ายที่มีขนาดใหญ่ โหลดของระบบมีค่ามาก สายส่งหรือสายป้อนมีระยะไกล การติดตั้ง DG ใกล้กับโหลดจะช่วยยกระดับแรงดันปลายทางที่โหลดให้สูงขึ้น

โดยเมื่อมองในส่วนของ DG ที่เป็น PV ที่เข้ามาเชื่อมต่อในระบบจำหน่าย PV จะช่วยจ่ายโหลดได้ในช่วงเวลากลางวันที่มีแดดจัด ซึ่งมีส่วนช่วยในการยกระดับแรงดันที่บัส แต่ในช่วงที่ PV ทำงานไม่ได้ในช่วงเวลาเย็นนั้น ยังต้องใช้คาปาซิเตอร์ช่วยชดเชยแรงดันต่อ โดยการมี PV จะช่วยยืดเวลาการสับคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบ จะแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้ PV ที่สามารถเก็บพลังงานไว้ได้ในแบตเตอรี่

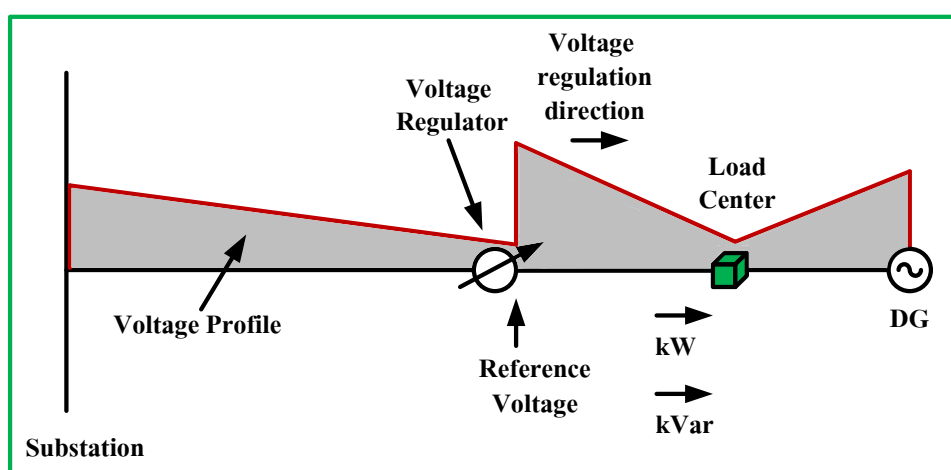
สรุปได้ว่า DG สามารถช่วยยกระดับแรงดันของโหลดให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อติดตั้งใกล้โหลดที่มีขนาดใหญ่และอยู่ห่างไกลจากสถานีไฟฟ้า

### 3) ผลกระทบของ DG ที่มีต่อการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน

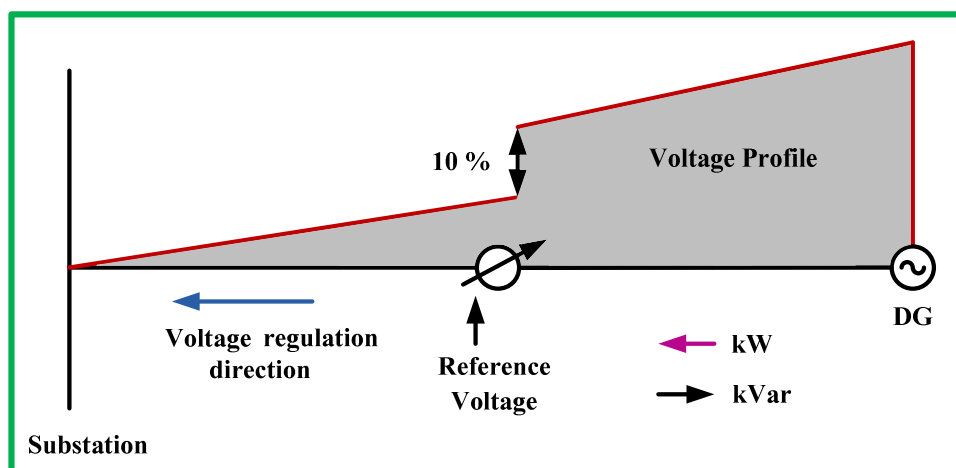
การมี DG ในระบบจำหน่ายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในระบบทั้งขนาดกำลังไฟฟ้าในสายป้อน และทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน

กรณีที่มี DG ที่จ่ายแต่กำลังไฟฟ้าจริงอยู่ทางด้านท้ายของคาปาซิเตอร์ แรงดันที่ปลายทางมีค่าสูงขึ้นกว่าเดิมอยู่แล้ว หากมีการสับคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกตีฟ อาจทำให้มีแรงดันที่ปลายทางสูงเกินไป

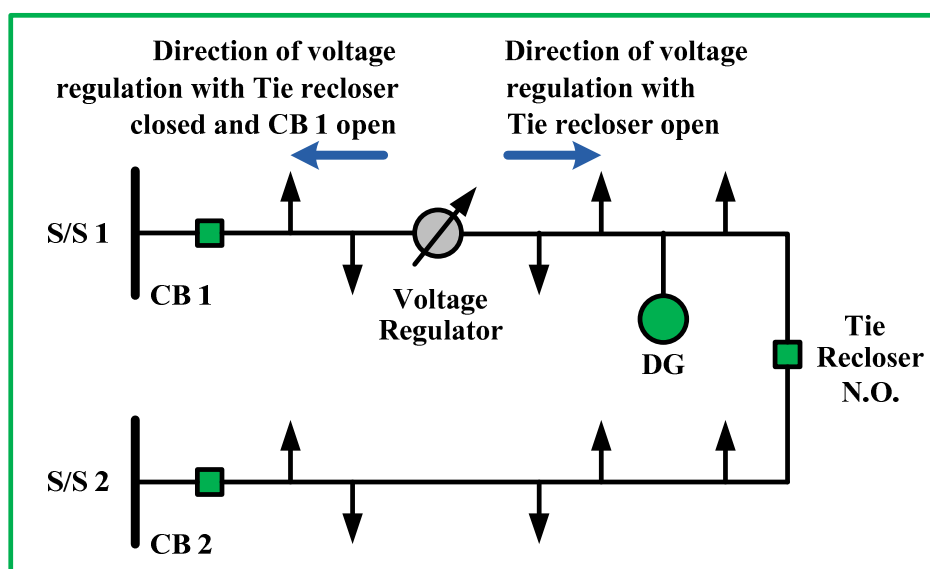
ผลของ DG ที่มีต่อ SVR ดังแสดงในภาพที่ 2.25 จะเป็นการทำงานของ SVR ในโหมด forward ส่วนในภาพที่ 2.26 การทำงานของ SVR ในโหมด reversed และในภาพที่ 2.27 จะแสดงผลของ DG ที่มีต่อ SVR ในระบบที่มี tie line



ภาพที่ 2.25 การทำงานของ SVR ในโหมด Forward [20]



ภาพที่ 2.26 การทำงานของ SVR ในโหมด Reversed [20]



ภาพที่ 2.27 การทำงานของ SVR ในระบบจำหน่ายแบบมี Tie Time [20]

เมื่อมี DG เชื่อมต่อเข้ามาในระบบจำหน่าย จะต้องปรับการตั้งค่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันใหม่ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

DG อาจทำให้เกิดระดับแรงดันสูงเกินไป โดยเฉพาะถ้าติดตั้งอยู่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงที่มีโหลดขนาดไม่ใหญ่มากนัก ผู้ใช้ไฟที่รับไฟจากหม้อแปลงนี้จะได้รับแรงดันเกิน

#### 4) ผลกระทบที่มีต่อความสูญเสียทางไฟฟ้า

DG ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงทำให้ลดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายมาจากสถานีไฟฟ้าย่อย และลดขนาดกระแสที่ไหลในสายป้อน ทำให้กำลังสูญเสียในสายส่งลดลง ซึ่งถ้า DG มีขนาดใกล้เคียงกับโหลดและเชื่อมต่อกับระบบในตำแหน่งที่ใกล้กับโหลด จะทำให้ความสูญเสียรวมในระบบ ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ถ้า DG อยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้าย่อย แต่จ่ายกำลังไฟฟ้าไปให้สถานีไฟฟ้าย่อยหรือย้อนกลับเข้าไปในระบบส่งจ่าย จะทำให้ความสูญเสียในระบบจำหน่ายสูงขึ้น แต่ความสูญเสียในระบบส่งจ่ายลดลง จากผลงานวิจัยของ DG ต่อ losses จะทำให้พอได้ข้อสรุปดังนี้

1. ความสูญเสียต่ำสุดเกิดขึ้นเมื่อ DG penetration มีค่าไม่สูงมากนัก
2. เมื่อ DG penetration มีค่าสูงขึ้น อาจทำให้ความสูญเสียสูงขึ้นกว่าระบบที่ไม่มี DG
3. ถ้า DG สามารถปรับค่าตัวประกอบกำลัง เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟได้ จะทำให้ความสูญเสียลดลงได้มากกว่า
4. DG สามารถช่วยลดความสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายได้ หากมีขนาดและอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม

5. DG ที่มีขนาดใหญ่เกินไป อาจทำให้ความสูญเสียทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

#### 5) ผลกระทบที่มีต่อการตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

กระแสฟอลต์มีค่าสูงกว่าปกติ เมื่อมี DG ต่อเข้ามาในระบบจำหน่าย จะทำให้กระแสฟอลต์มีค่าสูงขึ้น อาจทำความเสียหายให้อุปกรณ์ป้องกันทั้งของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟรายอื่น ซึ่งการตั้งค่าของ Relay จะทำได้ยากขึ้น และเมื่อมีการตัด DG ออกจากระบบบ่อยเกินไป ปกติเมื่อมีการเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ DG ต้องปลดตัวเองออกจากระบบ แต่บ่อยครั้งที่ DG ตรวจจับฟอลต์ในสายป้อนข้างเคียงแล้วปลดตัวเองออกโดยไม่จำเป็น

ในปัญหาเกิดปัญหาจากการทำงานของ Recloser การเชื่อมต่อนระบบที่มี DG กำลังจ่ายไฟอยู่ อาจทำให้เกิดปัญหา Out-of-Phase ของ DG กับระบบไฟฟ้าหลัก อาจทำให้

1. เกิดแรงดันเกินได้ถึง 3 เท่า
2. กระแส Inrush สูงมากไหลเข้าหม้อแปลงหรือมอเตอร์
3. แรงบิดเปลี่ยนแปลงฉับพลันที่มอเตอร์ของผู้ใช้ไฟ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า DG มีผลกระทบต่อพิภคและความสัมพันธ์ในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันทั้งของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟอื่น

#### 6) ผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพของระบบจากการ Islanding

Islanding คือ การที่อุปกรณ์ป้องกันของระบบจำหน่ายทำการตัดวงจรบางส่วนออกจากระบบไฟฟ้าหลัก แต่วงจรส่วนนั้นมี DG ต่ออยู่ ทำให้วงจรส่วนนั้นยังคงได้รับไฟจาก DG ดังนั้น DG ควรตรวจจับเหตุการณ์นี้ได้ และปลดตัวเองออกจากวงจร ซึ่งผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพของระบบจากการ Islanding มีดังนี้

1. แรงดันและความถี่ของระบบส่วนที่เชื่อมต่อกับ DG จะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยกรไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมได้ ส่งผลเสียต่อผู้ใช้ไฟ
2. DG ไม่สามารถปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ได้ ทำให้ไม่สามารถรองรับโหลดที่เหลืออยู่โดยไม่มีสถานีไฟฟ้าย่อยช่วยจ่ายโหลด
3. การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในส่วนที่เหลือของวงจร อาจไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ
4. อาจเกิดอันตรายกับผู้ทำงานด้านบำรุงรักษา เนื่องจากระบบยังคงมีการจ่ายไฟจาก DG หลังจากตัดวงจรออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยแล้ว
5. เกิดปัญหาเมื่อมีการ Recloser ส่วนของ Islanding เข้ากับระบบหลัก  
หากเกิดการ Islanding โดยไม่ได้วางแผนไว้ล่วงหน้า อาจทำให้เกิดแรงดันเกิน ระบบขาดเสถียรภาพ และเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ซึ่งถ้าหากมีการวางแผนการ Islanding ไว้ล่วงหน้า DG จะเพิ่มความเชื่อถือได้ (Reliability) ของระบบไฟฟ้า

#### 7) ผลกระทบของ DG ที่มีต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

โดยปกติ DG ไม่ได้ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกได้อย่างรวดเร็วตามที่ระบบต้องการ ถ้าหากศูนย์ควบคุมส่วนกลางไม่สามารถควบคุมความถี่และแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ DG เหล่านี้ได้ ดังนั้นจึงถือว่า DG ไม่สามารถช่วยเสริมเสถียรภาพของระบบ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ของการไฟฟ้าจะรับหน้าที่ในการรักษาเสถียรภาพของระบบทั้งในสภาวะคงตัว และสภาวะทรานเซียนต์ ถ้าระดับ DG Penetration ยังมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับขนาดของโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง จะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบและจะถูกคิดเป็นโหลดที่มีค่าเป็นลบ (Negative Load) ในการวิเคราะห์เสถียรภาพโดยรวมของระบบไฟฟ้า แต่เมื่อ DG จ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมากขึ้น (High Penetration) จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้าโดยรวมได้

## 1. การแกว่งของความถี่ขณะเกิดฟอลต์ในระบบที่มี DG

ถ้า DG เป็นแบบ Induction generator ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณการจ่ายไฟของ DG และระยะห่างระหว่าง DG กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ

ถ้า DG เป็นแบบ Synchronous generator จะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบมีความเร็วลดลง

ถ้า DG เป็นแบบ Power electronic converter จะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบมีความเร็วลดลง เนื่องจาก DG แบบนี้จะปลดตัวเองออกจากวงจรเมื่อเกิดฟอลต์ เพราะสูญเสียเสถียรภาพทางความถี่ มีผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวงจรรับภาระโหลดเพิ่มขึ้น

## 2. ระยะเวลาการแกว่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ในสายส่งของระบบที่มี DG

เมื่อมี DG ในระบบ จะทำให้ระยะเวลาในการแกว่งมากขึ้นกว่าในกรณีที่ไม่มี DG เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบ ในกรณีของ DG แบบ Power electronic converter ที่ไม่สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ จะมีระยะเวลาในการแกว่งสูงมาก เมื่อระดับ penetration สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการปลด DG เหล่านี้ออกจากระบบในขณะที่กำลังช่วยจ่ายโหลดปริมาณมาก แต่ถ้า DG แบบ Power electronic converter สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ จะทำให้ระยะเวลาในการแกว่งน้อยกว่าระบบที่ไม่มี DG

## 8) ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า

ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (Power System Security) ได้แก่ การที่ระบบไฟฟ้ายังคงสามารถจ่ายโหลดได้เมื่อเกิดเหตุไม่คาดหมาย (Contingency) ขึ้นในระบบโดยพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าสำรอง (Spinning Reserve) ที่มีอยู่ในระบบ รวมถึงค่า Ramping Up และ Ramping Down ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ ซึ่ง Contingency อาจเกิดจากการหลุด (Outage) ของสายส่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือโหลดใหญ่ โดยทั่วไประบบไฟฟ้าจะคำนึงถึงความมั่นคงในระดับ N-1 Contingency คือ การหลุดของอุปกรณ์ไฟฟ้า 1 อุปกรณ์ (สายส่ง 1 เส้น หรือเครื่องกำเนิด 1 เครื่อง) แล้วระบบยังคงมีกำลังไฟฟ้าพอจ่ายโหลดได้

ในระบบที่มี DG จำนวนมากและจ่ายโหลดปริมาณมาก (High Penetration) เมื่อเกิดฟอลต์และตามด้วยการหลุดของสายส่งเพื่อกำจัดฟอลต์ ทำให้ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (รวมทั้ง DG) เกิดการแกว่ง ถ้า DG มีการแกว่งของความถี่ออกนอกค่าที่ตั้งไว้ จะตัดตัวเองออกจากระบบ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบรับภาระโหลดมากยิ่งขึ้นไปอีก ซึ่งอาจเสี่ยงต่อการที่กำลังสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ไม่สามารถรองรับโหลดและการเปลี่ยนแปลงของความถี่ได้ การแก้ไขเหตุการณ์นี้อาจทำได้โดยการปลดโหลด (Load Shedding) เพื่อรักษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในระบบ โดยที่การปลด DG ออกจากระบบโดยใช้ค่าการแกว่งของความถี่ เป็นการป้องกัน DG จากเหตุการณ์ Islanding ในระบบจำหน่าย แต่ในระบบส่งจ่ายมักจะไม่มีเกิดเหตุการณ์ Islanding ขึ้น ดังนั้นการตั้งค่าการแกว่งของความถี่และการปลด DG ออกอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการ Islanding จึงอาจทำให้เกิดการปลด DG โดยไม่สมควรเมื่อเกิดฟอลต์ และส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบ

#### 9) ความถี่ในการปลด DG ออกจากระบบของประเทศในทวีปยุโรป

การตั้งค่าความถี่ที่แตกต่างกันของประเทศในทวีปยุโรป แสดงไว้ดังตารางที่ 2.3 ทำให้ระบบไฟฟ้ามีความเสี่ยงในการสูญเสียกำลังผลิตจำนวนมากจากการที่ DG ปลดตัวเองออกจากระบบในกรณีเกิดฟอลต์ ดูได้จากเหตุการณ์ตัวอย่างดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลที่ใช้ในการตั้งค่าความถี่ที่แตกต่างกันของประเทศในทวีปยุโรป

ประเทศ	ความถี่ (Hz)
ฝรั่งเศส	49.5-50.5 (narrow range) 47.5-51.0 (wide range) ใช้กับ wind farms
เยอรมัน	48.0-52.0
สเปน	49.0-51.0

1. กรณี Black out ของระบบไฟฟ้าของอิตาลี ในเดือนกันยายน 2003 ซึ่งสูญเสียกำลังผลิตจาก DG ถึง 1,700 MW เมื่อความถี่ลดลงจนถึง 49.0 Hz

2. กรณี Black out ของระบบ European Grid ในเดือนพฤศจิกายน 2006 เมื่อเกิด outage และ DG ที่เป็น Wind Power ในประเทศสเปนหลุดออกจากระบบถึง 2,800 MW ที่ความถี่ 49.0 Hz

3. ประเทศไทย (กฟน.) กำหนดข้อปฏิบัติสำหรับ SPP เมื่อความถี่ของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

4. กรณีความถี่ไม่อยู่ในช่วง 49.25-50.75 Hz และไม่ได้รับการติดต่อจากศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าของ กฟผ. บริษัทฯต้องช่วยระบบโดยเพิ่มหรือลดกำลังผลิตเพื่อจะให้ความถี่ของระบบกลับมาอยู่ที่ 50 Hz โดยในช่วงเวลาดังกล่าวบริษัทฯจะได้รับการยกเว้นเงื่อนไขในสัญญาซื้อขายไฟฟ้า

5. กรณีความถี่ต่ำกว่า 49.00 Hz หรือสูงกว่า 51.10 Hz ต่อเนื่องเกิน 1 นาทีทางบริษัทฯ สามารถปลดเครื่องออกจากระบบไฟฟ้า โดยไม่ถือเป็นสาเหตุของบริษัทฯ



6. กรณีความถี่ต่ำกว่า 47.90 Hz หรือสูงกว่า 51.10 Hz ทางบริษัทฯ สามารถปลดเครื่องออกจากระบบไฟฟ้า โดยไม่ถือเป็นสาเหตุของบริษัทฯ

#### 2.4.5 สรุป

จากการศึกษาข้างต้นจะพบว่าควรทำความเข้าใจพื้นฐาน และปัญหาต่างๆ ของระบบ เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำไปพิจารณาเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ โดยกำหนดให้มีขนาด 1 MW แล้วจึงนำไปเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ในการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมต่อไป

## 2.5 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Analysis of Power Flow)

### 2.5.1 บทนำ

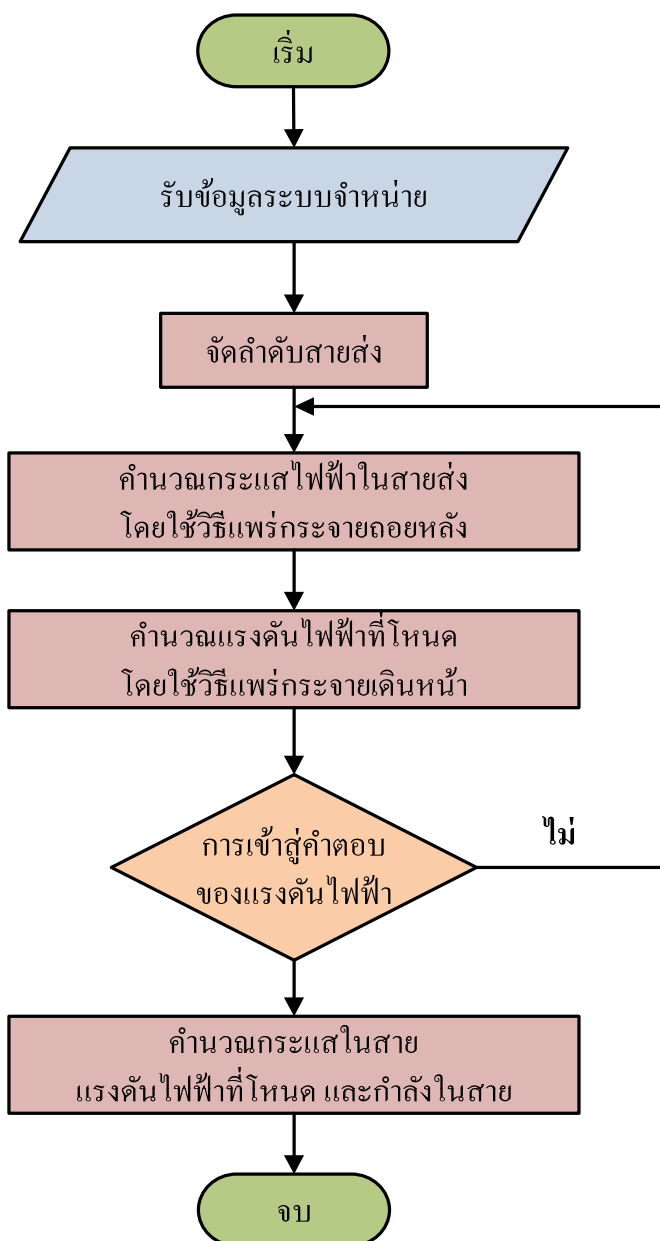
ระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่เป็นระบบแบบเรเดียลนั้น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ายังคงมีความสำคัญ เพราะคุณภาพและเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องจ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าควรเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง โดยที่การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจะทำให้ทราบระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหนดต่างๆ ได้ นอกจากนี้คำตอบของการไหลของกำลังในระบบจำหน่ายจะช่วยทำให้การวางแผนเพื่อควบคุมระบบตลอดจนการขยายระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าหรือการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น จะมีความซับซ้อนน้อยกว่าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เพราะในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะเป็นระบบที่มีการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียลเป็นส่วนใหญ่ แต่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้านั้น จะเป็นระบบที่มีการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบโครงข่าย อีกประการหนึ่งพารามิเตอร์สายในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจะประกอบด้วย ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ และความจุ แต่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะพิจารณาเพียงแต่ความต้านทาน และความเหนี่ยวนำของสายเท่านั้น ซึ่งการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการใช้เมทริกซ์จาโคเบียน เช่น นิวตันราฟสัน โหลด หรือเก๊าเซเดียน ไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่บางครั้งจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการลู่เข้าสู่คำตอบ [9]

อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้ายังมีความสำคัญ เพราะผู้จำหน่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าต้องเตรียมการให้พร้อมเพื่อการจ่ายไฟฟ้าที่มีคุณภาพ และการขยายการให้บริการในอนาคต ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการคำนวณกระแสด้วยวิธีแพร่กระจายถอยหลังและแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธี

แพร่กระจายเดินหน้า (Current Backward and Voltage Forward Propagations) โดยมีลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ แสดงดังภาพที่ 2.28

### 2.5.2 ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย



ภาพที่ 2.28 ลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีแพร่กระจายถอยหลังและเดินหน้า

1) ข้อมูลในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น ขั้นตอนจะต้องทราบค่าข้อมูลต่างๆ ของระบบจำหน่าย คือ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า จำนวนโหนด ค่าพารามิเตอร์ของสายตัวนำในแต่ละสาขา และค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดในแต่ละโหนด

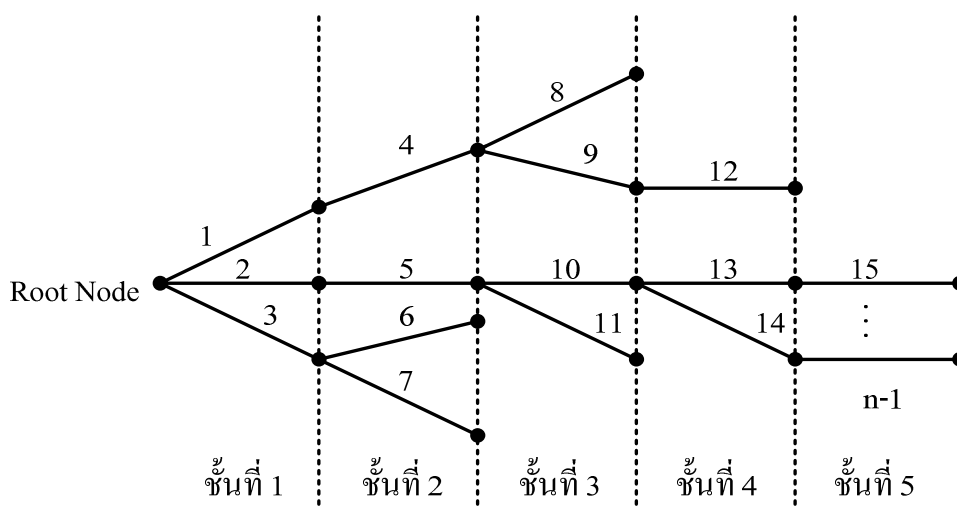
1. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า คือ หม้อแปลงกำลังไฟฟ้าที่สถานีจำหน่ายไฟฟ้า กำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ เรียกว่า รูดโหนด ใช้เป็นบัสอ้างอิง

2. โหนด หรือ บัส คือ จุดต่อร่วมของสาขาตั้งแต่สองสาขาขึ้นไป สำหรับระบบจำหน่ายแทนจุดต่อแยกของสายย่อย หรือจุดที่เป็นตำแหน่งหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า

3. สาขา คือ สายตัวนำที่ต่อระหว่างโหนดสองโหนดใดๆ ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ คือ ค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ มีหน่วยเป็น โอห์มต่อหน่วยความยาว ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์รวมของตัวนำแต่ละสาขาหาได้เมื่อทราบความยาวของสาย

4. โหลด คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลด แทนด้วยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ทั้งสองค่าคิดจากเปอร์เซ็นต์การจ่ายโหลดจริงเทียบกับพิกัดกำลังของหม้อแปลงแต่ละตัว อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำหนดให้มีค่าอัตราส่วนคงที่เมื่อกำหนดค่าตัวประกอบกำลัง

2) การจัดลำดับสายส่ง ในระบบจำหน่ายนั้น ค่าของขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่บัสอ้างอิงจะกำหนดให้มีค่าคงที่ ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่บัสอื่นนั้นเป็นตัวแปรที่ต้องคำนวณหาเมื่อรับข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้ามาแล้วต้องจัดลำดับสายส่ง โดยจะเริ่มจากด้านต้นทางของสายส่งไปเป็นลำดับ



ภาพที่ 2.29 การจัดลำดับสายส่ง

โดยระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีจำนวนโหนด คือ  $n$  โหนด จำนวนสาขา คือ  $b = n-1$  สาขา การจัดลำดับสายส่งเริ่มต้นจากรูดโหนดด้านซ้ายมือสุดเรียงกันตามลำดับไปทางด้านขวามือแบ่งเป็น ชั้นๆ เริ่มต้นจากชั้นที่ 1 ที่ต่ออยู่กับรูตบัส ลำดับสายส่งเริ่มต้นนับจากสาขาที่ 1 เรียงกันไปตามลำดับจากบนลงล่างจนครบทุกสาขา ชั้นถัดไปจะเริ่มต้นเมื่อทุกสาขาในชั้นที่ 1 ได้จัดเรียงสายส่งเรียบร้อยแล้ว ที่ชั้นอื่นๆ จะต่อเนื่องกันไปตามหลักการเดียวกันนี้จนสิ้นสุดที่สาขาสุดท้าย ดังภาพที่ 2.29

3) การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสาขาโดยวิธีแพร่กระจายถอยหลัง เมื่อจัดลำดับสายส่งเรียบร้อยแล้วก็เข้าสู่การคำนวณกระแสในสาย โดยจะเริ่มจากกระแสที่โหนดจะมีค่าเป็น

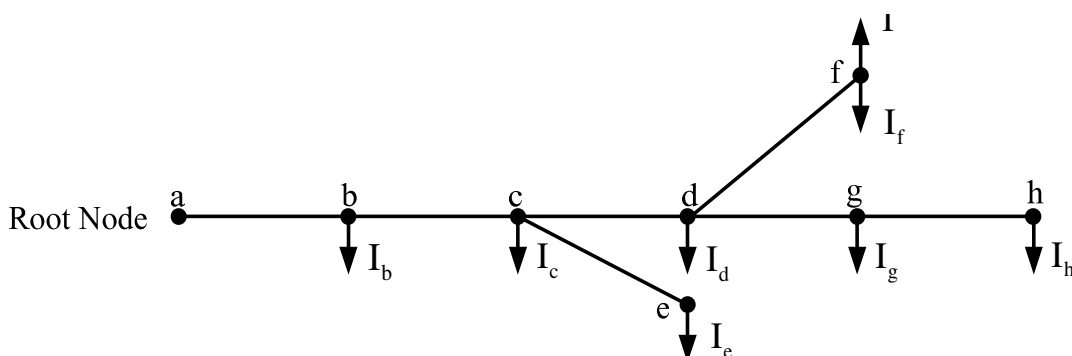
$$I_i^{(k)} = \left( \frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i V_i^{(k-1)} \quad (2.26)$$

- เมื่อ  $S_i$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่โหนด  $i$  ( $S_i = P_i \pm jQ_i$ )  
 $Y_i$  คือ ผลรวมของแอดมิตแตนซ์ส่วนลงดินทั้งหมดที่โหนด  $i$   
 $V_i^{(k-1)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่โหนด  $i$  ณ รอบคำนวณที่  $k-1$   
 $k$  คือ รอบการคำนวณ

การคำนวณกระแสนี้จะเริ่มให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าเป็น 1 p.u. และมุมแรงดันไฟฟ้าเป็น ศูนย์ที่ทุกๆ โหนด ส่วนของการคำนวณกระแสในสายจะเริ่มจากการคำนวณที่เรียกว่า การแพร่กระจายถอยหลัง โดยที่รอบคำนวณที่  $k$  จะคำนวณกระแส  $J$  ในสายที่สุดท้ายเรื่อยเข้าสู่รูตโหนดหรือรูตบัส โดยกระแสที่สาย  $L$  หาได้จากสมการที่ 2.27

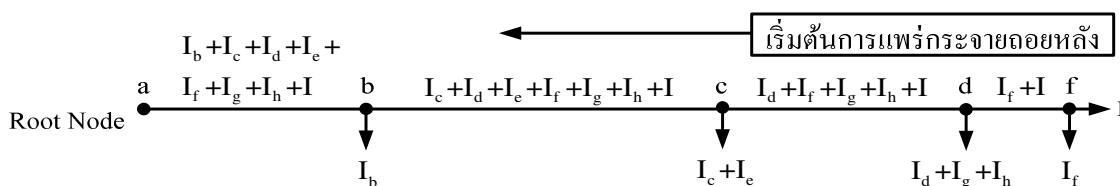
$$J_L^k = -I_{L2}^k + \sum (\text{กระแสในสายที่พุ่งมาจากโหนด } L_2) \quad (2.27)$$

โดยตัวอย่างกระแสในสายส่งของระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล แสดงดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 กระแสในสายส่งของระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล

ซึ่งการหาค่ากระแสในสายส่งสมการที่ 2.27 สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.31 โดยกระแสจะถูกเริ่มหาจากปลายสายส่งรูป



ภาพที่ 2.31 การคำนวณค่ากระแสในสายส่งในแต่ละช่วง

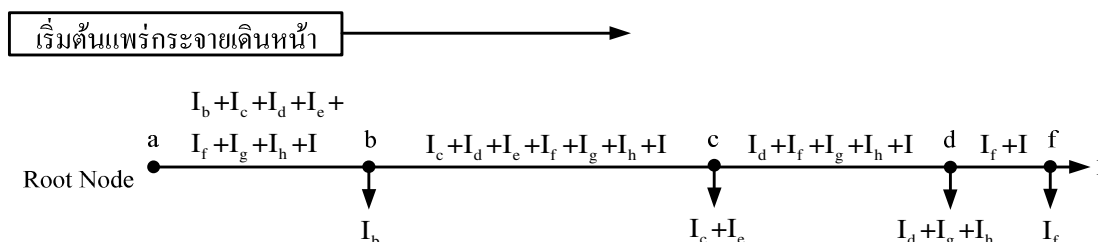
4) การคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดโดยวิธีแพร่กระจายเดินหน้า เริ่มต้นจากบัสอ้างอิง รูดโหนด หรือ รูดบัส โดยค่าแรงดันไฟฟ้ากำหนดให้มีค่าคงที่และมุมเฟสเป็นศูนย์ ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่บัสอื่นๆ ถัดไปจากบัสอ้างอิงในรอบคำนวณที่  $k$  จะถูกคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสเรื่อยๆ ไปสู่บัสสุดท้าย ดังสมการที่ 2.28

$$V_{L_2}^{(k)} = V_{L_1}^{(k)} - Z_L J_L^{(k)} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $Z_L$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของสายส่งช่วง  $L$  ระหว่างโหนด  $L_2$  และ  $L_1$   
 $L_2$  คือ โหนดปลายทาง  
 $L_1$  คือ โหนดต้นทาง  
 $J$  คือ กระแสในสาย

k คือ รอบการคำนวณ

ซึ่งการหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหนดดังสมการที่ 2.28 สามารถเขียนได้ดังภาพที่ 2.32 โดยแรงดันไฟฟ้าจะถูกเริ่มหาจากต้นสายดังรูป



ภาพที่ 2.32 การคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหนดแบบเดินหน้า

5) การเข้าสู่คำตอบของแรงดันไฟฟ้า การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแบบแพร่กระจายถอยหลังและการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าแบบแพร่กระจายเดินหน้าจะกระทำในลักษณะเวียนซ้ำ ในแต่ละรอบการคำนวณจะตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน (Mismatch) ของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส ดังสมการที่ 2.29

$$\Delta V_j^{(k)} = V_j^{(k)} - V_j^{(k-1)} \quad (2.29)$$

เมื่อ  $\Delta V_j^{(k)}$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าที่พอยอมรับได้ที่บัส  $j$  หลังจากการคำนวณในรอบที่  $k$

$V_j^{(k)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส  $j$  ในรอบการคำนวณที่  $k$

$V_j^{(k-1)}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส  $j$  ในรอบการคำนวณที่  $k-1$

การเข้าสู่คำตอบของแรงดันไฟฟ้าอาจหาได้จากผลต่างของค่าอื่นๆ ดังสมการที่ 2.27

$$\left\{ \begin{array}{l} |\operatorname{Re}(\Delta V_j^{(k)})| \leq \varepsilon \\ |\operatorname{Im}(\Delta V_j^{(k)})| \leq \varepsilon \\ |\Delta V_j^{(k)}| \leq \varepsilon \end{array} \right. \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับได้

คำตอบของแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ จะได้จากการคำนวณในรอบสุดท้าย ซึ่งรอบสุดท้ายจะเกิดขึ้นเมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้าทุกๆ บัส มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับค่าความคลาดเคลื่อนที่พอยอมรับได้ที่กำหนดและค่ากระแสในแต่ละสาขาสามารถคำนวณค่าได้จากสมการที่ 2.27

### 2.5.3 สรุป

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยเป็นเทคนิคการแพร่กระจายถอยหลังและเดินหน้า ในช่วงการถอยหลังนั้นอาศัยกฎความสัมพันธ์ของกระแสเคอร์ชชอฟฟ์นั่นเอง ในช่วงการแพร่กระจายเดินหน้าเพื่อคำนวณแรงดันที่โหนดก็อาศัยกฎความสัมพันธ์ของแรงดันเคอร์ชชอฟฟ์ จะเห็นว่าลำดับขั้นการคำนวณนั้น ไม่ยุ่งยากเท่าใดนัก เมื่อคำนวณแรงดันที่โหนดได้แล้ว เราก็สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าในสายได้ ประโยชน์จากการนำการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ามาใช้ในระบบจำหน่ายนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมากมาย

## 2.6 ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Power Flow Problem)

### 2.6.1 บทนำ

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยทั่วไปนิยมเรียกทับศัพท์ว่า ออปติมัลเพาเวอร์โฟลว์ (Optimal Power Flow: OPF) หรืออีกชื่อหนึ่ง คือ ออฟติมัลโหลดโฟลว์ (Optimal Load Flow: OLF) ประกอบด้วยรูปแบบของการสร้างปัญหาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไหลของกำลังไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนการกำหนดตัวแปร ฟังก์ชันวัตถุประสงค์การเลือกเงื่อนไขบังคับตลอดจนการเลือกใช้เทคนิคสำหรับแก้ปัญหา [21]

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำมาใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ของการหาตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบให้มีค่าต่ำที่สุด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2.6.2 สมการรูปแบบปัญหา

เป็นการวิเคราะห์การไหลกำลังไฟฟ้าในสถานะคงที่ [11] โดยพิจารณาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ร่วมกับขอบเขตเงื่อนไขบังคับที่เป็นตัวแปรควบคุม โดยมีรูปแบบทั่วไปดังต่อไปนี้

$$\text{Minimize } f(x) \quad (2.31)$$

$$\text{Subject to: } g(x) = 0, \text{ เงื่อนไขสมการ} \quad (2.32)$$

$$h(x) \leq 0, \text{ เงื่อนไขอสมการ} \quad (2.33)$$

การแปลงเงื่อนไขสมการและอสมการให้เป็นพจน์ปรับโทษ และนำไปรวมกับสมการวัตถุประสงค์เดิมจะได้ฟังก์ชันปรับโทษและเทอมปรับโทษ ดังสมการที่ 2.34 และสมการที่ 2.35

$$P(x) = f(x) + \Omega(x) \quad (2.34)$$

$$\Omega(x) = \rho \{ g^2(x) + [\max(0, h(x))]^2 \} \quad (2.35)$$

โดยที่  $P(x)$  คือ ฟังก์ชันปรับโทษ  
 $\Omega(x)$  คือ เทอมปรับโทษ  
 $\rho$  คือ ตัวประกอบการปรับโทษ

การใช้วิธีการปรับโทษทำให้การแก้ปัญหาจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบมีเงื่อนไขบังคับ เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่มีเงื่อนไข ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เปลี่ยนเป็นฟังก์ชันปรับโทษนี้แทน ซึ่งง่ายกว่าและมีรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อน

## 2.6.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีหลายปัญหาที่นิยมนำมาพิจารณา เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงรวมในระบบไฟฟ้าน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ 2.36

$$\text{Min } P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_B} [(P_{gi} + P_{DGi}) - P_{di}] \quad (2.36)$$

s.t.: { Power Balance, Voltage Limit and Power Limit }



โดยที่:	$P_{\text{loss}}$	คือ กำลังสูญเสียจริงทั้งหมดของระบบจำหน่าย
	$P_{g,i}$	คือ กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส $i$
	$P_{d,i}$	คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส $i$
	$P_{DG,i}$	คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายขนาด 1 MW ที่บัส $i$
	$N_B$	คือ จำนวนบัสของระบบจำหน่าย

### 1) ระบบเงื่อนไขบังคับ (Constraints)

ตัวแปรปรับตั้งในวิธานิพนธ์ จะถูกปรับตั้งเพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงในระบบน้อยที่สุด และยังคงอยู่ในช่วงขีดจำกัดของตัวแปรแต่ละตัว เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ โดยมีระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและอสมการแสดงดังต่อไปนี้

#### 1. เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้า (Equality Constraints)

$$P_{g,i} - P_{d,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (2.37)$$

$$Q_{g,i} - Q_{d,i} + \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (2.38)$$

โดยที่:	$P_{g,i}$	คือ กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส $i$
	$P_{d,i}$	คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส $i$
	$Q_{g,i}$	คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟผลิตที่บัส $i$
	$Q_{d,i}$	คือ ความต้องการกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส $i$
	$N_B$	คือ จำนวนบัส
	$\theta_{i,j}$	คือ มุมแอดมิตแตนซ์บัส $i$ ไปยังบัส $j$
	$Y_{i,j}$	คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์บัส $i$ ไปยังบัส $j$

#### 2. เงื่อนไขบังคับอสมการเป็นขอบเขตของตัวแปรที่ปรับตั้งปรับตั้ง (Un Equality Constraints)

$$V_{m,i}^{\min} \leq V_{m,i} \leq V_{m,i}^{\max} \quad (2.39)$$

$$P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \quad (2.40)$$

$$Q_{g,i}^{\min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{\max} \quad (2.41)$$

โดยที่:  $V_{m,i}^{\min}$  คือ ขอบเขตของแรงดันต่ำสุด  
 $V_{m,i}^{\max}$  คือ ขอบเขตของแรงดันสูงสุด  
 $P_{g,i}^{\min}$  คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุด  
 $P_{g,i}^{\max}$  คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด  
 $Q_{g,i}^{\min}$  คือ ขอบเขตกำลังไฟฟารีแอกตีฟต่ำสุด  
 $Q_{g,i}^{\max}$  คือ ขอบเขตกำลังไฟฟารีแอกตีฟสูงสุด

### 3. ฟังก์ชันปรับโทษ (Penalty Function)

แปลงรูปฟังก์ชัน  $f(x)$  ให้เป็น  $F_{\text{loss}}$  ดังสมการที่ (2.42)

$$f(x) = f(P_{\text{loss}}) = F_{\text{loss}} \quad (2.42)$$

จากสมการที่ 2.42 เมื่อ  $f(P_{\text{loss}}) = F_{\text{loss}}$  จากนั้นจึงทำการแทนเทอมของฟังก์ชัน  $F_{\text{loss}}$  จากสมการที่ 2.36 และเทอมของฟังก์ชัน  $\Omega(x)$  จากสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.34 ดังนั้นฟังก์ชันปรับโทษสามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.43)

$$P(x) = F_{\text{loss}} + \Omega_p + \Omega_q + \Omega_v + \Omega_g + \Omega_c \quad (2.43)$$

โดยที่: {Power Balance}

$$\Omega_p = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ P_{g,i} - P_{d,i} - \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \cos(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \right\}^2 \quad (2.44)$$

$$\Omega_q = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ Q_{g,i} - Q_{d,i} + \sum_{j=1}^{N_B} |V_i| |V_j| |Y_{i,j}| \sin(\theta_{i,j} - \delta_i + \delta_j) \right\}^2 \quad (2.45)$$

{Voltage Limit}

$$\Omega_v = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \max(0, V_{m,i} - V_{m,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \max(0, V_{m,i}^{\min} - V_{m,i}) \right\}^2 \quad (2.46)$$

{Power Limit}

$$\Omega_g = \rho \sum_{i=1}^{NB} \left\{ \max(0, P_{g,i} - P_{g,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \max(0, P_{g,i}^{\min} - P_{g,i}) \right\}^2 \quad (2.47)$$

$$\Omega_c = \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \max(0, Q_{g,i} - Q_{g,i}^{\max}) \right\}^2 + \rho \sum_{i=1}^{N_B} \left\{ \max(0, Q_{g,i}^{\min} - Q_{g,i}) \right\}^2 \quad (2.48)$$

โดยที่:  $N_B$  คือ จำนวนบัสของระบบจำหน่าย

#### 2.6.4 สรุป

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำมาใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงรวมของระบบให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งขั้นตอนการกำหนดตัวแปร ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การเลือกเงื่อนไขบังคับ นำไปสู่การเลือกใช้เทคนิคสำหรับแก้ปัญหาโดยวิธีการแบบตามู ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 2.7 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตามู

#### 2.7.1 บทนำ

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เทคนิคชาญฉลาดถูกนำมาประยุกต์ใช้มากขึ้นในปัจจุบัน เพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีความซับซ้อน และเป็นปัญหาแบบมัลติโมดอล (Multimodal Problem) ซึ่งมีจุดต่ำสุดหลายจุดในปริภูมิค้นหาและมีความไม่เชิงเส้นสูง ระเบียบวิธีกำหนดการทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอมานั้น อาจจะไม่สามารถค้นหาจุดต่ำสุดโดยรวมของปัญหาได้ ทำให้ปัญญาประดิษฐ์หรือเทคนิคชาญฉลาด ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย [21]

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำมาใช้แก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการแบบตามู ทำการหาตำแหน่งติดตั้ง DG ที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 1 MW นำมาเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE เพื่อลดกำลังสูญเสียของระบบให้มีค่าต่ำที่สุด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.7.2 ความหมายการค้นหาแบบตามู (Tabu Search: TS)

