การประเมินกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้ของระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางโดยพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

นายสุทธิพล พฤกษะวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Photovoltaic Hosting Capacity Evaluation of Medium-Voltage Distribution System Considering Battery Energy Storage Systems

Mr. Sutthipol Phrueksawan

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้ของระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางโดยพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่
โดย	นายสุทธิพล พฤกษะวัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วิโรจน์ บัวคลี่)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สุทธิพล พฤกษะวัน : การประเมินกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้ของระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางโดยพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่. (Photovoltaic Hosting Capacity Evaluation of Medium-Voltage Distribution System Considering Battery Energy Storage Systems) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ดร. พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์

ในปัจจุบันภาครัฐบาลมีการสนับสนุนให้ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่น ผลกระทบในด้านของแรงดัน, ผลกระทบด้านค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และผลกระทบด้านค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า การประเมินขีดจำกัดกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้จะช่วยการไฟฟ้าในการพิจารณาว่าระบบจำหน่ายสามารถรองรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เท่าใดโดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เทคโนโลยีที่มักจะติดตั้งควบคู่กับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก็คือระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ระบบจำหน่ายมากกว่าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องการ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะช่วยเก็บกำลังไฟฟ้าไหลย้อน และช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้าให้สามารถตอบสนองต่อระดับความต้องการและการผลิตในระบบไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประเมินกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้ในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางโดยพิจารณาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยใช้เกณฑ์ด้านแรงดัน, เกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของสาย และ เกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าบนโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory ผลลัพธ์จากสถานการณ์จำลองแสดงให้เห็นว่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้ถูกกำหนดโดยเกณฑ์ด้านแรงดันเกินและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ช่วยลดปัญหาแรงดันไฟฟ้าและการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า อย่างไรก็ผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6070347021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: photovoltaics, hosting capacity, overvoltage, line loading, transformer loading, distribution system

Sutthipol Phrueksawan : Photovoltaic Hosting Capacity Evaluation of Medium-Voltage Distribution System Considering Battery Energy Storage Systems. Advisor: Pisitpol Chirapongsananurak, Ph.D.

Nowadays, the government has supported installation of photovoltaic (PV) systems. However, the increase of PV generation will affect the electrical system, such as the impact of voltage, impact of line loading and impact of transformer loading. Evaluating the PV hosting capacity can help the utility to determine how much PV a given distribution system can accommodate without having any impacts on the electrical grid. The technology usually installs with the PV system is a battery energy storage system (BESS). When PV is generating power to distribution circuits more than the load can consume. BESS will help to store reverse power flow and increase the flexibility of the electrical system to respond to demand and supply in the electrical system.

This thesis proposes the method to evaluate PV hosting capacity of a medium-voltage distribution system considering BESS by using three criteria, which are the impact of voltage, impact of line loading and impact of transformer loading on DIgSILENT PowerFactory program. Simulation results show that PV hosting capacity is limited by overvoltage condition and BESS helps reduce the voltage and reverse power flow issue. However, the results depend on the location and size of PV and BESS.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Electrical Engineering	Student's Signature .....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร. พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์จนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์ และ ดร.วิโรจน์ บัวคลี่ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้สละเวลาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา รวมทั้ง รุ่นพี่ และ เพื่อนทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษาและให้ข้อมูลต่างๆ ซึ่งเป็นเบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุทธิพล พฤกษะวัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูปภาพ ..... ญ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 3

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 4

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 ผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 6

2.1.1 ผลกระทบด้านแรงดัน 6

2.1.2 ผลกระทบด้านความสามารถในการรองรับกระแสของอุปกรณ์ 8

2.1.3 ผลกระทบด้านการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า 9

2.2 ความหมายและเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาของ PV hosting capacity 10

2.3 วิธีการคำนวณหา PV hosting capacity ในงานวิจัยในอดีต 12

2.3.1 แบ่งตามตำแหน่งการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.2 แบ่งตามขอบเขตในการพิจารณาคำนวณหา PV hosting capacity 17
2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity 21
2.5 แนวทางในการเพิ่มค่า PV hosting capacity 24
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องมือในการคำนวณหา PV hosting capacity 27
3.1 ข้อมูลที่ต้องใช้ประกอบในการออกแบบเครื่องมือ 27
3.1.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า 27
3.1.2 ข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้า 30
3.1.3 ข้อมูลกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 31
3.1.4 ข้อมูลของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 32
3.2 เกณฑ์ที่ใช้ในการหา PV hosting capacity 34
3.2.1 เกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้า 34
3.2.2 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่ง 35
3.2.3 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า 35
3.3 การสร้างสถานการณ์จำลองของระบบทดสอบ 36
3.4 วิธีคำนวณหาค่า PV hosting capacity 37
3.5 การพิจารณาผลของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 39
3.6 เครื่องมือคำนวณค่า PV hosting capacity บนโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory 43
บทที่ 4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลลัพธ์ 45
4.1 การวิเคราะห์จำนวนครั้งในการหาค่า PV hosting capacity 45
4.2 ผลการคำนวณค่า PV hosting capacity 47
4.2.1 กรณีไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 47
4.2.2 กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า 48
4.2.3 กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง 49
4.2.4 กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง 50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการคำนวณ 51
4.3.1 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่า PV hosting capacity 51
4.3.2 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 64
4.3.3 ปัจจัยของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 66
4.3.4 ปัจจัยของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 67
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 70
5.1 บทสรุปของวิทยานิพนธ์ 70
5.2