การค้นหาแบบตามู (Tabu Search: TS) เป็นขั้นตอนวิธีการคิดที่ถูกลำนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาาระบบที่เรียกว่าปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน (Combinatorial Optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Glover เป็นผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดของ TS ไว้ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2520 และหลังจากนั้น TS ก็ได้กลายมาเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง ปัจจุบัน TS ได้เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่ามีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local Optimum) และยังสามารถทำการค้นหาคำตอบต่อไปจนกระทั่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Near Global Optimum) ตัว TS เองยังสามารถประยุกต์ใช้งานกับหลายๆระบบได้ อย่างไม่ยุ่งยากมากนักเนื่องมาจากหลักการและกลไกการทำงานของ TS ที่ไม่ซับซ้อนนั่นเอง ซึ่งทำให้ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งานของ TS ค่อนข้างที่จะสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น วิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing) จินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) เครือข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ฯลฯ ดังนั้นแล้วการเขียนโปรแกรมใช้งาน TS จึงอาจใช้เพียง 2-3 บรรทัดเท่านั้น

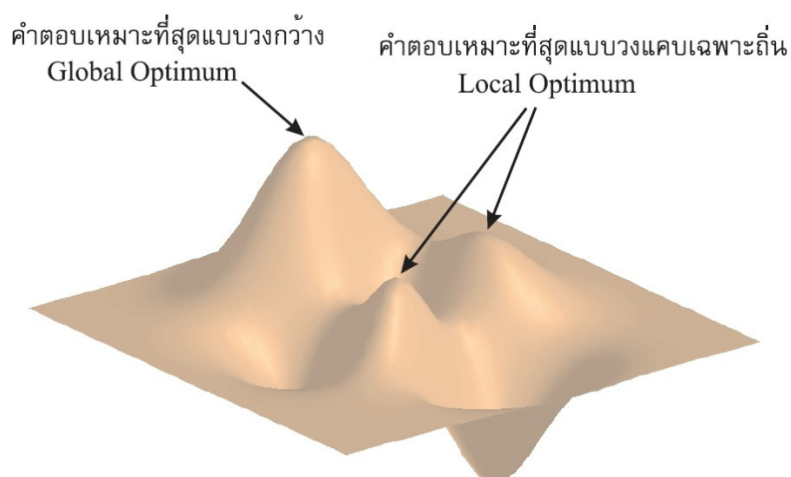
ข้อดีหลายๆ อย่างของ TS ทำให้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายและกลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดในงานหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นทาง ด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ทางธุรกิจหรือทางวิศวกรรม [22]

### 2.7.3 แนวคิดพื้นฐานของการค้นหาแบบตามู

คำว่า 'Tabu' มีความหมายตามพจนานุกรมต่างๆ ทั่วไปว่า 'ต้องห้าม' ในโครงสร้างของ TS จึงมองคู่ประกอบที่มีสถานะต้องห้ามหรือองค์ประกอบที่ไม่สามารถใช้งานได้อยู่ด้วย อย่างไรก็ตามสถานะขององค์ประกอบดังกล่าวไม่จำเป็นจะต้องคงสภาพเช่นนั้นตลอดไป แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสถานะต่างๆ ภายในระบบ ขั้นตอนการทำงานของ TS ใช้หลักแนวคิดดังกล่าว ในการพิจารณาเส้นทางที่คาดว่าจะนำไปสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยที่การค้นหาจะไม่หยุดอยู่ที่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ซึ่งหมายความว่าเส้นทางรอบๆ ในจุดนั้นๆ ไม่สามารถให้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบในปัจจุบันอีกแล้ว ดูตัวอย่างจากฟังก์ชัน

$$\text{peaks} = 3(1-x)2e^{(x^2+(y+1)^2)} - 10(5-x^3-y^5)e^{-(x^2+y^2)} + 3e^{-((x+1)^2+y^2)}$$

ใน MATLAB ดังภาพที่ 2.33

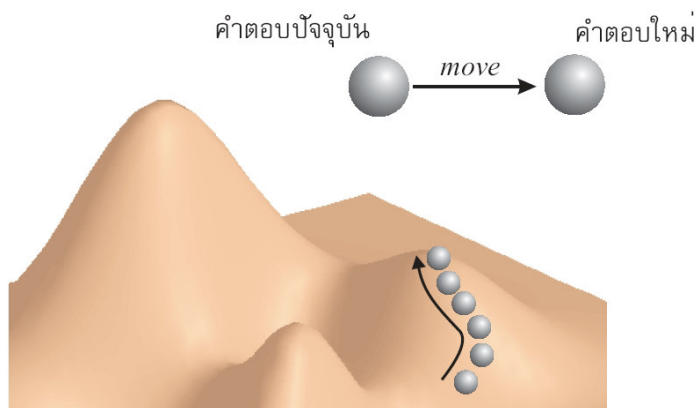


ภาพที่ 2.33 ตัวอย่างคำตอบที่เหมาะสมแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและแบบวงกว้าง

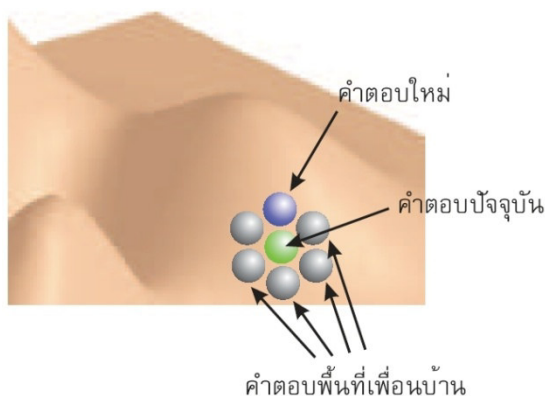
TS ใช้หลักแนวคิดที่ทำให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพเส้นทางต่างๆ ที่อยู่รอบๆ คำตอบในขณะนั้นสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการตัดสินใจว่าจะเลือกคำตอบใหม่ในเส้นทางใด ซึ่งแตกต่างไปจากการเลือกค้นหาคำตอบแบบอื่นๆ ดังนั้นการเลือกเส้นทางค้นหาคำตอบ ซึ่งในบางครั้งไม่ได้ให้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันอาจจะเป็นกลยุทธ์ที่สามารถนำไปสู่การค้นหาคำตอบที่ดีกว่าต่อไปได้

พิจารณาองค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบต่างๆ ไปในภาพที่ 2.34 กำหนดให้พื้นผิวในรูปเป็นผลที่ได้จากค่า การประเมิน (Objective Value) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) จุดหมายในที่นี้คือการหาค่าสูงสุดจากพื้นผิวของฟังก์ชันดังกล่าว (Maximization) การคำนวณหาคำตอบใหม่จากจุดของคำตอบปัจจุบันใดๆ จะใช้ปฏิบัติการที่เรียกว่าการ ‘Move’ (Move Operator) หรือ ‘การเดิน’ ซึ่งจะหาคำตอบหรือสถานะปัจจุบันของคำตอบเปลี่ยนแปลงไปตามการเดิน สำหรับการค้นหาคำตอบต่างๆ ไปที่เรียกว่าการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (Local Search หรือ LS) หรือการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง (Neighborhood Search หรือ NS) นั้น จะทำการเลือกคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันจากคำตอบที่มีอยู่รอบๆ โดยอาศัยการเดินเพื่อทำการประเมินค่าของคำตอบรอบๆ ข้าง เหล่านั้น แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดขึ้นมาเป็นคำตอบใหม่ต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2.35 จากรูปจะเห็นได้ว่าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่สูงที่สุดในบรรดาคำตอบเพื่อนบ้านทั้งหมด การค้นหาคำตอบด้วยวิธีนี้บางครั้งจะเรียกว่าวิธีการไต่เขา (Hill Climbing) กำหนดให้ขบวนการค้นหาคำตอบเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (ในกรณีตัวอย่างนี้ให้เป็นการหาค่าเหมาะสมที่มากที่สุดหรือการทำ

Maximization) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $f(s)$  และ  $s \in S$  โดยที่  $f(s)$  อาจจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้นใดๆ  $s$  เป็นคำตอบในปัจจุบันและ  $S$  เป็นเซตคำตอบที่เป็นไปได้ของระบบ



ภาพที่ 2.34 ปฏิบัติการ 'move' หรือการเดินทางเพื่อหาคำตอบใหม่จากคำตอบปัจจุบัน



ภาพที่ 2.35 การค้นหาคำตอบเฉพาะที่

(นั่นคือ  $S$  เป็นพื้นที่ค้นหาหรือ Search Space) สำหรับ  $s$  แต่ละค่าซึ่งเป็นคำตอบในตอนนี้จะมียุทธศาสตร์รอบข้างหรือ Neighborhood คือ  $N \subset S$  การกำหนดคำตอบรอบข้างนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาและการเดินทางที่กำหนดให้  $M$  คือเซตของการเดินทางในระบบแล้ว เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างคำตอบรอบข้างกับการเดินทางได้ดังนี้

$$N_i(s) = \{\mu_i(s) \in N\} \quad (2.49)$$

โดยที่  $i = 1, \dots, n$  สำหรับ  $\mu_i \in M$  การเดินจะขึ้นอยู่กับระบบ ดังนั้นจึงสามารถมีการเดินที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ระบบ ในกรณีนี้การเดินทำให้สถานะของระบบเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น นั่นคือมีคำตอบที่เข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุด เราสามารถนิยามคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ดังนี้

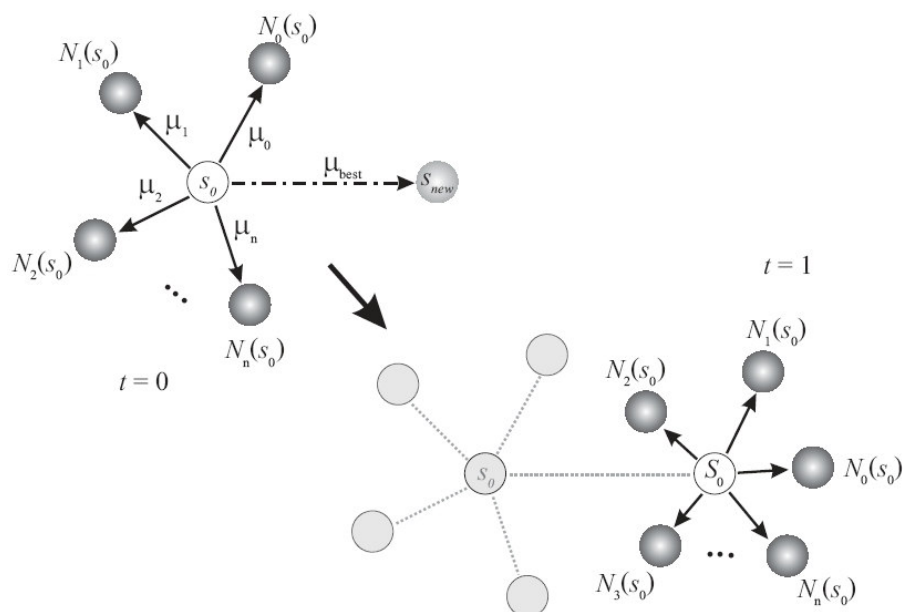
ถ้า  $s$  เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global Optimum) แล้ว จะได้ว่า

-  $f(s) \geq f(y)$  สำหรับ  $\forall y \in S$  (กรณีหาค่ามากที่สุดหรือ Maximization)

-  $f(s) \leq f(y)$  สำหรับ  $\forall y \in S$  (กรณีหาค่าน้อยที่สุดหรือ Minimization)

ถ้า  $s$  เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local Optimum) แล้ว จะได้ว่า

-  $f(s) \geq f(y)$  สำหรับ  $\forall y \in N(x)$  (กรณีหาค่ามากที่สุดหรือ Maximization)



ภาพที่ 2.36 การค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง

$f(s) \leq f(y)$  สำหรับ  $\forall y \in N(x)$  (กรณีหาค่าน้อยที่สุดหรือ Minimization) ขั้นตอนทั่วไปของการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้างสามารถสรุปได้ดังนี้ ดังภาพที่ 2.36

#### 2.7.4 การค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง - Neighborhood Search

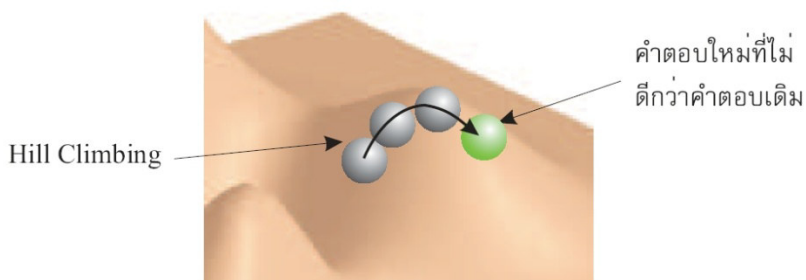
1) เลือก  $s_0 \in S$  เป็นคำตอบเริ่มต้นของระบบ  $s_0$  อาจจะมาจากการสุ่ม (Random) กำหนดให้คำตอบปัจจุบันที่มีอยู่นี้เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

2) ค้นหา  $s_{new} \in N(s_0)$  โดยที่  $f(s_{new}) > f(s_0)$

3) ถ้าไม่สามารถหา  $s_{\text{new}}$  ในข้อ 2) ได้ แสดงว่า  $s_0$  เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นให้ยุติการค้นหาได้

4) ให้  $s_0 = s_{\text{new}}$  แล้วเริ่มข้อ 2) ใหม่

ข้อด้อยที่เห็นได้ชัดของวิธีการค้นหาคำตอบแบบนี้ก็คือ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ เมื่อคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดที่ในคำตอบรอบข้างแล้ว จะไม่มีการเดินใดๆ ที่ทำให้ได้คำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันนี้อีกแล้ว อย่างไรก็ตามโครงสร้างการค้นหาคำตอบแบบนี้ก็ยังถูกใช้ในวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ยกตัวอย่างเช่นการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมลงชันสุด (Steepest Descent) ที่ออกแบบให้ทิศทางของการค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุดในเทอมของเกรเดียน (Gradient) ถึงแม้วิธีดังกล่าวจะไม่สามารถแก้ปัญหาของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ก็ตาม สำหรับ TS แล้วคุณสมบัติในการหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจุดเด่นที่ทำให้ TS กลายเป็นเครื่องมือในการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2.37 การหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น

### 2.7.5 องค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบแบบตาม (Fundamental TS Structures)

TS เพิ่มเดิมขั้นตอนและเงื่อนไขในการเดินที่นอกเหนือไปจากการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง โดยมีจุดประสงค์หลักคือ

1) หลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local Optimum Avoidance) คำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบพื้นที่รอบข้างจะมีค่าการประเมินที่สูงที่สุด ถ้าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบจะทำการเดินไปยังทิศทางนั้น และเมื่อใดที่ค่าการประเมินของคำตอบ พื้นที่รอบข้างไม่ได้ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบที่ดีกว่าจะสิ้นสุดลง ซึ่งในกรณีนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง คำตอบที่ได้ในขณะนี้จะเป็น



คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ในทางตรงข้าม TS ยอมให้มีการเดินไปยังคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่ไม่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน จุดประสงค์สำคัญก็เพื่อให้สามารถหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้นั่นเอง ดังภาพที่ 2.37

2) หลีกเลี่ยงเส้นทางที่การค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ (Cycle Avoidance) เส้นทางบางเส้นทางสามารถนำไปสู่การวนรอบอยู่กับที่ทำให้ไม่สามารถหลุดออกไปจากสถานะปัจจุบันได้ (ดังนั้นไม่สามารถเปลี่ยนเส้นทางที่นำไปสู่คำตอบที่ดีกว่าได้) ตัวอย่างของเส้นทางดังกล่าวได้แก่การเดินย้อนกลับ (Inverse Move) ซึ่งในบางโอกาสอาจจะทำให้การค้นหาคำตอบเกิดการเดินไปกลับโดยไม่มีที่สิ้นสุดได้ ดังนั้นใน TS จึงมีการตั้งค่าสถานะของการเดินที่เพิ่งถูกใช้ให้เป็นสถานะต้องห้าม (Tabu) เพื่อไม่ให้ใช้การเดินนอกภายในระยะเวลาที่กำหนด (นั่นหมายความว่าถ้าเวลาผ่านไปภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้แล้ว สถานะของการเดินนั้นจะถูกยกเลิกการเป็นสถานะต้องห้าม)

\* สถานะต้องห้ามหรือสถานะตาบู่ – เซตของการเดินใดๆ ที่ถูกตั้งสถานะเป็นสถานะต้องห้ามจะไม่อนุญาตให้ถูกใช้ในการค้นหาคำตอบได้ \*

ด้วยความสามารถใหม่ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า TS ได้มีการใช้ข้อมูลของการค้นหาคำตอบในอดีตมาช่วยตัดสินใจการเดินว่าควรจะไปในทิศทางใด องค์ประกอบใหม่ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของ TS ที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นนี้ได้แก่

1) เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด (Regency Condition) การใช้เงื่อนไขของความคงอยู่เป็นการติดตามการค้นหาคำตอบในช่วงเวลาที่ผ่านไป เมื่อคำตอบหนึ่งถูกค้นพบแล้ว การเดินที่นำไปสู่คำตอบนั้นจะถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม คำตอบที่ถูกค้นพบด้วยการเดินจะถือเป็นคำตอบล่าสุดและจะไม่ถูกค้นอีกภายในระยะเวลาหนึ่ง (เนื่องจากการเดินที่นำไปสู่คำตอบนี้ถูกห้ามใช้อีก ในขณะที่ยังมีสถานะต้องห้ามอยู่) หลังจากระยะเวลาที่กำหนดผ่านไป สถานการณ์เดินนี้ก็จะถูกตั้งค่ากลับสู่สภาวะปกติ ดังนั้นแล้วภายหลังจากการเดินไปยังคำตอบหนึ่งๆ TS จะบังคับให้การค้นหาคำตอบทำการเดินไปยังคำตอบใหม่ โดยที่คำตอบเดิมจะไม่ถูกค้นอีก กลไกนี้ทำให้ TS สามารถหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น และทำการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นไปเรื่อยๆ ได้ (ถึงแม้ว่าในบางครั้งคำตอบใหม่จะไม่ดีกว่าคำตอบที่มีอยู่ก็ตาม)

2) เงื่อนไขของความซ้ำซาก (Frequency Condition) ในลักษณะเดียวกันเราสามารถบันทึกจำนวนครั้งที่การเดินหนึ่งๆ ถูกเรียกใช้ได้ TS ถือว่าถ้ารูปแบบการเดินใดถูกเรียกใช้เป็นจำนวนมากครั้งเกินไป (เกินจำนวนที่ตั้งเอาไว้) การเดินนั้นควรจะถูกต้องห้ามหรือถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่การค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ ทำให้สามารถหลุดพ้นจากคำตอบ

เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ เงื่อนไขทั้งสองจะถูกใช้ร่วมกันเสมอ เนื่องจากเงื่อนไขเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งไม่เพียงพอ เราสามารถกล่าวได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองเป็นส่วนเติมเต็มหรือ Complimentary ซึ่งกันและกัน กล่าวคือการเดินใดถูกตั้งค่าใหม่สถานะต้องห้ามด้วยเงื่อนไขของความซ้ำซาก และได้คงสถานะต้องห้ามนานเกินระยะเวลาที่กำหนดไว้ การเดินนั้นจะสามารถถูกตั้งค่ากลับสู่สถานะปกติได้ด้วยเงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด TS ยังมีอีก 2 องค์ประกอบอื่นๆ อันเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้แก่ กลไกการเน้น (Intensification) และ กลไกการแปรเปลี่ยน (Diversification) โดยจะกล่าวรายละเอียดดังต่อไปนี้

**กลไกการเน้น** คือ การค้นหาคำตอบที่เน้นไปยังกลุ่มคำตอบที่ได้ค้นพบแล้วว่าเป็นคำตอบที่ดี โดยใช้ข้อมูลที่ได้นับจากการค้นหาคำตอบที่ผ่านมาในอดีต กลยุทธ์นี้ทำ TS กลับไปค้นหาคำตอบในย่านที่เคยเจอคำตอบที่ดี และทำการค้นหาในย่านนั้นอย่างละเอียดขึ้น ส่วนประกอบของคำตอบที่น่าจะเป็นประโยชน์หรือเส้นทางที่นำไปสู่คำตอบนั้น จะถูกใช้เป็นข้อมูลโดยกลไกการเน้นในการค้นหาคำตอบใหม่ได้

**กลไกการแปรเปลี่ยน** ในทางตรงกันข้ามเป็นกลยุทธ์ที่ส่งเสริมให้ TS ไปทำการสำรวจย่านที่ยังไม่เคยถูกสำรวจมาก่อน ซึ่งอาจจะทำให้ได้คำตอบที่มีความแตกต่างไปจากกลุ่มคำตอบที่ได้ถูกสำรวจมาก่อนที่จะทำกลยุทธ์นี้ ในบางครั้งการเลือกเส้นทางอื่นที่ยังไม่เคยสำรวจและแตกต่างไปจากแนวทางของเส้นทางเดิม อาจจะทำให้มีโอกาสเจอคำตอบที่ดีกว่าได้เช่นกัน

3) เกณฑ์ความทะเยอทะยาน นอกไปจากองค์ประกอบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น TS ยังมีองค์ประกอบอื่นที่เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบการค้นหาแบบตายนั่นก็คือ เกณฑ์ความทะเยอทะยาน ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สามารถทำให้เกิดการเดินไปในทิศทางที่ต้องการ ถึงแม้ว่าการเดินนั้นจะมีสถานะต้องห้าม โดยที่การเดินดังกล่าวจะถูกอนุญาตก็ต่อเมื่อคำตอบที่ได้ดีกว่าทุกคำตอบที่เคยค้นพบมา (TS จะต้องทำการเก็บบันทึกผลการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเอาไว้เพื่อใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข)

#### 2.7.6 โครงสร้างการค้นหาคำตอบแบบตายนุ (Fundamental TS Structures)

การค้นหาตายนุประกอบด้วยโครงสร้างหลักที่สำคัญ 4 ประการ ได้แก่ ปฏิภูมิการค้นหา (Search Space) เซตข้างเคียง (Neighborhood Set) หน่วยความจำของการค้นหา (Search Memories) และเกณฑ์ความทะเยอทะยาน (Aspiration Criteria) [21]



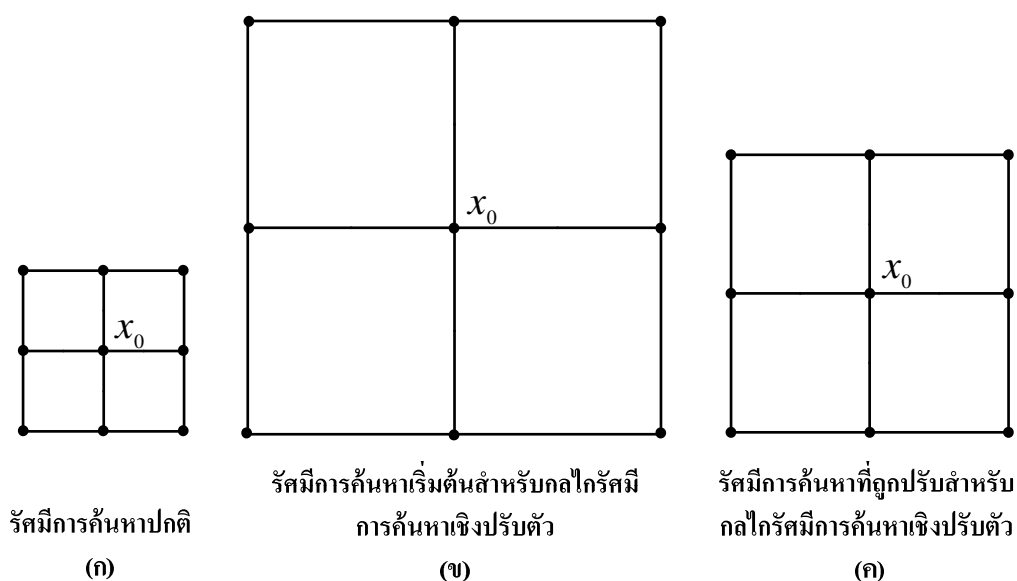
3) หน่วยความจำของการค้นหา (Search Memory) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญเพื่อช่วยให้กระบวนการค้นหาหลุดจากกับดักของจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นได้ (Local Minimum) โดยทั่วไปแล้วหน่วยความจำของการค้นหาแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. หน่วยความจำระยะสั้น (Short-Term Memory) ทำหน้าที่เก็บเซตของจุดคำตอบที่ถูกปรับปรุงในรอบการค้นหาที่ผ่านมา เพื่อกำหนดให้เป็นทิศทางต้องห้าม เรียกว่า ตาบูลิสต์ (Tabu List)

2. หน่วยความจำระยะยาว (Long-Term Memory) โดยจะเก็บเซตของจุดคำตอบเช่นกัน แต่จะมีช่วงเวลาในการเลือกเก็บที่ยาวนานมากกว่า ข้อมูลดังกล่าวจะใช้เพื่อเริ่มการค้นหาใหม่หลังจากที่จุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นใดๆ ถูกค้นพบแล้ว หน่วยความจำต่างๆ เหล่านี้มีคุณสมบัติแบบเข้าก่อนออกทีหลัง (First-in, Last-out) หรือนิยมเรียกว่า สแต็ก (Stack)

4) เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (Aspiration Criteria) เป็นกลยุทธ์ที่ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้ปลด ล็อกการติดกับดักของจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่น เซตคำตอบในตาบูลิสต์จะเป็นตัวกำหนดทิศทางต้องห้ามไม่ให้ค้นหา ผลของเกณฑ์ความทะเยอทะยานนี้ จะไปปลดเงื่อนไขดังกล่าว นั่นคือ จะยอมให้การค้นหาไปในทิศทางต้องห้ามได้ แต่อาจจะต้องกำหนดกฎเกณฑ์บางอย่างกำกับไว้ เช่น เมื่อไม่สามารถปรับปรุงจุดคำตอบได้อีกแล้ว เมื่อใช้การคำนวณอย่างน้อย 10 รอบการค้นหา เป็นต้น เกณฑ์ดังกล่าวไม่มีข้อกำหนดที่ตายตัว ผู้แก้ไขปัญหาก็สามารถกำหนดได้อย่างอิสระ

กลไกของรัศมีการค้นหาเชิงปรับตัว (Adaptive Search Radius Mechanism) เป็นกลยุทธ์รูปแบบหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ เมื่อกระบวนการค้นหาไม่สามารถปรับปรุงผลเฉลยได้เป็นจำนวนรอบที่มากกว่าที่กำหนด กลไกนี้จะปรับลดรัศมีการค้นหาซึ่งหมายถึงขอบเขตของเซตข้างเคียงลง โดยขอบเขตของเซตข้างเคียงที่ลดลง จะส่งผลให้มีการสร้างเซตข้างเคียงดังกล่าวมีโอกาสค้นพบผลเฉลยที่ดีกว่าผลเฉลยในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามอัตราการปรับลดค่าของรัศมีไม่มีกฎที่แน่ชัดขึ้นอยู่กับปัญหาและต้องกำหนดโดยผู้ใช้งาน เช่น อาจจะปรับให้รัศมีการค้นหาลดลง 80 % ของค่าเดิม เมื่อไม่สามารถปรับปรุงจุดคำตอบได้ในการคำนวณ 100 รอบการคำนวณติดกัน เป็นต้น พิจารณาได้ดังภาพที่ 2.40-ก นำเสนอรัศมีการค้นหาปกติสำหรับการค้นหาแบบดั้งเดิม การค้นหาด้วยหลักการนี้ เสียเวลาในการคำนวณมากเกินไป ถ้าการค้นหาที่มีคุณสมบัติลาดชัน การข้ามจุดหรือขยายขอบเขตการสร้างเซตข้างเคียงให้กว้างขึ้น ดังภาพที่ 2.40-ข ย่อมทำให้ได้ผลเฉลยที่รวดเร็วยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้รัศมีการค้นหาที่กว้างจะทำให้คำตอบเข้าสู่เร็ว แต่เมื่อผลเฉลยที่ถูกปรับปรุงมีค่าเข้าใกล้จุดต่ำสุดเฉพาะถิ่น การใช้รัศมีที่กว้างขึ้นย่อมลุ่มจุดคำตอบข้ามจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่น และไม่สามารถปรับปรุงจุดคำตอบได้เลย ดังนั้นเมื่อคำตอบไม่สามารถปรับปรุงได้อีกเป็นจำนวนรอบที่มากกว่าค่าที่กำหนด นั้นหมายความว่าผลเฉลยที่ปรับปรุงเข้าใกล้จุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นให้ปรับลดรัศมีการค้นหาดังภาพที่ 2.40-ค



ภาพที่ 2.40 กลไกการค้นหาเชิงปรับตัว

กระบวนการค้นหาสามารถสรุปเป็นขั้นตอนย่อยๆ ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 สุ่มเลือกคำตอบเริ่มต้น  $x_0$  กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น

ให้  $x_{lbest} = x_0, x_{gbest} = x_0, TL = \text{เซตว่าง}$

ขั้นที่ 2 สร้างผลเฉลยแบบสุ่มจากเซตข้างเคียง  $\mathcal{N}(x_0)$  ของ  $x_0$  โดยที่  $x \in \mathcal{N}(x_0)$

ขั้นที่ 3 ค้นหาสมาชิกที่ให้ค่าความฟิตที่ดีที่สุด  $x_{nbest}$  จากเซตข้างเคียงที่สร้างขึ้น

ถ้า  $x_{nbest}$  ให้ค่าความฟิตดีกว่า  $x_{lbest}$  จะได้ว่า  $x_{lbest} = x_{nbest}$  เก็บ  $x_{nbest}$  ไว้ในตามูลิสต์

ถ้าไม่ใช่ ให้ตรวจสอบการติดกับดักเกณฑ์ความทะเยอทะยาน

- สอดคล้องตามเกณฑ์ทะเยอทะยาน

\* ถ้าจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นถูกค้นพบข้ามไปขั้นที่ 5

\*\* ถ้าไม่ใช่ข้ามไปขั้นที่ 4

- ไม่สอดคล้องตามเกณฑ์ความทะเยอทะยาน ทำซ้ำขั้นที่ 2

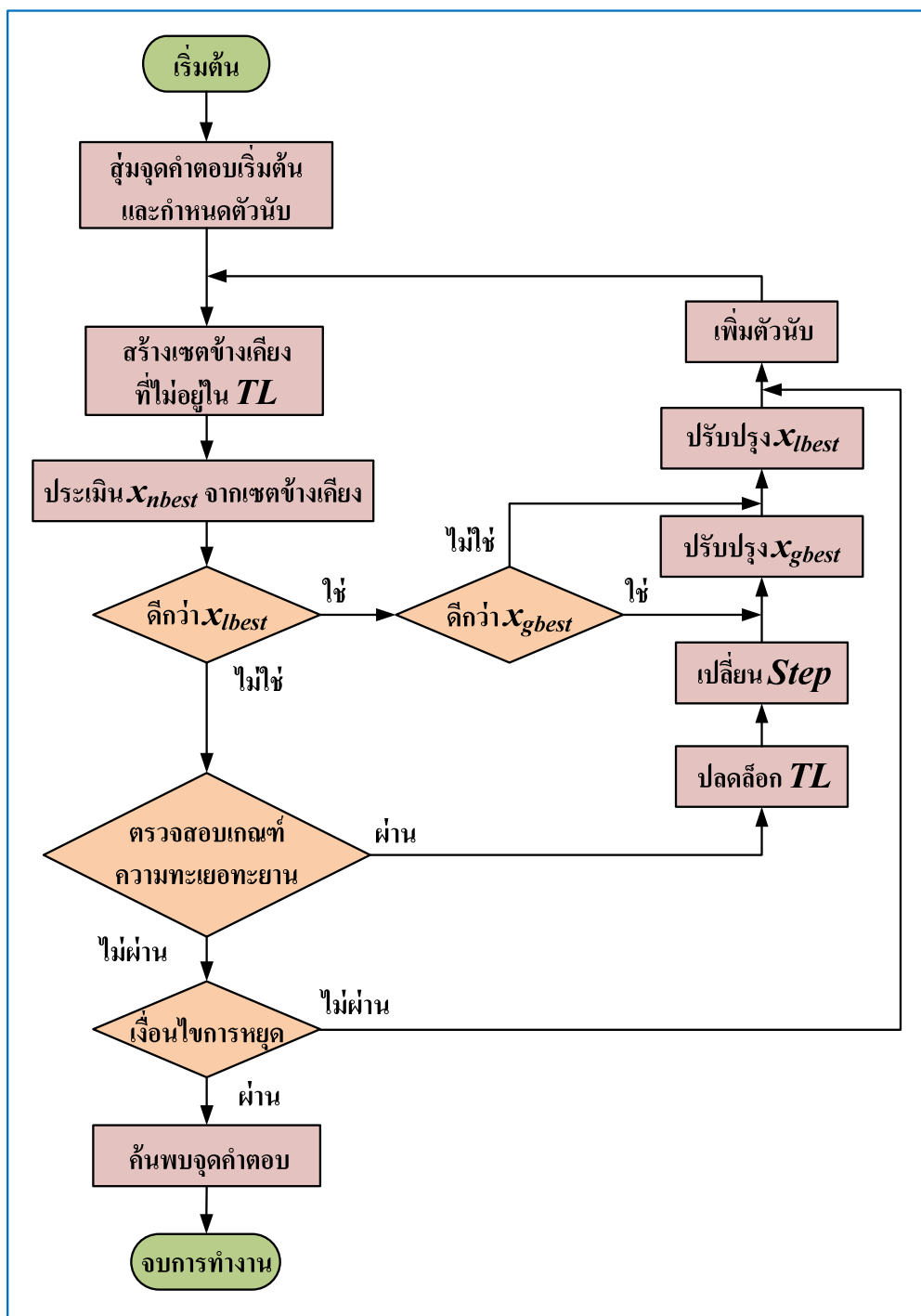
- ตรวจสอบเงื่อนไขการปรับรัศมีการค้นหา

ขั้นที่ 4 ปลดเงื่อนไขตามูลิสต์ ทำซ้ำขั้นที่ 2

ขั้นที่ 5 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด

ถ้าไม่เป็นจริงให้เริ่มต้นการค้นหาจากหน่วยความจำระยะยาวที่เก็บไว้ ทำซ้ำขั้นที่ 2

ขั้นที่ 6 ค้นพบผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุด อาจจะสรุปเป็นแผนผังการทำงาน  
ได้ดังนี้



ภาพที่ 2.41 การทำงานของการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการค้นหาตาม

ตัวอย่างที่ 2.1 ดำเนินการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดต่อไปนี้โดยใช้การค้นหาตาม

$$\text{Minimize} \quad f(x) = x_1^2 + x_2^2$$

วิธีทำ กำหนดให้ความละเอียดของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรเท่ากับ 0.01

เนื่องจากปัญหานี้มีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียว ทำให้กับดักของจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นไม่มีผลต่อการค้นหา ดังนั้นจะไม่ใช้เกณฑ์ความทะเยอทะยาน

สุ่มจุดเริ่มต้น จะได้  $x_0 = [0.2 \ -0.4]^T$ . ให้ค่า  $f(x_0) = 0.2$

ให้  $x_{best} = x_0$ .

ตารางที่ 2.4 รอบการคำนวณที่ 1: สร้างเซตข้างเคียงโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร 0.01 ในแต่ละมิติจะได้ทั้งสิ้น 8 ตัว

$i$	$x_1$	$x_2$	$fobj$	<i>remark</i>
1	0.20	-0.39	0.1921	
2	0.20	-0.41	0.2081	
3	0.21	-0.39	0.3621	
4	0.21	-0.40	0.2041	
5	0.21	-0.41	0.2122	
6	0.19	-0.39	0.1882	<i>Neighborhood best : <math>x_{best}</math></i>
7	0.19	-0.40	0.1961	
8	0.19	-0.41	0.2042	

เก็บ  $x_0 = [0.2 \ -0.4]^T$ . ไว้ในตามูลิสต์  $TL = \{x_0\}$  จะได้  $x_1 = [0.19 \ -0.39]^T$

ตารางที่ 2.5 รอบการคำนวณที่ 2: สร้างเซตข้างเคียงโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร 0.01 ในแต่ละมิติ จะได้ทั้งสิ้น 8 ตัว

$i$	$x_1$	$x_2$	$fobj$	$remark$
1	0.19	-0.38	0.1805	
2	0.19	-0.40	0.1961	
3	0.20	-0.38	0.1844	
4	0.20	-0.39	0.1921	
5	0.20	-0.40	<i>Don't care</i>	<i>Tabu move</i>
6	0.18	-0.38	0.1768	<i>Neighborhood best : <math>x_{lbest}</math></i>
7	0.18	-0.39	0.1845	
8	0.18	-0.40	0.1924	

เก็บ  $x_1 = [0.19 - 0.39]^T$  ไว้ในตามูลิสต์  $TL = \{x_0, x_1\}$  จะได้  $x_2 = [0.18 - 0.38]^T$

ทำการคำนวณวนรอบจะได้รับการเข้าสู่จุดคำตอบของผลเฉลย

### 2.7.7 สรุป

การศึกษาค่าเหมาะที่สุดโดยใช้เทคนิคชาดูลาด ซึ่งใช้ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตาม ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำมาใช้แก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตาม ทำการหาตำแหน่งติดตั้ง DG ที่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 1 MW นำมาเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส ของ IEEE เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบให้มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจหลักการพื้นฐาน และขั้นตอนของระเบียบวิธีการเพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

คำว่า “Tabu” มีความหมายตามพจนานุกรมต่างๆ ว่าเป็น “ต้องห้าม” ในโครงสร้างของ TS จึงมีองค์ประกอบที่มีสถานะต้องห้ามหรือองค์ประกอบที่ไม่สามารถใช้งานได้อยู่ด้วย อย่างไรก็ตามสถานะขององค์ประกอบดังกล่าวไม่จำเป็นจะต้องคงสภาพเช่นนั้นตลอดไป แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสถานะต่างๆ ภายในระบบ [23]

ข้อดี: ตัว TS เองยังสามารถประยุกต์ใช้งานกับหลายๆ ระบบได้อย่างไม่ยุ่งยากมากนัก เนื่องจากหลักการและกลไกการทำงานของ TS ที่ไม่ซับซ้อนนั่นเอง ซึ่งทำให้ขั้นตอนการ



ประยุกต์ใช้งานของ TS ก่อนข้างที่จะสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่นวิธีการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing) จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm)

ข้อเสีย: การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบตามช่วยแก้ปัญหาของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและการวนรอบอยู่กับที่พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ในโครงสร้างของ TS มีผลต่อพฤติกรรมในการค้นหาคำตอบ โดยทฤษฎีแล้วยังไม่มีการคำนวณที่แน่นอนว่าพารามิเตอร์ต่างๆ ควรจะมีค่าเป็นเท่าไรที่จะทำให้การค้นหาคำตอบของ TS เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยปกติแล้วการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้จากการสุ่มทดลองและสังเกตผล

ขีดจำกัด: การค้นหาแบบตาม หรือ Tabu Search (TS) เป็นขั้นตอนวิธีการคิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาในระบบที่เรียกว่าปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial Optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (Local Optimum) และยังสามารถทำการค้นหาคำตอบต่อไปจนกระทั่งให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Near Global Optimum)

ข้อกำหนดที่เหมาะสมทางเทคนิค: สิ่งสำคัญที่ทำให้ TS แตกต่างไปจากการค้นหาคำตอบวิธีอื่นๆ ก็คือรายการต้องห้าม (Tabu List) ซึ่งใช้เป็นตัวข้อมูลสำหรับเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในการค้นหาคำตอบ ไม่ว่าจะเป็นสถานะต้องห้ามของแต่ละการเดินทางหรือคุณสมบัติอื่นๆ ของ TS เช่น เงื่อนไขความซ้ำซากหรือเงื่อนไขความคงอยู่ล่าสุด ดังนั้นการออกแบบรายการต้องห้ามจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะคุณสมบัติของรายการต้องห้ามเช่น ขนาด หรือช่วงเวลาในการคงความเป็นสถานะต้องห้าม ฯลฯ จะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ TS

## 2.8 ระบบขดเคเบิลกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-Sulfur Battery: NaS)

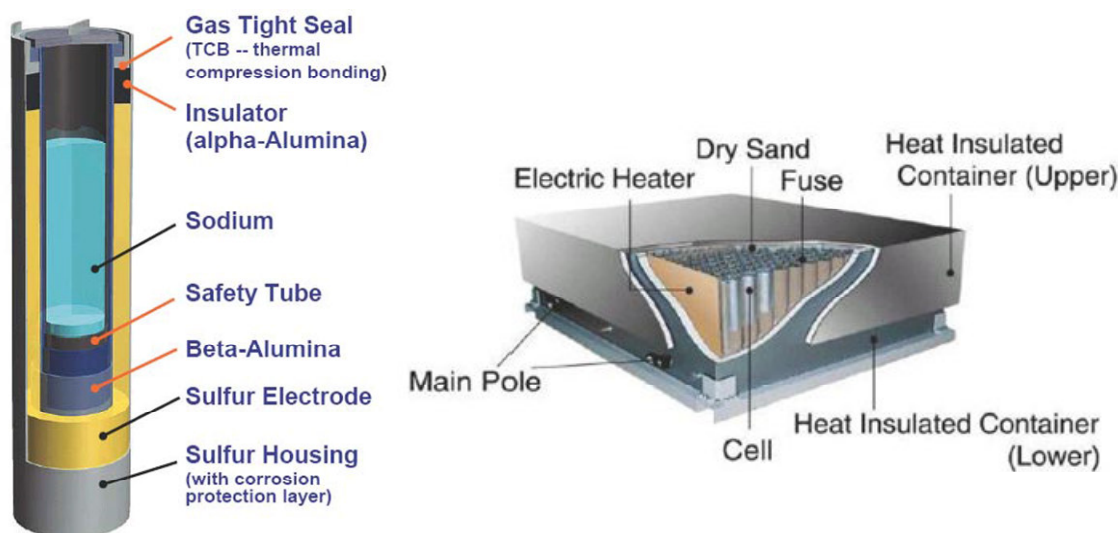
### 2.8.1 บทนำ

จากปัญหาของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เฉพาะช่วงเวลากลางวันเท่านั้น การใช้ระบบขดเคเบิลกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ก็เป็นทางเลือกหนึ่งในการที่จะขยายเวลาการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดของระบบได้ยาวนานขึ้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้ระบบขดเคเบิลกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-Sulfur Battery: NaS) ที่มีขนาด 200 kW มาใช้แก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้น และจะเป็นการแก้ไขเพื่อปรับปรุงรูปร่างของแรงดันในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้ดีขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย

## 2.8.2 ส่วนประกอบและหลักการทำงาน

แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ เป็นแบตเตอรี่ชนิดหนึ่งในแบตเตอรี่ประเภท Molten-metal ที่มีการนำมาใช้กักเก็บพลังงานในระบบขนาดใหญ่มากมาย ประกอบด้วยโครงสร้างที่มีโซเดียมเหลวทำหน้าที่เป็นขั้วลบและซัลเฟอร์เหลวทำหน้าที่เป็นขั้วบวก ซึ่งซัลเฟอร์เหลวจะถูกดูดซับอยู่ในคาร์บอนที่ลักษณะเหมือนฟองน้ำ โดยขั้วทั้งสองจะถูกแยกจากกันด้วยอิเล็กโทรไลต์ที่มีลักษณะเป็นของแข็งทำจากเบต้าอลูมินา ซึ่งอิเล็กโทรไลต์นี้จะยอมให้  $\text{Na}^+$  เคลื่อนที่ผ่านเท่านั้น ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีอัตราการคายประจุด้วยตัวเองต่ำมาก [24]

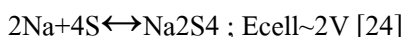
โดยทั่วไปเซลล์แบตเตอรี่ชนิดนี้มักจะสร้างในรูปทรงกระบอกสูง เซลล์ทั้งหมดจะถูกหุ้มด้วยเหล็กที่เคลือบโครเมียมและโมลิบดีนัม เพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากภายใน ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แบตเตอรี่จะแสดงดังภาพที่ 2.42 (ซ้าย) สำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์เซลล์แบตเตอรี่จะถูกจัดเรียงอยู่ในกล่องแบตเตอรี่ที่มีฉนวน ดังภาพที่ 2.42 (ขวา) เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนเนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้จะทำงานที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงประมาณ 300 ถึง 350 °C นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องมีแหล่งกำเนิดความร้อน



ภาพที่ 2.42 ส่วนประกอบและโครงสร้างของเซลล์แบตเตอรี่ NaS (ซ้าย) เซลล์ NaS ที่ประกอบในโมดูลแบตเตอรี่ (ขวา) [24]

การทำงานของแบตเตอรี่ ในขณะที่คายประจุโซเดียมไอออนจะเคลื่อนที่จากขั้วลบผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ที่ขั้วบวก กลายเป็นโซเดียมพอลิซัลไฟด์ (Sodium

Polysulfides) ซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง และเมื่อทำการอัดประจุก็จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ในระหว่างอัดและคายประจุจะเกิดความร้อนขึ้น โดยความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นวัฏจักรตามรอบการอัดและคายประจุนี้เพียงพอที่จะรักษาอุณหภูมิในการดำเนินการ จึงไม่จำเป็นต้องมีแหล่งพลังงานจากภายนอก โดยปฏิกิริยาระหว่างอัดและคายประจุ เป็นไปดังนี้



## 1) คุณสมบัติของแบตเตอรี่

### 1. คุณสมบัติทั่วไป

ข้อดี เป็นแบตเตอรี่ที่ให้ความหนาแน่นพลังงานสูง (มากกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดถึงสามเท่า) มีประสิทธิภาพในการอัดและคายประจุสูง (89-92%) อายุการใช้งานนาน อัตราการคายประจุด้วยตัวเองต่ำ ทำจากวัสดุที่ราคาไม่แพงและเป็นวัสดุที่ไม่เป็นอันตราย

ข้อเสีย มีการใช้งานเฉพาะในช่วงอุณหภูมิสูง 300-350 °C ต้องใช้ความร้อนในการรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่ใช้งานซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ และในระหว่างที่สแตนด์บายจะต้องรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้สูงกว่า 290 °C ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานระหว่างการดำเนินการได้ แบตเตอรี่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการระเบิดหากอิเล็กโทรไลต์เกิดแตกสลาย

ตัวอย่างการใช้งาน เหมาะกับการใช้งานขนาดใหญ่และไม่ต้องเคลื่อนย้าย เช่น Grid Energy Storage ใช้เป็นแบตเตอรี่ในรถยนต์ซึ่งมีข้อดีตรงที่น้ำหนักเบาและมีขนาดเล็ก มีการใช้งานในลักษณะ Peak Shaving หรือ Load Leveling ได้เมื่อนำหลายๆ เซลล์มาประกอบกันเป็นโมดูล และคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานขนาดใหญ่

### 2. คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานขนาดใหญ่

ก. แบตเตอรี่ NaS สามารถจัดเก็บพลังงานได้เป็นจำนวนมาก และมีการตอบสนองในการทำงานที่รวดเร็ว ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานที่มีความผันผวนอย่างพลังงานหมุนเวียน และสามารถสำรองพลังงานไว้ใช้ยามฉุกเฉินได้อีกด้วย

ข. แบตเตอรี่ NaS ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงสามารถดำเนินการได้ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (optimum) และมีอัตราการผลิตคงที่ โดยการกักเก็บพลังงานส่วนเกินที่ผลิตได้ ส่งผลให้สามารถลดการสิ้นเปลืองเชื้อน้ำมันเพลิง และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีกด้วย

ก. แบตเตอรี่ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์จะถูกออกแบบมาให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นาน 7 – 10 ชั่วโมง และเมื่อมีการใช้ในช่วงเวลาสั้น (ตั้งแต่วันที่จนถึงนาที) แบตเตอรี่สามารถให้พลังงานสูงเป็นเท่าของกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้นาน 7 ชั่วโมง

ง. มีอายุการใช้งานยาวนานประมาณ 15 ปี หรือ 4,500 รอบอัตราการคายประจุ

จ. แบตเตอรี่ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซ และมีการสั้นสะเทือนน้อยทำให้ไม่เกิดเสียงดัง

## 2) การพัฒนาแบตเตอรี่โซเดียม-ซัลเฟอร์

1. ประเทศสหรัฐอเมริกา ฟอรัมอเตอร์เป็นผู้บุกเบิกแบตเตอรี่ในทศวรรษที่ 1960 เพื่อนำมาใช้ให้พลังงานในต้นแบบรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นแรกๆ นอกจากนั้นการทดลองเทคโนโลยีแบตเตอรี่ NaS ครั้งแรกในสหรัฐอเมริกาเกิดขึ้นในโอไฮโอ (Ohio) ตั้งแต่ปี 2001 ถึง 2002 และปี 2009 บริษัท Ceramtec ได้พัฒนาแบตเตอรี่ NaS รุ่นที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งพวกเขาใช้ เมมเบรนที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ที่มีชื่อว่า Sodium (Na) Super Ion Conductor หรือ NaSICON ซึ่งทำให้แบตเตอรี่ดำเนินการได้ที่อุณหภูมิ 90 °C โดยส่วนประกอบที่เหลือเป็นของแข็งทั้งหมด

2. ประเทศญี่ปุ่น แบตเตอรี่ NaS เป็นหนึ่งในสี่ประเภทของแบตเตอรี่ที่ถูกเลือกมาวิจัยอย่างเข้มข้น (แบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ ที่ถูกเลือกมาได้แก่ lead acid-, vanadium redox flow-, and ZnBr batteries) โดย Ministry of International Trade and Industry (MITI) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการมูนไลท์ (Moonlight) ในปี 1980 โครงการนี้ ได้ค้นคว้าเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานที่มีความทนทาน ยั่งยืนตั้งเงื่อนไขที่แสดงด้านล่าง โดยโครงการนี้มีระยะเวลา 10 ปี

ก. ต้องมีขนาด 1,000 กิโลวัตต์

ข. 8 hour charge/8 hour discharge at rated load

ค. ประสิทธิภาพประมาณ 70% หรือมากกว่า

ง. มีอายุการใช้งานประมาณ 1,500 รอบหรือมากกว่า

3. ในปี 1983 บริษัท TEPCO (Tokyo Electric Power Co.)/NGK (NGK Insulators Ltd.) ได้มีความสนใจในการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับแบตเตอรี่ NaS และได้กลายเป็นผู้พัฒนาหลักตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา เหตุผลที่ บริษัท TEPCO เลือกแบตเตอรี่ชนิดนี้เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำองค์ประกอบทุกส่วนของแบตเตอรี่ (โซเดียม ซัลเฟอร์ เซรามิก) สามารถพบได้มากในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งต้นแบบตัวแรกของแบตเตอรี่ NaS ขนาดใหญ่ได้มีการทดลองใช้ที่สถานีย่อย Tsunashima ของบริษัท TEPCO ระหว่างปี 1993 ถึง 1996 โดยธนาคารแบตเตอรี่ (Battery Bank) ต้นแบบนี้มีขนาด 3 x 2 MW, 6.6 kV ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้เป็นผลให้มีการปรับปรุงโมดูล (Modules) ของแบตเตอรี่ และได้รับการพัฒนา

จนกระทั่งสามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ในปี 2000 ซึ่งแบตเตอรี่ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์นั้นมีคุณสมบัติดังนี้

ความจุ: 25-250 กิโลวัตต์ต่อธนาคารแบตเตอรี่

ก. มีประสิทธิภาพ 87%

ข. อายุการใช้งาน 2,500 รอบ (ที่ 100% DOD - depth of discharge) หรือ 4,500 รอบ (ที่ 80% DOD)

4. แบตเตอรี่ ที่ให้พลังงานถึง 90 MW ของความจุในแต่ละปี ถูกผลิตขึ้นในปี 2008 โดยบริษัท NGK / TEPCO ซึ่งเป็นกลุ่มผู้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดนี้เพียงกลุ่มเดียวเท่านั้น โดยในปีเดียวกันนี้ได้มีโครงการสาธิตที่ใช้แบตเตอรี่ NaS ของบริษัท NGK Insulators เพื่อเก็บพลังงานที่ผลิตจากกังหันลมที่ Miura Wind Park ซึ่งเป็นโครงการของบริษัท Japan Wind Development นอกจากนั้นในเดือนพฤษภาคมปีเดียวกันนี้บริษัท Japan Wind Development ได้เปิดทุ่งกังหันลมที่มีกำลังการผลิตถึง 51 เมกะวัตต์ และมีการต่อเข้ากับแบตเตอรี่ NaS ที่มีความจุ 34 เมกะวัตต์ โดยโครงการนี้สร้างขึ้นที่ Futamata ในจังหวัด Aomori

5. บริษัท Xcel Energy ของสหรัฐอเมริกาได้แถลงว่าจะทำการทดสอบระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ NaS จากบริษัท NGK Insulators Ltd ของญี่ปุ่นกับทุ่งกังหันลมใน Minnesota โดยแบตเตอรี่มีน้ำหนัก 80 ตัน หรือขนาดประมาณตู้รถพ่วงสองตู้ ซึ่งคาดว่าจะมีความจุ 7.2 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ที่อัตราการอัดและคายประจุ 1 เมกะวัตต์

6. ในปี 2010 บริษัท NGK ได้เพิ่มปริมาณความจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ NaS จาก 90 เมกะวัตต์ เป็น 150 เมกะวัตต์ต่อปี และเมื่อเดือนมีนาคม 2011 อุตสาหกรรมซุมิโตโมอิเล็กทริก (Sumitomo Electric Industries) และมหาวิทยาลัยเกียวโต (Kyoto University) แถลงว่าพวกเขาได้พัฒนาแบตเตอรี่ molten sodium ion ที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถให้พลังงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 °C โดยแบตเตอรี่จะมีความหนาแน่นพลังงานเป็นสองเท่าของแบตเตอรี่ Li-ion และมีต้นทุนต่ำ เทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นนี้บริษัทมีเป้าหมายที่จะเริ่มดำเนินการผลิตในปี 2015 โดยจะเริ่มนำไปใช้งานกับอาคารและรถโดยสาร

### 3) โครงการแบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์

ในปัจจุบันนี้มีผู้ผลิตเทคโนโลยีแบตเตอรี่ NaS ที่ใช้ในงานขนาดใหญ่เพียงบริษัทเดียวคือ NGK Insulators ซึ่งมีการพัฒนามายาวนานจนมั่นใจได้ว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการสำรองพลังงานสำหรับ Smart-Grid จากการสำรวจเมื่อเดือนมีนาคม ปี 2011 โดยบริษัท NGK Insulators พบว่าแบตเตอรี่ NaS มีการติดตั้งเพื่อใช้ในการสำรองพลังงานไฟฟ้ามากกว่า 365 เมกะ

วัดทั่วโลก โดยมีการติดตั้งใช้งานในประเทศญี่ปุ่นมากกว่า 170 แห่ง และในอีกห้าประเทศทั่วโลก ซึ่งได้แก่ สหรัฐอเมริกา สหรัฐอาหรับเอมิเรตส์ (United Arab Emirates) ฝรั่งเศส เยอรมัน และอังกฤษ ซึ่งข้อมูลการติดตั้งแบตเตอรี่ NaS จนถึงเดือนธันวาคม ปี 2009 แสดงดังตาราง 2.6

**ตารางที่ 2.6** โครงการที่มีการติดตั้งแบตเตอรี่ NaS ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของบริษัท NGK Insulators (ข้อมูลในเดือนธันวาคม 2009) [24]

Name of Developer	Country	Location	KW	Start of Operation/Status
TEPCO (Tokyo Electric Power Company)	Japan	Many locations around Tokyo	200,000 (approx.)	As of the end of 2008
HEPCO (Hokkaidou Electric Power Company)	Japan	Wakkanai City, Hokkaido	1,500	Feb. 2008
Other Japanese Electric Companies	Japan	Many locations other than Tokyo area	60,000 (approx.)	As of the end of 2008
JWD (Japan Wind Development Co.,Ltd.)	Japan	Rokkasho Village, Aomori	34,000	Aug. 2008
AEP (American Electric Power)	USA	Charleston WV, Bluffton OH, Milton WV, Churubusco IN, Presidio, TX	11,000	4 sites except for Presidio: July 2006~Jan. 2009; Presidio: Shipped in Nov. 2009
NYPA (New York Power Authority)	USA	Long Island, NY	1,000	April 2008
PG&E (Pacific Gas and Electric Company)	USA	Not decided	6,000	Shipped in 2008
Xcel	USA	Luveme, MN	1,000	Nov. 2008
Younicos	Germany	Berlin	1,000	July 2009
Enercon	Germany	Emden, Lower Saxony	800	July 2009
EDF	France	Reunion Island	1,000	Dec. 2009
ADWEA (Abu Dhabi Water & Electricity Authority)	UAE	Abu Dhabi	48,000	Partially operated
Total			365,300	

นอกจากโครงการดังกล่าวข้างต้นแล้ว เมื่อปี 2010 บริษัท POSCO ของเกาหลี ได้ออกมา แถลงว่า สามารถพัฒนาแบตเตอรี่ NaS ได้สำเร็จ และคาดว่าจะสามารถผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ภายในปี 2015 ซึ่งแบตเตอรี่ NaS ที่พัฒนาโดย POSCO มีความหนาแน่นพลังงานมากกว่า 3 เท่าของแบตเตอรี่ที่ ใช้อยู่ในปัจจุบัน อีกทั้งมีอายุการใช้งานมากกว่า 15 ปีทำให้เหมาะสำหรับการใช้ในการจัดเก็บพลังงาน ที่ต้องการความจุขนาดใหญ่

ธุรกิจระบบ Smart Grid เริ่มมีการขยายตัวมากขึ้น ทำให้เทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน มีความจำเป็น และเริ่มมีการขยายตัวทางการตลาดไปด้วย อย่างเช่น แบตเตอรี่ NaS ซึ่งคาดว่าจะเติบโต จากประมาณ 450 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2010 เป็นหนึ่งหมื่นล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2020 ซึ่งการ เจริญเติบโตทางการตลาดของแบตเตอรี่ NaS รายปีเฉลี่ยมากกว่า 35%



ภาพที่ 2.43 สถานีย่อยของ American Electric Power (AEP) เก็บและจ่ายพลังงาน โดยแบตเตอรี่ชนิด โซเดียมซัลเฟอร์ [24]



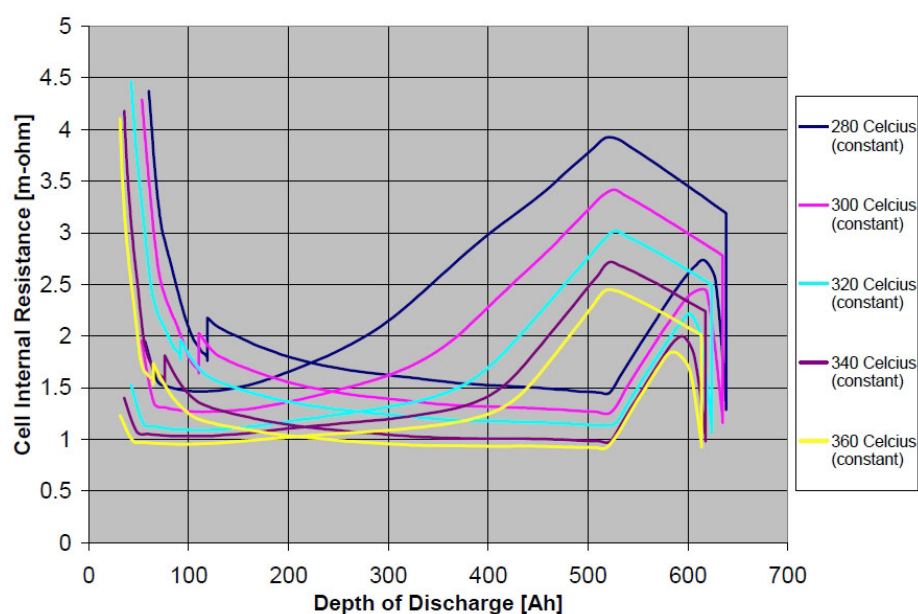
ภาพที่ 2.44 แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 1.2 MW/7.2 MWh โดย NYPA [24]

### 2.8.3 วงจรสมมูลและโครงสร้าง

#### 1) ปัจจัยสำคัญในแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS)

เมื่อกล่าวถึงความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ มีปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ความต้านทานภายใน อายุการใช้งาน อุณหภูมิ แรงเคลื่อนไฟฟ้า และความลึกของการคายประจุ เป็นสิ่งจำเป็นในการหาค่าความจุของแบตเตอรี่ และพฤติกรรมของแรงดัน-กระแส ซึ่งแบ่งการพิจารณาออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้ [13]

1. ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ จะประกอบด้วย ความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ ความต้านทานอิเล็กโทรไลต์ ความต้านทานเพลท และความต้านทานของของเหลว ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับผลกระทบของสิ่งที่แตกต่างกัน โดยความต้านทานภายในจะเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาของการเก็บประจุและคายประจุ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความลึกของการคายประจุและอุณหภูมิของชุดทดสอบ ดังภาพที่ 2.45

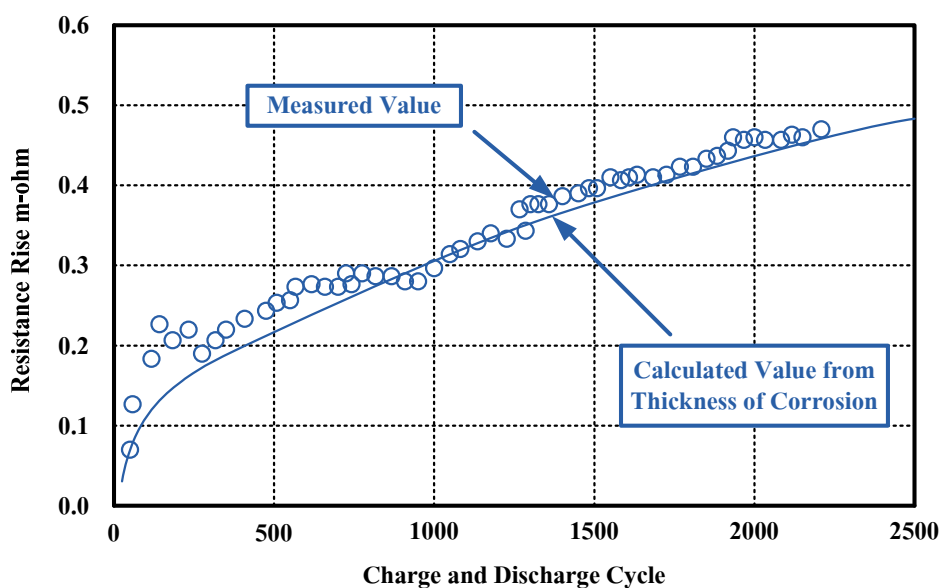


ภาพที่ 2.45 ความลึกของการคายประจุและความต้านทานของเซลล์ภายในที่อุณหภูมิต่างกัน (การทดสอบ) [13]

โดยภาพที่ 2.45 จะประกอบด้วยกราฟที่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 สำหรับการดำเนินการเก็บประจุ และกลุ่มที่ 2 สำหรับการดำเนินการคายประจุที่อุณหภูมิของเซลล์แตกต่างกัน 5 ระดับ กราฟจะแสดงให้เห็นว่าความต้านทานภายในเปลี่ยนแปลงตามความลึกของการคายประจุที่ระดับอุณหภูมิของเซลล์แตกต่างกัน จะสังเกตได้ว่าความต้านทานภายในจะลดลงและอุณหภูมิจะ



เพิ่มขึ้นจาก 280 °C ไปจนถึง 360 °C ซึ่งเมื่อสังเกตที่จุดสิ้นสุดของการดำเนินการเก็บประจุ และการคายประจุจะเป็นผลกระทบของสิ่งที่แตกต่างกันนั้นมีแนวโน้มที่ความต้านทานภายในจะเพิ่มขึ้น ในช่วงของความลึกของการคายประจุนี้จะมีการหลีกเลี่ยงการดำเนินการนี้ของแบตเตอรี่ชนิด โซเดียม ซัลเฟอร์ ไปจนถึงการเพิ่มขึ้นในความต้านทานภายในที่มากจนเกินไป



ภาพที่ 2.46 เซลล์-ความต้านทานที่เสื่อมลง และรอบของการเก็บประจุ-การคายประจุ (ข้อมูลจากผู้ผลิต) [13]

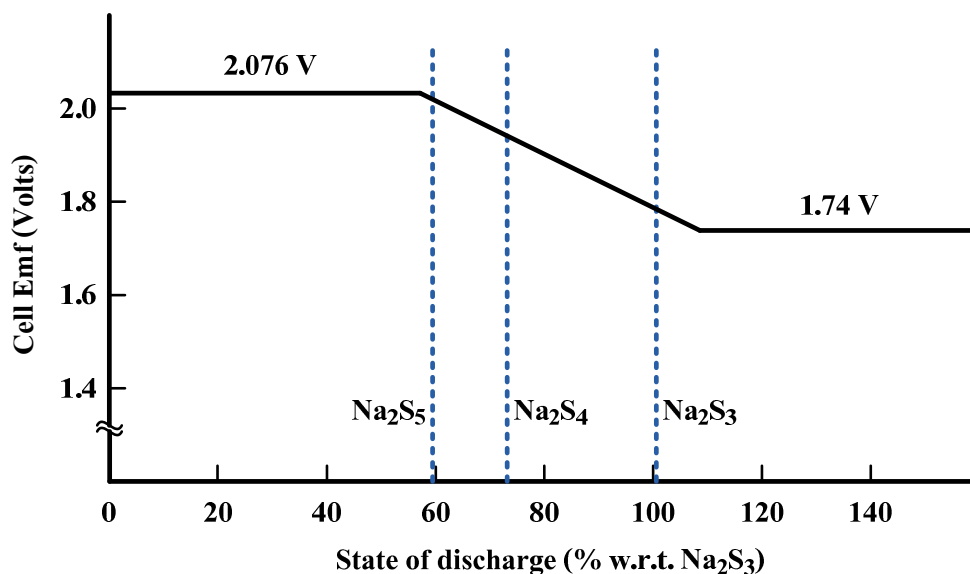
ความต้านทานภายในจะทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงของรอบอายุของความต้านทานนั้นจะปรากฏบนจำนวนรอบของประสพการณ์ที่พร้อมสำหรับการเก็บประจุ และการคายประจุของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.46 โดยความต้านทานภายในที่เพิ่มขึ้นจะมาจากจำนวนรอบที่มีการเก็บประจุ และการคายประจุเพิ่มขึ้น สาเหตุนี้เองเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำมาใช้หาส่วนที่ยังคงค้างอยู่ซึ่งหาได้จาก กำลังงานสูงสุดของขดคัลสัน และแรงดันขาออกของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์

2. ผลกระทบจากอุณหภูมิ แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะทำงานที่อุณหภูมิ 300°C-360°C โดยอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันระหว่างสภาวะการเก็บประจุ สภาวะการเตรียมพร้อม และสภาวะการคายประจุของการดำเนินการในระหว่างสภาวะการคายประจุ ความร้อนของความต้านทานที่เกิดขึ้นของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ และความร้อนของการสึกกร่อน

ก่อให้เกิดการสะสมของความร้อนในแบตเตอรี่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่สถานะของการเก็บประจุจำนวนความร้อนที่เกิดขึ้นของความต้านทานมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับการดูดซึมความร้อนของการลึกร้อน ดังนั้นอุณหภูมิของแบตเตอรี่จะค่อยๆ ลดลง ความร้อนที่สะสมในแบตเตอรี่จะกระจายไปแล้วจนถึงสภาวะเตรียมพร้อม ซึ่งผลก็คืออุณหภูมิของแบตเตอรี่จะค่อยๆ ลดลงไป เมื่ออุณหภูมิมีมากกว่าค่าขั้นต่ำที่จำกัดไว้  $300^{\circ}\text{C}$  ความร้อนที่ติดตั้งอยู่ภายในของแบตเตอรี่โมดูล (Battery Module: BM) จะเริ่มทำงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ และจะรักษาไว้ภายในย่านของอุณหภูมิที่ระบุไว้ ความต้านทานของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่อุณหภูมิของโมดูลที่สูงขึ้น ซึ่งมาจากความต้านทานภายในที่มีขนาดเล็ก

ผลกระทบจากอุณหภูมิต่ำและความต้านทานภายในมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้หากการจำกัดกำลังงานสูงสุดด้านขาออกของแบตเตอรี่ ซึ่งในบางการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะเป็นการศึกษาเรื่องกำลังงานขาออกของขดลวด โดยการเพิ่มช่วงเวลาดำเนินการ 4-5 ช่วงเวลาของระดับกำลังงานขาออก ซึ่งกำลังงานของขดลวดสูงสุดขาออกนั้นจะมีกระแสที่ค่อนข้างสูงมากกว่าความร้อนจูลที่เกิดจากความต้านทานภายใน สำหรับตัวอย่างเช่น โมดูลของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 50 kW ที่มีกำลังงานขาออก 5 ช่วงเวลา สำหรับ 30 วินาที จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นรอบละ  $3^{\circ}\text{C}$  ในระหว่างการดำเนินการหากำลังงานขดลวดเหล่านี้ อุณหภูมิจะถูกเก็บภายในสภาวะการดำเนินงานปกติในอันดับที่ต้องการหลีกเลี่ยงถึงการยอมรับอุณหภูมิที่สูง และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นอย่างไม่พึงปรารถนาภายในแบตเตอรี่

3. แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (Battery Electromotive Force: EMF) ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความลึกของการคายประจุ เพราะส่วนประกอบของปฏิกิริยาของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แต่การลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นหลังจาก 60-75 % ของความลึกของการคายประจุ จะแสดงดังภาพที่ 2.47



ภาพที่ 2.47 แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) และความลึกของการคายประจุ [13]

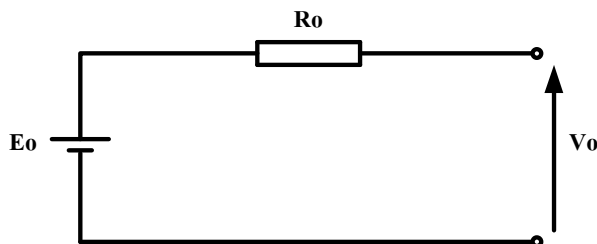
ในทางปฏิบัติแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะจำกัดการคายประจุลงน้อยกว่า 100% ของความจุของทฤษฎี เพราะว่าคุณสมบัติของการกัดกร่อนของ Na<sub>2</sub>S<sub>3</sub> โดยก่อนที่วัสดุทั้งหมดจะเปลี่ยนจาก Na<sub>2</sub>S<sub>3</sub> โซเดียมในเซลล์จะเคลื่อนที่จากอิเล็กโทรดที่ใช้งาน และภายในห้องของโซเดียมจะกลับมาว่างเปล่า ในกรณีเช่นนี้จะไม่มีความเสี่ยงสำหรับอิเล็กตรอนในขั้วลบของอิเล็กโทรดก่อให้เกิดสมรรถนะที่แย่ในการคายประจุ ด้วยเหตุนี้แบตเตอรี่จึงถูกออกแบบมาให้มีการหยุดคายประจุก่อนโซเดียมทั้งหมดจะไปที่อิเล็กโทรดที่ใช้งาน เพื่อใช้ดำเนินการเป็นขอบเขตการป้องกัน โดยยังคงให้ค่าของโซเดียมต่อเซลล์ มีการพิจารณาสำหรับตัวอย่างในค่ารวมของโซเดียม 780 g. จะใช้โซเดียม 675 g. ในการทำให้โซเดียมยังคงค่าเป็นโซเดียมที่ 13.5%

ในขณะที่ผลของชนิดของเซลล์โซเดียมซัลเฟอร์ได้ผล 85-90% ตามความจุของทฤษฎี ซึ่งค่าเฉลี่ยโดยประมาณของโซเดียมพอลิซัลไฟด์ จะมีส่วนประกอบที่ตรงกันที่ 1.82 V ต่อเซลล์ จะเป็นการผสมกันของ Na<sub>2</sub>S<sub>4</sub> และ Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub> ที่จุดสิ้นสุดของการคายประจุ ปัจจัยเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญและต้องการนำไปพิจารณาในการจำลองในอันดับของการสังเกตระดับแรงดันที่จุดสิ้นสุดของการคายประจุ และทำนายความเป็นไปได้ของกำลังสูงสุดขาออกของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ ที่ความลึกของการคายประจุต่างๆ

4. ความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge: DOD) จากภาพที่ 2.47 ทางด้านซ้ายจะเป็นการแสดงความจุในแบตเตอรี่ซึ่งมีความสำคัญ คือ จะเป็นความสัมพันธ์ของการเก็บประจุของความต้านทานภายใน อุณหภูมิและระดับแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF) ของแบตเตอรี่

## 2) แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS)

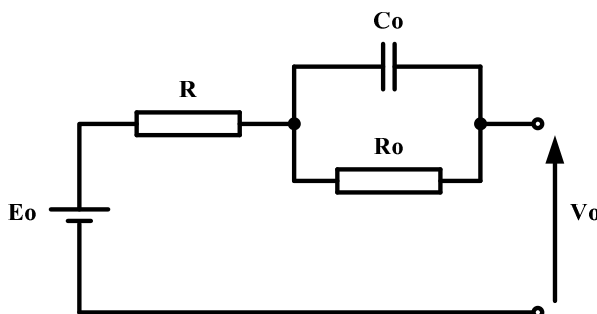
### 1. แบบจำลองอย่างง่าย



ภาพที่ 2.48 แบบจำลองอย่างง่าย

โดยปกติส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลองของแบตเตอรี่ดังแสดงในภาพที่ 2.48 ซึ่งประกอบด้วย ค่าความต้านทานภายในคงที่ ( $R_o$ ) และแรงดันเปิดวงจร ( $E_o$ ) ที่  $V_o$  จะเป็นจุดเชื่อมต่อแรงดันของแบตเตอรี่ ตั้งแต่ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะเป็นความไวและจะแปรตามอุณหภูมิและความลึกของการคายประจุ ซึ่งแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองภายในแบตเตอรี่ เพราะมันไม่สามารถนำค่าคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ในส่วนของความลึกของการคายประจุ และอุณหภูมิจนกระทั่งเก็บประจุ แบบจำลองอย่างง่ายนี้สามารถไปประยุกต์ใช้ในกรณีศึกษาต่างๆ ที่ต้องการทราบค่าพลังงานจาก  $E_o$  โดยสมมติให้มีค่าได้ไม่จำกัด

### 2. แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเทวินิน

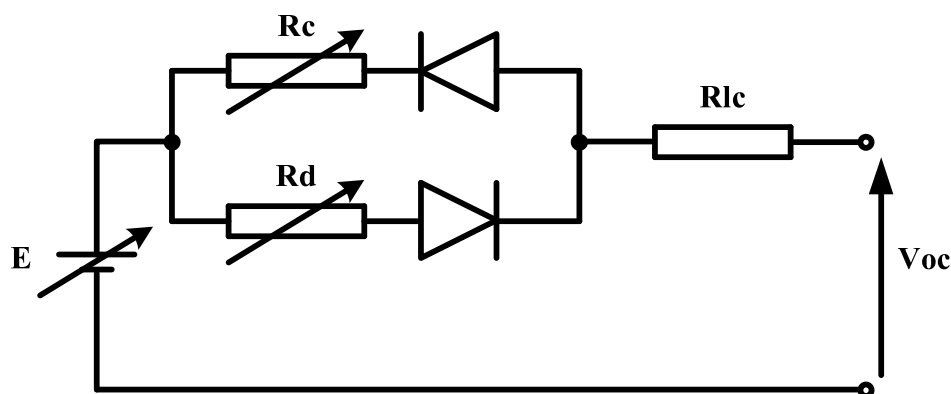


ภาพที่ 2.49 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเทวินิน

ในลำดับที่ 2 นี้ โดยส่วนมากจะใช้แบบจำลองแบตเตอรี่แบบเทวินิน ซึ่งจะประกอบด้วย แรงดันของแบตเตอรี่ซึ่งไม่มีโหลดแบบในอุดมคติ ( $E_0$ ) ความต้านทานภายใน ( $R$ ) ค่าตัวเก็บประจุ ( $C_0$ ) และความต้านทานแรงดันเกิน ( $R_0$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.49

ในแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะมีข้อเสียเปรียบของแบบจำลองนี้ คือ องค์ประกอบต่างๆ จะสมมติให้เป็นค่าคงที่ และว่าในความเป็นจริงค่าขององค์ประกอบทั้งหมดจะสัมพันธ์ถึงสถานะของแบตเตอรี่ โดยจะต้องเพิ่มแรงดันที่ตกค่อมขณะเปิดวงจร (EMF) ในแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ จะเป็นสิ่งที่ไม่ถูกนำไปคิด

### 3. แบบจำลองแบตเตอรี่แบบประยุกต์



ภาพที่ 2.50 แบบจำลองแบตเตอรี่แบบประยุกต์

แบบจำลองแบตเตอรี่นี้ จะแสดงดังภาพที่ 2.50 กล่าวคือ จะเป็นความสัมพันธ์อย่างง่าย แต่ยังคงการที่จะพบส่วนประกอบทั้งหมดสำหรับแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS)

โดยจะเป็นการใช้แบบจำลองแบตเตอรี่แบบประยุกต์ บนพื้นฐานของลักษณะพื้นฐานของแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่าย โดยจะถูกนำไปคิดคุณลักษณะองค์ประกอบของแบตเตอรี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น ในระหว่างการเก็บประจุและคายประจุตลอดจนความต้านทานภายใน ซึ่งปรากฏบนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความลึกของการคายประจุของแบตเตอรี่ ดังนั้นจะเป็นการเลือกที่เหมาะสมมากที่สุดในการแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ บนพื้นฐานของคุณลักษณะของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ โดยองค์ประกอบในแบบจำลองแบตเตอรี่แบบประยุกต์ จะเป็นการอธิบายดังต่อไปนี้

ก. ความต้านทานขณะเก็บและคายประจุ ( $R_c$  และ  $R_d$ )

ความต้านทานภายใน  $R_c$  และ  $R_d$  จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความลึกของการคายประจุ โดยจะนำไดโอดมาต่อร่วม คือ การทำให้ขบวนการของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์เกิดความแตกต่างจากค่าความต้านทานภายในระหว่างขบวนการเก็บและคายประจุ

ข. ความต้านทานของวงรอบอายุของการเก็บและคายประจุ ( $R_{lc}$ )

ค่า  $R_{lc}$  จะบ่งบอกถึงการเสื่อมสภาพของความต้านทานนั้น จะอยู่บนพื้นฐานจำนวนรอบของความต้านทานของวงรอบอายุของการเก็บและคายประจุ

ค. แรงดันขณะเปิดวงจรของแบตเตอรี่ ( $E$ )

โดย  $E$  จะบ่งบอกถึงเซลล์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (EMF) จะเป็นฟังก์ชันของความลึกของการคายประจุบนพื้นฐานของคุณลักษณะ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2.47 และอธิบายได้ดังนี้

$$E = E_o ; \text{at DOD} \leq 60 \% \quad (2.50)$$

$$E = E_o - k.f ; \text{at DOD} > 60 \% \quad (2.51)$$

โดยที่ $k$	คือ	ค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง
$f$	คือ	ความลึกของการคายประจุ (%)
$E_o$	คือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (EMF) ที่เก็บประจุเต็มแล้ว

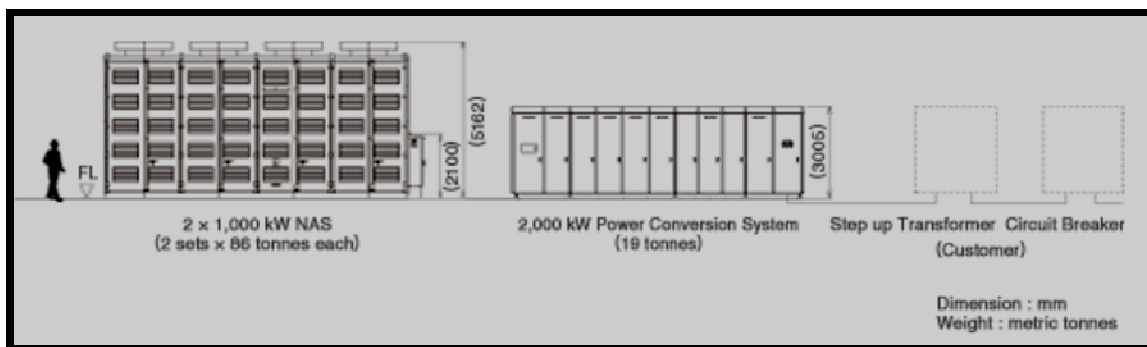
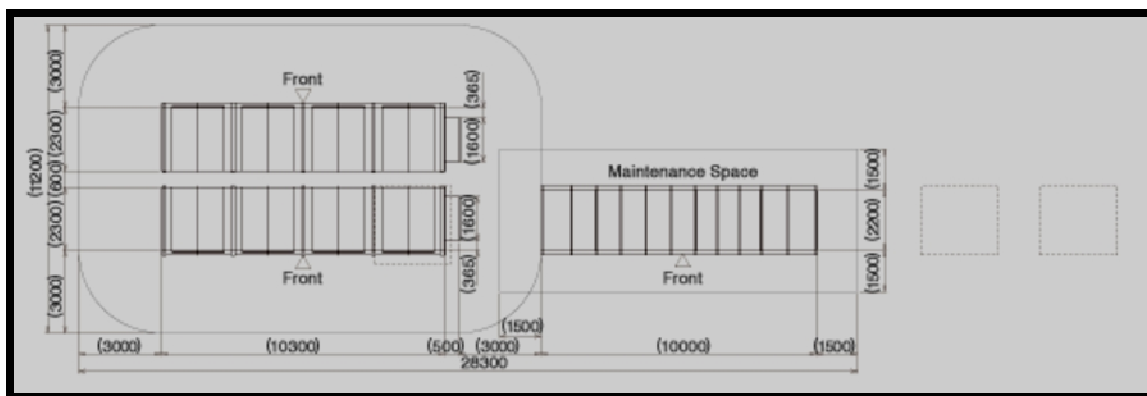
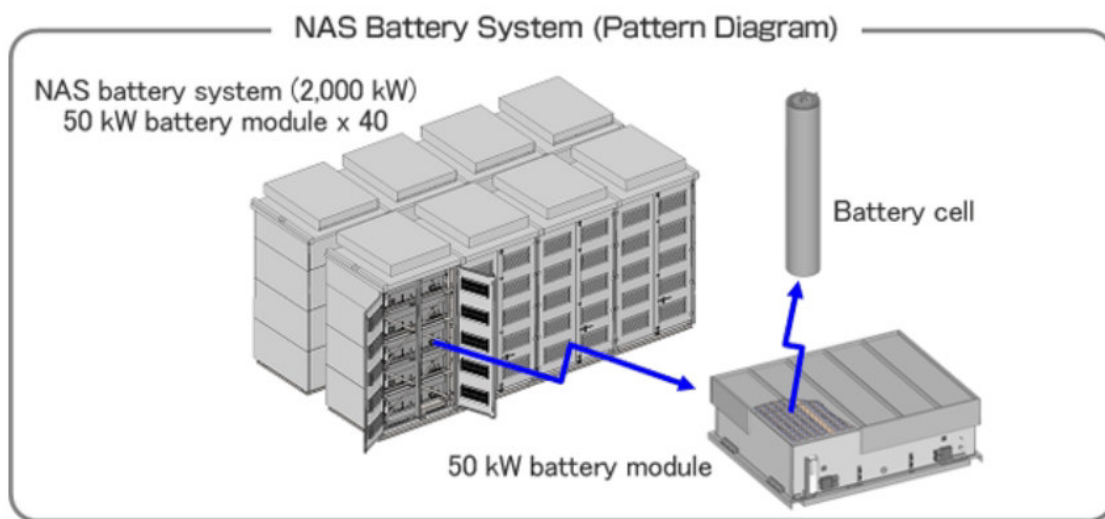
การประยุกต์ใช้แบบจำลองของแบตเตอรี่จากภาพที่ 2.47 นั้น จะบ่งบอกถึงสมรรถนะของเซลล์ของแบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 1 เซลล์ โดยระบบสำรองพลังงานจากแบตเตอรี่จะใช้โมดูลของแบตเตอรี่ ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ต่างๆ เชื่อมต่อกันในแบบอนุกรมและขนาน ซึ่งตัวอย่างของโมดูลของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ขนาด 50 kW (type G50) ประกอบด้วยการเชื่อมต่อของเซลล์ 320 เซลล์ ในแบบอนุกรมสำหรับเลือกเพื่อเป็นวิธีการสำรองความจุให้มีค่าสูง โดยพฤติกรรมแรงดันและกระแสของโมดูลแบตเตอรี่ขนาด 50 kW สามารถประมาณและจำลองได้โดยการคูณความต้านทานของเซลล์ภายในและเซลล์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (EMF) ที่มีขนาด 320 เซลล์บนพื้นฐานของข้อมูลความต้านทานของเซลล์ภายในและข้อมูลสมรรถนะจากผู้ผลิตแบตเตอรี่

3) ระบบทั่วไปของแบตเตอรี่ชนิด โซเดียมซัลเฟต (NaS) [25]

ตัวอย่างข้อมูลของระบบแบตเตอรี่ NaS ขนาด 2,000 kW ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของบริษัท NGK Insulators แสดงดังตารางที่ 2.5 และการติดตั้งของระบบแบตเตอรี่ NaS ขนาด 2,000 kW จะถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 2.51

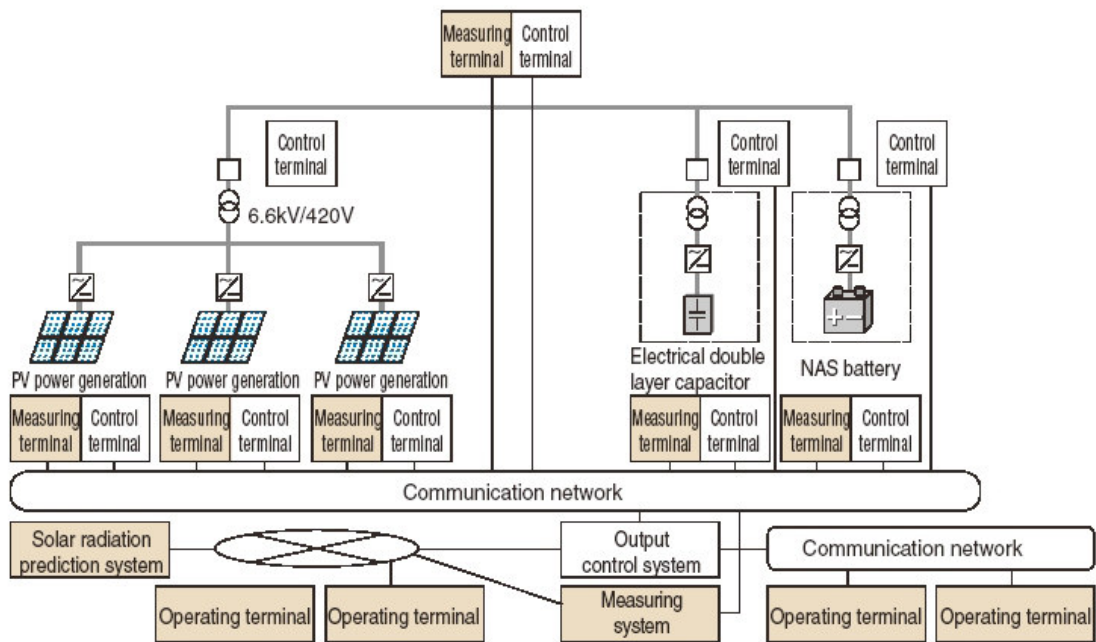
ตารางที่ 2.7 ข้อมูลของระบบแบตเตอรี่ NaS ขนาด 2,000 kW ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของบริษัท NGK Insulators [25]

Data	Size
Rated Output	2,000 kW
Rated Input	2,000 kW
Rated Capacity	12,000 kWh
Construction	50 kW Module x 40 Units

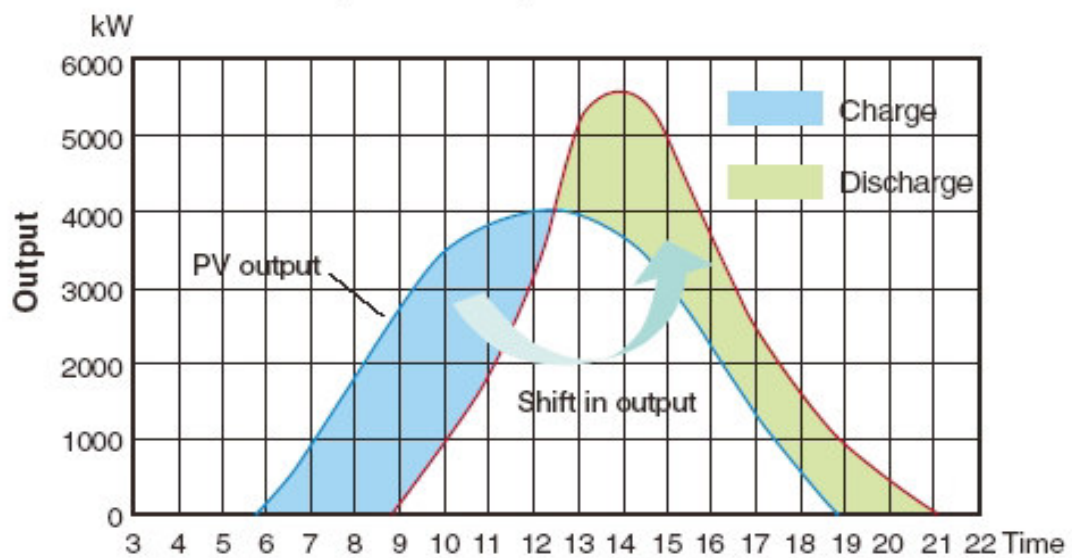


ภาพที่ 2.51 การติดตั้งของระบบแบตเตอรี่ NaS ขนาด 2,000 kW [25]





ภาพที่ 2.52 ระบบควบคุมกำลังงานขาออก ของ Wakkanai Mega Solar Project [26]



ภาพที่ 2.53 การเลื่อนเวลาของสัญญาณเอาต์พุต (Output) ด้วยแบตเตอรี่ชนิด โซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) [26]

โดยที่ภาพที่ 2.52 เป็นตัวอย่างระบบควบคุมกำลังงานขาออก ของ Wakkanai Mega Solar Project และภาพที่ 2.53 เป็นตัวอย่างของการเลื่อนเวลาของสัญญาณเอาต์พุต (Output) ด้วยแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) [26] ซึ่งเป็นโครงการลำดับขั้นๆ ของประเทศญี่ปุ่นที่นำแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์เข้ามาใช้เป็นระบบสำรองพลังงาน

#### 2.8.4 สรุป

จากการศึกษาที่ผ่านมาในข้างต้น จะพบว่าระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ) มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นระบบชดเชยของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่ ไม่ว่าจะเป็นในแง่ของประสิทธิภาพและสมรรถนะที่เหนือกว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงาน เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองเป็นระบบชดเชยที่มีขนาด 200 kW ให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถช่วยในการปรับปรุงรูปร่างแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายให้ดียิ่งขึ้น

### 2.9 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

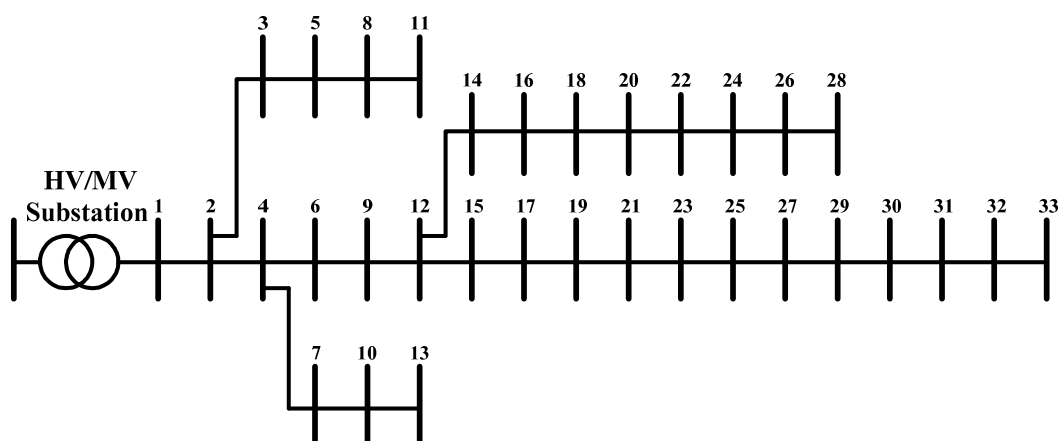
จากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ปัญหาดังกล่าวจะถูกแก้ไขในแนวคิดของทฤษฎีในหัวข้อต่างๆ ที่ได้กล่าวถึงมาแล้วในข้างต้น ซึ่งจะนำไปในการใช้สร้างแบบจำลองของปัญหา ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ หรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (DG) ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) และวิเคราะห์ปัญหา โดยใช้การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าและปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อทดสอบผลของการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่าย อีกทั้งขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (DG) เพื่อช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ส่วนการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้าจะเป็นการต่อระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) เข้าสู่ระบบจำหน่าย ในการวิเคราะห์แบบจำลองต่างๆ ของระบบจะกระทำภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่ (Static Load) โดยจะทำการทดสอบและกล่าวถึงในบทถัดไป

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

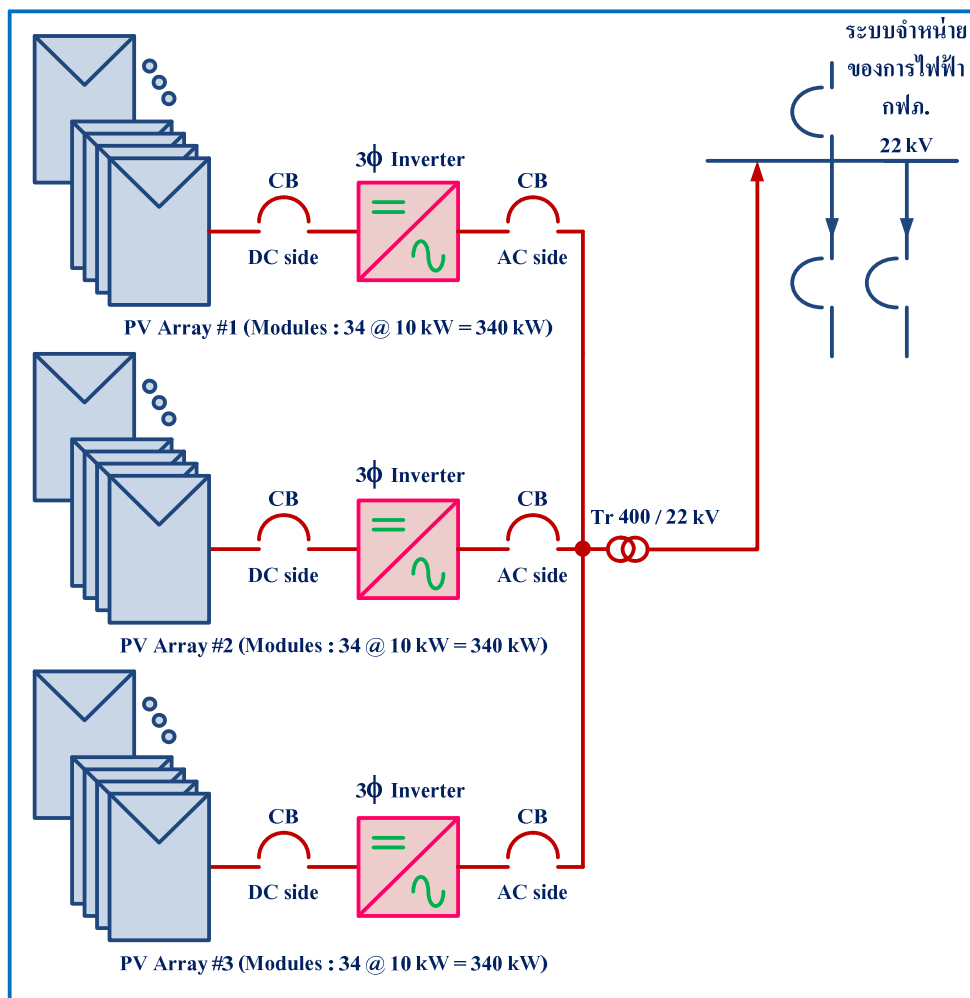
#### 3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation : DG) เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยนำเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตาบู่ (Tabu Search : TS) มาช่วยในการแก้ปัญหาของการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด เพื่อช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ โดยผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ ในส่วนการจำลองระบบจะเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE เป็นต้นแบบ [27] ดังภาพที่ 3.1 ซึ่งทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA โดยอาศัยข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าและหาตำแหน่งการติดตั้ง DG ที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปพล็อตกราฟ จากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากผลการจำลองระบบจำหน่าย ดูว่าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง DG เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับบัสอื่นๆ กล่าวคือ เป็นบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง DG เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย โดยกำหนด DG ให้มีขนาด 1 MW ภายใต้งานโหลดเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สถานะโหลดคงที่ (Static Load) สุกท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-Sulfur Battery: NaS) ซึ่งกำหนดให้มีขนาด 200 kW เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เพื่อเป็นการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนของการทดสอบ โดยมีลำดับของการกล่าวถึงดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 แผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE

จากภาพที่ 3.1 แสดงแผนภาพเส้นเดียวของแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ จะเป็นการประยุกต์ใช้ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE โดยทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟรวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟรีแอกทีฟที่สูงที่สุดเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 77.0135 kW และ 52.1361 kVar ตามลำดับ โดยที่บัสที่ 1 เป็นโหนดจ่ายที่เชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายโดยผ่านสถานีย่อย การเชื่อมต่อโหนดสาขาจะเริ่มเชื่อมต่อจากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 แล้วต่อไปยังโหนดสาขาอื่นๆ ต่อไป



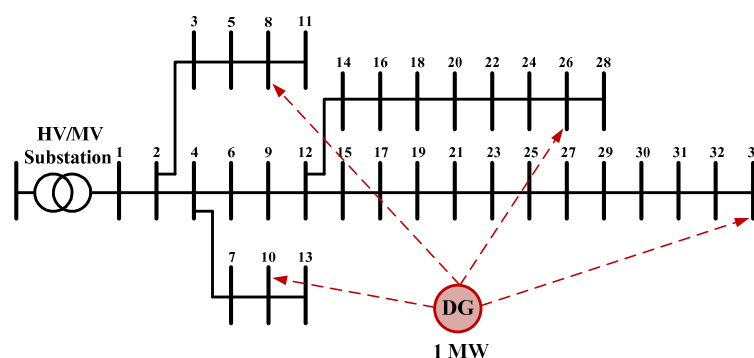
ภาพที่ 3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

จากภาพที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 2 โดยเมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนสุดท้ายของการหาค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายจะมองเป็น DG ที่สามารถจ่ายได้เฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) เช่น การผลิตด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [8] โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ [8] ได้มีปัจจัยเกี่ยวกับการหาขนาดของ DG เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้นำมาใช้ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ จะกำหนดให้ DG จ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงที่มีขนาด 1 MW เท่านั้น

### 3.2 ขั้นตอนวิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือหลักในการช่วยวิเคราะห์และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ ที่ต้องการทำการทดสอบ โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

3.2.1 ทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม แสดงไว้ดังภาพที่ 3.3 โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ ทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาม เพื่อนำมาใช้แก้ปัญหาการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด



ภาพที่ 3.3 แผนผังการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DG ขนาด 1 MW เชื่อมต่อเข้าสู่แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE

1) ทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ DG ขนาด 1 MW
2. รับข้อมูลสาขา ข้อมูลบัส และขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
3. คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสาขาโดยวิธีแพร่กระจายถอยหลัง และการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดโดยวิธีแพร่กระจายเดินหน้า ก่อนติดตั้ง DG

4. คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่นชัดของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน เพื่อหาตำแหน่งที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงของระบบน้อยที่สุด นำไปใช้ในการทำนายว่า DG เหมาะสมกับการติดตั้งที่บัสใด [10] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. ทดสอบข้อมูลและทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่าย 33 บัส แบบเบเรเดียม

ข. หากำลังผลิตของกำลังไฟฟ้าจริงและการใช้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่เหมาะสมที่สุด ทุกตำแหน่ง

ค. เลือกตำแหน่งและขนาดของ DG ที่จะติดตั้ง ทำการอพยพค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ฉีดเข้าไปในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งเป็นการเก็บค่าตัวแปร (แรงดันและมุมของทุกบัส) และคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณ (Approximate Losses) ของระบบใหม่

ง. ทำซ้ำในขั้นตอน ค) สำหรับทุกๆ ตำแหน่งที่เป็นไปได้

จ. ตำแหน่งและขนาดที่จะนำมาเข้าร่วมของ DG จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงของระบบต่ำที่สุด ซึ่งจะเป็นการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดตามลำดับ

ฉ. ทดสอบการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยการหาขนาดของ DG ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด และหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่ชัด (Exact Losses) ของระบบจำหน่าย

5. ทำการติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเบเรเดียม 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE

6. คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสาขาโดยวิธีแพร่กระจายถอยหลัง และการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดโดยวิธีแพร่กระจายเดินหน้า หลังติดตั้ง DG

7. บันทึกผลการทดสอบของค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัส กระแสไฟฟ้าของแต่ละสาขา กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณ และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่ชัดของระบบจำหน่าย แบบเบเรเดียม มาตรฐาน IEEE 33 บัส ทั้งก่อนและหลังติด DG เพื่อนำไปสร้างกราฟการรายงานผลการทดสอบค่าต่างๆ

2) ทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเบเรเดียม โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบตาม ที่นำมาใช้แก้ปัญหาการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ DG ขนาด 1 MW

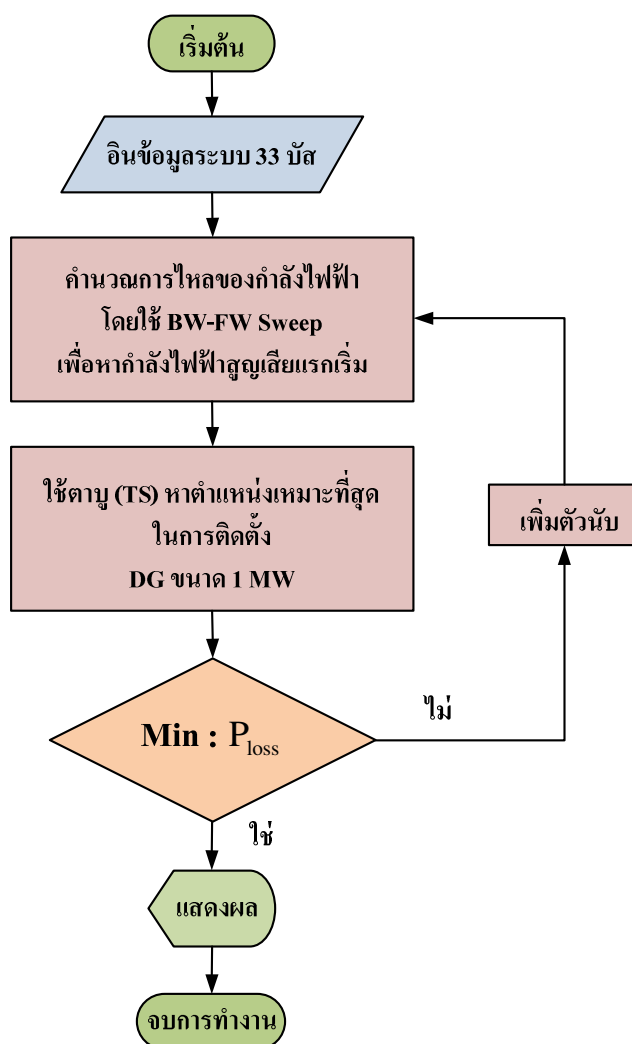
2. รับข้อมูลสาขา ข้อมูลบัส และขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าที่บัส

3. คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสาขาโดยวิธีแพร่กระจายถอยหลัง และการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดโดยวิธีแพร่กระจายเดินหน้า ก่อนติดตั้ง DG

4. ทำการติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู วิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ดังภาพที่ ดังภาพที่ 3.4

5. คำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้การไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสาขาโดยวิธีแพร่กระจายถอยหลัง และการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดโดยวิธีแพร่กระจายเดินหน้า ก่อนติดตั้ง DG

6. บันทึกผลการทดสอบของค่าแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัส กระแสไฟฟ้าของแต่ละสาขา และกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ



ภาพที่ 3.4 แผนผังการใช้ MATLAB M-File หาค่าตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DG ขนาด 1 MW โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู



3.2.2 ทดสอบเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู ที่นำมาใช้แก้ปัญหาการวิเคราะห์ หาค่าตำแหน่งติดตั้งเหมาะที่สุดนี้ เพื่อทดสอบสมรรถนะของวิธีการและทดสอบผลลัพธ์การค้นหาคำตอบของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ

1) ทดสอบสมรรถนะของวิธีการ จะเป็นการเปรียบเทียบความเร็วในการค้นหาคำตอบระหว่างการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู ซึ่งแต่ละวิธีจะทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. ทดสอบรันโปรแกรม MATLAB M-File ของการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู โดยทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง

2. ทดสอบสมรรถนะในการค้นหาต่ำสุด

3. ทดสอบจำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ \* TS Max Iter = 50 รอบ

4. ทดสอบความเร็วในการค้นหา (วินาที)

5. บันทึกผลการทดสอบของการทดสอบสมรรถนะในการค้นหาต่ำสุด การทดสอบจำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ \* TS Max Iter = 50 รอบ และการทดสอบความเร็วในการค้นหา (วินาที)

6. บันทึกกราฟผลการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู ทดสอบสมรรถนะในการค้นหาต่ำสุด เพื่อดูการลู่เข้าสู่คำตอบของการค้นหาแบบตามู

2) ทดสอบผลลัพธ์การค้นหาคำตอบของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง โดยจะมีผลต่อสมรรถนะการค้นหาที่ดีที่สุด โดยจะกำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขต ซึ่งแต่ละวิธีจะทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. กำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขต ดังนี้

(+1 และ -1) (+2 และ -2) (+3 และ -3) (+4 และ -4) (+5 และ -5) (+6 และ -6)

(+7 และ -7) (+8 และ -8) (+9 และ -9)

2. ทดสอบรันโปรแกรม MATLAB M-File ของการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบ

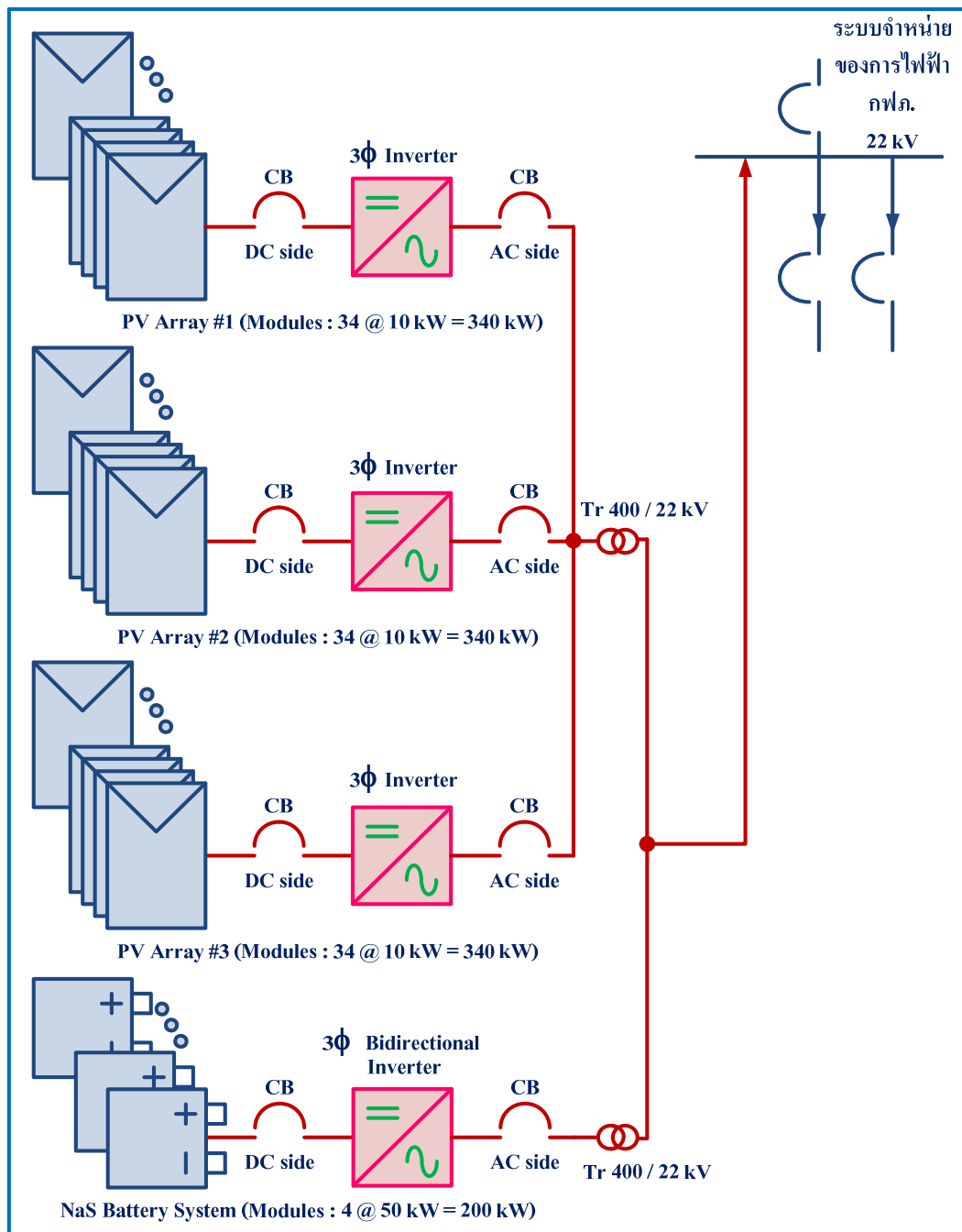
เรเดี่ยล โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตาม ซึ่งจะทำการกำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขต

3. บันทึกผลการทดสอบของจำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ \* TS Max Iter = 50 รอบ และความเร็วในการค้นหา (วินาที) จำนวน 30 ครั้ง ต่อ 1 ขอบเขตของรัศมีการค้นหา

4. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า เปอร์เซนต์ที่ลดลงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณของขอบเขตของรัศมีการค้นหา ดังสมการที่ 3.1 เพื่อนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ

$$\% \text{ ที่ลดลงของเวลาที่ } = \frac{(\text{เวลาเฉลี่ย Trial DG 33 ครั้ง}) - (\text{เวลาเฉลี่ย tsmain ?}) \times 100}{\text{ใช้ในการคำนวณที่ tsmain ?} \quad (\text{เวลาเฉลี่ย Trial DG 33 ครั้ง})} \quad (3.1)$$

3.2.3 ทดสอบระบบซดเซยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย เพื่อเป็นการแก้ไขปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ ทดสอบกำลังการผลิตของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW และ NaS ขนาด 200 kW ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน และทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG และ NaS ใน巴士ที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน



ภาพที่ 3.5 ระบบขดเซยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ต่อร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

จากภาพที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของแบบจำลองของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่ได้จากการศึกษาในบทที่ 2 โดยเมื่อพิจารณาถึงขั้นตอนสุดท้ายของการหาค่ากำลังไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายจะเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ DG เช่นกัน ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้คือ จะกำหนดให้ NaS จ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงที่มีขนาด 200 kW เท่านั้น

โดยเมื่อพิจารณาถึงขนาดของ NaS จะเป็นการออกแบบเลือกใช้ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ที่ขนาด 200 kW ซึ่งคิดเป็น 20 % ของระบบจ่ายพลังงานหลัก นั่นก็คือ DG ขนาด 1 MW เมื่อพิจารณาถึงระบบชดเชยกำลังไฟฟ้า ถ้าเลือกใช้ระบบชดเชยกำลังไฟฟ้า ที่มีค่าสูงกว่า 50 % ของระบบหลัก ก็ควรพิจารณาเลือกลงทุนสร้างระบบหลักใหม่อีกชุดจึงจะเหมาะสมกว่า

เมื่อพิจารณาถึงการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW แล้วนั้น ปัญหาหลักของการจ่ายพลังงานสำหรับแบตเตอรี่ก็คือ ปัญหาเรื่องเปอร์เซ็นต์ความจุที่ถูกใช้งานออกไป (Depth of Discharge : DOD) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้งานแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ที่ 90 % ของการคายประจุทั้งหมด จะมีค่าเท่ากับ 180 kW เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

โดยเมื่อพิจารณาภาพที่ 2.53 จะนำมาใช้เป็นต้นแบบในการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW และระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW เพื่อนำค่าไปใช้ทดสอบในหัวข้อต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW จะแสดงไว้ดังตารางที่ 3.1

2) การวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) 200 kW จะแสดงไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 การวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า (%)	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า (kW)
0-5	0	0
6	4	40
7	20	200
8	45	450
9	68	680
10	86	860
11	95	950
12	100	1000
13	99	990
14	90	900
15	78	780
16	56	560
17	32	320
18	14	140
19-24	0	0

ตารางที่ 3.2 การวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบซดเซยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) 200 kW

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า (%)	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า (kW)
0-10	เก็บประจุ	เก็บประจุ
11	เตรียมพร้อม	เตรียมพร้อม
12	25	16.66
14	25	16.66
15	40	26.66
16	40	26.66
17	40	26.66
18	25	16.66

ตารางที่ 3.2 การวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) 200 kW (ต่อ)

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า (%)	กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า (kW)
19	25	16.66
20	25	16.66
21	เตรียมพร้อม	เตรียมพร้อม
22-24	เก็บประจุ	เก็บประจุ

1) ทดสอบกำลังการผลิตของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW และ แบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

นำค่าของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW จากตารางที่ 3.1 และการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW จากตารางที่ 3.2 ไปสร้างกราฟของกำลังการผลิตกำลังงานไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน เพื่อนำค่าไปใช้ทดสอบในหัวข้อต่อไป

2) ทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG และ Nas ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. นำค่าที่ได้จากการสร้างกราฟของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน มาทำการทดสอบหาลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมที่บัส 25 ตามตำแหน่งของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน ของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW และการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) 200 kW โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาม มาใช้ในการวิเคราะห์

2. บันทึกผลการทดสอบพร้อมนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟของกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง ของ DG และ NaS ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบ

### 3.3 สรุปผลวิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ จะเป็นการประยุกต์ใช้ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE โดยทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้รวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะตั้งอยู่ที่ 77.0135 kW และ 52.1361 kVar ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ จะใช้ โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือหลักในการช่วยวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ ที่ต้องการทำการทดสอบ โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทดสอบดังนี้ อันดับแรกจะทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ อันดับสองจะทดสอบเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู ที่นำมาใช้แก้ปัญหาการวิเคราะห์หาค่าแห่งติดตั้งเหมาะที่สุดนี้ เพื่อทดสอบสมรรถนะของวิธีการ และทดสอบผลรัศมีการค้นหาของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง และอันดับสุดท้ายจะทดสอบทดสอบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ต่อร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย เพื่อเป็นการแก้ไขปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation: DG) เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาบู่ (Tabu Search: TS) มาช่วยในการแก้ปัญหาของการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด โดยผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ จะเป็นการประยุกต์ใช้ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ใช้แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ จะใช้ โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือหลักในการช่วยวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ ที่ต้องการทำการทดสอบ โดยมีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการแสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

#### 4.2 ขั้นตอนแสดงผลการวิจัย

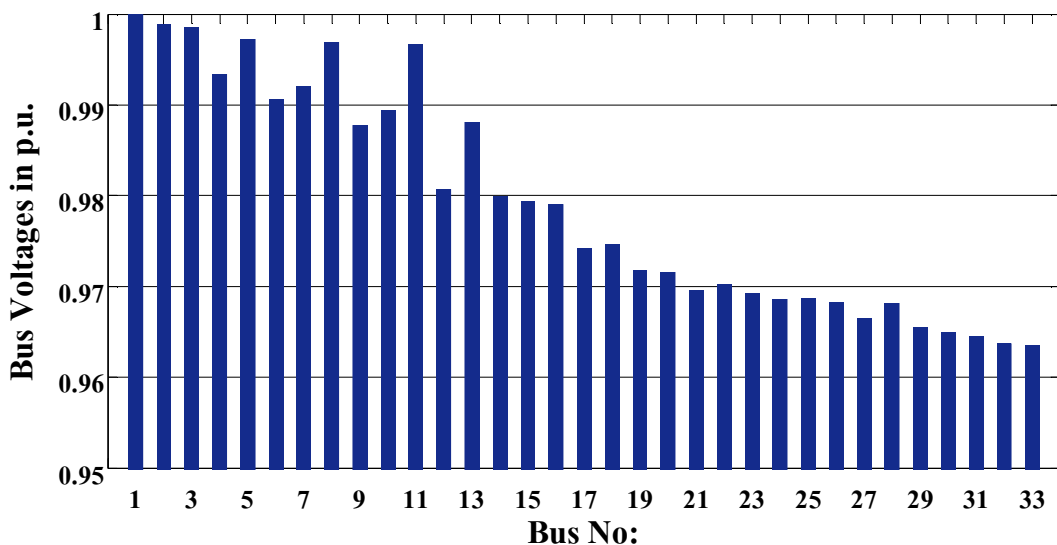
ผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือหลักในการช่วยวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ ที่ต้องการทำการทดสอบ มีรายละเอียดลำดับขั้นตอนการแสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

##### 4.2.1 ผลการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

การทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบเมื่อติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยจะแบ่งการแสดงผลการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ ก่อนติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบจำหน่าย และหลังติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบจำหน่ายซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ดังต่อไปนี้

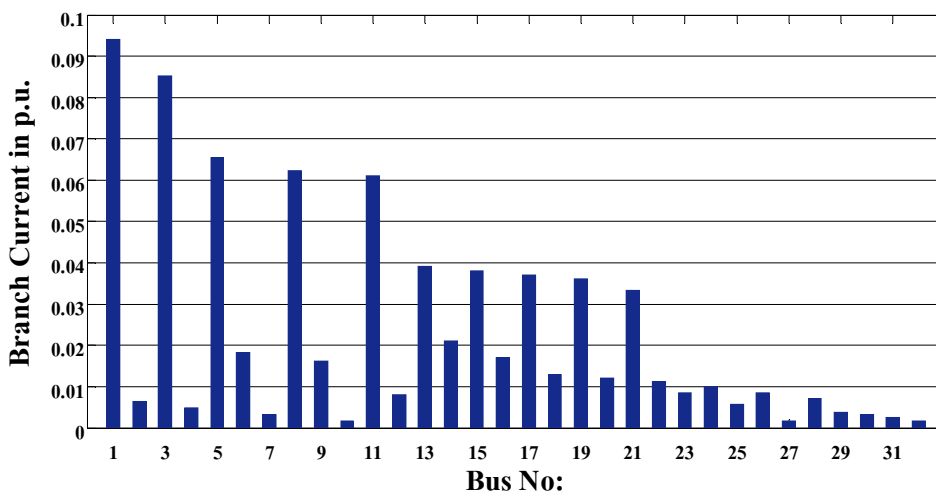
- 1) ผลการทดสอบก่อนติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบจำหน่าย โดยจะเป็นการประยุกต์ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ใช้แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ซึ่งจะแสดงผลการทดสอบไว้ดังนี้





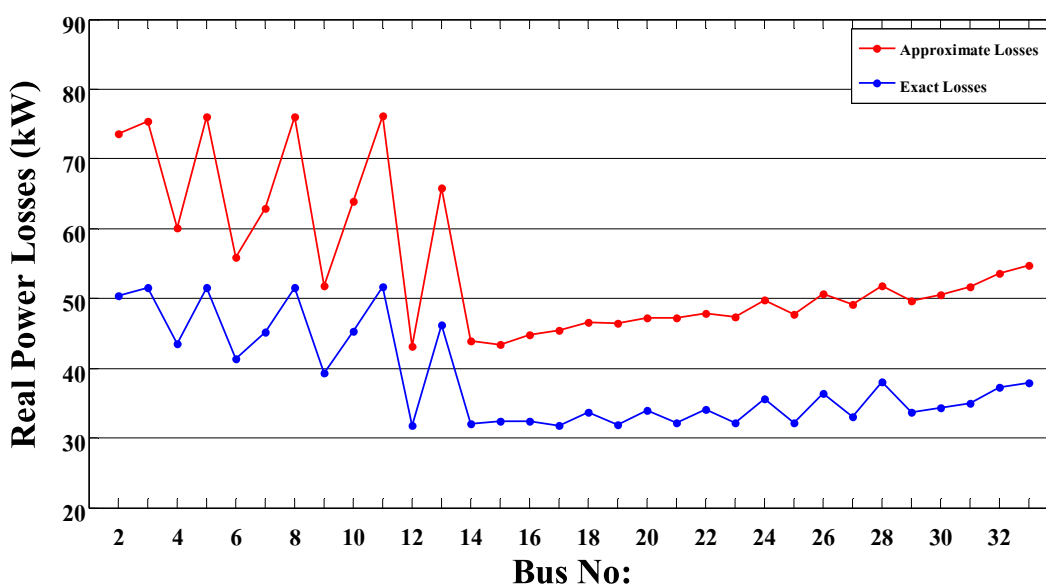
ภาพที่ 4.1 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส

พิจารณารูปภาพที่ 4.1 จะพบว่าก่อนติดตั้ง DG ค่าขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบจะลดลงไปจากบัสที่ 1 ที่มีค่าแรงดันไฟฟ้า = 1 p.u. อย่างต่อเนื่อง สาเหตุมาจากการต่อ วงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล กล่าวคือเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันตกที่ปลายสายส่ง โดยบัสสุดท้ายหรือบัสที่ 33 จะถูกมองว่าเป็นบัสอ่อนแอ (Weak Bus) ซึ่งมีค่าขนาดแรงดันที่บัสต่ำที่สุดเท่ากับ 0.963457 p.u. และเป็นบัสที่ไกลที่สุด



ภาพที่ 4.2 ขนาดกระแสไฟฟ้าที่สาขาต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส

พิจารณารูปภาพที่ 4.2 จะพบว่าก่อนติดตั้ง DG ค่าขนาดกระแสที่สาขาต่างๆ ของระบบ จะมีค่าแตกต่างกัน สาเหตุมาจากภาระของโหลดแต่ละสาขาที่แตกต่างกัน ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในตัวนำของสายป้อนบางสาขายังมีค่าสูงเกินไป ส่งผลให้สายป้อนแต่ละสาขามีขีดความสามารถรับกระแสไฟฟ้าของโหลดได้ลดลง โดยที่สาขาที่ 1 มีค่ากระแสสูงสุดคือ 0.094083 p.u.



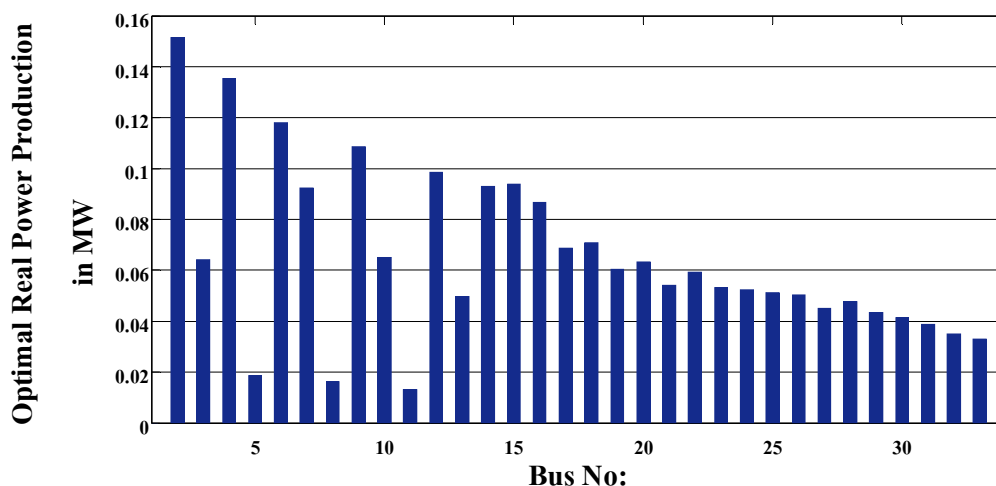
ภาพที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณและค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่ชัดของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส

พิจารณารูปภาพที่ 4.3 จะพบว่าก่อนติดตั้ง DG จะมีการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณของระบบจำหน่าย และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่ชัดของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ที่บัสต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบกันโดยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่ชัดของระบบจำหน่าย จะนำไปใช้ในการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงในระบบต่อไป

โดยทั้งสองวิธีนี้มีขั้นตอนในการหาเหมือนกันแต่การหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณของระบบจำหน่ายนั้นจะใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่า เพราะใช้การประมาณค่า โดยการหาค่าเพียงบางตำแหน่งเท่านั้น [10] ซึ่งทั้งสองวิธีจะเป็นเหมือนการทำนายล่วงหน้าว่าควรติดตั้ง DG ที่ตำแหน่งใด โดยดูที่บัสต่างๆ ว่าบัสใดที่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจริงของระบบน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณารูปกราฟจะพบว่า กราฟเส้นบนคือการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณของระบบจำหน่าย ในบัสที่ 12 จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยประมาณต่ำที่สุด = 43.2027 kW และกราฟ เส้นล่างคือการหาค่า

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่นัดของระบบจำหน่าย ในบัสที่ 12 จะได้ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่แน่นัดต่ำที่สุด = 31.7650 kW โดยทั้งสองวิธีนั้นระบุว่าควรติดตั้ง DG ในบัสที่ 12

ซึ่งทั้งสองวิธีนั้นได้มีขั้นตอนเสมือนการจำลองการหาขนาดและตำแหน่งของ DG ร่วมเข้าไปในแต่ละบัสด้วย ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนดขนาดของ DG ไว้ที่ขนาด 1 MW ดังนั้นผลที่ได้หลังจากติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบแล้วนั้นอาจจะไม่ใช่บัสที่ 12 ก็เป็นไปได้



ภาพที่ 4.4 ค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส

พิจารณากราฟภาพที่ 4.4 จะพบว่าก่อนติดตั้ง DG ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมที่สุดของระบบที่ปลายสายส่งของระบบมีค่าลดต่ำลงเช่นกัน สาเหตุมาจากค่าแรงดันที่บัสต่างๆ และค่ากระแสของแต่ละสาขาซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงซึ่งกันและกัน ดังนั้นจะส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบที่ปลายสายส่งค่อนข้างมาก โดยมีการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมที่สุดของระบบต่ำสุด = 13.2551 kW และสูงสุด = 151.4956 kW ซึ่งบัสที่ 12 ที่มีการทำนายว่าเหมาะกับการติดตั้ง DG นั้นควรมีการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมที่สุดของระบบ = 98.4130 kW

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส

Bus No.	Voltage p.u.	Angle (Radians)	Angle (Degrees)
1	1.000000	0.000000	0.000000
2	0.998838	0.000091	0.005214
3	0.998628	0.000015	0.000859
4	0.993396	0.000629	0.036039
5	0.997203	-0.000450	-0.025783
6	0.990539	0.001060	0.060734
7	0.991986	0.000420	0.024064
8	0.996923	-0.000584	-0.033461
9	0.987713	0.001494	0.085600
10	0.989367	-0.000181	-0.010371
11	0.996670	-0.000725	-0.041539
12	0.980692	0.000874	0.050077
13	0.988063	-0.000474	-0.027158
14	0.979956	0.001128	0.064630
15	0.979359	-0.000617	-0.035351
16	0.978985	0.001490	0.085371
17	0.974191	-0.001610	-0.092246
18	0.974639	0.002028	0.116196
19	0.971801	-0.002085	-0.119462
20	0.971520	0.002527	0.144786
21	0.969593	-0.002492	-0.142781
22	0.970170	0.003193	0.182945
23	0.969264	-0.002447	-0.140203
24	0.968593	0.002663	0.152579
25	0.968693	-0.002374	-0.136020
26	0.968246	0.002518	0.144271

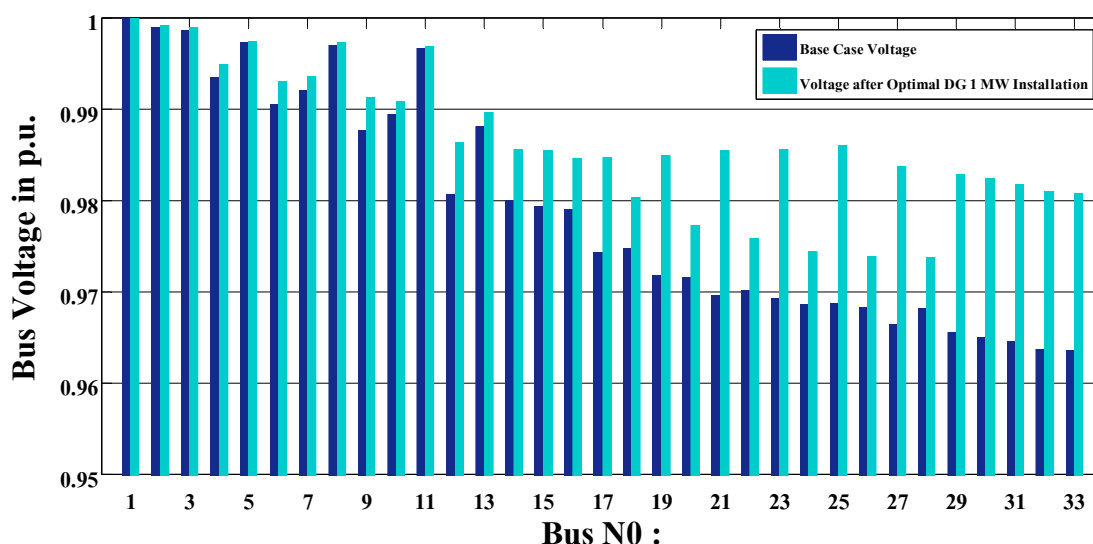
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33บัส

Bus No.	Voltage p.u.	Angle (Radians)	Angle (Degrees)
27	0.966371	-0.002957	-0.169424
28	0.968139	0.002470	0.141521
29	0.965510	-0.003455	-0.197957
30	0.964974	-0.003692	-0.211536
31	0.964455	-0.003839	-0.219958
32	0.963687	-0.004325	-0.247804
33	0.963457	-0.004385	-0.251242
กำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย (kW)		77.0135 kW	
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสีย (kVar)		52.1361 kVar	

ผลของแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE ก่อนติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบจำหน่าย โดยประยุกต์ใช้แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ซึ่งจากการจำลองการไหลของการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสาขาโดยวิธีแพร่กระจายถอยหลัง และการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดโดยวิธีแพร่กระจายเดินหน้าของระบบจำหน่ายแล้ว พบว่า ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1 p.u. ส่วนบัสอื่นๆ ที่อยู่ไกลออกไปแรงดันไฟฟ้าที่บัสจะลดลงเรื่อยๆ โดยเฉพาะที่ปลายสาย คือ บัสที่ 33 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนแอที่สุด (Weak Bus) จะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด โดยจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.963457 p.u. และกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะอยู่ที่ 77.0135 kW และ 52.1361 kVar ตามลำดับ รวมไปถึงค่ามุมของแรงดันที่บัสต่างๆ แสดงรายละเอียดไว้ดังตารางที่ 3.1

2) ผลการทดสอบหลังติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบจำหน่าย โดยจะเป็น การประยุกต์ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ใช้แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar โดยที่ผลการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบที่ละบัส (Trial DG) และผลการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยใช้เทคนิคการหา ค่าเหมาะสม

ที่สุดแบบตาม ที่นำมาใช้แก้ปัญหาการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดนั้นจะได้ค่า ต่างๆ ของ ผลการทดสอบที่เท่ากัน ซึ่งจะแสดงผลการทดสอบไว้ดังนี้

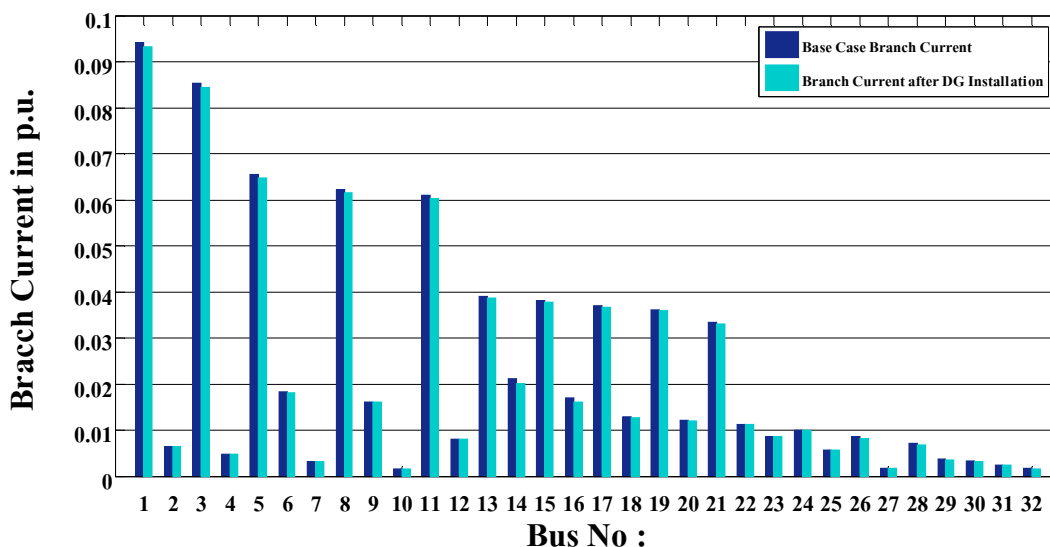


ภาพที่ 4.5 ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติด DG

พิจารณากราฟภาพที่ 4.5 จะเป็นการเปรียบเทียบค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติด DG โดยใช้การทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามาค้นหาตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ในบัสที่ 25 แล้วนั้น พบว่าหลังติดตั้ง DG ค่าขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น สาเหตุมาจาก DG จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบจึงช่วยยกระดับค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ให้สูงขึ้นด้วย โดยบัสสุดท้ายจะถูกมองว่าเป็นบัสอ่อนแอ (Weak Bus) ซึ่งมีค่าขนาดแรงดันที่บัสต่ำที่สุด และเป็นบัสที่ไกลที่สุด จะเปลี่ยนไปเป็นบัสที่ 28 แทน แสดงค่าไว้ดังตารางที่ 4.2

จากภาพที่ 4.3 โดยก่อนติด DG ได้มีการทำนายล่วงหน้าไว้ว่าควรติด DG ในบัสที่ 12 แต่หลังจากติด DG เข้าสู่ระบบแล้วผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะเป็นบัสที่ 25 ซึ่งได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบมีค่าต่ำที่สุด = 48.6791 kW และค่าขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นดังภาพที่ 4.5 โดยที่วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนดขนาดของ DG ไว้ที่ขนาด 1 MW ดังนั้นผลที่ได้หลังจากติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบแล้วนั้นอาจจะไม่ใช่บัสที่ 12 ก็ได้ เพราะทั้งสองวิธีที่

ใช้คำนวณในช่วงต้นก่อนติด DG นั้น ได้มีขั้นตอนเสมือนการจำลองการหาขนาดและตำแหน่งของ DG ร่วมเข้าไปในแต่ละบัสด้วย จึงเหมาะกับการนำไปคำนวณเพื่อทำนายหาทั้งขนาดและตำแหน่งของการติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบพร้อมกัน



ภาพที่ 4.6 ขนาดกระแสไฟฟ้าที่สาขาต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติด DG

พิจารณารูปภาพที่ 4.6 จะเป็นการเปรียบเทียบค่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่สาขาต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติด DG โดยใช้การทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามูค้นหา ตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ในบัสที่ 25 แล้วนั้น พบว่าหลังติดตั้ง DG ค่าขนาดกระแสไฟฟ้าที่สาขาต่างๆ ของระบบจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น สาเหตุมาจาก DG จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบ จึงช่วยลดระดับค่ากระแสไฟฟ้าที่สาขาต่างๆ ด้วย ซึ่งผลที่ได้นั้นจะเห็นว่าค่ากระแสจะลดลงไม่มากนัก โดยมีผลสืบเนื่องมาจากความต้องการของภาระโหลดของระบบที่ต้องการกระแสที่ต้องจ่ายให้โหลดของระบบมีค่าคงที่ และวิทยานิพนธ์นี้เป็นการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่ (Static Load) ด้วย

ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองค่าต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส หลังติด DG

Bus No.	DG Size MW	P <sub>loss</sub> kW	Q <sub>loss</sub> kVar	Voltage p.u.	Base kV kV
2	1	75.4476	51.3201	0.9991	22
3	1	75.5616	51.4295	0.9989	22
4	1	68.2571	47.6215	0.9949	22
5	1	77.2838	52.9795	0.9974	22
6	1	64.8404	45.8602	0.9930	22
7	1	67.2507	46.9377	0.9935	22
8	1	77.9321	53.7368	0.9972	22
9	1	61.5112	44.1436	0.9912	22
10	1	65.6762	45.7003	0.9909	22
11	1	79.3662	55.6347	0.9969	22
12	1	54.5840	38.2215	0.9863	22
13	1	66.0401	45.9836	0.9896	22
14	1	54.1107	37.9750	0.9855	22
15	1	53.9663	36.3271	0.9854	22
16	1	53.5434	37.6807	0.9846	22
17	1	50.4326	33.7822	0.9847	22
18	1	51.7702	36.1354	0.9803	22
19	1	49.4300	33.0632	0.9849	22
20	1	50.7053	35.2192	0.9772	22
21	1	48.7662	32.5911	0.9854	22
22	1	50.3740	35.0489	0.9758	22
23	1	48.7054	32.5696	0.9856	22
24	1	50.7903	35.4542	0.9743	22
25	1	48.6791	32.5590	0.9860	22
26	1	51.1766	35.8948	0.9739	22
27	1	49.0506	32.8487	0.9837	22



ตารางที่ 4.2 ผลการจำลองค่าต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส หลังติดตั้ง DG (ต่อ)

Bus No.	DG Size MW	$P_{loss}$ kW	$Q_{loss}$ kVar	Voltage p.u.	Base kV kV
28	1	51.9968	37.1260	0.9738	22
29	1	49.3663	33.2560	0.9828	22
30	1	50.0803	33.8851	0.9823	22
31	1	51.2081	34.7044	0.9818	22
32	1	53.5833	37.8143	0.9810	22
33	1	55.1273	39.0131	0.9808	22

พิจารณาตารางที่ 4.2 จะเป็นการรายงานผลการจำลองค่าต่างๆ ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส หลังติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบ ซึ่งจะรายงานค่าของขนาด DG ที่ใช้ในการติดตั้งเข้าสู่แต่ละบัสโดยมีขนาด = 1MW ต่อมาจะรายงานค่ากำลังงานสูญเสียของระบบที่แต่ละบัส โดยจะพบว่าหลังจากติดตั้ง DG เข้าสู่บัสที่ 25 แล้วจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียน้อยที่สุด = 48.6791 kW และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสีย = 32.5590 kVar โดยเมื่อพิจารณาค่าของแรงดันหลังติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบ บัสอ่อนแอ (Weak Bus) ซึ่งมีค่าขนาดแรงดันที่บัสต่ำที่สุด โดยก่อนติดตั้ง DG จะอยู่ที่บัสที่ 33 แต่เมื่อติดตั้ง DG เข้าสู่บัสที่ 25 แล้วจะเปลี่ยนไปเป็นบัสที่ 28 แทนซึ่งจะมีค่า = 0.9738 p.u. และสุดท้ายจะเป็นการรายงานค่าการทดสอบระบบของแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส โดยจะทำการทดสอบที่แรงดันไฟฟ้าฐาน = 22 kV

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ DG โดยใช้การค้นหาแบบทีละบัส (Trial DG) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาบู่ (TS)

System	Method	Bus No.	DG Size 1 MW	$P_{loss}$ kW	$Q_{loss}$ kVar	Loss Reduction %	
						Real Power	Reactive Power
33 Bus	Load Flow Analysis			77.0135	52.1361		
	Trial DG And TS	25	1	48.6791	32.5590	36.79	37.54
		23	1	48.7054	32.5696	36.75	37.52
		21	1	48.7662	32.5911	36.67	37.48
		27	1	49.0506	32.8487	36.30	36.99
		29	1	49.3663	33.2560	35.89	36.21

พิจารณาตารางที่ 4.3 จะเป็นการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย และ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสีย ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส โดยที่ก่อนติดตั้ง DG ขนาด 1 MW เข้าสู่ระบบจำหน่าย ซึ่งจากผลการจำลองการไหลของการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าแต่ละสาขา โดยวิธีแพร่กระจายถอยหลังและการคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดโดยวิธีแพร่กระจายเงินหน้าของระบบจำหน่ายแล้วจะได้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสียรวมในระบบจะอยู่ที่ 77.0135 kW และ 52.1361 kVar ตามลำดับ

หลังติด DG โดยใช้การทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามขั้นตอนการติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ในบัสที่ 25 แล้วนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย = 48.6791 kW และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสีย = 32.5590 kVar โดยที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบลดลง 36.79 % kW และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสียของระบบลดลง 37.54 % ทำให้ระบบมีเสถียรภาพของแรงดันเพิ่มมากขึ้น และสุดท้ายจะแสดงถึงบัสที่ติดตั้ง DG แล้วให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสียของระบบต่ำที่สุดถัดมาอีก 4 บัสได้แก่บัสที่ 23 บัสที่ 21 บัสที่ 27 และบัสที่ 29 ตามลำดับ

4.2.2 ผลการทดสอบเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาม ที่นำมาใช้แก้ปัญหาการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด โดยจะแบ่งผลของการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้คือ ผลการทดสอบสมรรถนะของวิธีการ และผลการทดสอบผลลัพธ์การค้นหาค่าของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการทดสอบสมรรถนะของวิธีการ จะเป็นการเปรียบเทียบความเร็วในการค้นหาคำตอบระหว่างการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาม ซึ่งแต่ละวิธีจะทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง โดยมีลำดับขั้นตอนการแสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบโดย Trial DG จำนวน 32 ครั้ง ทำการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง

Bus No	Objective Function (kW)	Round No	Time (sec)	Iteration 33 Bus/1 Round	Answer Bus
2	137.3817	1	1.6510	33	25
3	137.6057	2	1.4677	33	25
4	126.5040	3	1.4617	33	25
5	140.8816	4	1.4625	33	25
6	121.3331	5	1.4778	33	25
7	124.8149	6	1.4762	33	25
8	142.2878	7	1.4918	33	25
9	116.2946	8	1.4850	33	25
10	131.5569	9	1.5447	33	25
11	145.6204	10	1.4688	33	25
12	103.4602	11	1.5031	33	25
13	122.6525	12	1.4845	33	25
14	102.7417	13	1.4822	33	25
15	100.9500	14	1.4958	33	25
16	101.8819	15	1.5354	33	25
17	94.8876	16	1.5069	33	25
18	98.5688	17	1.5252	33	25
19	93.1748	18	1.5561	33	25
20	96.5913	19	1.5213	33	25
21	92.0469	20	1.5401	33	25
22	96.0913	21	1.5565	33	25
23	91.9658	22	1.5489	33	25
24	96.9154	23	1.5617	33	25
25	91.9312	24	1.5886	33	25
26	97.7428	25	1.5796	33	25
27	92.5997	26	1.6115	33	25
28	99.7943	27	1.5505	33	25
29	93.3248	28	1.5908	33	25
30	94.6699	29	1.7351	33	25
31	96.6188	30	1.6642	33	25
32	102.1055				
33	104.8354				

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบโดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ ทำการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง

Bus No :	Objective Function (kW)	Round No	Time (sec)	Iteration	Answer Bus
2	137.3817	1	0.7827	9	25
3	137.6057	2	0.7108	9	25
4	126.5040	3	0.6383	8	25
5	140.8816	4	0.6105	8	25
6	121.3331	5	0.7066	9	25
7	124.8149	6	0.6922	9	25
8	142.2878	7	0.6290	8	25
9	116.2946	8	0.6490	8	25
10	131.5569	9	0.7128	9	25
11	145.6204	10	0.6313	8	25
12	103.4602	11	0.6356	8	25
13	122.6525	12	0.6930	9	25
14	102.7417	13	0.6885	9	25
15	100.9500	14	0.7048	9	25
16	101.8819	15	0.7105	9	25
17	94.8876	16	0.6726	8	25
18	98.5688	17	0.7943	9	25
19	93.1748	18	0.7205	9	25
20	96.5913	19	0.7191	9	25
21	92.0469	20	0.6327	8	25
22	96.0913	21	0.7273	9	25
23	91.9658	22	0.7053	9	25
24	96.9154	23	0.6229	8	25
25	91.9312	24	0.6994	9	25
26	97.7428	25	0.7151	9	25
27	92.5997	26	0.7034	9	25
28	99.7943	27	0.7137	9	25
29	93.3248	28	0.6964	9	25
30	94.6699	29	0.7183	9	25
31	96.6188	30	0.7064	9	25
32	102.1055				
33	104.8354				

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ สมรรถนะในการค้นหาต่ำสุด

Methods	min fobj.	average fobj.	max fobj.	S.D.
Trial DG	91.9312	109.0572	145.6204	17.7576
TS	91.9312	91.9312	91.9312	0

ตารางที่ 4.7 รายงานผลทดสอบ จำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ \* TS Max Iter = 50 รอบ

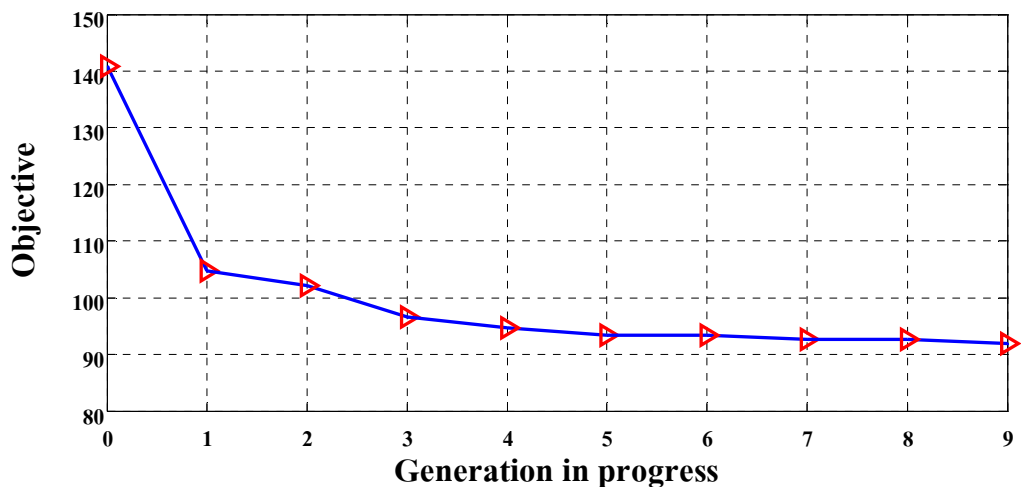
Methods	min Iter.	average Iter.	max Iter.	S.D.
Trial DG	33	33	33	0
TS	8	8.7000	9	0.4661

ตารางที่ 4.8 งานผลทดสอบ ความเร็วในการค้นหา (วินาที)

Methods	min time	average time	max time	S.D.
Trial DG	1.4617	1.5375	1.7351	0.0658
TS	0.6105	0.6914	0.7943	0.0440

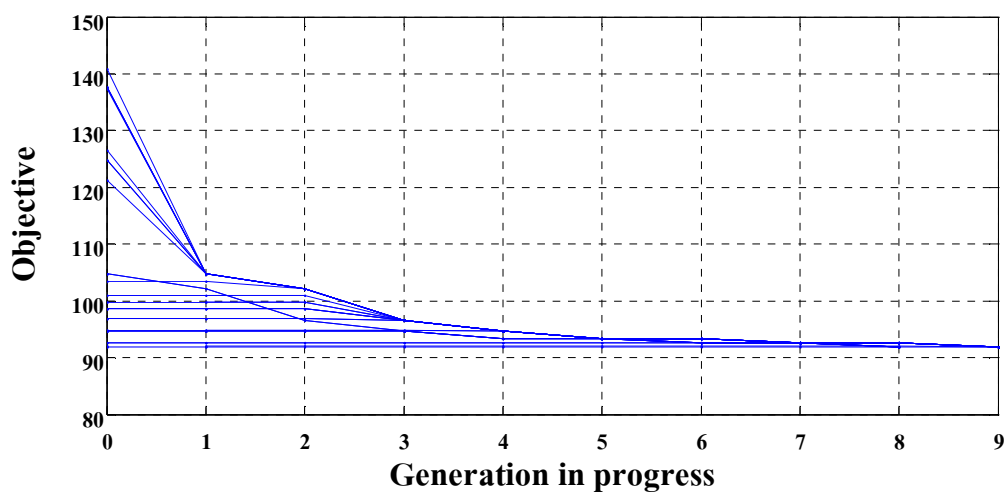
จากตารางที่ 4.4 และ 4.5 เป็นการรายงานผลของการทดสอบรันโปรแกรม MATLAB M-File โดยการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู โดยทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง เปรียบเทียบกัน แล้วจึงนำค่ามาหาค่าเฉลี่ย ต่างๆ ที่ต้องการเพื่อรายงานผลการทดสอบของ ผลการทดสอบสมรรถนะในการค้นหาต่ำสุด แสดงดัง ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบ จำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ \* TS Max Iter = 50 แสดงดังตารางที่ 4.7 และผลการทดสอบความเร็วในการค้นหา (วินาที) แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยที่จากตารางที่ 4.6 – 4.8 แสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู มีสมรรถนะที่เหนือกว่าวิธีการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) ไม่ว่าจะเป็นตัววิธีการของสมรรถนะเอง จำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ใน การค้นหาก็น้อยกว่า รวมถึงความเร็วในการค้นหาค่าตอบก็เร็วกว่า ซึ่งโดยรวมแล้วจะเป็นการบ่งบอกถึงควมมีสมรรถนะที่ดีในการหาค่าตอบของวิธีการ

Convergence curve (best solution)



ภาพที่ 4.7 การลู่เข้าสู่คำตอบโดยใช้การค้นหาแบบตาม ครงที่ 1

Convergence curve (best solution)



ภาพที่ 4.8 การลู่เข้าสู่คำตอบโดยใช้การค้นหาแบบตาม ครงที่ 2- 30

จากภาพที่ 4.7 และ 4.8 เป็นการรายงานผลของการทดสอบรันโปรแกรม MATLAB M-File โดยการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตาม โดยทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง โดยภาพที่ 4.7 เป็นรายงานผลของการทดสอบการลู่เข้าสู่คำตอบครั้งที่ 1 พร้อมทั้งทิศทางของการลู่เข้าสู่คำตอบ ภาพที่ 4.8 เป็นรายงานผลของการทดสอบการลู่

เข้าสู่คำตอบครั้งที่ 2 - 30 โดยแกน x จะเป็นจำนวนรอบของการคำนวณ จากภาพทั้งสองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวิธีการ

2) ผลการทดสอบผลรัศมีการค้นหาของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง โดยจะมีผลต่อสมรรถนะการค้นหาที่ดีที่สุด ซึ่งจะกำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขต โดยที่แต่ละวิธีจะทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง การกำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขตมี ดังนี้ (+1 และ -1) (+2 และ -2) (+3 และ -3) (+4 และ -4) (+5 และ -5) (+6 และ -6) (+7 และ -7) (+8 และ -8) (+9 และ -9) ซึ่งผลการทดสอบของจำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ \* TS Max Iter = 50 รอบ และความเร็วในการค้นหา (วินาที) จำนวน 30 ครั้ง ต่อ 1 ขอบเขตของรัศมีการนำค่าที่ได้มากำหนดค่า เบอร์เซนต์ที่ลดลงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณของขอบเขตของรัศมีการค้นหา ดังสมการที่ 3.1 เพื่อนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ

ตารางที่ 4.9 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmaim\_all33bus โดย Trial DG จำนวน 32 ครั้ง

Bus No :	Objective Function (kW)	Round No :	Time (sec)	Iteration 33 Bus / 1 Round	Answer Bus :
2	137.3817	1	1.6510	33	25
3	137.6057	2	1.4677	33	25
4	126.5040	3	1.4617	33	25
5	140.8816	4	1.4625	33	25
6	121.3331	5	1.4778	33	25
7	124.8149	6	1.4762	33	25
8	142.2878	7	1.4918	33	25
9	116.2946	8	1.4850	33	25
10	131.5569	9	1.5447	33	25
11	145.6204	10	1.4688	33	25
12	103.4602	11	1.5031	33	25
13	122.6525	12	1.4845	33	25
14	102.7417	13	1.4822	33	25
15	100.9500	14	1.4958	33	25
16	101.8819	15	1.5354	33	25

ตารางที่ 4.9 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_all33bus โดย Trial DG จำนวน 32 ครั้ง (ต่อ)

Bus No :	Objective Function (kW)	Round No :	Time (sec)	Iteration 33 Bus / 1 Round	Answer Bus :
17	94.8876	16	1.5069	33	25
18	98.5688	17	1.5252	33	25
19	93.1748	18	1.5561	33	25
20	96.5913	19	1.5213	33	25
21	92.0469	20	1.5401	33	25
22	96.0913	21	1.5565	33	25
23	91.9658	22	1.5489	33	25
24	96.9154	23	1.5617	33	25
25	91.9312	24	1.5886	33	25
26	97.7428	25	1.5796	33	25
27	92.5997	26	1.6115	33	25
28	99.7943	27	1.5505	33	25
29	93.3248	28	1.5908	33	25
30	94.6699	29	1.7351	33	25
31	96.6188	30	1.6642	33	25
32	102.1055				
33	104.8354				

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบ  
เรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) โดยจะนำค่าที่ไปใช้คำนวณสมการที่ (3.1)



ตารางที่ 4.10 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain . m	+ 1	- 1	0.8635	8
2	tsmain . m	+ 1	- 1	0.7830	8
3	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9469	9
4	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9160	9
5	tsmain . m	+ 1	- 1	0.7933	8
6	tsmain . m	+ 1	- 1	0.8258	8
7	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9691	9
8	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9187	9
9	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9048	8
10	tsmain . m	+ 1	- 1	0.7995	8
11	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9604	9
12	tsmain . m	+ 1	- 1	0.8251	8
13	tsmain . m	+ 1	- 1	0.8762	8
14	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9774	9
15	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9553	9
16	tsmain . m	+ 1	- 1	1.0478	9
17	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9955	9
18	tsmain . m	+ 1	- 1	0.8869	8
19	tsmain . m	+ 1	- 1	1.0244	9
20	tsmain . m	+ 1	- 1	1.0541	9
21	tsmain . m	+ 1	- 1	1.0098	9
22	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9321	8
23	tsmain . m	+ 1	- 1	1.1250	9
24	tsmain . m	+ 1	- 1	1.1126	9
25	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9764	8
26	tsmain . m	+ 1	- 1	1.1711	9
27	tsmain . m	+ 1	- 1	1.1369	9
28	tsmain . m	+ 1	- 1	1.0942	9
29	tsmain . m	+ 1	- 1	1.1215	9
30	tsmain . m	+ 1	- 1	1.1150	9

ตารางที่ 4.11 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_1 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8019	8
2	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7709	8
3	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7084	7
4	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7754	8
5	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7986	8
6	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8187	8
7	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7827	8
8	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7850	8
9	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8252	8
10	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8050	8
11	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7318	7
12	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8392	8
13	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8628	8
14	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7370	7
15	tsmain_1 . m	+2	-2	0.9445	8
16	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8400	8
17	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7389	7
18	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8916	8
19	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8755	8
20	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8768	8
21	tsmain_1 . m	+2	-2	0.7570	7
22	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8864	8
23	tsmain_1 . m	+2	-2	0.9176	8
24	tsmain_1 . m	+2	-2	1.0846	8
25	tsmain_1 . m	+2	-2	0.9213	8
26	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8227	7
27	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8435	7
28	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8260	7
29	tsmain_1 . m	+2	-2	0.9486	8
30	tsmain_1 . m	+2	-2	0.8076	7

ตารางที่ 4.12 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_2 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.6505	6
2	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.5722	6
3	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.6869	7
4	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.5750	6
5	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.6011	6
6	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7409	7
7	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7723	7
8	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7392	7
9	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7731	7
10	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7414	7
11	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7534	7
12	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7622	7
13	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7775	7
14	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7644	7
15	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7853	7
16	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8389	6
17	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7612	7
18	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.6714	6
19	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8213	7
20	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8106	7
21	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8012	7
22	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7982	7
23	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7305	6
24	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8121	7
25	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8395	7
26	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8338	7
27	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8211	7
28	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8175	7
29	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8542	7
30	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.8474	7

ตารางที่ 4.13 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_3 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6176	6
2	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.5408	6
3	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.5851	6
4	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.4682	5
5	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.5667	6
6	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.5852	6
7	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6064	6
8	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.5021	5
9	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6059	6
10	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6379	6
11	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.5363	5
12	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6093	6
13	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6013	6
14	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6006	6
15	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6256	6
16	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6077	6
17	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6463	6
18	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6639	6
19	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.5332	5
20	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6296	6
21	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6320	5
22	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6646	6
23	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6603	6
24	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6326	6
25	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6850	6
26	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6384	6
27	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6372	6
28	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6489	6
29	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6714	6
30	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6810	6

ตารางที่ 4.14 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_4 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.1391	1
2	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4906	5
3	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5022	5
4	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4690	5
5	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4805	5
6	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4908	5
7	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4968	5
8	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.3891	4
9	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4062	4
10	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.3999	4
11	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4957	5
12	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4983	5
13	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.1173	1
14	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5242	5
15	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4138	4
16	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4096	4
17	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5527	5
18	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5325	5
19	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.1277	1
20	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5197	5
21	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5971	5
22	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4380	4
23	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5517	5
24	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5373	5
25	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5801	5
26	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5627	5
27	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5593	5
28	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5705	5
29	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5625	5
30	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.5599	5

ตารางที่ 4.15 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_5 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4306	4
2	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.2975	3
3	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3798	4
4	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3843	4
5	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4017	4
6	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4109	4
7	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3449	3
8	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3922	4
9	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3930	4
10	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3075	3
11	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4080	4
12	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4072	4
13	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4095	4
14	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4067	4
15	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3210	3
16	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4175	4
17	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4176	4
18	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4260	4
19	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3163	3
20	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.1241	1
21	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4506	4
22	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3307	3
23	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3579	3
24	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4245	4
25	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4537	4
26	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4510	4
27	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4573	4
28	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4451	4
29	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4633	4
30	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.4556	4

ตารางที่ 4.16 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_6 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3427	3
2	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.1852	2
3	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.1927	2
4	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2955	3
5	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2914	3
6	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3441	3
7	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2899	3
8	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3176	3
9	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3181	3
10	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3368	3
11	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2003	2
12	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3099	3
13	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3096	3
14	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2053	2
15	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3299	3
16	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2980	3
17	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3313	3
18	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3134	3
19	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3250	3
20	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3359	3
21	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3069	3
22	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3200	3
23	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3289	3
24	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3207	3
25	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2223	2
26	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.2428	2
27	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3586	3
28	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3287	3
29	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3210	3
30	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.4421	3

ตารางที่ 4.17 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_7 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2569	2
2	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1943	2
3	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1038	1
4	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.0963	1
5	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1003	1
6	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2072	2
7	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2080	2
8	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2179	2
9	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2099	2
10	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1032	1
11	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1039	1
12	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2074	2
13	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2104	2
14	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2121	2
15	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2270	2
16	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1146	1
17	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1213	1
18	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2188	2
19	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1142	1
20	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2160	2
21	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2162	2
22	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1174	1
23	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1378	1
24	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1296	1
25	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2391	2
26	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2109	2
27	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2173	2
28	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2350	2
29	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.2441	2
30	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1245	1



ตารางที่ 4.18 รายงานผลทดสอบ ไฟล์ tsmain\_8 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Time (sec)	Iteration (Round)
1	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1522	1
2	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1067	1
3	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.0911	1
4	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1035	1
5	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1062	1
6	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.8983	9
7	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1084	1
8	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1107	1
9	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1039	1
10	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.0980	1
11	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1051	1
12	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1120	1
13	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1081	1
14	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1062	1
15	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.8933	9
16	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1120	1
17	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1190	1
18	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1125	1
19	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.9343	9
20	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.9218	9
21	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.9240	9
22	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1213	1
23	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1355	1
24	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1319	1
25	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1333	1
26	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1308	1
27	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1461	1
28	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1369	1
29	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.1381	1
30	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	1.0146	9

ตารางที่ 4.19 รายงานผลทดสอบค่าเฉลี่ยของ ไฟล์ tsmain – tsmain\_8 โดยใช้ TS กำหนด Max Iter = 50 รอบ จำนวน 30 ครั้ง

Round No	File for Testing	Positive Value	Negative Value	Mean of Time (sec)	Mean of Iteration (Round)
1 - 30	tsmain . m	+ 1	- 1	0.9706	8.6333
1 - 30	tsmain_1 . m	+ 2	- 2	0.8342	7.7000
1 - 30	tsmain_2 . m	+ 3	- 3	0.7585	6.7667
1 - 30	tsmain_3 . m	+ 4	- 4	0.6107	5.8333
1 - 30	tsmain_4 . m	+ 5	- 5	0.4658	4.4000
1 - 30	tsmain_5 . m	+ 6	- 6	0.3895	3.6667
1 - 30	tsmain_6 . m	+ 7	- 7	0.3022	2.8000
1 - 30	tsmain_7 . m	+ 8	- 8	0.1772	1.6000
1 - 30	tsmain_8 . m	+ 9	- 9	0.2805	2.6000

จากตารางที่ 4.10 – 4.18 จะรายงานผลการทดสอบผลรัศมีการค้นหาของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง โดยจะมีผลต่อสมรรถนะการค้นหาที่ดีที่สุด ซึ่งจะกำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขต โดยที่แต่ละวิธีจะทำการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง การกำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขตมี ดังนี้ (+1 และ -1) (+2 และ -2) (+3 และ -3) (+4 และ -4) (+5 และ -5) (+6 และ -6) (+7 และ -7) (+8 และ -8) (+9 และ -9) ซึ่งผลการทดสอบของจำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ \* TS Max Iter = 50 รอบ และความเร็วในการค้นหา (วินาที) จำนวน 30 ครั้ง ต่อ 1 ขอบเขตของรัศมีการค้นหา จากนั้นนำไปหาค่าเฉลี่ย ซึ่งแสดงผลไว้ดังตารางที่ 4.19 แล้งจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณของขอบเขตของรัศมีการค้นหา โดยใช้สมการที่ 3.1 เพื่อนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ ดังภาพที่ 4.9 นำค่าจากตารางมาสร้างกราฟโดยได้ค่าจากการคำนวณดังนี้

$$\% \text{ ที่ลดลงของเวลาที่ } = \frac{\text{เวลาเฉลี่ย Trial DG 33 ครั้ง} - (\text{เวลาเฉลี่ย tsmain ?})}{\text{เวลาเฉลี่ย Trial DG 33 ครั้ง}} \times 100$$

ใช้ในการคำนวณที่ tsmain ?

$$\text{At tsmain . m} = (0.6914 - 0.9706) \times 100 / 0.6914 = -40.3818 \%$$

$$\text{At tsmain_1 . m} = (0.6914 - 0.8342) \times 100 / 0.6914 = -20.6537 \%$$

$$\text{At tsmain_2 . m} = (0.6914 - 0.7585) \times 100 / 0.6914 = -9.7049 \%$$

$$\text{At tsmain_3 . m} = (0.6914 - 0.6107) \times 100 / 0.6914 = 11.6719 \%$$

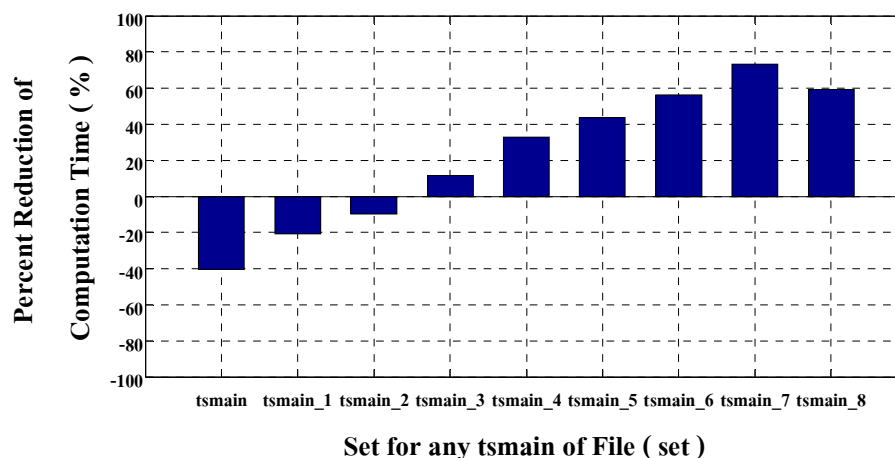
$$\text{At tsmain_4 . m} = (0.6914 - 0.4658) \times 100 / 0.6914 = 32.6294 \%$$

$$\text{At tsmain_5 . m} = (0.6914 - 0.3895) \times 100 / 0.6914 = 43.6650 \%$$

$$\text{At tsmain_6 . m} = (0.6914 - 0.3022) \times 100 / 0.6914 = 56.2915 \%$$

$$\text{At tsmain_7 . m} = (0.6914 - 0.1772) \times 100 / 0.6914 = 73.3708 \%$$

$$\text{At tsmain_8 . m} = (0.6914 - 0.2805) \times 100 / 0.6914 = 59.4301 \%$$

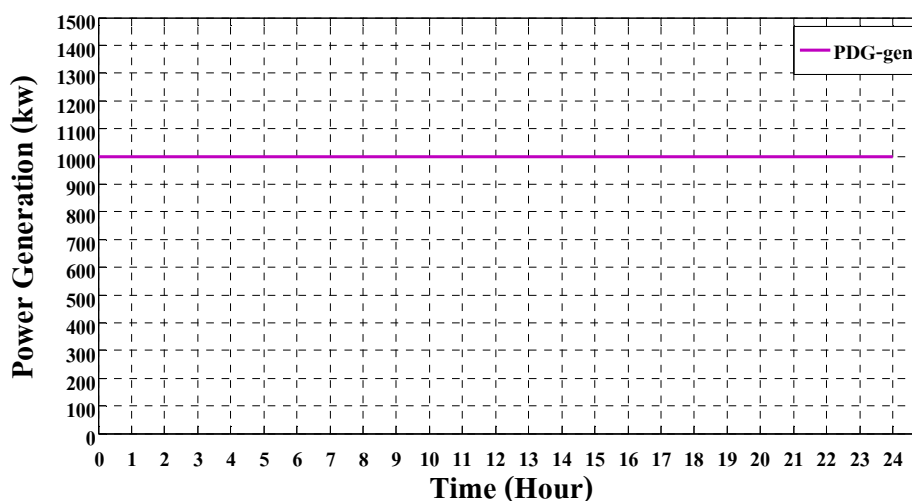


ภาพที่ 4.9 เปรอ์เซ็นต์ที่ลดลงของเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ tsmain ต่างๆ

จากตารางที่ 4.19 และภาพที่ 4.9 จะรายงานผลการทดสอบผลลัพธ์การค้นหาของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง ซึ่งจะมีผลต่อสมรรถนะการค้นหาที่ดีที่สุด โดยขอบเขตที่ดีที่สุดคือ (+8 และ -8) จะอยู่ที่ภาพผลทดสอบค่าเฉลี่ยของ ไฟล์ tsmain\_7 ซึ่งจะใช้เวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด โดยขอบเขตที่ (+9 และ -9) จะเริ่มเกิดการลู่ออกของเวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ

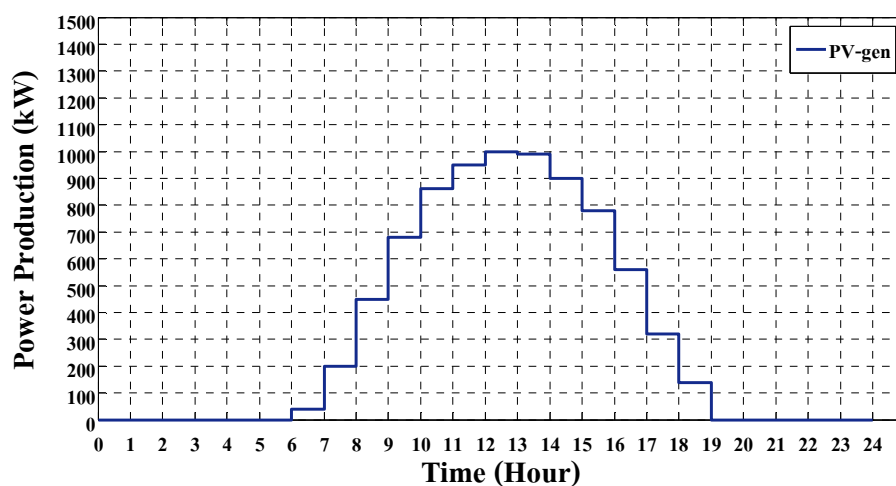
4.2.3 ผลการทดสอบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) ขนาด 200 kW ต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่นำมาใช้แก้ปัญหาการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ โดยจะแบ่งผลของการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการทดสอบกำลังการผลิตของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW และ NaS ขนาด 200 kW ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วันจะเป็นการรายงานผลการนำค่าของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW จากตารางที่ 3.1 และการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) 200 kW จากตารางที่ 3.2 ไปสร้างกราฟของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน เพื่อนำค่าไปใช้ทดสอบในหัวข้อต่อไป โดยมีลำดับขั้นตอนการแสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้



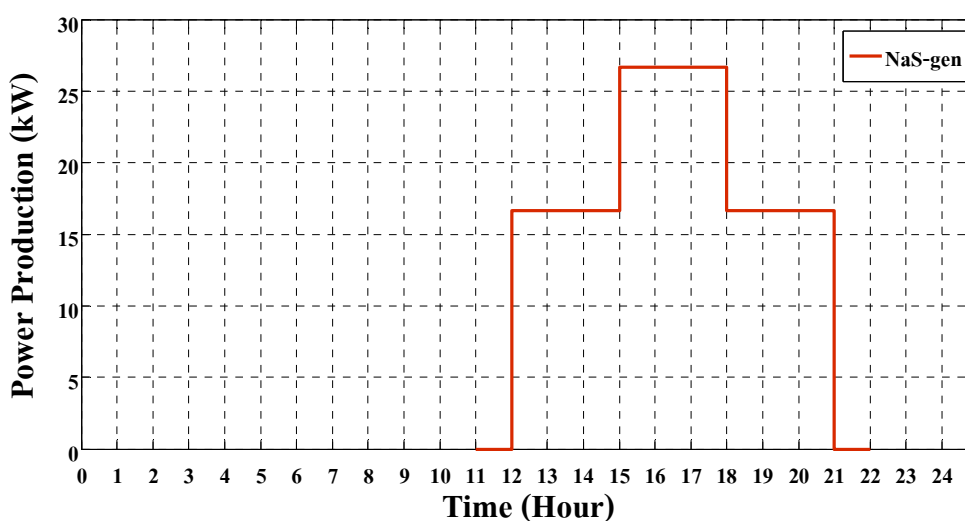
ภาพที่ 4.10 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW ขณะโหลดคงที่ ในช่วงเวลา 1 วัน

พิจารณากราฟภาพที่ 4.10 จะแสดงการรายงานผลการนำค่าของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของ DG ที่เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ขณะโหลดคงที่ ในช่วงเวลา 1 วัน



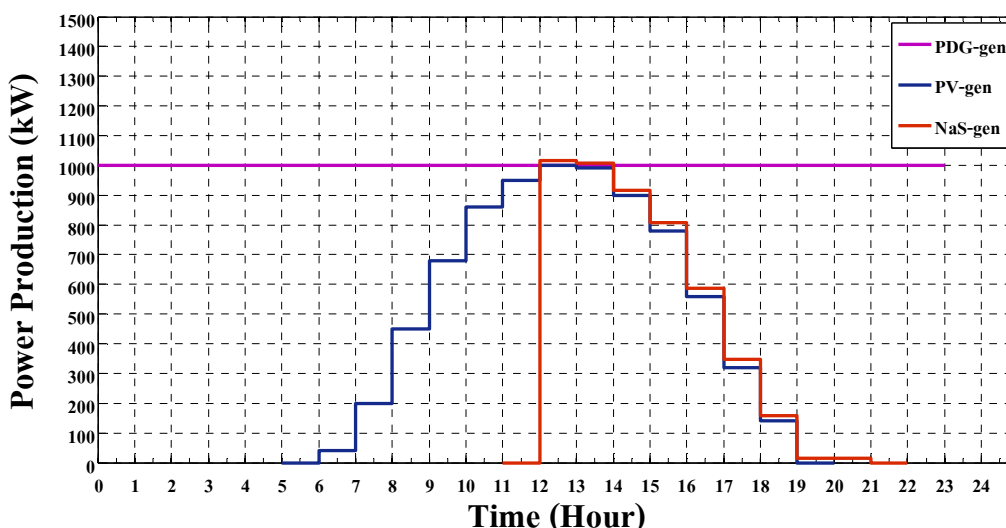
ภาพที่ 4.11 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW ในช่วงเวลา 1 วัน

พิจารณารูปภาพที่ 4.11 จะแสดงการรายงานผลการนำค่าของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW ขณะเวลาต่างๆ ในช่วงเวลา 1 วัน ซึ่งช่วงเวลา 12.00 น. หรือเที่ยงวัน DG ที่เป็นแบบ PV จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่แสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มของแสงสูงที่สุด จึงสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงที่สุดเช่นกัน ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 4.12 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ NaS ขนาด 200 kW ขณะในช่วงเวลา 1 วัน

พิจารณากราฟภาพที่ 4.12 จะแสดงการรายงานผลการนำค่าของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ระยะเวลาต่างๆ ในช่วงเวลา 1 วัน ซึ่งจะใช้ค่า DOD = 90 % ดังนั้นความจุรวมทั้งหมดจึงมีแค่ 180 kW ที่นำไปใช้งานได้ จากกราฟจะพบว่าที่เวลา 11.00-12.00 น. และ 21.00-22.00 น. จะเป็นช่วงเตรียมพร้อม โดยที่ช่วงเวลา 12.00-15.00 น. และ 18.00-21.00 น. จะเป็นช่วงคายประจุมีค่าเท่ากับ 25 % หรือ 16.66 kW ของความจุทั้งหมดของ 180 kW และสุดท้ายที่ช่วงเวลา 15.00-18.00 น. จะเป็นช่วงคายประจุมีค่าเท่ากับ 40 % หรือ 26.66 kW ของความจุทั้งหมดของ 180 kW เช่นกัน ซึ่งเวลาในการคายประจุเท่ากับ 9 ชั่วโมง และเวลาในการเก็บประจุเท่ากับ 13 ชั่วโมง โดยเริ่มเก็บประจุตั้งแต่วันที่ 22.00-11.00 น. ของวันต่อไป



ภาพที่ 4.13 กำลังการผลิตกำลังไฟฟ้า ในช่วงเวลา 1 วัน ของ DG ที่เป็น PV ขนาด 1 MW ร่วมกับ NaS ขนาด 200 kW ระยะเวลา ในช่วงเวลา 1 วัน

พิจารณากราฟภาพที่ 4.13 จะแสดงการรายงานผลการนำค่าของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW และการนำค่าของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ระยะเวลาต่างๆ ในช่วงเวลา 1 วัน มาสร้างกราฟการออกแบบระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) เพื่อใช้เป็นระบบชดเชยให้ DG จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าระบบชดเชยของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะมีประโยชน์ที่สำคัญ 2 ส่วนคือ อันดับแรก

ระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) จะช่วย DG จ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงความต้องการของโหลดสูงสุด คือช่วงเวลา 12.00-14.00 น. อันดับที่สองระบบของแบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟต (NaS) จะช่วยยืดเวลาการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ยาวนานขึ้น คือช่วงเวลา 19.00-21.00 น. ซึ่งจะช่วยในแก้ปัญหาการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ ดังมาจากสาเหตุที่ DG และระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) เมื่อเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเบเรเคิล ในบัสที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มหรือยกระดับแรงดันที่ปลายสายส่ง เพราะ DG และระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

2) ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG และ NaS ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วันจะเป็นการรายงานผลการนำค่าที่ได้จากการสร้างกราฟของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน มาทำการทดสอบหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่บัส 25 ตามตำแหน่งของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน ของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW และการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) ขนาด 200 kW โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตาม มาใช้ในการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.20 โดยมีลำดับขั้นตอนการแสดงผลการทดสอบดังต่อไปนี้

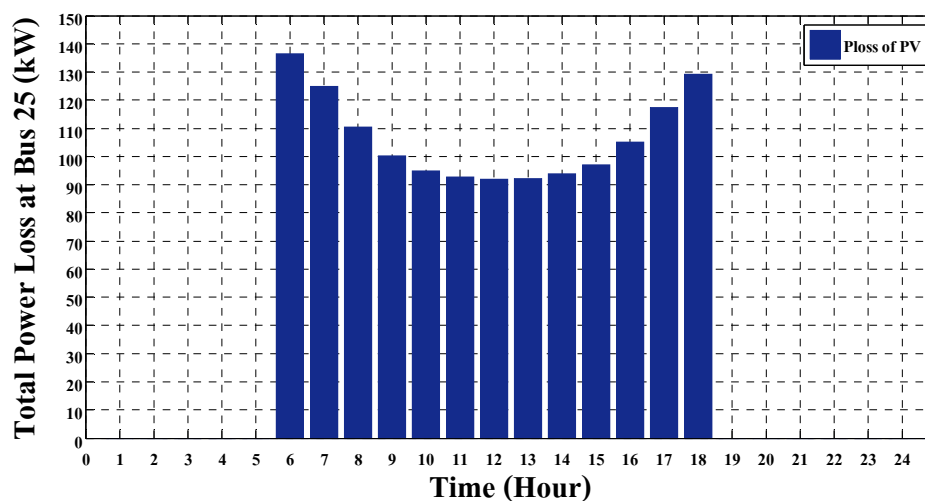
**ตารางที่ 4.20** ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG และ NaS ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของ DG (kW)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของ NaS (kW)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของ DG + NaS (kW)
0-5	0	0	0
6	136.5804	0	136.5804
7	125.0283	0	125.0283
8	110.3348	0	110.3348
9	100.3495	0	100.3495
10	94.8415	0	94.8415
11	92.8339	0	92.8339
12	91.9312	138.4080	91.6639

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG และ Nas ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน

เวลา (ชั่วโมง)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของ DG (kW)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของ NaS (kW)	กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของ DG + NaS (kW)
13	92.0996	138.4080	91.8223
14	93.8883	138.4080	93.5201
15	97.0423	137.6205	96.2652
16	105.1422	137.6205	103.9992
17	117.4697	137.6205	115.9177
18	129.1616	138.4080	127.9901
19	0	138.4080	138.4080
20	0	138.4080	138.4080
21-24	0	0	0

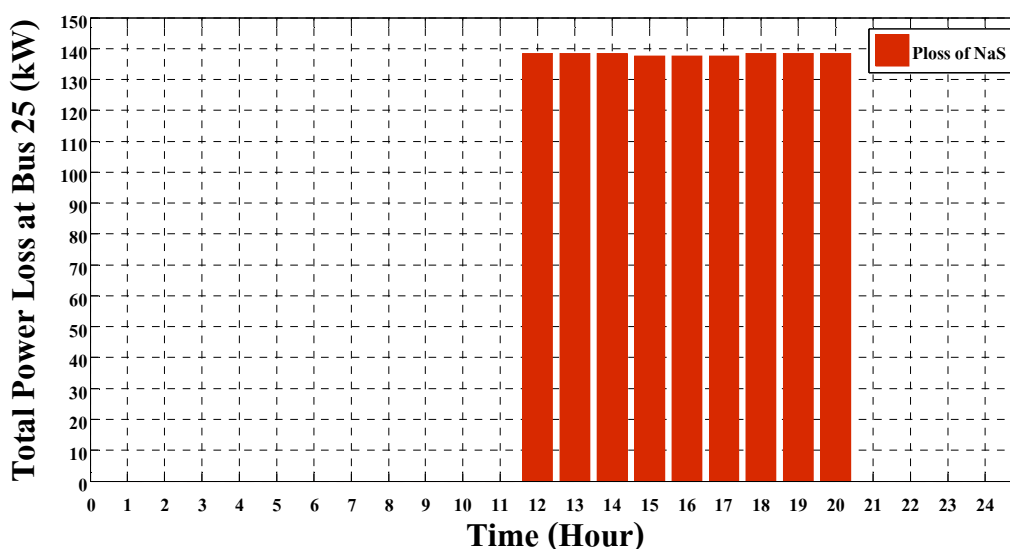
จากตารางที่ 4.20 จะแสดงการรายงานผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG และแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (Nas) ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน นำผลที่ได้มาสร้างกราฟการรายงานผลการทดสอบในภาพที่ 4.14 - 4.16



ภาพที่ 4.14 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน



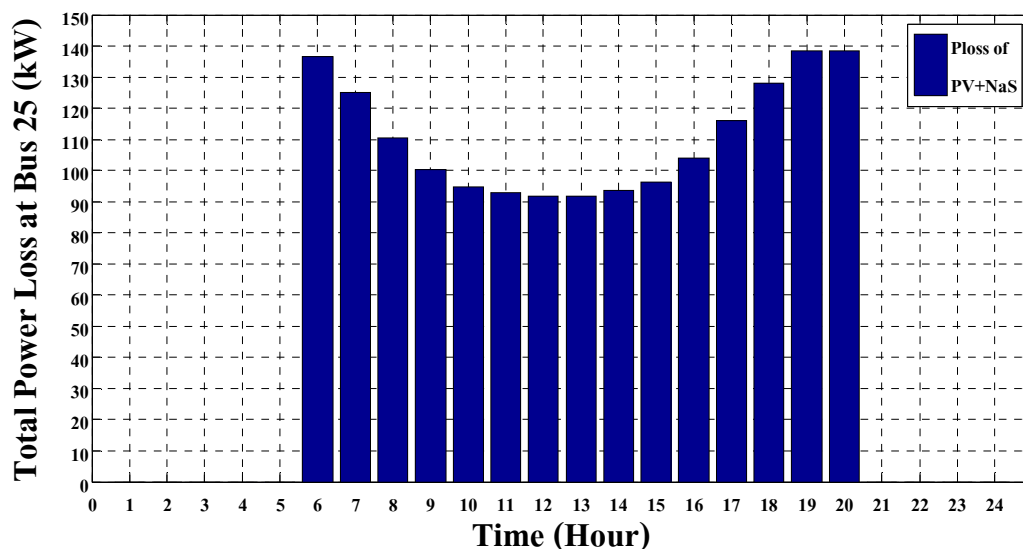
พิจารณากราฟภาพที่ 4.14 จะแสดงการรายงานผลการนำค่าที่ได้จากการสร้างกราฟของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน มาทำการทดสอบหาลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมที่บัส 25 ตามตำแหน่งของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน ของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมจะมีค่าสูงเมื่อ DG เริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 6.00 น. และช่วงใกล้หยุดจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 18.00 น. ในทางตรงกันข้ามในช่วงที่ DG จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือในช่วงเวลา 12.00 น. ลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมจะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงถ้าติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยลดลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบได้ดีที่สุดในช่วงเวลาที่ DG มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงที่สูงที่สุด



ภาพที่ 4.15 ลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง NaS ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน

พิจารณากราฟภาพที่ 4.15 จะแสดงการรายงานผลการนำค่าที่ได้จากการสร้างกราฟของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน มาทำการทดสอบหาลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมที่บัส 25 ตามตำแหน่งของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน ของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าลำดับไฟฟ้าสูญเสียรวมจะมีค่าสูงเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ขณะนี้ทำการทดสอบที่ค่าการออกแบบคือ 16.66 kW และ 26.66 kW ซึ่งยังไม่รวมค่าของ DG ซึ่งก็มีข้อดีคือทำให้รู้ว่าขนาดของระบบที่ผลิต

กำลังไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ถ้ามีกำลังการผลิตที่มีค่าน้อย เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแล้วจะลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบได้น้อยเช่นกัน



ภาพที่ 4.16 กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมเมื่อติดตั้ง DG ร่วมกับ NaS ในบัสที่ 25 ในช่วงเวลาของการทดสอบ 1 วัน

พิจารณากราฟภาพที่ 4.16 จะแสดงการรายงานผลการนำค่าที่ได้จากการสร้างกราฟของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน มาทำการทดสอบหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่บัส 25 ตามตำแหน่งของกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 วัน ของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW และของการออกแบบการวางแผนการจ่ายพลังงานของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW จากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมจะเหมือนกับภาพที่ 4.14 ซึ่งจากพฤติกรรมดังกล่าวสามารถสรุปได้คือ ช่วงเวลาที่ DG และระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จ่ายกำลังงานไฟฟ้าร่วมกันเข้าสู่ระบบจำหน่ายสูงสุดช่วงเวลา 12.00 น. จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบจำหน่ายได้สูงสุด กล่าวคือมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบจำหน่ายต่ำที่สุด แต่เมื่อถึงช่วงที่ DG เริ่มจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้น้อยลงเนื่องจาก DG เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จึงทำให้มีช่วงที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้แตกต่างกันรวมถึงช่วงที่ต้องหยุดผลิตกำลังไฟฟ้า ดังนั้นระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียม

ซัลเฟอร์ (NaS) จะช่วยเป็นตัวเสริมและยืดเวลาในการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบได้เพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น

#### 4.3 สรุปผลการแสดงผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation : DG) เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามู (Tabu Search: TS) มาช่วยในการแก้ปัญหาในการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด โดยผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ จะเป็นการประยุกต์ใช้ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ใช้แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3 MVar ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ จะใช้ โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือหลักในการช่วยวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่างๆ ที่ต้องการทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบสรุปได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสีย ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติดตั้ง DG โดยใช้การทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามูค้นหาตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ในบัสที่ 25 แล้วนั้น พบว่าหลังติดตั้ง DG ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย = 77.0135 kW และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสีย = 52.1361 kVar แต่หลังติดตั้ง DG เข้าสู่บัสที่ 25 แล้วนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย = 48.6791 kW และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสีย = 32.5590 kVar โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบลดลง 36.79 % kW และกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่สูญเสียของระบบลดลง 37.54 % ทำให้ระบบมีเสถียรภาพของแรงดันเพิ่มมากขึ้น

ผลของการทดสอบรันโปรแกรม MATLAB M-File โดยการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามู แสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามู มีสมรรถนะที่เหนือกว่าวิธีการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) ไม่ว่าจะเป็นตัววิธีการของสมรรถนะเอง จำนวนรอบการค้นหาที่ใช้ในการค้นหาก็น้อยกว่า รวมถึงความเร็วในการค้นหาคำตอบก็เร็วกว่า ซึ่งโดยรวมแล้วจะเป็นการบ่งบอกถึงควมมีสมรรถนะที่ดีในการหาคำตอบของ

วิธีการ และผลการทดสอบผลรัศมีการค้นหาของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง โดยจะมีผลต่อสมรรถนะการค้นหาที่ดีที่สุด ซึ่งจะกำหนดขอบเขตของรัศมีการค้นหาทั้งหมด 9 ขอบเขต โดยขอบเขตที่ดีที่สุดคือ (+8 และ -8) จะอยู่ที่รูปผลทดสอบค่าเฉลี่ยของ ไฟล์ tsmain\_7 ซึ่งจะใช้เวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด โดยขอบเขตที่ (+9 และ -9) จะเริ่มเกิดการล้นออกของเวลา และจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ

ผลการทดสอบระบบขดเคชกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) ขนาด 200 kW ต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่นำมาใช้แก้ปัญหาการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ โดยจะมีประโยชน์ที่สำคัญ 2 ส่วนคือ อันดับแรกระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) จะช่วย DG จ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงความต้องการของโหลดสูงสุด คือช่วงเวลา 12.00-14.00 น. อันดับที่สองระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) จะช่วยยืดเวลาการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้ยาวนานขึ้น คือช่วงเวลา 19.00-21.00 น. ซึ่งจะช่วยในแก้ปัญหาการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ ดังมาจากสาเหตุที่ DG และระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) เมื่อเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ในบัสที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มหรือยกระดับแรงดันที่ปลายสายส่ง เพราะ DG และระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟต (NaS) จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบได้ ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation : DG) เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามู (Tabu Search: TS) มาช่วยในการแก้ปัญหาในการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด เพื่อช่วยลด กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ

โดยผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ ในส่วนการจำลองระบบจะเป็นการประยุกต์ใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE เป็นต้นแบบ ซึ่งทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าฐาน 22 kV และ 25 MVA โดยอาศัยข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าและหาตำแหน่งการติดตั้ง DG ที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายแล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไปพล็อตกราฟ จากนั้นทำการวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าจากผลการจำลองระบบจำหน่าย คว้าบัสไหนของระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง DG เข้าไปแล้ว กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสูญเสียต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับบัสอื่น ๆ กล่าวคือเป็นบัสที่เหมาะสมในการติดตั้ง DG เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย โดยกำหนด DG ให้มีขนาด 1 MW ภายได้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่ (Static Load)

สุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ระบบขดเซยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิด โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium-Sulfur Battery: NaS) เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เพื่อเป็นการปรับปรุง รูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดียิ่งขึ้น

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation : DG) เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามู (Tabu Search : TS) มาช่วย ในการแก้ปัญหาของการหาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด โดยผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ จะเป็นการประยุกต์ใช้ ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ใช้แรงดันไฟฟ้าฐานเท่ากับ 22 kV และกำลังไฟฟ้าปรากฏฐานเท่ากับ 25 MVA ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้ารวมของโหลดเท่ากับ 3.72 MW และ 2.3

MVar ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่าง ๆ จะใช้ โปรแกรม MATLAB M-File เป็นเครื่องมือหลักในการช่วยวิเคราะห์ และแก้ปัญหาของระบบในส่วนต่าง ๆ ที่ต้องการทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบสรุปได้เป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสีย ของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล มาตรฐาน IEEE 33 บัส ก่อนและหลังติดตั้ง DG โดยใช้การทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามาค้นหาคำแห่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ในบัสที่ 25 แล้วนั้น พบว่าหลังติดตั้ง DG ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย = 77.0135 kW และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสีย = 52.1361 kVar แต่หลังติดตั้ง DG เข้าสู่บัสที่ 25 แล้วนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่สูญเสีย = 48.6791 kW และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสีย = 32.5590 kVar โดยที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบลดลง 36.79 % kW และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียของระบบลดลง 37.54 % ทำให้ระบบมีเสถียรภาพของแรงดันเพิ่มมากขึ้น

5.1.2 ผลของการทดสอบรันโปรแกรม MATLAB M-File โดยการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) และการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามา แสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตามา มีสมรรถนะ ที่เหนือกว่าวิธีการทดสอบติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แบบทีละบัส (Trial DG) ไม่ว่าจะเป็นตัววิธีการของสมรรถนะเอง จำนวนรอบการค้นหาคำที่ใช้ในการค้นหาก็น้อยกว่า รวมถึงความเร็วในการค้นหาคำตอบก็เร็วกว่า ซึ่งโดยรวมแล้วจะเป็นการบ่งบอกถึงความมีสมรรถนะที่ดีในการหาคำตอบของวิธีการ และผลการทดสอบผลลัพธ์การค้นหาคำของกลไกการสร้างคำตอบข้างเคียง โดยจะมีผลต่อสมรรถนะการค้นหาคำที่ดีที่สุด ซึ่งจะกำหนดขอบเขตของผลลัพธ์การค้นหาคำทั้งหมด 9 ขอบเขต โดยขอบเขตที่ดีที่สุดคือ (+8 และ -8) จะอยู่ที่รูปผลทดสอบค่าเฉลี่ยของ ไฟล์ tsmain\_7 ซึ่งจะใช้เวลาและจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบน้อยที่สุด โดยขอบเขตที่ (+9 และ -9) จะเริ่มเกิดการลู่ออกของเวลา และจำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ ซึ่งเป็นขอบเขตที่ไม่เหมาะสมในการปรับตั้ง

5.1.3 ผลของการทดสอบระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW ต่อร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ที่นำมาใช้แก้ปัญหาค่าการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ โดยจะมีประโยชน์ที่สำคัญ 2 ส่วนคือ อันดับแรกระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะช่วย DG จ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงความต้องการของโหลดสูงสุด คือช่วงเวลา 12.00-14.00 น. อันดับที่สองระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะช่วยยืดเวลาการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดได้

ยาวนานขึ้น คือช่วงเวลา 19.00-21.00 น. ซึ่งจะช่วยในแก้ปัญหาการปรับปรุงรูปร่างของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Profile) ของระบบ ดังมาจากสาเหตุที่ DG และระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) เมื่อเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ในบัสที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มหรือยกระดับแรงดันที่ปลายสายส่ง เพราะ DG และระบบของแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเทคโนโลยีของระบบชดเชยกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) นั้น ยังคงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นเรื่องที่น่าติดตามและสนใจศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย หรือที่นิยมเรียกโดยย่อว่า DG นั้นเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าที่มาจากพลังงานทดแทนหลายรูปแบบให้เลือกใช้ในการทดสอบ ซึ่งไม่ว่าจะใช้แบบใดนั้นควรศึกษาข้อมูลของแบบจำลองให้เข้าใจก่อนนำไปใช้งาน

5.2.2 แบบจำลองของระบบจำหน่ายมีให้เลือกทำการทดสอบหลายรูปแบบ ซึ่งก่อนนำไปใช้งานควรพิจารณาเลือกให้เหมาะสมกับรูปแบบ และขนาดของปัญหาที่ต้องการ

5.2.3 การเลือกใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดมาใช้ในการแก้ปัญหาของระบบต่าง ๆ นั้น ควรพิจารณาถึงกระบวนการของการทำงาน และสมรรถนะของวิธีการ และขนาดของรูปแบบของปัญหาที่ต้องการแก้ไข ซึ่งจะให้ผลของสมรรถนะที่ดีในการค้นหาคำตอบ

5.2.4 การทดสอบแบบจำลองของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา มาตรฐาน IEEE ของวิทยานิพนธ์นี้ จะกระทำภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่สภาวะโหลดคงที่ (Static Load) ซึ่งผู้สนใจสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบที่มีโหลดโหลดเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้ (Dynamic Load) หรือระบบที่ใช้เวลาจริงในการทดสอบ (Real Time)

## รายการอ้างอิง

- [1] ชวลิต ดำรงรัตน์, การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า. หจก.เอช-เอน การพิมพ์: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2533. หน้า 93-94.
- [2] นพภาพร พานิช และคณะ, ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศ (Online), 2551. Available: [http://www.aqnis.pcd.go.th/basic/pollution\\_basic.htm](http://www.aqnis.pcd.go.th/basic/pollution_basic.htm) (14 สิงหาคม 2553).
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน, ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Online), 2542. Available: <http://www.eppo.go.th/power/pw-ElecPriv-T-02.html> (17 กรกฎาคม 2553).
- [4] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551 (Online), 2552. Available: [http://www.pea.or.th/vspp/etc/connection\\_code.pdf](http://www.pea.or.th/vspp/etc/connection_code.pdf) (17 กรกฎาคม 2553).
- [5] การไฟฟ้านครหลวง, ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กมากฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2547 (Online), 2553. Available: <http://www.mea.or.th/internet/Elecvalue/VSPP/VSPPReportWeb.pdf> (17 กรกฎาคม 2553).
- [6] Golder, A. S., **Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies**, Master of science Thesies in Electrical Engineering, Drexel University, October 2006.
- [7] Namin, M. H. “ et al.” “Large scale photovoltaic power generation modeling, control method and analyzing,” **IEEE International Conference on Clean Electrical Power** (Electronic), 2009, pp. 159-164. Available: IEEE organization / IEEE Xplore (8 August 2010).
- [8] วิชิต เครือสุข, “การหาดำแหน่งและขนาดกำลังผลิตที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายโดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้การเคลื่อนที่กลุ่มของอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด”, การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยศรีปทุม, 14 สิงหาคม 2552
- [9] ธวัช เกิดชื่น และกฤตวิทย์ บัวใหญ่, “เทคนิคการคำนวณการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย”, การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (EENET2008) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ธัญบุรี, 2552, หน้า 1-13.



- [10] Pukar, M., Weerakom, O. and Nadarajah, M., “Optimal placement of wind turbine DG in primary distribution systems for real loss reduction”, **Energy for Sustainable Development: Prospects and Issues for Asia** (Electronic), 2006, pp. 1-6. Available: World Academy of Science, Engineering and Technology (8 August 2010).
- [11] อุเทน ลีตัน และ ธนัชชัย กุลวรรวานิชพงษ์, “การแก้ปัญหากำลังงานสูญเสียในสายส่งต่ำที่สุดโดยใช้ผลเฉลยการไหลกำลังไฟฟ้าเหมาะที่สุดที่อาศัยปัญญาเชิงกลุ่ม”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33, ธันวาคม 2553, หน้า 81-84.
- [12] ยุทธนา เอี่ยมสมบูรณ์, การหาค่าตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่เหมาะสมเพื่อลดกำลังสูญเสียและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยวิธีการค้นหาแบบตาบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2551.
- [13] Zahrul, F. “ et al.”, “Modeling of Sodium Sulfur Battery for Power System Applications,” **ELEKTRIKA Journal of Electrical Engineering**, 2007, Vol. 9, No. 2, pp. 66-72. Available: Faculty of Electrical Engineering University Teknologi Malaysia (8 February 2013).
- [14] กฤษณ์ ภูมิภักดีพิชญ์, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ทริปเปิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2552. หน้า 1-5.
- [15] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์, การออกแบบระบบไฟฟ้า. ครั้งที่ 1. บริษัท ทีซีจี พรินติ้ง จำกัด: ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545. หน้า 11-20.
- [16] ชาย ชีวะเกตุ และชนานันท์ บัวเขียว, การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ (Online), 2543 Available: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html> (14 สิงหาคม 2553).
- [17] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, หลักสูตรฝึกอบรมหลักสูตรฝึกอบรมเทคนิคการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ออกแบบ (Online), 2552. Available: <http://www.are101.org/book/solarcell-training/01Designer.pdf> (8 สิงหาคม 2553).
- [18] ธาดา วรณโชติกุล, ประภัสสร ว่องชิงชัย และพงษ์พันธ์ สุขสา, พลังงานจากแสงอาทิตย์(Online), 2553. Available: [http://www.thaienergydata.in.th/econtent/upload\\_pic/1190198489.pdf](http://www.thaienergydata.in.th/econtent/upload_pic/1190198489.pdf) (8 กรกฎาคม 2553).

- [19] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (VSPP) (Online), 2549. Available: <http://www.pea.co.th/vspp/vspp/Connection%2010%20MW.pdf> (5 กรกฎาคม 2553).
- [20] ปานจิต คำรงกุลกำจร, ผลกระทบจากพลังงานหมุนเวียนต่อระบบไฟฟ้า (Online), 2552. Available: <http://www.eppo.go.th/power/ENSOP.pdf> (8 สิงหาคม 2553).
- [21] ธนัตชัย กุลวรรานิชพงษ์, การหาค่าเหมาะที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท จรัสสินทวงศ์การพิมพ์ จำกัด, 2554. หน้า 411, 225, 262-268.
- [22] ผศ.ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, ปัญหาเชิงคำนวณ. ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552 หน้า 3-9.
- [23] อมรเทพ แพทยานันท์ และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, “การศึกษาเทคนิคสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล”, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ 3 “รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย”, 15-17 ธันวาคม 2553, หน้า 155-162.
- [24] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการการศึกษาประเมินและจัดทำแผนงานวิจัยพลังงานทดแทน (Energy Storage) ตามกรอบแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี(Online), 2555. Available: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib14393.pdf> ( 12 กุมภาพันธ์ 2555)
- [25] NGK INSULATOR, LTD., **Typical System** (Online), 2556. Available: <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/principle/index.html> (8 กุมภาพันธ์ 2556).
- [26] Hokkaido Electric Power Co., Inc., **Shining New Light on Solar Power Challenges and Prospects of PV Power Generation Wakkanai Mega Solar Project** (Online), 2556. Available: <http://www.docstoc.com/docs/24424390/Shining-New-Light-on-Solar-Power-Challenges-and-Prospects> (8 กุมภาพันธ์ 2556).
- [27] IEEE, **IEEE Standard 33-Bus Radial Distribution** (Online), Available: <http://www.ieee.org>, IEEE Standard 33-Bus Radial Distribution System (14 สิงหาคม 2553).

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**

**ข้อมูลระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE**

ก.1 ข้อมูลสาขาของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (MVA)
1	2	0.0058	0.0030	0	25
2	3	0.0102	0.0098	0	25
3	4	0.0308	0.0157	0	25
4	5	0.0939	0.0846	0	25
5	6	0.0228	0.0116	0	25
6	7	0.0282	0.0192	0	25
7	8	0.0255	0.0298	0	25
8	9	0.0238	0.0121	0	25
9	10	0.0560	0.0442	0	25
10	11	0.0442	0.0585	0	25
11	12	0.0511	0.0441	0	25
12	13	0.0559	0.0437	0	25
13	14	0.0127	0.0065	0	25
14	15	0.0117	0.0386	0	25
15	16	0.0177	0.0090	0	25
16	17	0.1068	0.0771	0	25
17	18	0.0661	0.0583	0	25
18	19	0.0643	0.0462	0	25
19	20	0.0502	0.0437	0	25
20	21	0.0649	0.0462	0	25
21	22	0.0317	0.0161	0	25
22	23	0.0123	0.0041	0	25
23	24	0.0608	0.0601	0	25
24	25	0.0234	0.0077	0	25
25	26	0.0194	0.0226	0	25
26	27	0.0916	0.0721	0	25
27	28	0.0213	0.0331	0	25
28	29	0.0338	0.0445	0	25
29	30	0.0369	0.0328	0	25
30	31	0.0466	0.0340	0	25
31	32	0.0804	0.1074	0	25
32	33	0.0457	0.0358	0	25

**ก.2 ข้อมูลบัสของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 33 บัส มาตรฐาน IEEE**

Bus No	Type	Pload	Qload	Gs p.u.	Bs p.u.	Area	Vm	Va	Bas kV	Area
1	3	0.000	0.000	0	0	1	1	0	22	1
2	1	0.100	0.060	0	0	1	1	0	22	1
3	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	22	1
4	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	22	1
5	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	22	1
6	1	0.120	0.080	0	0	1	1	0	22	1
7	1	0.090	0.050	0	0	1	1	0	22	1
8	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	22	1
9	1	0.060	0.030	0	0	1	1	0	22	1
10	1	0.420	0.200	0	0	1	1	0	22	1
11	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	22	1
12	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	22	1
13	1	0.420	0.200	0	0	1	1	0	22	1
14	1	0.060	0.025	0	0	1	1	0	22	1
15	1	0.200	0.100	0	0	1	1	0	22	1
16	1	0.060	0.025	0	0	1	1	0	22	1
17	1	0.200	0.100	0	0	1	1	0	22	1
18	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	22	1
19	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	22	1
20	1	0.120	0.070	0	0	1	1	0	22	1
21	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	22	1
22	1	0.200	0.600	0	0	1	1	0	22	1
23	1	0.045	0.030	0	0	1	1	0	22	1
24	1	0.150	0.070	0	0	1	1	0	22	1
25	1	0.060	0.035	0	0	1	1	0	22	1
26	1	0.210	0.100	0	0	1	1	0	22	1
27	1	0.060	0.035	0	0	1	1	0	22	1
28	1	0.060	0.040	0	0	1	1	0	22	1
29	1	0.120	0.080	0	0	1	1	0	22	1
30	1	0.060	0.010	0	0	1	1	0	22	1
31	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	22	1
32	1	0.060	0.020	0	0	1	1	0	22	1
33	1	0.090	0.040	0	0	1	1	0	22	1

## ภาคผนวก ข

ข้อมูลการจำลองต่างๆ ที่ทำการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB M-File

## ข.1 ข้อมูลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนติดตั้ง DG ที่ทำการทดสอบด้วยโปรแกรม

### MATLAB M-File ประกอบด้วย 4 ไฟล์ดังนี้

#### 1) ไฟล์ input 33.m

```

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
% clear
% clc
% Base MVA = 25 MVA
baseMVA = 25;
% Base kV = 22 kV.
baseKV=22;

%% bus data
%bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
bus = [
    1 3 0 0 0 0 1 1 0 22 1 1.05 0.95;
    2 1 0.1 0.06 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    3 1 0.09 0.04 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    4 1 0.09 0.04 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    5 1 0.09 0.04 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    6 1 0.12 0.08 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    7 1 0.09 0.05 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    8 1 0.09 0.04 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    9 1 0.06 0.03 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    10 1 0.42 0.2 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    11 1 0.09 0.04 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    12 1 0.06 0.02 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    13 1 0.42 0.2 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    14 1 0.06 0.025 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    15 1 0.2 0.1 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    16 1 0.06 0.025 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    17 1 0.2 0.1 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    18 1 0.06 0.02 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    19 1 0.06 0.02 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    20 1 0.12 0.07 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    21 1 0.06 0.02 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    22 1 0.2 0.6 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    23 1 0.045 0.030 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    24 1 0.15 0.07 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    25 1 0.06 0.035 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    26 1 0.21 0.1 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    27 1 0.06 0.035 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    28 1 0.06 0.04 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    29 1 0.12 0.08 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    30 1 0.06 0.01 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    31 1 0.06 0.02 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    32 1 0.06 0.02 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
    33 1 0.09 0.04 0 0 1 1 0 22 1 1.00 0.95;
];
%% generator data

```



```

% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin
gen = [
    1  0  0  2  -2  1.05  25  1  2  0.05;
];
%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
branch = [
    1  2  0.0058  0.0030  0  10  10  10  0  0  1;
    2  3  0.0102  0.0098  0  10  10  10  0  0  1;
    2  4  0.0308  0.0157  0  10  10  10  0  0  1;
    3  5  0.0939  0.0846  0  10  10  10  0  0  1;
    4  6  0.0228  0.0116  0  10  10  10  0  0  1;
    4  7  0.0282  0.0192  0  10  10  10  0  0  1;
    5  8  0.0255  0.0298  0  10  10  10  0  0  1;
    6  9  0.0238  0.0121  0  10  10  10  0  0  1;
    7  10 0.0560  0.0442  0  10  10  10  0  0  1;
    8  11 0.0442  0.0585  0  10  10  10  0  0  1;
    9  12 0.0511  0.0441  0  10  10  10  0  0  1;
    10 13 0.0559  0.0437  0  10  10  10  0  0  1;
    12 14 0.0127  0.0065  0  10  10  10  0  0  1;
    12 15 0.0117  0.0386  0  10  10  10  0  0  1;
    14 16 0.0177  0.0090  0  10  10  10  0  0  1;
    15 17 0.1068  0.0771  0  10  10  10  0  0  1;
    16 18 0.0661  0.0583  0  10  10  10  0  0  1;
    17 19 0.0643  0.0462  0  10  10  10  0  0  1;
    18 20 0.0502  0.0437  0  10  10  10  0  0  1;
    19 21 0.0649  0.0462  0  10  10  10  0  0  1;
    20 22 0.0317  0.0161  0  10  10  10  0  0  1;
    21 23 0.0123  0.0041  0  10  10  10  0  0  1;
    22 24 0.0608  0.0601  0  10  10  10  0  0  1;
    23 25 0.0234  0.0077  0  10  10  10  0  0  1;
    24 26 0.0194  0.0226  0  10  10  10  0  0  1;
    25 27 0.0916  0.0721  0  10  10  10  0  0  1;
    26 28 0.0213  0.0331  0  10  10  10  0  0  1;
    27 29 0.0338  0.0445  0  10  10  10  0  0  1;
    29 30 0.0369  0.0328  0  10  10  10  0  0  1;
    30 31 0.0466  0.0340  0  10  10  10  0  0  1;
    31 32 0.0804  0.1074  0  10  10  10  0  0  1;
    32 33 0.0457  0.0358  0  10  10  10  0  0  1;
];

%%----- OPF Data -----%%

%% area data
areas = [
];

%% generator cost data
% 1 startup shutdown n x0 y0 ... xn yn
% 2 startup shutdown n c(n-1) ... c0
gencost = [
];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
bustype=bus(:,2);
N=length(bustype); % N is the number of nodes

```

```

n=N-1; % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1); % Flat start
for aa=1:N
    if bustype(aa)==3
        V(aa)=1 ; % Setting the value of voltages of 1 for
                    Generator bus
    end
end
maxmis=0.0001; % Maximum mismatch
maxitt=100; % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;
P1=bus(:,3)/baseMVA;
Q1=bus(:,4)/baseMVA;
FN=branch(:,1);
TN=branch(:,2);
R=branch(:,3);
X=branch(:,4);
B=branch(:,5);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);

% Calculated Impedance
Z=n+1;
zbus=zeros(Z,Z);
zbus(1,1)=0+j*0.000000001;

for bb=1:n
    a=FN(bb);
    b=TN(bb);
    zbus(b,:)=zbus(a,:);
    zbus(:,b)=zbus(:,a);
    zbus(b,b)=zbus(a,a)+R(bb)+j*X(bb);
end
Rik=real(zbus); % Finding R bus
Xik=imag(zbus); % Finding X bus

%%%%%%%%-----Voltage Bus-----%%%%%%%%

while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for cc=1:N;
        Pi(cc)=(P1(cc)-Pg(cc));
        Qi(cc)=(Q1(cc)-Qg(cc));
        In(cc,:)=(Pi(cc)-j*Qi(cc))/(conj(V(cc))); % In is the load
                                                    current
    end
    for cc=2:N;
        I(cc-1)=In(cc);
    end
end

%BACKWARD SWEEP
Vk=V;

```

```

for dd=1:n;
    a=N-dd;
    for b=1:n;
        if FN(b)==a+1
            c=TN(b);
            I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
        end
    end
    I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2; %I is the branch current
end

% FORWARD SWEEP
for ee=1:n;
    ff=FN(ee);
    V(ee+1)=V(ff)-(R(ee)+j*X(ee))*I(ee);
    dV(ee)=abs(V(ee+1)-Vk(ee+1));
end
dVmax=max(dV);
end

for gg=1:N
    Pi(gg)=(Pg(gg)-Pl(gg));
    Qi(gg)=(Qg(gg)-Ql(gg));
end
Vm=abs(V); %*baseKV;
Delta=angle(V);
for hh=1:N
    for ii=1:N
        alpha(hh,ii)=Rik(hh,ii)*cos(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
        beta(hh,ii)=Rik(hh,ii)*sin(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
        gama(hh,ii)=Xik(hh,ii)*cos(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
        geta(hh,ii)=Xik(hh,ii)*sin(Delta(hh)-Delta(ii))/(Vm(hh)*Vm(ii));
    end
end
LL1=2; %limit of min location
LH1=33; %limit of max location
SL1=0.05; %limit of min size DG
SH1=1; %limit of max size DG

%%=====%%

```

## 2) ไฟล์ DLF.m

```

function [V,I]=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql, FN, TN, R, X, B, baseMVA)

% This function finds the load flow solution of distribution system
% With one root node and other load buses in the system
N=length(bustype); % N is the number of nodes
n=N-1; % n is the number of sections
j=sqrt(-1);
V=ones(N,1)+j*zeros(N,1); % Flat start
for i=1:N
    if bustype(i)==3
        V(i)=1; % Setting the value of voltages of 1 for
    end
end

```

```

                                Generator bus
    end
end
maxmis=0.0001;                % Maximum mismatch
maxitt=100;                   % Maximum iteration
itt=0;
dVmax=1;

% Iteration Start
while itt<maxitt&dVmax>maxmis
    itt=itt+1;
    % Calculating Nodal Current
    for i=1:N;
        Pi(i)=(Pl(i)-Pg(i));
        Qi(i)=(Ql(i)-Qg(i));
        In(i,:)=(Pi(i)-j*Qi(i))/(conj(V(i))); % In is the load current
    end
    for i=2:N;
        I(i-1)=In(i);
    end

%BACKWARD SWEEP
Vk=V;
for i=1:n;
    a=N-i;
    for b=1:n;
        if FN(b)==a+1
            c=TN(b);
            I(a)=I(a)+I(c-1)+j*B(c-1)*V(a+1);
        end
    end
    I(a)=I(a)+j*V(a+1)*B(a)/2; %I is the branch current
end

% FORWARD SWEEP
for i=1:n;
    k=FN(i);
    V(i+1)=V(k)-(R(i)+j*X(i))*I(i);
    dV(i)=abs(V(i+1)-Vk(i+1));
end
dVmax=max(dV);
end

%%=====%%

```

### 3) ๓๓ Zbus.m

```

function[zbus]=Zbus(branch)

% This function calculates the Bus impedance matrix of radial system
FN=branch(:,1);
TN=branch(:,2);
R=branch(:,3);
X=branch(:,4);

```

```

B=branch(:,5);
n=length(R);
Z=n+1;
zbus=zeros(Z,Z);
zbus(1,1)=0+j*0.000000001;
% j=sqrt(-1);
for i=1:n
    a=FN(i);
    b=TN(i);
    zbus(b,:)=zbus(a,:);
    zbus(:,b)=zbus(:,a);
    zbus(b,b)=zbus(a,a)+R(i)+j*X(i);
end

%%=====%%

```

#### 4) ๓๓๓ case1.m

```

%=====
%case1.m
%=====
% this program finds the optimal DG size and location when DG supply
  real power only
clear;
clc;
input33;
% input33;
bustype=bus(:,2);
Pl=bus(:,3)/baseMVA;
Ql=bus(:,4)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);
V=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql,FN,TN,R,X,B,baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
% Finding Optimal Size of the DG When DG supply Real Power Only
Rik=real(zbus); % finding R bus
Xik=imag(zbus); % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end

```

```

        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N
        % approximate loss calculation
        Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k)));
        % approximate loss calculation
        Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
for i=1:N
    sum=0;
    for k=1:N
        if k~=i
            sum=sum+(alpha(i,k)*Pi(k)-beta(i,k)*Qi(k));
        end
    end
    % PDG is the optimal size of the DG to be placed at node i.
    PDG(i)=Pl(i) - sum/alpha(i,i);
end
Ploss=zeros(N,1);
Qloss=zeros(N,1);
for m=2:N % location of DG
    Pi(m)=Pi(m)+PDG(m);
    for i=1:N % i is the bus contating DG...we will test by placing
        one by one in each bus
            for k=1:N

                Ploss(m)=Ploss(m)+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation

                Qloss(m)=Qloss(m)+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation
            end
        end
        Pi(m)=Pi(m)-PDG(m);
    end
end
clc
for i=1:N-1;
    result(i,1)=i+1;
    result(i,2)=PDG(i+1)*baseMVA;
    result(i,3)=Ploss(i+1)*baseMVA*1000;
    result(i,4)=Qloss(i+1)*baseMVA*1000;
    result(i,5)=Vm(i+1)*baseKV;
end
BusRanking=sortrows(result,[1]);
fprintf('\n')

```



```
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);

if bus_no==2
    Pg(2)=1;
end
if bus_no==3
    Pg(3)=1;
end
if bus_no==4
    Pg(4)=1;
end
if bus_no==5
    Pg(5)=1;
end
if bus_no==6
    Pg(6)=1;
end
if bus_no==7
    Pg(7)=1;
end
if bus_no==8
    Pg(8)=1;
end
if bus_no==9
    Pg(9)=1;
end
if bus_no==10
    Pg(10)=1;
end
if bus_no==11
    Pg(11)=1;
end
if bus_no==12
    Pg(12)=1;
end
if bus_no==13
    Pg(13)=1;
end
if bus_no==14
    Pg(14)=1;
end
if bus_no==15
    Pg(15)=1;
end
if bus_no==16
    Pg(16)=1;
end
if bus_no==17
    Pg(17)=1;
end
if bus_no==18
    Pg(18)=1;
end
```



```

if bus_no==19
    Pg(19)=1;
end
if bus_no==20
    Pg(20)=1;
end
if bus_no==21
    Pg(21)=1;
end
if bus_no==22
    Pg(22)=1;
end
if bus_no==23
    Pg(23)=1;
end
if bus_no==24
    Pg(24)=1;
end
if bus_no==25
    Pg(25)=1;
end
if bus_no==26
    Pg(26)=1;
end
if bus_no==27
    Pg(27)=1;
end
if bus_no==28
    Pg(28)=1;
end
if bus_no==29
    Pg(29)=1;
end
if bus_no==30
    Pg(30)=1;
end
if bus_no==31
    Pg(31)=1;
end
if bus_no==32
    Pg(32)=1;
end
if bus_no==33
    Pg(33)=1;
end

Pg=Pg/baseMVA;

[V, I]=DLF(bustype, Pg, Qg, Pl, Ql, FN, TN, R, X, B, baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
% Finding Optimal Size of the DG When DG supply Real Power Only
Rik=real(zbus); % finding R bus
Xik=imag(zbus); % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end

```

```

end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N
        % approximate loss calculation
        Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k)));
        % approximate loss calculation
        Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
% for i=1:N
%     sum=0;
%     for k=1:N
%         if k~=i
%             sum=sum+(alpha(i,k)*Pi(k)-beta(i,k)*Qi(k));
%         end
%     end
% % PDG is the optimal size of the DG to be placed at node i.
%     PDG(i)=Pl(i) - sum/alpha(i,i);
% end
%
% Ploss=zeros(N,1);
% Qloss=zeros(N,1);
% for m=2:N % location of DG
%     Pi(m)=Pi(m)+PDG(m);
%     for i=1:N % i is the bus contating DG...we will test by placing
one by one in each bus
%         for k=1:N
%
Ploss(m)=Ploss(m)+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation
%
Qloss(m)=Qloss(m)+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k))); % approximate loss calculation
%         end
%     end
%     Pi(m)=Pi(m)-PDG(m);
% end
%
% clc
% for i=1:N-1;
%     result(i,1)=i+1;

```



```

% disp([Pg' Pl' Plss1'])
%
% Pg'
% Pl'
% [Pg Pl Plss1']
% %%% Voltage Limits Penalty Calculation
for i=1:33
    if (Vm(i)>=0.95)&(Vm(i)<=1.05)
        Vm(i)=Vm(i);
    else
        Vm(i)=1e3;
    end
end

Voltage_limit=sum(Vm);
% Voltage_limit_penalty=1e3*Voltage_limit;

% %%% Power Limits Penalty Calculation
%     Power_Limits_Penalty (Xg) = rho*sum(max(0,Pg(i)-Pgmax(i))^2 +
rho*sum(max(0,Pgmin(i)-Pg(i))^2;
%     Power_Limits_Penalty (Xc) = rho*sum(max(0,Qc(i)-Qcmax(i))^2 +
rho*sum(max(0,Qcmin(i)-Qc(i))^2;
%
% % %%% Prohibited Operating Zones Penalty Calculation
% %     temp_x = repmat(x,No_of_POZ_Limits/2,1);
% %     POZ_Penalty = sum(sum((POZ_Lower_Limits<temp_x &
temp_x<POZ_Upper_Limits).*min(temp_x-
POZ_Lower_Limits,POZ_Upper_Limits-temp_x)));
% %%% Total Penalty Calculation
%     Total_Penalty(i,1) = 1e3*Power_Balance_Penalty +
1e3*Voltage_Limits_Penalty + 1e5*Power_Limits_Penalty;
% %%% Loss Calculation
%     Loss(i,1) = sum( a.*(x.^2) + b.*x + c );
%     Total_Loss(i,1) = Cost(i,1) + Total_Penalty(i,1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Weighting functions
a=0.3;

Total_Penalty=a*Voltage_limit;

Total_Loss=Plss*baseMVA*1000+Qlss*baseMVA*1000;

J=Total_Loss+Total_Penalty;

[Vm angle(V)*180/pi]
figure(1)
bar(Vm)
axis([0 35 0.95 1])

figure(2)
bar(-I)
axis([0 35 0 0.1])
return

```

```
%%=====%%
```

## 2) ไฟล์ obj1.m

```

=====
%case1.m
=====
% this program finds the optimal DG size and location when DG supply
real power only
function [J,P,Q]=obj1(bus_no)
global P Q
% (bus_no)
% global bus_no
% clear;
% clc;
input33;
% input33;
bustype=bus(:,2);
P1=bus(:,3)/baseMVA;
Q1=bus(:,4)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);

if bus_no==2
    Pg(2)=1;
end
if bus_no==3
    Pg(3)=1;
end
if bus_no==4
    Pg(4)=1;
end
if bus_no==5
    Pg(5)=1;
end
if bus_no==6
    Pg(6)=1;
end
if bus_no==7
    Pg(7)=1;
end
if bus_no==8
    Pg(8)=1;
end
if bus_no==9
    Pg(9)=1;
end
end

```

```
if bus_no==10
    Pg(10)=1;
end
if bus_no==11
    Pg(11)=1;
end
if bus_no==12
    Pg(12)=1;
end
if bus_no==13
    Pg(13)=1;
end
if bus_no==14
    Pg(14)=1;
end
if bus_no==15
    Pg(15)=1;
end
if bus_no==16
    Pg(16)=1;
end
if bus_no==17
    Pg(17)=1;
end
if bus_no==18
    Pg(18)=1;
end
if bus_no==19
    Pg(19)=1;
end
if bus_no==20
    Pg(20)=1;
end
if bus_no==21
    Pg(21)=1;
end
if bus_no==22
    Pg(22)=1;
end
if bus_no==23
    Pg(23)=1;
end
if bus_no==24
    Pg(24)=1;
end
if bus_no==25
    Pg(25)=1;
end
if bus_no==26
    Pg(26)=1;
end
if bus_no==27
    Pg(27)=1;
end
if bus_no==28
    Pg(28)=1;
```

```

end
if bus_no==29
    Pg(29)=1;
end
if bus_no==30
    Pg(30)=1;
end
if bus_no==31
    Pg(31)=1;
end
if bus_no==32
    Pg(32)=1;
end
if bus_no==33
    Pg(33)=1;
end

Pg=Pg/baseMVA;

V=DLF(bustype,Pg,Qg,Pl,Ql, FN, TN, R, X, B, baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
% Finding Optimal Size of the DG When DG supply Real Power Only
Rik=real(zbus); % finding R bus
Xik=imag(zbus); % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N
    for k=1:N
        % approximate loss calculation
        Plss=Plss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k)));
        % approximate loss calculation
        Qlss=Qlss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
% fprintf('\t Optimal Size of DGs for Each Bus and Corresponding
Losses\n')
% fprintf('\t\t\t\t\t Program By: AMORNTHEP PATTAYANUN\n\n')
% fprintf('\t The Real Power Loss in the original System with 1 MW DG
= %3.4f kW\n',Plss*baseMVA*1000)

```





```
% disp([J P Q])
%%=====%%
```

**ข.3 ข้อมูลการคำนวณหาตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบ**

**ตาม ที่ทำการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB M-File ประกอบด้วย 4 ไฟล์ของภาคผนวก ข.1**

**และที่เพิ่มเข้ามาใหม่อีก 7 ไฟล์ดังนี้**

1) ไฟล์ obj.m

```
=====
%case1.m
%=====
% this program finds the optimal DG size and location when DG supply
real power only
function J=obj(bus_no)
% (bus_no)
% global bus_no
% clear;
% clc;
input33;
% input33;
bustype=bus(:,2);
P1=bus(:,3)/baseMVA;
Q1=bus(:,4)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);

if bus_no==2
    Pg(2)=1;
end
if bus_no==3
    Pg(3)=1;
end
if bus_no==4
    Pg(4)=1;
end
if bus_no==5
```

```
        Pg(5)=1;
end
if bus_no==6
    Pg(6)=1;
end
if bus_no==7
    Pg(7)=1;
end
if bus_no==8
    Pg(8)=1;
end
if bus_no==9
    Pg(9)=1;
end
if bus_no==10
    Pg(10)=10;
end
if bus_no==11
    Pg(11)=1;
end
if bus_no==12
    Pg(12)=1;
end
if bus_no==13
    Pg(13)=1;
end
if bus_no==14
    Pg(14)=1;
end
if bus_no==15
    Pg(15)=1;
end
if bus_no==16
    Pg(16)=1;
end
if bus_no==17
    Pg(17)=1;
end
if bus_no==18
    Pg(18)=1;
end
if bus_no==19
    Pg(19)=1;
end
if bus_no==20
    Pg(20)=1;
end
if bus_no==21
    Pg(21)=1;
end
if bus_no==22
    Pg(22)=1;
end
if bus_no==23
    Pg(23)=1;
end
```

```

if bus_no==24
    Pg(24)=1;
end
if bus_no==25
    Pg(25)=1;
end
if bus_no==26
    Pg(26)=1;
end
if bus_no==27
    Pg(27)=1;
end
if bus_no==28
    Pg(28)=1;
end
if bus_no==29
    Pg(29)=1;
end
if bus_no==30
    Pg(30)=1;
end
if bus_no==31
    Pg(31)=1;
end
if bus_no==32
    Pg(32)=1;
end
if bus_no==33
    Pg(33)=1;
end

Pg=Pg/baseMVA;

[V, I]=DLF(bustype, Pg, Qg, Pl, Ql, FN, TN, R, X, B, baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
% Finding Optimal Size of the DG When DG supply Real Power Only
Rik=real(zbus); % finding R bus
Xik=imag(zbus); % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end
% Finding the Original Loss
Plss=0;
Qlss=0;
for i=1:N

```

```

    for k=1:N
        % approximate loss calculation

Ploss=Ploss+(alpha(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+beta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)
-Pi(i)*Qi(k)));
% approximate loss calculation

Qloss=Qloss+(gama(i,k)*(Pi(i)*Pi(k)+Qi(i)*Qi(k))+geta(i,k)*(Qi(i)*Pi(k)-
Pi(i)*Qi(k)));
    end
end
% %% Voltage Limits Penalty Calculation
for i=1:33
    if (Vm(i)>=0.95) & (Vm(i)<=1.05)
        Vm(i)=Vm(i);
    else
        Vm(i)=1e3;
    end
end
Voltage_limit=sum(Vm);

%% Power Limits Penalty Calculation
for i=1:33
    if ((Pg(i)>=0.00/baseMVA) & (Pg(i)<=2/baseMVA)) & ((Qg(i)>=-
2) & (Qg(i)<=2))
        Pg(i)=Pg(i);
    else
        Pg(i)=1e3;
    end
end
Power_limit=sum(Pg);

%% Power Balance Penalty Calculation
Pbus=0;
for i=1:33
    for k=1:33

Pbus(i)=abs(V(i))*abs(V(k))*abs(ybus(i,k))*cos(angle(ybus(i,k))+angle(
V(i))-angle(V(k)));

Qbus(i)=abs(V(i))*abs(V(k))*abs(ybus(i,k))*sin(angle(ybus(i,k))+angle(
V(i))-angle(V(k)));
        Pbus_sum=sum(Pbus);
        Qbus_sum=sum(Qbus);
    end
end
Power_balance_P=sum(Pg)-sum(Pl)-Pbus_sum;
Power_balance_Q=sum(Qg)-sum(Ql)+Qbus_sum;
Power_balance=1*Power_balance_P+1*Power_balance_Q;

% Weighting functions
a=0.33;
b=0.33;
c=0.33;

Total_Penalty=a*Voltage_limit+b*Power_limit+c*Power_balance;

```

```

Total_Loss=Ploss*baseMVA*1000+Qloss*baseMVA*1000;

J=Total_Loss+Total_Penalty;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
% If bus_no is out of required bus 2 to 33, its J is assign to be
1000.
A=2:33;
if bus_no~=A
    J=1000;
End

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%
% [Vm angle(V)*180/pi]
% Pg
% figure(1)
% bar(Vm)
% axis([0 35 0.95 1])
%
% figure(2)
% bar(-I)
% axis([0 35 0 0.1])
Return

%%=====%%

```

## 2) ไฟล์ obj1.m

```

%=====
%casel.m
%=====
% this program finds the optimal DG size and location when DG supply
real power only
function [J,P,Q]=obj1(bus_no)
global P Q
% (bus_no)
% global bus_no
% clear;
% clc;
    input33;
% input33;
bustype=bus(:,2);
P1=bus(:,3)/baseMVA;
Q1=bus(:,4)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);

```

```
Qg=zeros(N,1);

if bus_no==2
    Pg(2)=1;
end
if bus_no==3
    Pg(3)=1;
end
if bus_no==4
    Pg(4)=1;
end
if bus_no==5
    Pg(5)=1;
end
if bus_no==6
    Pg(6)=1;
end
if bus_no==7
    Pg(7)=1;
end
if bus_no==8
    Pg(8)=1;
end
if bus_no==9
    Pg(9)=1;
end
if bus_no==10
    Pg(10)=1;
end
if bus_no==11
    Pg(11)=1;
end
if bus_no==12
    Pg(12)=1;
end
if bus_no==13
    Pg(13)=1;
end
if bus_no==14
    Pg(14)=1;
end
if bus_no==15
    Pg(15)=1;
end
if bus_no==16
    Pg(16)=1;
end
if bus_no==17
    Pg(17)=1;
end
if bus_no==18
    Pg(18)=1;
end
if bus_no==19
    Pg(19)=1;
end
```

```

if bus_no==20
    Pg(20)=1;
end
if bus_no==21
    Pg(21)=1;
end
if bus_no==22
    Pg(22)=1;
end
if bus_no==23
    Pg(23)=1;
end
if bus_no==24
    Pg(24)=1;
end
if bus_no==25
    Pg(25)=1;
end
if bus_no==26
    Pg(26)=1;
end
if bus_no==27
    Pg(27)=1;
end
if bus_no==28
    Pg(28)=1;
end
if bus_no==29
    Pg(29)=1;
end
if bus_no==30
    Pg(30)=1;
end
if bus_no==31
    Pg(31)=1;
end
if bus_no==32
    Pg(32)=1;
end
if bus_no==33
    Pg(33)=1;
end

Pg=Pg/baseMVA;

V=DLF(bustype,Pg,Qg,P1,Q1, FN, TN, R, X, B, baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
% Finding Optimal Size of the DG When DG supply Real Power Only
Rik=real(zbus); % finding R bus
Xik=imag(zbus); % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-P1(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Q1(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);

```





## 3) ไฟล์ RunOBJ.m

```

global P Q
% tic
% for i=2:33
%     J(i)=obj(i);
% end
% Time=toc
% disp('Total loss each bus after installing a 1 MW DG')
% disp(J')
% Time

clear all
clc

tic
for i=2:33
    J(i,:)=obj1(i);
%     P(i);
%     Q(i);
end
J
Time=toc
% disp('J   P   Q')
% disp([J   P   Q])

%%=====%%

```

## 4) ไฟล์ randp.m

```

global P Q
% tic
% for i=2:33
%     J(i)=obj(i);
% end
% Time=toc
% disp('Total loss each bus after installing a 1 MW DG')
% disp(J')
% Time

clear all
clc

tic
for i=2:33
    J(i,:)=obj1(i);
%     P(i);
%     Q(i);
end
J
Time=toc
% disp('J   P   Q')

```

```
% disp([J P Q])
```

```
%%=====%%
```

### 5) ไฟล์ tsmain.m

```

=====
%                               tsmain.m
=====
% function [xgbest, fgbest] = tsmain(fobj,x0,xlimit,opt)
function [xgbest, fgbest] = tsmain
global k

% Tabu Search Program
% tsmain function is a simple tabu search coded in SCILAB
% fobj      Objective function
% x0        Initial guess solution
% xlimit    Limits of variables
% xlimit = [x1min mlmax x1_point;x2min x2max x2_point;...];
% opt(1)    Maximum number of generation counted
% opt(2)    Maximum number of generation stalled
% opt(3)    Maximum number of search radius adjustment
% opt(4)    Display detail during calculation
% opt(5)    Option to randomly generate an initial guess solution
%           1: enable this option
%           Otherwise use x0 as the initial guess solution
% opt(6)    Option to apply a search radius (% of variable range)

% tic                                     % Start time

Jmin=91.95;                               % Expected objective function
xlimit=[2;33];                             % bus no. 2 to 33 are
feasible choices.
x0=randi([xlimit(1) xlimit(2)],1)          % generate initial bus from
search space.
% opt=[1000 100 20 1 1 2]
opt=[50 100 20 1 1 2];
% Ne = length(x0);
Ne =1;
% xstep = (xlimit(:,2)-xlimit(:,1))./(xlimit(:,3)-1);
xstep=1;
Xnb_p = zeros(Ne,Ne); Xnb_n = zeros(Ne,Ne);
if opt(5)==1
%   x0 = randp(Ne,1,xlimit)
%   x0=[0 0]
%   x0=[0];
x0=randi([xlimit(1) xlimit(2)],1)
end
% f0 = feval(fobj,x0); count = 0; SRcount = 0;
% f0 = fobj7_13(x0); count = 0; SRcount = 0;
f0 = obj(x0); count = 0; SRcount = 0;
xgbest = x0; fgbest = f0;

```

```

if opt(4)==1
    disp('Initial guess solution');
    disp([x0 f0])
end
% figure
% semilogy(0,fgbest); hold on;
subplot(2,1,1),semilogy(0,fgbest); hold on;
title('Convergence curve (best solution)');
xlabel('Generation in progress');
ylabel('Objective');
subplot(2,1,2),bar([SRcount count 0],0.1);hold on;
title('Generation Counted');
Xnb=2;

TabuList=[x0]; % Assign Tabu List
% Xnb=[x0 x0]'; % Define Xnb
tic % Start time

for k=1:opt(1)
    EliteSolution=setdiff(xlimit(1):xlimit(2),TabuList); %
    for i=1:Ne
        for j=1:Ne
            % a = rand(); xj = (-1)^j;
            % Xnb(i, j) =
            x0(j)+round(a*opt(6)*xlimit(j,1))*xj*xstep(j,1);

            % Elower = find(EliteSolution<x0) ;
            % Eupper = find(EliteSolution>x0) ;
            %
            % if isempty(Elower)
            %     Xnb(i, j)=Eupper(end);
            % else
            %     Xnb(i, j) = Elower(end);
            % end

            % if isempty(Eupper)
            %     Xnb(i+Ne, j) = Elower(1);
            % else
            %     Xnb(i+Ne, j) = Eupper(1);
            % end

            Xnb(i, j) = EliteSolution(1); % Generating Neighbours

            Xnb(i+Ne, j) =EliteSolution(end);
            % Xnb(i+Ne, j) = max(B);
            % Xnb(i+Ne, j) =Eupper(1);
            % X=[x0 Xnb(i, j) Xnb(i+Ne, j)]
            % Xnb(i+Ne, j)= randi([EliteSolution]);
            % Xnb(i+Ne, j) = x0(j)-
            round(b*opt(6)*xlimit(j,1))*xj*xstep(j,1);
            % Xnb(i+Ne, j) = x0(j)-
            round(b*opt(6)*xlimit(j,1))*xstep(j,1);
            % Xnb(i, j)=x0(j)+round(-xstep+a*(xstep+xstep))
            % Xnb(i+Ne, j)=x0(j)-round(-xstep+a*(xstep+xstep))
            % Xnb(i, j)=x0+xstep;

```

```

%           Xnb(i+Ne, j)=x0(j)-xstep;
end
%       Xnb
%       end
%       Fnb(i,1) = feval(fobj,Xnb(i,:));
%       Fnb(i+Ne,1) = feval(fobj,Xnb(i+Ne,:));
%       Fnb(i,1) = fobj7_13(Xnb(i,:));
%       Fnb(i+Ne,1) = fobj7_13(Xnb(i+Ne,:));
%       Fnb(i,1) = obj(Xnb(i,:));
%       Fnb(i+Ne,1) = obj(Xnb(i+Ne,:));
end
[FLbest,IDL] = min(Fnb);
XLbest = Xnb(IDL,:);

%       TabuList(length(TabuList)+1)=Xnb(i);           % Update Tabu List
%       TabuList(length(TabuList)+1)=Xnb(i+Ne);       % Update Tabu List

if opt(4)==1
    disp(' ');
disp('=====');
    disp(['Generation # ' num2str(k)]);
disp('=====');
    disp('1. Best neighbor');
    disp([XLbest FLbest]);
end
if FLbest<fgbest
    fgbest = FLbest;
    xgbest = XLbest;
%     count = 0;
%     else
%     count = count + 1;
end
x0 = XLbest;
subplot(2,1,1),semilogy(k,fgbest);hold on;
subplot(2,1,1),semilogy([k-1 k],[f0 fgbest]);hold on;
subplot(2,1,2),bar([SRcount count k],0.1); hold on;
f0 = fgbest;
%     if count>opt(2)
%         SRcount = SRcount + 1;
%         opt(6) = opt(6)*0.75;
%     end
%     if SRcount>opt(3)
if fgbest<Jmin
    break;
%     subplot(2,1,1),semilogy(k,fgbest);hold on;
%     subplot(2,1,1),semilogy([k-1 k],[f0 fgbest]);hold on;
%     subplot(2,1,2),bar([SRcount count k],0.1); hold on;
end
%     TabuList
end
time=toc
return

%%=====%%

```

## 6) ไฟล์ tsmain\_all33bus.m

```

=====
%                               tsmain.m
=====
% function [xgbest, fgbest] = tsmain(fobj,x0,xlimit,opt)
function [xgbest, fgbest] = tsmain
global k

% Tabu Search Program
% tsmain function is a simple tabu search coded in SCILAB
% fobj      Objective function
% x0        Initial guess solution
% xlimit    Limits of variables
% xlimit = [x1min m1max x1_point;x2min x2max x2_point;...];
% opt(1)    Maximum number of generation counted
% opt(2)    Maximum number of generation stalled
% opt(3)    Maximum number of search radius adjustment
% opt(4)    Display detail during calculation
% opt(5)    Option to randomly generate an initial guess solution
%           1: enable this option
%           Otherwise use x0 as the initial guess solution
% opt(6)    Option to apply a search radius (% of variable range)

% Jmin=91.95;                               % Expected objective
function                                       % bus no. 2 to 33 are
% xlimit=[2;33];                             % generate initial bus from
feasible choices.                            % generate initial bus from
% x0=randi([xlimit(1) xlimit(2)],1);          search space.
% % opt=[1000 100 20 1 1 2]
opt=[33 100 20 1 1 2];

tic                                           % Start time
for k=2:opt(1)

    X(k)=obj(k);
    B(k-1)=X(k);
    disp(' ');
disp('=====');
    disp(['Generation # ' num2str(k)]);
disp('=====');
    disp('1. Best neighbor');
    if k==10
        format long
    end
    if k==11
        format short
    end
    disp([k X(k)]);
    [F,I]=min(B);
End

time=toc

```

```
disp(['The 1MW PV-DG should be installed at bus number '
num2str(I+1)]);
return
```

```
%%=====
```

## 7) ไฟล์ runts.m

**%กำหนดฟังก์ชันสำหรับทดสอบผลการรันโปรแกรม**

```
%=====
%                runts.m
%=====
```

```
% function [xg,fg,tg,kg] = runts(fobj,Ntrial)
function [xg,fg,tg,kg] = runts
global k
Ntrial=1;
xlimit = [-1 1 10000; -1 1 10000];
opt = [1000 100 20 0 1 10];
x0 = [0 0];
Ne = 2;
Np = 20;
for u=1:Ntrial
tic;
% [xmin,fmin,k] = tsmain(fobj,x0,xlimit,opt);
[xmin,fmin] =tsmain
%ts0.mเหมือนกับ tsmain.m ต่างกันที่ไม่ให้มีการแสดงผลด้วยกราฟ
t = toc();
xg(u,1) = xmin(1);
xg(u,2) = xmin(2);
fg(u,1) = fmin;
kg(u,1) = k;
tg(u,1) = t;
disp(['Trial # ' u ' was successfully performed']);
end
disp('      x1      x2      f(x1,x2)   Time   Iter')
disp([xg(:,1) xg(:,2) fg(:,1) tg(:,1) kg(:,1)])
return
```

```
%%=====
```

ข.4 ข้อมูลการทดสอบสมรรถนะของเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตามู ที่ใช้ในการคำนวณหา

ตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ที่ทำการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB M-File ประกอบด้วย

(4 ไฟล์ของภาคผนวก ข.1) (7 ไฟล์ของภาคผนวก ข.3) และที่เพิ่มเข้ามาใหม่อีก 1 ไฟล์ โดยที่ไฟล์

ใหม่นี้จะมีการเปลี่ยนค่าที่ใช้ทดสอบ 9 ขอบเขต ภายในตัวโปรแกรม ดังนี้

1) ไฟล์ tsmain.m

```

%=====
%                               tsmain.m
%=====
% function [xgbest, fgbest] = tsmain(fobj,x0,xlimit,opt)
function [xgbest, fgbest] = tsmain
global k

% Tabu Search Program
% tsmain function is a simple tabu search coded in SCILAB
% fobj      Objective function
% x0        Initial guess solution
% xlimit    Limits of variables
% xlimit = [x1min m1max x1_point;x2min x2max x2_point;...];
% opt(1)   Maximum number of generation counted
% opt(2)   Maximum number of generation stalled
% opt(3)   Maximum number of search radius adjustment
% opt(4)   Display detail during calculation
% opt(5)   Option to randomly generate an initial guess solution
%          1: enable this option
%          Otherwise use x0 as the initial guess solution
% opt(6)   Option to apply a search radius (% of variable range)

% tic                                % Start time

Jmin=91.95;                            % Expected objective function
xlimit=[2;33];                          % bus no. 2 to 33 are
feasible choices.
x0=randi([xlimit(1) xlimit(2)],1)        % generate initial bus from
search space.
% opt=[1000 100 20 1 1 2]
opt=[50 100 20 1 1 2];
% Ne = length(x0);
Ne =1;
% xstep = (xlimit(:,2)-xlimit(:,1))./(xlimit(:,3)-1);
xstep=1;
Xnb_p = zeros(Ne,Ne); Xnb_n = zeros(Ne,Ne);
if opt(5)==1
%     x0 = randp(Ne,1,xlimit)
%     x0=[0 0]

```

```

%       x0=[0];
x0=randi([xlimit(1) xlimit(2)],1)
end
% f0 = feval(fobj,x0); count = 0; SRcount = 0;
% f0 = fobj7_13(x0); count = 0; SRcount = 0;
f0 = obj(x0); count = 0; SRcount = 0;
xgbest = x0; fgbest = f0;
if opt(4)==1
    disp('Initial guess solution');
    disp([x0 f0])
end
subplot(2,1,1),semilogy(0,fgbest); hold on;
title('Convergence curve (best solution)');
xlabel('Generation in progress');
ylabel('Objective');
subplot(2,1,2),bar([SRcount count 0],0.1);hold on;
title('Generation Counted');
% Xnb=2;

TabuList=[x0]; % Assign Tabu List
% Xnb=[x0 x0]'; % Define Xnb
tic % Start time

for k=1:opt(1)
    EliteSolution=setdiff(xlimit(1):xlimit(2),TabuList);
    for i=1:Ne
        for j=1:Ne

            Xnb(i,j) = EliteSolution(1); % Generating Neighbours

            Xnb(i+Ne,j) =EliteSolution(end);

        End

        Fnb(i,1) = obj(Xnb(i,:));
        Fnb(i+Ne,1) = obj(Xnb(i+Ne,:));

    end
    [FLbest,IDL] = min(Fnb);
    XLbest = Xnb(IDL,:);

    TabuList (length(TabuList)+1)=Xnb(i); % Update Tabu List
    TabuList (length(TabuList)+1)=Xnb(i+Ne); % Update Tabu List

    if opt(4)==1
        disp(' ');
disp('=====');
        disp(['Generation # ' num2str(k)]);
disp('=====');
        disp('1. Best neighbor');
        disp([XLbest FLbest]);
    end
    if FLbest<fgbest
        fgbest = FLbest;
        xgbest = XLbest;
%       count = 0;

```



```

%     else
%         count = count + 1;
end
x0 = XLbest;
subplot(2,1,1),semilogy(k,fgbest);hold on;
subplot(2,1,1),semilogy([k-1 k],[f0 fgbest]);hold on;
subplot(2,1,2),bar([SRcount count k],0.1); hold on;
f0 = fgbest;
%     if count>opt(2)
%         SRcount = SRcount + 1;
%         opt(6) = opt(6)*0.75;
%     end
%     if SRcount>opt(3)
if fgbest<Jmin
    break;
%     subplot(2,1,1),semilogy(k,fgbest);hold on;
%     subplot(2,1,1),semilogy([k-1 k],[f0 fgbest]);hold on;
%     subplot(2,1,2),bar([SRcount count k],0.1); hold on;
end
%     TabuList
end
time=toc
return

%%=====%%

```

ข.5 ข้อมูลการคำนวณหาตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW และระบบขดเคียวกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ชนิดโซเดียมซัลเฟอร์ (NaS) ขนาด 200 kW เพื่อหากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบ โดยใช้ของเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบตาม ทำการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB M-File ประกอบด้วย (4 ไฟล์ของภาคผนวก ข.1) (7 ไฟล์ของภาคผนวก ข.3) ซึ่งจะใช้ไฟล์ obj.m และไฟล์ tsmain.m ของภาคผนวก ข.เปลี่ยนค่าที่ใช้ทดสอบ ในบัสที่ 25 ภายในตัวโปรแกรม ดังนี้

1) ไฟล์ obj.m

```

=====
%case1.m
=====
% this program finds the optimal DG size and location when DG supply
real power only
function J=obj(bus_no)
% (bus_no)
% global bus_no
% clear;
% clc;

input33;
% input33;
bustype=bus(:,2);
P1=bus(:,3)/baseMVA;
Q1=bus(:,4)/baseMVA;
FN = branch(:,1);
TN = branch(:,2);
R = branch(:,3);
X = branch(:,4);
B = branch(:,5);
N=length(bustype);
Pg=zeros(N,1);
Qg=zeros(N,1);

if bus_no==2
    Pg(2)=1;
end
if bus_no==3
    Pg(3)=1;
end

```

```
if bus_no==4
    Pg(4)=1;
end
if bus_no==5
    Pg(5)=1;
end
if bus_no==6
    Pg(6)=1;
end
if bus_no==7
    Pg(7)=1;
end

if bus_no==8
    Pg(8)=1;
end
if bus_no==9
    Pg(9)=1;
end
if bus_no==10
    Pg(10)=10;
end
if bus_no==11
    Pg(11)=1;
end
if bus_no==12
    Pg(12)=1;
end
if bus_no==13
    Pg(13)=1;
end
if bus_no==14
    Pg(14)=1;
end
if bus_no==15
    Pg(15)=1;
end
if bus_no==16
    Pg(16)=1;
end
if bus_no==17
    Pg(17)=1;
end
if bus_no==18
    Pg(18)=1;
end
if bus_no==19
    Pg(19)=1;
end
if bus_no==20
    Pg(20)=1;
end
if bus_no==21
    Pg(21)=1;
end
if bus_no==22
```

```

        Pg(22)=1;
end
if bus_no==23
    Pg(23)=1;
end
if bus_no==24
    Pg(24)=1;
end
if bus_no==25
    Pg(25)=1;
end
if bus_no==26
    Pg(26)=1;
end
if bus_no==27
    Pg(27)=1;
end
if bus_no==28
    Pg(28)=1;
end
if bus_no==29
    Pg(29)=1;
end
if bus_no==30
    Pg(30)=1;
end
if bus_no==31
    Pg(31)=1;
end
if bus_no==32
    Pg(32)=1;
end
if bus_no==33
    Pg(33)=1;
end

Pg=Pg/baseMVA;

[V, I]=DLF(bustype, Pg, Qg, Pl, Ql, FN, TN, R, X, B, baseMVA);
zbus=Zbus(branch);
% Finding Optimal Size of the DG When DG supply Real Power Only
Rik=real(zbus); % finding R bus
Xik=imag(zbus); % finding Xbus
for i=1:N
    Pi(i)=(Pg(i)-Pl(i));
    Qi(i)=(Qg(i)-Ql(i));
end
Vm=abs(V);
Delta=angle(V);
for i=1:N
    for k=1:N
        alpha(i,k)=Rik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        beta(i,k)=Rik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        gama(i,k)=Xik(i,k)*cos(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
        geta(i,k)=Xik(i,k)*sin(Delta(i)-Delta(k))/(Vm(i)*Vm(k));
    end
end

```



```

        if ((Pg(i)>=0.00/baseMVA) & (Pg(i)<=2/baseMVA) & ((Qg(i)>=-
2) & (Qg(i)<=2) )
            Pg(i)=Pg(i);
        else
            Pg(i)=1e3;
        end
    end
end
Power_limit=sum(Pg);

%%% Power Balance Penalty Calculation
Pbus=0;
for i=1:33
    for k=1:33

Pbus(i)=abs(V(i))*abs(V(k))*abs(ybus(i,k))*cos(angle(ybus(i,k))+angle(
V(i))-angle(V(k)));

Qbus(i)=abs(V(i))*abs(V(k))*abs(ybus(i,k))*sin(angle(ybus(i,k))+angle(
V(i))-angle(V(k)));
        Pbus_sum=sum(Pbus);
        Qbus_sum=sum(Qbus);
    end
end
Power_balance_P=sum(Pg)-sum(Pl)-Pbus_sum;
Power_balance_Q=sum(Qg)-sum(Ql)+Qbus_sum;
Power_balance=1*Power_balance_P+1*Power_balance_Q;

% Weighting functions
a=0.33;
b=0.33;
c=0.33;

Total_Penalty=a*Voltage_limit+b*Power_limit+c*Power_balance;

Total_Loss=Plss*baseMVA*1000+Qlss*baseMVA*1000;

J=Total_Loss+Total_Penalty;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% If bus_no is out of required bus 2 to 33, its J is assign to be
1000.
A=2:33;
if bus_no~=A
    J=1000;
End

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
% [Vm angle(V)*180/pi]
% Pg
% figure(1)
% bar(Vm)
% axis([0 35 0.95 1])
%
```

```
% figure(2)
% bar(-I)
% axis([0 35 0 0.1])
Return
```

```
%%=====%%
```

## 2) ไฟล์ tsmain.m

```
=====
%                               tsmain.m
=====
% function [xgbest, fgbest] = tsmain(fobj,x0,xlimit,opt)
function [xgbest, fgbest] = tsmain
global k
% Tabu Search Program
% tsmain function is a simple tabu search coded in SCILAB
% fobj      Objective function
% x0        Initial guess solution
% xlimit    Limits of variables
% xlimit = [x1min m1max x1_point;x2min x2max x2_point;...];
% opt(1)    Maximum number of generation counted
% opt(2)    Maximum number of generation stalled
% opt(3)    Maximum number of search radius adjustment
% opt(4)    Display detail during calculation
% opt(5)    Option to randomly generate an initial guess solution
%           1: enable this option
%           Otherwise use x0 as the initial guess solution
% opt(6)    Option to apply a search radius (% of variable range)
% tic              % Start time
Jmin=91.95;        % Expected objective function
xlimit=[2;33];    % bus no. 2 to 33 are
feasible choices.
x0=randi([xlimit(1) xlimit(2)],1) % generate initial bus from
search space.
% opt=[1000 100 20 1 1 2]
opt=[50 100 20 1 1 2];
% Ne = length(x0);
Ne =1;
% xstep = (xlimit(:,2)-xlimit(:,1))./(xlimit(:,3)-1);
xstep=1;
Xnb_p = zeros(Ne,Ne); Xnb_n = zeros(Ne,Ne);
if opt(5)==1
%   x0 = randp(Ne,1,xlimit)
%   x0=[0 0]
%   x0=[0];
x0=randi([xlimit(1) xlimit(2)],1)
end
% f0 = feval(fobj,x0); count = 0; SRcount = 0;
% f0 = fobj7_13(x0); count = 0; SRcount = 0;
f0 = obj(x0); count = 0; SRcount = 0;
xgbest = x0; fgbest = f0;
if opt(4)==1
disp('Initial guess solution');
disp([x0 f0])
```

```

end
% figure
% semilogy(0,fgbest); hold on;
subplot(2,1,1),semilogy(0,fgbest); hold on;
title('Convergence curve (best solution)');
xlabel('Generation in progress');
ylabel('Objective');
subplot(2,1,2),bar([SRcount count 0],0.1);hold on;
title('Generation Counted');
Xnb=2;

TabuList=[x0]; % Assign Tabu List
% Xnb=[x0 x0]'; % Define Xnb
tic % Start time

for k=1:opt(1)
    EliteSolution=setdiff(xlimit(1):xlimit(2),TabuList);
    for i=1:Ne
        for j=1:Ne

            Xnb(i,j) = EliteSolution(1); % Generating Neighbours
        End

        Fnb(i,1) = obj(Xnb(i,:));
        Fnb(i+Ne,1) = obj(Xnb(i+Ne,:));

    end

    [FLbest,IDL] = min(Fnb);
    XLbest = Xnb(IDL,:);

    TabuList(length(TabuList)+1)=Xnb(i); % Update Tabu List
    TabuList(length(TabuList)+1)=Xnb(i+Ne); % Update Tabu List

    if opt(4)==1
        disp(' ');
    end
    disp('=====');
    disp(['Generation # ' num2str(k)]);
    disp('=====');
    disp('1. Best neighbor');
    disp([XLbest FLbest]);
end
if FLbest<fgbest
    fgbest = FLbest;
    xgbest = XLbest;
%     count = 0;
%     else
%     count = count + 1;
end
x0 = XLbest;
subplot(2,1,1),semilogy(k,fgbest);hold on;
subplot(2,1,1),semilogy([k-1 k],[f0 fgbest]);hold on;
subplot(2,1,2),bar([SRcount count k],0.1); hold on;
f0 = fgbest;
%     if count>opt(2)
%     SRcount = SRcount + 1;

```



```
%         opt(6) = opt(6)*0.75;
%     end
%     if SRcount>opt(3)
if fgbest<Jmin
    break;
%     subplot(2,1,1),semilogy(k,fgbest);hold on;
%     subplot(2,1,1),semilogy([k-1 k],[f0 fgbest]);hold on;
%     subplot(2,1,2),bar([SRcount count k],0.1); hold on;
    end
%     TabuList
end
time=toc
return

%%=====%%
```

ภาคผนวก ค  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

# การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ 3 “รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย”

3<sup>rd</sup> Thailand Renewable Energy for Community Configuration Conference

15-17 ธันวาคม 2553

## กลุ่มของสาขาบทความ

- กลุ่มที่ 1 เทคโนโลยีพลังงานชุมชน
- กลุ่มที่ 2 การจัดการพลังงานชุมชน
- กลุ่มที่ 3 ธุรกิจพลังงานชุมชน
- กลุ่มที่ 4 กลยุทธ์การพัฒนาพลังงานชุมชน

ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ 3

“รูปแบบพลังงานทดแทนของชุมชนแห่งประเทศไทย” ประจำปี 2553

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
วท.ดร.สมวีรุ	เกิดสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ศิริชัย	เทพา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.นริศ	ประทีปทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.จันทนา	กัญชรวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.อำพล	อาวรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.นุภาพ	แย้มไทรพัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผศ.ดร.ติ๊ก	บุญภาค	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อาจารย์อำนาจ	ผลุงศิลป์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ดร.วิทยา	พวงสมบัติ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.สมชาย	มณีวีวรรณ	มหาวิทยาลัยแนวครว
ผศ.ดร.นิพนธ์	เกลื้อจ้อย	มหาวิทยาลัยแนวครว
ดร.พิสิษฐ์	มณีโชติ	มหาวิทยาลัยแนวครว
ผศ.ดร.ศิรินุช	จินดาภิรมย์	มหาวิทยาลัยแนวครว
ดร.วเรศ	วีระสัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.นพพันธ์	นาหนองนบ	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.อัมพร	กัญชรวัฒน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
ดร.ประภาพงษ์	วางทฤษฏ์	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.ณัฐกฤษ	ภาคภูมิ	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.ณรงค์	วัชรเสถียร	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ดร.ชนากานต์	อาษาสุจิต	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.บริสุทธ์	สุทธิสงค์	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.ณรงค์	สีหาจ้อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.รัตนากร	ระวังกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ศุภาวิทย์	ลวงะสกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วารุณี	อริวิริยะะรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ผ่องศรี	ศิวันศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สโรชา	เจริญวิทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สถาพร	ทองวิค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จิกิรี	ศรีนันทน์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณรงค์ชัย	โอเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิกิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์	แห่งมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



**รายชื่อผู้พิจารณาบทความ**  
**การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ 3**  
**“รูปแบบพลังงานทดแทนของชุมชนแห่งประเทศไทย” ประจำปี 2553**

ชื่อ	นามสกุล	มหาวิทยาลัย/สถาบัน
ดร.สุนนมาลย์	เนียมกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.เทอดเกียรติ	ลิมปิติปราการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์พงษ์ศักดิ์	อำภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สหพงษ์	ภวสุปรีดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วิรัชชัย	โรยนรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองวารี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ประเสริฐ	หาชานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์อนันท์	มีมนต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์สมชาย	เมื่อนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์วินัย	จันทร์เพ็ญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์พร้อมศักดิ์	อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## สารบัญ

บทความ	หน้า
<b>ET041</b> การศึกษาเทคนิคสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล <i>อมรเทพ แพทยานันท์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์</i>	155
<b>ET043</b> การจำลองสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ชุดแรงดันแบบอนุกรมด้วยทฤษฎี Instantaneous Power Theory <i>ภนอมศักดิ์ แก้วสุกณี กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์</i>	163
<b>ET044</b> การออกแบบและวิเคราะห์วงจรหม้อแปลงแรงดันแบบลูอัลสำหรับระบบพลังงานทดแทน <i>ศุภวัฒน์ คำทิพย์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์</i>	169
<b>ET045</b> การออกแบบชุดควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างสำหรับทางเดินสาธารณะโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับสายส่ง <i>อุทัย ศรีพันธ์ จิวิศกวิทย์ วัชชีวิเชียร ประพิชารีย์ ธนวิรักษ์</i>	177
<b>ET046</b> วิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ <i>นิชริมา รุ่งนีน สรพงษ์ ภาสุปรีดิ์ ภักทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ศิริลักษณ์ คุ้มประคับ</i>	185
<b>ET047</b> ระบบผสมผสานเตาแก๊สชีวมวลร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า <i>ฉันทนา พันธุ์เหล็ก สมชาย มณีวรรณ</i>	191
<b>กลุ่มที่ 2 การจัดการพลังงานชุมชน (EB)</b>	
<b>EB001</b> การศึกษาประสิทธิภาพและการจัดการโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 1,500 กิโลวัตต์ กรณีศึกษา ห.ส.น. รัษฎุกิจ นครปฐม (2521) <i>มณฑล เนตรทิพย์ สหทัย ลาตปาละ นิพนธ์ เกตุจ้อย</i>	201
<b>EB004</b> การวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแห้งจากลำต้นข้าวโพด <i>กิ่งกานต์ พันธุวานิชย์ วรภูมิ ฤกษ์ทรัพย์ พิสิษฎ์ มณีโชติ</i>	209
<b>EB005</b> การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของการลงทุนระบบก๊าซชีวภาพ กรณีศึกษา ค่าแสด วิเวอร์แคว รีสอร์ท <i>วิญญา ทองสกุลพานิชย์ ประพิชารีย์ ธนวิรักษ์</i>	215

การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3  
15 - 17 ธันวาคม 2553 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## การศึกษาเทคนิคสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

### Studying for Optimal Placement of Large-Scale PV Power Generation Systems in Radial Distribution Systems

อมรเทพ แพทยานันท์ ฤกษ์ชนม์ ภูมิภักดิพิชญ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี  
อำนวยการพิมพ์ ปทุมธานี 10120 โทร 0-2549-3571 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำแหล่งพลังงานทดแทนมาเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีเพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งแหล่งพลังงานทดแทนเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด บทความนี้ได้รวบรวมการศึกษาเทคนิคการหาตำแหน่งที่เหมาะสมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งแหล่งพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งประเด็นของการนำเสนอจะเป็นกล่าวถึงผลการเปรียบเทียบข้อดี, ข้อเสีย, ข้อจำกัด และข้อกำหนดที่เหมาะสมของเทคนิคการหาตำแหน่งที่เหมาะสมต่างๆ เพื่อเลือกใช้งาน ซึ่งจะเป็ประโยชน์เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นของการเลือกใช้และพัฒนาเทคนิคการกำหนดตำแหน่งในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์, ระบบจำหน่าย, การกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสม

#### 1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้ในภาคครัวเรือนหรือภาคอุตสาหกรรม ล้วนมีส่วนในการช่วยขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ ซึ่งในประเทศไทยระบบการส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายส่วนใหญ่เป็นระบบการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียล (Radial) ซึ่งหมายถึงการต่อกระจายออกเชิงรัศมี เป็นการจัดรูปแบบวงจรที่ง่ายและมีราคาต่ำที่สุด โดยเป็นการจ่ายไฟฟ้าออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปจ่ายให้กับโหลด ซึ่งการต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรเดียลนี้ จะไม่มีการเชื่อมต่อกับสายป้อนที่มาจากสถานีย่อยอื่นๆ จึงเป็นข้อเสีย กล่าวคือเมื่อเกิดฟอลต์ที่สายป้อนใดจะทำให้สายป้อนนั้นไฟดับทั้งหมด [1] ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังโหลดไม่มีความน่าเชื่อถือและไม่มีความยืดหยุ่นของระบบเท่าที่ควร เป็นผลให้การส่งกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายมีคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเสถียรภาพกำลังไฟฟ้าที่ต่ำตามไปด้วย ในส่วนของปัญหาดังกล่าวจะเป็นการขาดแคลนของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นน้ำมัน, ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งล้วนแต่เป็วัตถุดิบทางธรรมชาติที่ใช้นำหมดไป โดยที่นับวันจะลดน้อยลงไปทุกทีรวมทั้งมีราคาที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้ามีราคาที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง และปัญหาสุดท้ายจะเกี่ยวกับปัญหาภาวะโลกร้อน (Global Warming) อันเนื่องมาจากมลภาวะทางอากาศ (Air Pollution) ไม่ว่าจะเป็นฝุ่นละออง (Particulate Matter), ตะกั่ว (Pb), ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>), ก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) และก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) เป็นต้น [2] โดยเกิดจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม, การใช้น้ำมันดีเซล รวมทั้งการอุปโภคและบริโภคในชีวิตประจำวันของ



มนุษย์ ซึ่งปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาล้วนส่งผลให้อิโชนในชั้นบรรยากาศของโลกถูกทำลาย ทำให้โลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลให้โลกมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้วในข้างต้นนี้จึงจำเป็นต้องมีการส่งเสริมการสร้างแหล่งพลังงานทดแทนที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตที่สะอาดและปราศจากมลพิษ เพื่อทดแทนแหล่งพลังงานการผลิตไฟฟ้าแบบเก่า อาทิเช่น พลังงานลม (Wind) พลังงานเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) และพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นต้น เพื่อนำมาเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดในการผลิตไฟฟ้า โดยทำการสร้างให้เหมาะสมกับบริเวณที่ ๆ ต้องการใช้ไฟฟ้า เพื่อเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ณ. จุดนั้น จะได้เป็นการเพิ่มแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าซึ่งจะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของระบบได้มากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดการสร้างแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบเดิม ซึ่งไม่มีมลพิษกับสิ่งแวดล้อม

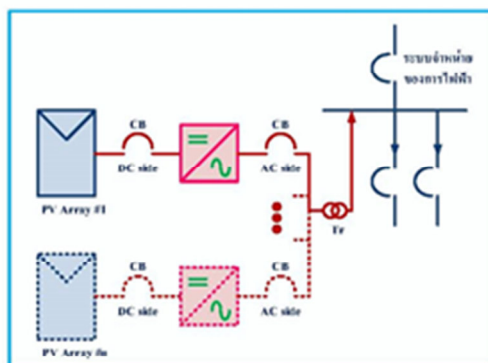
จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นนั้น การเชื่อมต่อแหล่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่เป็นอิสระเข้ากับระบบจำหน่ายนั้น จะมีข้อดีอีกประการหนึ่งคือสามารถขายพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้กับการไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่งด้วย ซึ่งในประเทศไทยมีการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าแบ่งตามขนาดของกำลังการผลิตได้ 3 ประเภทดังนี้ [3], [4] และ [5]

1. ผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer : IPP) หรือผู้ผลิตไฟฟ้ารายใหญ่ จ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 90 MW ขึ้นไป
2. ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer : SPP) จ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า 10 MW แต่ไม่เกิน 90 MW
3. ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer : VSPP) จ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าได้ไม่เกิน 10 MW

ซึ่งในบทความนี้จะทำการศึกษาแหล่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าทดแทนที่เป็นอิสระที่มีระดับการจ่ายปริมาณพลังงานไฟฟ้าประเภท VSPP ซึ่งรับผิดชอบโดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค : กฟภ. และการไฟฟ้านครหลวง : กฟน. โดยในหัวข้อที่ 2. เป็นการกล่าวถึงโครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่กำหนดให้มีขนาด 1 MW ซึ่งในหัวข้อที่ 3. ของบทความนี้จะนำเสนอการศึกษาเทคนิคการหาค่าความเหมาะสม (Optimization Techniques) ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันที่ถูกนำมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่เข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ส่วนในหัวข้อที่ 4. จะเป็นประเด็นของการนำเสนอจะเป็นกล่าวถึงผลการเปรียบเทียบข้อดี, ข้อเสีย, ข้อจำกัด และข้อกำหนดที่เหมาะสมของเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมต่างๆ เพื่อเลือกใช้งานจะกล่าว และในหัวข้อที่ 5. จะเป็นการสรุปผลของการศึกษา ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการเป็นข้อมูลเบื้องต้นของการเลือกใช้และพัฒนาเทคนิคในอนาคตต่อไป

## 2. โครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (Large-Scale PV Power Generation Systems)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (Large-Scale PV Power Generation Systems) หรือโรงผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Power Plant) โดยกำหนดให้มีขนาด 1 MW ที่นำมาเชื่อมเข้ากับระบบจำหน่ายจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 1 [6] มีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย [6]

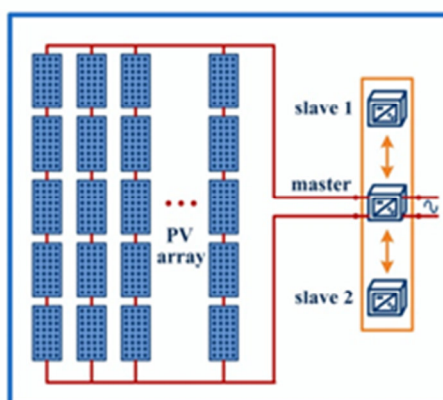


## 2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ นั้น การนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานโดยปกติจะประกอบให้อยู่ในรูปแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module) ก่อน และหากต้องการเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นก็สามารถนำแผงเซลล์มาเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าได้ทั้งในรูปแบบของสตริง (string) หรืออะเรย์ (Array) ได้ โดยรูปแบบการเชื่อมต่อแต่ละเซลล์เพื่อทำให้เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่ 3 แบบคือ (1). แบบอนุกรมกัน คือ การนำแต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกันเป็น 1 แถว หรือเรียกว่า 1 สตริง (string) เท่านั้นใน 1 แผง มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าของแผงให้สูงขึ้น (2). แบบอนุกรม-ขนาน คือ การนำแต่ละสตริงที่เซลล์ต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นแล้วนำมาต่อขนานกันเพื่อเพิ่มกระแสให้สูงขึ้น (3). แบบอนุกรม-ขนาน-อนุกรม คือ การนำแต่ละกลุ่มที่เชื่อมต่อกันแบบที่ 2 มาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้า เช่น ถ้าต้องการกำลังไฟฟ้าขนาด 1 MW จะต้องนำโมดูลขนาด 10 kW มาต่อกัน 25 ชุด ให้ได้ PV Array ขนาด 250 kW 1 ชุด และต้องใช้ PV Array ขนาด 250 kW  $\times$  4 ชุด จึงจะได้กำลังไฟฟ้าขนาด 1 MW เป็นต้น

## 2.2 การเลือกรูปแบบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

การเลือกรูปแบบของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะพิจารณาจากอินเวอร์เตอร์ที่ต้องการใช้งานได้แก่ ระบบแบบรวมศูนย์ (centralize) และระบบแบบแยกศูนย์ (decentralized) ซึ่งส่งผลกระทบต่อวิธีการต่อวงจรแผงเซลล์เพื่อใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ให้มีการสูญเสียเนื่องจากความไม่สอดคล้องของอุปกรณ์ (mismatch losses) โดยที่อินเวอร์เตอร์สามารถใช้งานได้ทั้งในรูปแบบรวมศูนย์แบบสตริงอินเวอร์เตอร์ (string inverter) และแบบโมดูลอินเวอร์เตอร์ (module inverter) โดยระบบที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายส่วนใหญ่จะเป็นระบบแบบรวมศูนย์มี 3 แบบดังนี้ (1). แบบแรงดันต่ำ หากแรงดันจากแผงเซลล์อยู่ในช่วงแรงดันต่ำ ( $UDC < 120 V$ ) การต่อวงจรแผงเซลล์ในสตริงจะใช้แผงเซลล์ไม่มาก (ประมาณ 3 ถึง 5 แผง) ข้อดีของการต่อวงจรแผงเซลล์เมื่อสตริงสั้น คือ หากเกิดการบังเงาจะส่งผลกระทบต่อระบบน้อยกว่าสตริงยาว เนื่องจากกระแสไหลออกจากสตริงอื่นๆ ที่ไม่ถูกบังเงาจะไหลไปยังอินเวอร์เตอร์ (2). แบบแรงดันสูง รูปแบบนี้ต้องการอุปกรณ์ที่มีระดับการป้องกัน Class II (อุปกรณ์ประเภทแรตต์ที่มีฉนวนป้องกัน) เพื่อต่อวงจรแผงเซลล์ในสตริงเป็นจำนวนมาก ( $UDC > 120 V$ ) ข้อดีของแบบแรงดันสูงคือ สายไฟมีขนาดเล็กเนื่องจากกระแสในระบบน้อย สำหรับข้อเสียคือการบังเงาจะส่งผลกระทบต่อระบบเป็นอย่างมาก (3). แบบ master - slave ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ที่ใช้รูปแบบรวมศูนย์มักใช้อินเวอร์เตอร์ในแบบที่มีอินเวอร์เตอร์มากกว่าหนึ่งตัว โดยแบ่งฟังก์ชันของอินเวอร์เตอร์ออกไปให้อินเวอร์เตอร์มาสเตอร์ (master) ทำงานในช่วงความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำ จนกระทั่งความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้นกว่าอินเวอร์เตอร์มาสเตอร์ทำงานได้ จึงให้อินเวอร์เตอร์สเลฟ (slave) ทำงาน ข้อแนะนำคือ ควรให้ทำหน้าที่สลับกันเป็นรอบ (rotating master) เพื่อให้ทำงานที่ภาระเฉลี่ยเท่ากัน ข้อดีของแบบ master - slave คือ ทำให้ประสิทธิภาพรวมของระบบในขณะความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำดีกว่าการใช้อินเวอร์เตอร์ เพียงตัวเดียวแต่จะทำให้ค่าลงทุนสำหรับอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โดะแกรมการต่อระบบรูปแบบรวมศูนย์ แบบ master - slave [6]

### 2.3 การเลือกพิกัดอินเวอร์เตอร์

ข้อกำหนดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผู้ผลิตระบุไว้จะมีข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกพิกัดอินเวอร์เตอร์และการติดตั้ง ผู้ใช้งานควรศึกษาข้อมูลดังกล่าวด้วยเพื่อใช้ในการออกแบบการเชื่อมต่อระบบ, ระบบแรงดัน และพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ จะต้องพิจารณา 3 ส่วนดังต่อไปนี้ (1). การเลือกจำนวนของอินเวอร์เตอร์ที่ต้องใช้และพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ (2). การเลือกพิกัดแรงดัน (3). การหาจำนวนสาย (string)

### 2.4 ทหามีเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อบนระบบจำหน่าย

การหาพหามีเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ จะต้องกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของ Array จากบทความของ Golder, A. S. [7] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการจำลองตัวกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic : PV) สำหรับการศึกษา ระบบจำหน่ายขนาดใหญ่ โดยจะทำการนำเสนอการพัฒนาของการทดสอบแบบจำลองสำหรับระบบจำหน่ายด้วยการติดตั้ง ตัวกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาถึงการหาค่ากำลังสูงสุดของ PV Array หรือกำลังไฟฟ้าขาออกที่ผลิต ได้จากระบบ จะมีขั้นตอนของแบบจำลองมีดังนี้คือ (1). ทหูปแบบการเชื่อมต่อของ Array (2). แปลงสมการคุณลักษณะของ เซลล์แสงอาทิตย์ 1 เซลล์ ให้เป็นสมการคุณลักษณะของ Array (3). แก้ปัญหาพหามีเตอร์ของสมการคุณลักษณะของ Array (4). คำนวณค่าสมการคุณลักษณะของ I-V curve และทำการหาค่า  $P_O^{DC}$  ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\hat{P} = \hat{I} \hat{V} \quad (1)$$

$$P_O^{DC} = P_{max,AE} = \max(\hat{P}) \quad (2)$$

โดยที่:  $P_O^{DC}$  = ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกกระแสตรงสำหรับอาร์เรย์ที่ถูกกำหนดสภาพแวดล้อม (วัตต์)

$P_{max,AE}$  = ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับอาร์เรย์ที่ถูกกำหนดสภาพแวดล้อม (วัตต์)

ซึ่งข้อมูลเฉพาะของระบบที่อธิบายไว้ดังนี้ : (1). แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array) มีขนาด 4500 วัตต์, (2). โมดูลของ Shell SQ 150 วัตต์ [8], (3). แผงต่ออนุกรมกัน 2 ชุดของแผงแต่ละ 15 โมดูล, (4). อุณหภูมิแวดล้อม : 22 องศาเซลเซียส, (5). ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่กระทบต่อหน่วยพื้นที่ : 850 วัตต์/เมตร<sup>2</sup>, (6). ผลรวมของพื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (total solar module area) 26.9 เมตร<sup>2</sup>, (7). ชุดปรับสภาวะของกระแสไฟฟ้า (power conditioning unit : PCU) Xantrex GT-3.8 ซึ่งมีประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) = 95.7%

โดยเมื่อพิจารณาตัวแปรของระบบแล้วจะทำให้ทราบว่า มีลักษณะที่เป็นตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีความสำคัญในการพิจารณาเพื่อเลือกใช้เทคนิคการหาค่าความเหมาะสม ให้เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดใหญ่เข้ากับระบบจำหน่ายแบบแรงดัน

### 3. การศึกษาเทคนิคการหาค่าความเหมาะสม (Studying for Optimization Techniques)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาเทคนิคการหาค่าความเหมาะสม (Optimization Techniques) ที่นิยมนำมาใช้ในการหา หรือ กำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบแรงดัน โดยจะกล่าวถึง (1). พื้นฐานของการหาค่าความเหมาะสม (2). การสำรวจบทความที่ได้มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้, เปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย, ทั้งข้อจำกัด และข้อกำหนดที่เหมาะสมทางเทคนิค ซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

#### 3.1 พื้นฐานการหาค่าความเหมาะสม (Basic Optimization Solution)

การวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยวิธีทางคณิตศาสตร์มักจะเริ่มด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งระบบจะหมายถึงสิ่งที่ต้องการทำการศึกษา การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของระบบ โดยที่เราไม่ต้องทำการศึกษากับระบบจริง อันเนื่องมาจากข้อจำกัดบางอย่างหรือเป็นไปได้ในกรณีที่จะต้องทำการศึกษากับระบบจริงโดยทั่วไป ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะได้จากหลักการหรือกฎทางธรรมชาติที่นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษาและทดสอบมาแล้ว [9] โดยที่บทความนี้จะการศึกษาเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมเพื่อนำไปหาค่าตั้งสูญเสียของระบบต่อไปในอนาคต ดังสมการที่ (3) [10] ในส่วนถัดมา (1). จะต้องทำการออกแบบตัวแปร (Design variables) ซึ่งได้มาจากพหามีเตอร์ของการหา  $P_O^{DC}$  ในข้างต้นและที่จำเป็นต้องใช้ (2). ทำการกำหนดเงื่อนไขบังคับ (Constraints) ภายใต้เงื่อนไขที่ต้องการของ

การศึกษาเรื่อง (n). Power Balance (ข). Voltage Limit (ค). Power Limit (ง). กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่ต้องการดังสมการที่ (4) โดยมีสมการที่ใช้หาค่ากำลังสูญเสีย ( $P_L$ )

$$P_G = P_D + P_L \quad (3)$$

Objective Function : Min  $P_L = P_G - P_D \quad (4)$

Subject to : 1. Power Balance  $\sum_{i=1}^N P_{Dxi} = \sum_{i=1}^N P_{Gxi} + P_L \quad (5)$

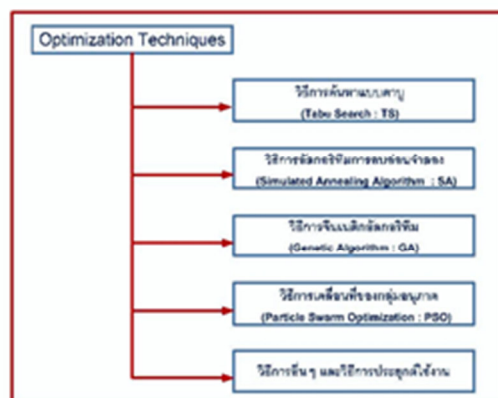
2. Voltage Limit  $V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (6)$

3. Power Limit  $Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \quad (7)$

โดยที่  $P_G$  คือ กำลังงานที่ผลิต,  $P_D$  คือ กำลังงานที่ต้องการ และ  $P_L$  คือ กำลังงานจริงที่สูญเสีย

### 3.2 เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมแบบต่างๆ (Optimization Techniques) [11]

เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมมีหลากหลายเทคนิค โดยที่แผนผังในรูปที่ 3 จะแสดงถึงเทคนิคที่นิยมนำมาใช้งาน



รูปที่ 3 แผนผังของเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมที่สุดแบบต่างๆ

#### 3.2.1 วิธีการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search : TS)

คำว่า "tabu" มีความหมายตามพจนานุกรมทั่วไปว่า "ต้องห้าม" ในโครงสร้างของ TS จึงมีองค์ประกอบที่มีสถานะต้องห้ามหรือองค์ประกอบที่ไม่สามารถใช้งานได้อยู่ด้วย อย่างไรก็ตามสถานะขององค์ประกอบดังกล่าวไม่จำเป็นจะต้องคงสภาพเช่นนั้นตลอดไป แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสถานะต่างๆ ภายในระบบ

**ข้อดี :** ตัว TS เองยังสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับหลายๆ ระบบได้อย่างไม่ยุ่งยากมากนักเนื่องจากหลักการและกลไกการทำงานของ TS ที่ไม่ซับซ้อนนั่นเอง ซึ่งทำให้ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งานของ TS ก่อนข้างที่จะสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่นวิธีการอบอ่อนจำลอง (simulated annealing) จีแนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm)

**ข้อเสีย :** การค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาบู่ช่วยแก้ปัญหาของค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นและการวน

รอบอยู่กับที่พารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ในโครงสร้างของ TS มีผลต่อพฤติกรรมในการค้นหาค่าตอบ โดยทฤษฎีแล้วยังไม่มีการคำนวณที่แน่นอนว่าพารามิเตอร์ต่างๆ ควรจะมีค่าเป็นเท่าไรที่จะทำให้การค้นหาค่าตอบของ TS เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยปกติแล้วการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้จากการสุ่มทดลองและสังเกตผล

**ข้อจำกัด :** การค้นหาแบบตาบอด หรือ tabu search (TS) เป็นขั้นตอนวิธีการคิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา ระบบที่เรียกว่าปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความสามารถในการหลีกเลี่ยงค่าตอบที่เหมาะสมเฉพาะถิ่น (local optimum) และยังสามารถทำการค้นหาค่าตอบต่อไปจนกระทั่งให้ค่าตอบที่ใกล้เคียงกับค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum)

**ข้อก้ำหนดที่เหมาะสมทางเทคนิค :** สิ่งสำคัญที่ทำให้ TS แตกต่างไปจากการค้นหาค่าตอบวิธีอื่นๆ ก็คือรายการต้องห้าม (tabu list) ซึ่งใช้เป็นตัวข้อมูลสำหรับเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในการค้นหาค่าตอบ ไม่ว่าจะเกิดสถานะต้องห้ามของแต่ละการเดินหรือคุณสมบัติอื่นๆ ของ TS เช่น เงื่อนไขความซ้ำซากหรือเงื่อนไขความคงอยู่ต่ำสุด ดังนั้นการออกแบบรายการต้องห้ามจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะคุณสมบัติของรายการต้องห้ามเช่น ขนาด หรือช่วงเวลาในการคงความเป็นสถานะต้องห้าม ฯลฯ จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบของ TS

โดยทำการศึกษาดูอย่างบทความ Yann-Chang, H. และคณะ [12] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหของตำแหน่งการวางคาปาซิเตอร์ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยใช้ Tabu Search

### 3.2.2 วิธีการอัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (Simulated Annealing Algorithm : SA)

อัลกอริทึมการอบอ่อนจำลอง (simulated annealing หรือ SA) เป็นเทคนิคการค้นหาค่าตอบแบบสุ่มเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น SA ทำให้ระบบได้รับค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (global optimum) โดยการเลียนแบบธรรมชาติของกระบวนการอบอ่อนเหล็ก

**ข้อดี :** จุดเด่นที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ SA มีโครงสร้างหรือหลักการทำงานที่ไม่มีความซับซ้อนแต่อย่างใด

**ข้อเสีย :** SA นั้นอยู่ที่ต้องมีการคำนวณค่อนข้างมาก ถึงแม้ว่าจะมีการนำเสนออัลกอริทึมของ SA แบบดัดแปรเพื่อให้ทำงานได้เร็วขึ้น แต่การนำไปโปรแกรมใช้งานจริงยังมีความยุ่งยากและยังไม่เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางนัก

**ข้อจำกัด :** ถึงแม้ว่า SA จะสามารถให้ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ แต่เวลาในการค้นหาค่าตอบอาจจะไม่เหมาะสมในการใช้งานจริงก็ได้ มีงานวิจัยมากมายที่เน้นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบของ SA ให้ดีขึ้น

**ข้อก้ำหนดที่เหมาะสมทางเทคนิค :** SA มีข้อได้เปรียบในการใช้งานที่เห็นได้ชัดคือความยืดหยุ่นและทนทานในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง ตัว SA เองไม่ได้ใช้ข้อมูลของความชันหรือเกรเดียนต์ (gradient) เหมือนกับในหลายๆ วิธีของการค้นหา SA เองสามารถใช้งานกับปัญหาที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง รวมไปถึงกับปัญหาที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันที่ไม่สามารถหาอนุพันธ์ได้ (นั่นคือไม่สามารถใช้เกรเดียนต์ ในการค้นหาค่าตอบได้)

โดยทำการศึกษาดูอย่างบทความ Nahman, J. M. และ Peric, D. M. [13] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการวางแผนที่เหมาะสมของโครงข่ายการจำหน่ายแบบเรเดียล โดยใช้เทคนิคการอบอ่อนจำลอง (SA)

### 3.2.3 วิธีการจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA)

จินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) เป็นวิธีการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุดโดยใช้หลักการคัดเลือกแบบธรรมชาติ และหลักการทางสายพันธุ์ จินเนติกอัลกอริทึมเป็นการคำนวณอย่างหนึ่งที่สามารถกล่าวได้ว่ามี "วิวัฒนาการ" อยู่ในขั้นตอนของการค้นหาค่าตอบ

**ข้อดี :** เมื่อพิจารณาถึงความสามารถและโครงสร้างของ GA แล้ว สามารถสรุปข้อดีต่างๆ ของ GA ได้ดังนี้ (1). มีโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลแบบขนาน (2). มีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือ (3). สามารถให้ค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (global optimum) (4). มีความยืดหยุ่นในการออกแบบชนิดของโครโมโซม (5). เหมาะสำหรับระบบที่มีเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ (6). เหมาะสำหรับระบบที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบพหุคูณ GA เป็นต้น

**ข้อเสีย :** GA อาจจะไม่เหมาะกับระบบที่เป็นแบบเวลาจริง (real-time system) หรือระบบที่มีระยะเวลาในช่วงของการประมวลผลที่ค่อนข้างจำกัด

**ขีดจำกัด :** GA มีข้อจำกัดในการใช้งานจริงเหมือนกัน ปัญหาหลักๆ ของ GA คือการปรับพารามิเตอร์ของ GA ที่ขึ้นอยู่กับปัญหาที่จะนำเอา GA ไปแก้ไขหาค่าตอบ ผู้ใช้จะต้องมีความเข้าใจในปัญหา ซึ่งปัญหาต่างๆ มีรายละเอียดความหลากหลายมากมาย แล้วเลือกปรับ GA ให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมของปัญหาให้ได้

**ข้อกำหนดที่เหมาะสมทางเทคนิค :** GA ถือว่าเป็นวิธีการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) แบบปัญหาเชิงคำนวณ ที่มีความสามารถในการค้นหาค่าตอบอย่างชาญฉลาด และลดความยุ่งยากในขั้นตอนต่างๆ ของการค้นหาลงไป

โดยทำการศึกษาดูอย่างบทความของ Borges, Carmen L. T. และ Falcao, Djalmá M. [14] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการจัดสรรเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation : DG) สำหรับปรับปรุงแรงดัน, ความสูญเสีย และความน่าเชื่อถือของระบบ

### 3.2.4 วิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO)

การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (particle swarm optimization หรือ PSO) เป็นอัลกอริทึมที่มีแรงดลใจมาจากธรรมชาติ โดยเฉพาะการเคลื่อนที่ของฝูงปลาและฝูงนก PSO เป็นอัลกอริทึมเชิงประชากร ที่ซึ่งอนุภาคย่อยๆ (individual particle) ในกลุ่มประชากรทำงานร่วมมือกันในการแก้ปัญหา สิ่งที่น่าสนใจใน PSO คือความเรียบง่ายของอัลกอริทึม ทำให้การนำไปใช้งานจริงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

**ข้อดี :** เมื่อเปรียบเทียบกับ GA แล้ว ข้อได้เปรียบของ PSO คือความง่ายของอัลกอริทึมและพร้อมกับการปรับแต่งอัลกอริทึมด้วยจำนวนพารามิเตอร์เพียงไม่กี่ตัวเท่านั้น

**ข้อเสีย :** PSO ยังถือเป็นอัลกอริทึมที่ค่อนข้างใหม่สำหรับการแก้ปัญหาหาค่าเหมาะที่สุด

**ขีดจำกัด :** ประสิทธิภาพของ PSO ได้เป็นที่ยอมรับในการนำไปใช้ในงานการหาค่าเหมาะที่สุดอย่างหลากหลาย

**ข้อกำหนดที่เหมาะสมทางเทคนิค :** PSO มีคุณลักษณะหลายๆ อย่างที่เหมือนกับการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ เช่นเงินเด็กอัลกอริทึม (GA) โดย PSO มีการสุ่มสร้างประชากรเริ่มต้น และใช้ในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยการปรับประชากรนั้นๆ ในห้วงรอบการคำนวณ (ทุกๆ รุ่นหรือ generation) อย่างไรก็ดี PSO มีความแตกต่างไปจาก GA ตรงที่ไม่มีปฏิบัติการทางสายพันธุ์

โดยทำการศึกษาดูอย่างบทความของ Prakash, K. และ Sydulu, M. [15] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการหาค่าเหมาะที่สุดการวางคาปาซิเตอร์บนพื้นฐานของวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) ในระบบจำหน่ายแบบเบ็ดเตล็ด

นอกจากเทคนิควิธีการข้างต้นซึ่งเป็นที่นิยมใช้แล้วยังมีเทคนิควิธีการต่างๆ และการประยุกต์ใช้งานดังต่อไปนี้ วิธีการ Multi - Objective Optimization, วิธีการ Grid Search Algorithm, วิธีการ Sequential Quadratic Programming (SQP) Algorithm เป็นต้น โดยเทคนิควิธีการข้างต้นจะถูกเลือกเพื่อนำไปใช้ให้เหมาะสมกับงานในลำดับถัดไป

## 4. กระบวนการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสม

จากการศึกษาเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมแบบต่างๆ ในข้างต้น จะนำไปสู่การพิจารณาเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบ Tabu Search : TS) ซึ่งเมื่อนำมาใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความซับซ้อนนั้นจะเป็นเครื่องมือในการพิจารณาหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังงานสูญเสียของระบบนั้น ต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบดังนี้ (1) ความสามารถในการหลีกเลี่ยงค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และยังสามารถทำการค้นหาค่าตอบต่อไปจนกระทั่งให้ค่าตอบที่ใกล้เคียงกับค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum) (2) การประยุกต์ ใช้งานกับหลายๆ ระบบได้อย่างไม่ยุ่งยาก (3) มีความรวดเร็วในการหาค่าตอบที่ต้องการ ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นดังกล่าวมาแล้วจะนำไปสู่การทำวิจัยต่อไปในอนาคต โดยทำการทดสอบแบบจำลองบนพื้นฐานของของ IEEE 33 บัสเพื่อลดกำลังสูญเสียของระบบ จากนั้นจึงใช้เทคนิคการหาค่าความเหมาะสมแบบ Tabu Search : TS) เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังงานสูญเสียของระบบ

## 5. สรุป

การศึกษาเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมแบบต่างๆ ในข้างต้นนั้น ทำให้ทราบถึงข้อดี, ข้อเสีย, ขีดจำกัด และข้อกำหนดที่เหมาะสมของเทคนิคการหาค่าความเหมาะสมต่างๆ เพื่อเลือกใช้งาน โดยที่จะทำการเลือกวิธีการค้นหาแบบ Tabu

(Tabu Search : TS) ซึ่งมีข้อดี และข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นความสามารถในการหลีกเลี่ยงค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และยังสามารถทำการค้นหาค่าตอบต่อไปจนกระทั่งให้ค่าตอบที่ใกล้เคียงกับค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum) และประยุกต์ ใช้งานกับหลายๆ ระบบได้อย่างไม่ยุ่งยากมากนัก เนื่องจากหลักการและกลไกการทำงานของ TS ที่ไม่ซับซ้อนนั่นเอง ซึ่งทำให้ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งานของ TS ก่อนข้างที่ จะสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่นวิธีการอบอ่อนจำลอง (simulated annealing) จินเนติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) จึงเหมาะสมที่จะใช้เทคนิควิธีการค้นหาแบบสุ่มสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ซวลิต ดำรงรัตน์, การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า, หจก.เอส-เอน การพิมพ์: บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด, 2533. หน้า 93-94.
- [2] นพภาพร พานิช และคณะ. "ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับมลพิษทางอากาศ." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.aqnis.pcd.go.th/basic/pollution\\_basic.htm](http://www.aqnis.pcd.go.th/basic/pollution_basic.htm). สืบค้น 14 สิงหาคม 2553.
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน, "ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.eppo.go.th/power/pw-ElecPriv-T-02.html>. สืบค้น 17 กรกฎาคม 2553.
- [4] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. "ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://www.pea.or.th/vspp/etc/connection\\_code.pdf](http://www.pea.or.th/vspp/etc/connection_code.pdf). สืบค้น 17 กรกฎาคม 2553.
- [5] การไฟฟ้านครหลวง. "ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็กมากฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2547." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.mea.or.th/internet/Elecvalue/VSPP/VSPPReportWeb.pdf>. สืบค้น 17 กรกฎาคม 2553.
- [6] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. "หลักสูตรฝึกอบรมหลักสูตรฝึกอบรมเทคนิคการประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์สำหรับผู้ออกแบบ." [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.are101.org/book/solarcell-training/01Designer.pdf>. สืบค้น 8 สิงหาคม 2553.
- [7] Golder, Andrew S., Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies, Master Degree Thesis, Electrical Engineering, Drexel University, October 2006.
- [8] California Public Utilities Commission. "California Solar Incentive Program." Available : <http://www.cpuc.ca.gov/static/Energy/solar/index.htm>. 2006.
- [9] ดร.ธนัญชัย ลีภักดิ์ปรีดา, การหาค่าเหมาะสมที่สุด:หลักการพื้นฐานและขั้นตอนวิธีการ. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2543. หน้า 1-6.
- [10] Pukar, M., Weerakom, O. and Nadarajah, M., "Optimal placement of wind turbine DG in primary distribution systems for real loss reduction," Energy for Sustainable Development:Prospects and Issues for Asia (Electronic),2006, pp. 1-6. Available: World Academy of Science, Engineering and Technology (8 August 2010).
- [11] ผศ.ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, ปัญญาเชิงคำนวณ. พิมพ์ครั้งที่ 1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- [12] Yann-Chang, H., Hong-Tzer, Y. and Ching-Lien, H., "Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using Tabu Search approach," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 11, no. 4, pp. 1868-1873, 1996.
- [13] Nahman, J. M. and Peric, D. M., "Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 23, no. 2, pp. 790-795, 2008.
- [14] Borges, Carmen L. T. and Falca'o, Djalma M., "Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, 2006.
- [15] Prakash, K. and Sydulu, M., "Particle Swarm Optimization Based Capacitor Placement on Radial Distribution Systems." pp. 1-5.







**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5**

**บทความวิจัย**

- ไฟฟ้ากำลัง
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ไฟฟ้าสื่อสารและโทรคมนาคม
- ระบบควบคุมและการวัดคุม
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

**บทความวิชาการ**

27-29 มีนาคม 2556 โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

**EENET2013**



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



### รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ		หน่วยงาน
ศาสตราจารย์ ดร. วัลลภ	สุระกำพลธร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์	วัฒน์กุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย	อริย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์	จางวนิชติศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. ปุทธิศักดิ์	ชีวิสุวิทย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. สมพร	สิริสำราญนุกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์	หวังสถิตย์วงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์	ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิตัง	เนียมมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิตชัย	กุลวรรวานิชพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร. เวทิน	ปิยรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เนนบุญ	หุนเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย	เคซัสอนันต์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงษ์	สุวรรณกวิน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์	คำผ้อย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุทธนา	ข้าสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชาวัลย์	นาคทรัพย์	มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์	บาลมงคล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร. นาดยา	คล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
อาจารย์ ดร. ยงยุทธ	นารามบุรี	มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. นิमित	บุญภิรมย์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
อาจารย์ ดร. สมมาคร	แสงเงิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



**รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ**  
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ		หน่วยงาน
ดร.อภิรดา	นามแสง	สถาบันการบันพลเรือน
ดร.สุวิทย์	อัคริยะเมต	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.ชูวงศ์	วัฒนศักดิ์ภูบาล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ดร.อรรด	พยอมหอม	การไฟฟ้านครหลวง
ดร.ป้ามาณ	กุลวานิช	กรมวิทยาศาสตร์บริการ



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



### รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
อาจารย์ ดร. วุฒิวัฒน์	กองเรือนประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร. สาชอล	ชุดเจ็ชชิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ชัยณรงค์	วิศมศักดิ์วิชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิโรจน์	เพชรพันธุ์ศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกฤษ	พลสิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพนธ์	ทางทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ประหยัด	กองสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ภัทรพงศ์	อัญชันภาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมพล	โคศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมยศ	สันติมาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์พิศพันธุ์	สุวรรณภักดิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฤกษ์ชัย	ภูมิภักดิ์พิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย	ทรัพย์สิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักริ	ศรีนนท์ฉัตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ฉัตรชัย	สุกพิทักษ์สกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. กิตติวัฒน์	น้อมเกิดผล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. บุญยัง	ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. สุรินทร์	แห่งมงาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย	หิรัญวโรดม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. อำนวย	เรืองวารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. อนุภัทร	พันธ์คง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย	แดงอม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ	โสมะเกษศรีรินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์พนิจ	จิตจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์สมชาย	เบียนสูงเนิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับพิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
อาจารย์พร้อมศักดิ์	อภิรติกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์นิติพงศ์	ปานกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ธีระพล	เหมือนขาว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราชญ์	คาบมั่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ไพฑูรย์	รักเหลือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์วิโรจน์	พิราจนนชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ณัฐพงศ์	พันชนะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณัฐโชติ	รักไทยเจริญชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สุนทร	วรรณการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ทอง	ลานธารทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์จตุรงค์	จตุรเชิดชัยสกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์เวชรินทร์	ชัยสิทธิ์ประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สาคร	ภูมิพัฒน์พันธุ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สมเกียรติ	ทองแก้ว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์อรุณ	ชั่งสุทธิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์มนัส	บุญเกียรติทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์โกศล	นิธิโสภา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรินทร์	จุลวานิช มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์	วัชรกั๊วชร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัจจา	ลักษณะอำนาจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ธนะกิจ	วัชรกั๊วชร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์นิลมิต	นิลาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ชลกาญจน์	วงศ์ก่อเกียรติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร. ณาทพร	จินดาประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับการพิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ประสพ โชค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.มนตรี สมคุณยคนก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์อดิศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนต์พงษ์ ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ เซอชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์กาญจน์บุษยา พานิชเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ศิวพล จำเริญกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์โสภา แซ่เอ็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์สิทธิ์ชัย บุญปัทม์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์สมพันธ์ อำทวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสุทธิ์ พงศ์ฤกษ์ธาตุ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.วรรณีย์ วงศ์ไครรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธ์พงศ์ อภิชาติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์รุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุธาธินันท์ ดันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ เผื่อนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์กิตติวุฒิ จินนະบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.มงคล กุพินาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.ประจวบ อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)





## สารบัญ

### สาขาบทความไฟฟ้ากำลัง

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
PW01 บทความดีเด่น	การจัดรูปแบบสายป้อนในระบบจำหน่ายที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหลายชนิด เพื่อลดความสูญเสีย โดยใช้วิธีการเรียงพันจุกกรรม ภูวนาท มากแสน และธวัช เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	1
PW02	การประเมินค่าดัชนีชี้วัดคุณภาพหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเพื่อกำหนดวิธีการบำรุงรักษา กรณีศึกษาของการไฟฟ้านครหลวง ไพศาล เขื่อนวิเชียรวัฒน์ และสมพร สิริสารานุกูล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	5
PW03	การหาตำแหน่งติดตั้งหม้อแปลงที่เสถียรของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ในระบบจำหน่ายแบบเบเรเดิล เพื่อลดกำลังงานสูญเสีย อมรเทพ แพรทยานันท์ <sup>1</sup> กฤษณ์จรรย์ ภูมิภักดีพิชญ์ <sup>2</sup> และจักรกฤษณ์ เคลือบวัง <sup>3</sup> <sup>1</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี <sup>2</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี <sup>3</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	9
PW04	การประยุกต์ใช้วิธีพีชคณิตในการประเมินมูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้อง ของกลุ่มพาณิชย์กรรมในประเทศไทย อภิสิทธิ์ สุขยอด ภาณุวัฒน์ เทียนศรี พระทีพัฒน์ ภาสบุตร และวรรธิน ปิตรประกร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	13
PW05	เครื่องผลิตก๊าซไอโซนแบบแรงดันไฟฟ้าสูง ความถี่สูง กำลังไฟฟ้าต่ำ โดยใช้พลังงาน แสงอาทิตย์และพลังงานลมเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วม ประสพโชค โห้ทองคำ <sup>1</sup> สุดาพร อ่วมรุ่ง <sup>2</sup> ณรงค์ชัย ทศพร <sup>3</sup> ไซยอันต์ ทองสองยอด <sup>4</sup> สุจิต ถึงสูง <sup>5</sup> และจักรกฤษณ์ จันทร์เชียว <sup>6</sup> <sup>1</sup> มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ <sup>2</sup> มหาวิทยาลัยสยาม	17
PW06	การติดตั้ง AVR และตัวเก็บประจุที่เหมาะสมในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิโดยใช้ NSGA-II กฤตวิทย์ บัวใหญ่ ประจวบ อินระวงศ์ กิตติวุฒิ ชินนะบุตร และธวัช เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	21

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศรีวิชัย

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

# การหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล เพื่อลดกำลังงานสูญเสีย Optimal Placement of Large-Scale PV Power Generation System in Radial Distribution System for Loss Reduction

อนรทพ เพ็ญอนันท์ ฤกษ์ชัยวัฒน์ ภูมิภักดิ์พิชญ์ และจักรกฤษณ์ เกลือบวัง<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าศรีวิชัย  
39 ม. 1 อ.วังเต่าจ๊ก นครนายก ต.คลองขอก อ.วังเต่าจ๊ก จ.ปราจีนบุรี 12110 โทรศัพท์ : 02-5493571 E-mail: krishonme.b@enr.mut.ac.th

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

41 ม. 7 อ.พหลโยธิน ต.บางเขน อ.เมือง จ.ตลิ่งชัน 10600 โทรศัพท์ : 055-515900 ต่อ 257 E-mail: jukkrit\_k@mut.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์การหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ 1 เมกะวัตต์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งจะช่วยลดกำลังงานสูญเสียในระบบเมื่อติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม โดยประเด็นของการนำเสนอจะเป็นการนำเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบตาบู่ (Tabu Search : TS) มาช่วยในการหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด ในส่วนการวิเคราะห์และทดสอบแบบจำลองของระบบจำหน่ายจะใช้แบบจำลองมาตรฐานของ IEEE 33 บัส แบบเรเดียล ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าฐาน 22 kV และ 25 MVA ภายใต้เงื่อนไขเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังที่ภาระโหลดคงที่ (Static Load) จากผลการทดสอบที่ได้จะพบว่ากำลังงานสูญเสียจริง (Power Loss Reduction) ของระบบลดลง 36.79 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริงในอนาคต

คำสำคัญ: โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์, การหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด, ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล, การลดกำลังงานสูญเสีย

## Abstract

This paper presents a methodology for finding the optimal location for Large-Scale PV Power Generation System size 1 MW connected to the radial distribution system. This reduces the power losses in the system when installed in a suitable location. The focus of the presentation will be the optimization techniques by Tabu Search (TS) to help determine the optimal placement for installation. In the analysis is used standard model of the IEEE 33-bus radial distribution system and tested at base voltage level 22kV and 25 MVA under the terms of the voltage stability and static loading conditions. From the test results can be found that the real power loss of system down 36.79

percent which resulted to stability and reliability of system increased. The guidelines are applied to the real system in the future.

Keywords: Large-Scale PV Power Plants, Optimal Placement, Radial System, Power Loss Reduction

## 1. บทนำ

ปัจจุบันมีความสนใจเทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่มีแหล่งวัตถุดิบในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้มาจากธรรมชาติที่มากขึ้น เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และอื่น ๆ ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม โดยแหล่งพลังงานทดแทนในรูปแบบนี้จะเรียกว่าแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation : DG) โดยปัจจุบันมีความนิยมนำมาเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมากขึ้น ซึ่งส่งผลดีกับระบบเมื่อติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม นอกจากนั้นแบบจำลองของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะเป็นแบบจำลองที่ระดับกิโลวัตต์ ดังนั้นแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ระดับเมกะวัตต์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในบทความนี้ [1] และเมื่อพิจารณาถึงการหาค่าแห่งที่เหมาะสมในการติดตั้ง DG นั้น เทคนิคการหาค่าแห่งที่เหมาะสมมีมากมายหลายวิธี ซึ่งมีทั้งข้อดี และข้อเสียแตกต่างกันไป [2] โดยบทความนี้จะเลือกใช้เทคนิคการหาค่าแห่งที่เหมาะสมแบบตาบู่ (Tabu Search : TS) มาช่วยในการแก้ปัญหาดังกล่าว ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ 1 เมกะวัตต์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยนำเทคนิคการหาค่าแห่งที่เหมาะสมแบบตาบู่ (Tabu Search : TS) มาช่วยในการหาค่าแห่งติดตั้งที่เหมาะสม เพื่อลดกำลังงานสูญเสียในระบบ ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น

ซึ่งองค์ประกอบของการนำเสนอในบทความนี้จะมีลำดับการกล่าวถึงดังต่อไปนี้ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่

## บทความวิจัย

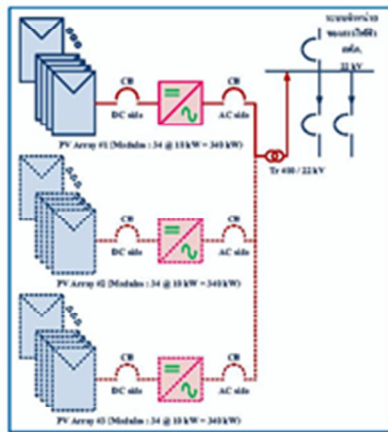
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

ระบบจำหน่ายแบบเบรเดิล การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการแบบสัญผลการจำลอง และสรุป สันนิษฐาน

## 2. โครงสร้างของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ (Large-Scale PV Power Generation Systems) หรือโรงผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Power Plant) ในบทความนี้จะกำหนดให้มีขนาด 1 MW ที่จะนำมาเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 1 (2) มีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 MW แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ซึ่งการหาพารามิเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่จะต้องกำหนดให้อยู่ในรูปแบบของระบบแผงเซลล์ หรืออาร์เรย์ (Array) จากบทความ [1] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการจำลองตัวกำเนิดไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาการระบบจำหน่ายขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาถึงการทำกำลังสูงสุดของระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array) หรือกำลังไฟฟ้าขาออกที่ผลิตได้จากระบบ จะมีขั้นตอนของแบบจำลองมีดังนี้คือ 1. หารูปแบบการเชื่อมต่อของอาร์เรย์, 2. แปลงสมการคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์, เซลล์ ให้เป็นสมการคุณลักษณะของอาร์เรย์, 3. แก้ปัญหาหาค่าพารามิเตอร์ของสมการคุณลักษณะของอาร์เรย์ และ 4. คำนวณค่าสมการคุณลักษณะของกราฟเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดัน จากนั้นทำการหาค่า  $P_{DC}^{DC}$  ดังสมการที่ (1) และ (2)

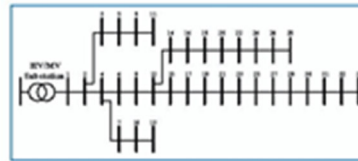
$$\hat{P} = \hat{I} \hat{V} \quad (1)$$

$$P_{DC}^{DC} = P_{max,AT} = \max(\hat{P}) \quad (2)$$

โดยที่  $P_{DC}^{DC}$  - ค่ากำลังไฟฟ้าขาออกกระแสตรงสำหรับอาร์เรย์ที่ถูกกำหนดสภาพแวดล้อม (วัตต์) และ  $P_{max,AT}$  - ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับอาร์เรย์ที่ถูกกำหนดสภาพแวดล้อม (วัตต์) เมื่อพิจารณาสมการ และเงื่อนไขของระบบแล้วพบว่าปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง ดังสมการที่ (3) ซึ่งมีความสำคัญในการพิจารณาเพื่อเลือกใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเบรเดิล

## 3. ระบบจำหน่ายแบบเบรเดิล

ระบบจำหน่ายมาตรฐาน IEEE แบบเบรเดิล 33 บัส 32 สาขา นั้น จะมีกำลังไฟฟ้รวมของโหลดขนาด 3.72 MW และ 2.3 MVar โดยในบทความนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้ระบบจำหน่ายมาตรฐาน IEEE แบบเบรเดิล 33 บัส 32 สาขา ที่การทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าฐาน 22 kV และ 25 MVA ซึ่งแรกเริ่มกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่สูญเสียรวมในระบบมีขนาด 77.0135 kW และ 52.1361 kVar โดยที่บัสที่ 1 เป็นโหนดจ่ายที่เชื่อมต่อกับระบบส่งโดยผ่านสถานีออก ซึ่งการเชื่อมต่อโหนดสาขาจะเริ่มเชื่อมต่อจากบัสที่ 1 ไปยังบัสที่ 2 แล้วต่อไปยังโหนดสาขาอื่น ๆ ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2 [3]



รูปที่ 2 แผนภาพเส้นเคเบิลของระบบจำหน่ายแบบเบรเดิล 33 บัส

## 4. การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

การคำนวณการไหลของโหลดด้วยหลักการใช้นิเวศจากโคมิออน (Jacobian-based) เช่น นิวตันราฟสันโหลด หรือกัวซิ-นิวตันไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของโหลดสำหรับระบบจำหน่ายที่บางครั้งเกิดปัญหาที่เกี่ยวกับการเข้าสู่ค่าล้น ดังนั้นในบทความนี้จะใช้วิธีแพร่กระจายออกหลังและเดินทาง (Backward and forward propagations) เพื่อแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับการเข้าสู่ค่าล้น ซึ่งสามารถคิดคำนวณรายละเอียดได้ใน [3]

## 5. ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด

### 5.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการหา นั่นก็คือ ค่ากำลังสูญเสียจริงรวมในระบบไฟฟ้า ดังสมการที่ (3)



**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศรีวิชัย 5

Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

$$\min P_{\text{bus}} = \sum_{i=1}^{N_b} (P_{G_i} + P_{D_{G_i}}) - P_{D_i} \quad (3)$$

ภายใต้เงื่อนไข : เก้าอี้ไฟฟ้าสูงสุด พีดจำกัดของแรงดันไฟฟ้า และพีดจำกัดของกำลังไฟฟ้า

โดยที่ :  $P_{\text{bus}}$  คือ กำลังสุทธิเชิงจริงทั้งหมดของระบบจำหน่าย,  $P_G$  คือ กำลังการผลิตจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส  $i$ ,  $P_D$  คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าที่บัส  $i$ ,  $P_{D_{G_i}}$  คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาด 1 MW และ  $N_b$  คือ จำนวนบัส

**5.2 ระบบเงื่อนไขบังคับ**

ตัวแปรปรับตั้งในบทความนี้จะถูกปรับตั้งเพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสุทธิเชิงจริงในระบบที่น้อยที่สุด และยังคงอยู่ในช่วงพีดจำกัดของตัวแปรแต่ละตัว เพื่อให้ระบบไฟฟ้าทำงานอยู่ในสภาวะปกติ โดยมีระบบเงื่อนไขบังคับทั้งเงื่อนไขสมการและอสมการแสดงดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขบังคับสมการเป็นสมการการไหลกำลังไฟฟ้า

$$P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| |Y_{ij}| V_j \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (4)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} + \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| |Y_{ij}| V_j \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (5)$$

โดยที่ :  $P_{G_i}$  คือ กำลังไฟฟ้าจริงผลิตที่บัส  $i$ ,  $P_{D_i}$  คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส  $i$ ,  $Q_{G_i}$  คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟผลิตที่บัส  $i$ ,  $Q_{D_i}$  คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส  $i$ ,  $N_b$  คือ จำนวนบัส,  $\theta_{ij}$  คือ มุมแอดมิตแตนซ์บัส  $i$  ไปยังบัส  $j$  และ  $Y_{ij}$  คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์บัส  $i$  ไปยังบัส  $j$

2. เงื่อนไขบังคับสมการเป็นขอบเขตของตัวแปรปรับตั้ง

$$V_{m_i}^{\min} \leq V_{m_i} \leq V_{m_i}^{\max} \quad (6)$$

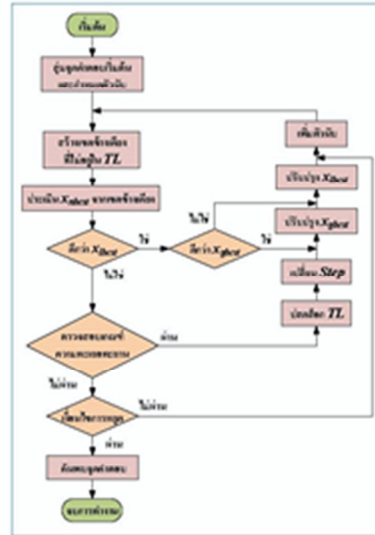
$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad (7)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{\max} \quad (8)$$

โดยที่ :  $V_{m_i}^{\min}$ ,  $V_{m_i}^{\max}$  คือ ขอบเขตของแรงดันต่ำสุดและสูงสุด,  $P_{G_i}^{\min}$ ,  $P_{G_i}^{\max}$  คือ ขอบเขตของกำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดและสูงสุด และ  $Q_{G_i}^{\min}$ ,  $Q_{G_i}^{\max}$  คือ ขอบเขตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่ำสุดและสูงสุด ฟังก์ชันปรับใหม่สามารถคิดตามรายละเอียดได้ใน [4]

**6. ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการแบบกาย**

ซึ่งมีลำดับขั้นตอนของการแก้ปัญหา แสดงไว้ดังรูปที่ 3 [5]

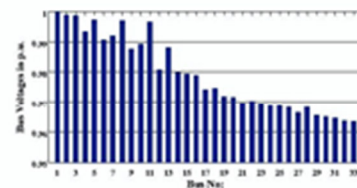


รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของกรหาหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการค้นหาทาง

**7. ผลการจำลองการทำงาน**

ผลการจำลองที่ประยุกต์ใช้ระบบมาตรฐานของ IEEE แบบเรเดียล 33 บัส 32 สาขา ที่การทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้าฐาน 22 kV และ 25 MVA จะได้ดังนี้

1. ก่อนติดตั้ง DG : กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม = 77.0135 kW และ 52.1361 kVar
2. หลังติดตั้ง DG ในบัสที่ 25 : กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม = 48.6791 kW และ 32.5509 kVar โดยที่ค่าถึงงานสูญเสียเชิงจริง (Power Loss Reduction) ของระบบลดลง 36.79 % โดยจะแสดงกราฟผลการจำลองค่าต่าง ๆ ไว้ดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4 ค่าขนาดแรงดันที่บัสต่าง ๆ ของระบบก่อนติดตั้ง DG

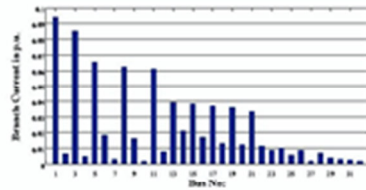


## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศรีวิชัย

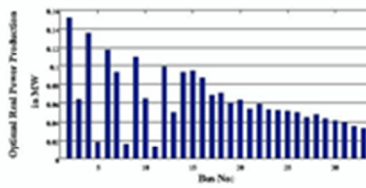
Proceedings of The 5<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

พิจารณากราฟรูปที่ 4 จะพบว่าก่อนติดตั้ง DG ค่าขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบจะลดลงไปจาก 1 p.u. อย่างต่อเนื่อง สาเหตุมาจาก การต่อวงจรสายป้อนหลักแบบเรดิออล กล่าวคือเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดแรงดันตกที่ปลายสายส่ง โดยบัสสุดท้ายจะถูกระบุว่าบัสอ่อนแอ (Weak Bus) ซึ่งมีค่าขนาดแรงดันที่บัสต่ำที่สุด และเป็นบัสที่ไกลที่สุด



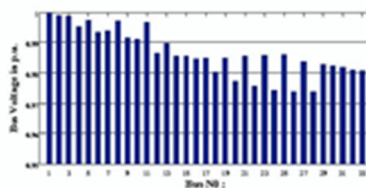
รูปที่ 5 ค่าขนาดกระแสที่สายต่างๆ ของระบบก่อนติดตั้ง DG

พิจารณากราฟรูปที่ 5 จะพบว่าก่อนติดตั้ง DG ค่าขนาดกระแสที่สายต่างๆ ของระบบจะมีค่าแตกต่างกัน สาเหตุมาจากกระแสของโหลดแต่ละสายที่แตกต่างกัน ทำให้กระแสไหลที่ที่โหลดในตัวนำของสายป้อนบางสายอาจมีค่าสูงเกินไป ส่งผลให้สายป้อนแต่ละสายมีขีดความสามารถรับกระแสไฟฟ้าของโหลดได้ลดลง



รูปที่ 6 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมที่สุดของระบบก่อนติดตั้ง DG

พิจารณากราฟรูปที่ 6 จะพบว่าก่อนติดตั้ง DG ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เหมาะสมที่สุดของระบบที่ปลายสายส่งของระบบมีค่าลดลงเช่นกัน สาเหตุมาจากค่าแรงดันที่บัสต่างๆ และค่ากระแสของแต่ละสายซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงซึ่งกันและกัน ดังนั้นจะส่งผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียในระบบที่ปลายสายส่งค่อนข้างมาก



รูปที่ 7 ค่าขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ของระบบหลังติดตั้ง DG

พิจารณากราฟรูปที่ 7 จะพบว่าหลังจากใช้การหาค่าเหมาะที่สุดแบบการค้นหาตำแหน่งติดตั้ง DG ขนาด 1 MW ในบัสที่ 25 แล้วนั้น จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบมีค่าที่ต่ำที่สุด และค่าขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบัสที่อยู่ด้านปลายสายส่งของระบบจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น สาเหตุมาจาก DG จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบจึงช่วยยกระดับค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ให้สูงขึ้น และลดค่ากระแสแต่ละสายทำให้ค่าแรงดันที่บัสต่างๆ ให้กำลังงานสูญเสียในระบบที่ปลายสายส่งลดลงค่อนข้างมาก

## 8. สรุป

บทความนี้มีข้อเสนอการหาค่าเหมาะที่สุดที่เหมาะสมที่สุดของ DG ขนาด 1 MW เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายแบบเรดิออล การวิเคราะห์แบบจำลองก่อนติดตั้ง DG แรกเริ่มกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้านิเออที่ที่สูญเสียรวมในระบบมีขนาด 77.0135 kW และ 52.1361 kVar ดังรูปที่ 6 แต่หลังจากใช้การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการค้นหาตำแหน่งติดตั้ง DG เข้าสู่ระบบในบัสที่ 25 แล้ว ค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้านิเออที่ที่สูญเสียรวมในระบบลดลงเหลือ 48.6791 kW และ 32.5509 kVar ดังรูปที่ 7 ซึ่งพบว่ากำลังงานสูญเสียจริง (Power Loss Reduction) ของระบบลดลง 36.79 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ระบบมีเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเป็แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริงต่อไปในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Golder, Andrew S., "Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies", Master Degree Thesis, Electrical Engineering, Drexel University, October 2006.
- [2] อมรเทพ เทพธำนิภรณ์ และ คุณณัฏฐ์ ภูมิภักดีพิชญ์, "การศึกษาเทคนิคสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบเรดิออล", TREC 2010, 2553, หน้า 155-162.
- [3] รัชช กัดชื่น และ กุลวณิช บัวโพธิ์, "จากนิคการคำนวณการไหลของกำลังในระบบจำหน่าย", EENET 2008, 2552, หน้า 1-13.
- [4] อุทมน อิศน และ ณัฏฐิ กุลรววนิชพนม, "การแก้ปัญหาการกำลังงานสูญเสียในสายส่งที่สูญเสียโดยขาดการไหลกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อแก้ปัญหาชุมชน", EENET-33, 2553, หน้า 81-84.
- [5] ณัฏฐิ กุลรววนิชพนม, "การหาค่าเหมาะที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง", นวัตกรรม นวัตกรรมทางวิศวกรรมศาสตร์, 2554, หน้า 261-284.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอมรเทพ แพทยานันท์
วัน เดือน ปี เกิด	18 ตุลาคม 2516
ที่อยู่	160 ถ.สุขสวัสดิ์ แขวง/เขตราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ 10140
การศึกษา	สำเร็จการศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรไฟฟ้า หจก.สุขสวัสดิ์เครนเซอร์วิส
พ.ศ. 2545 – ปัจจุบัน	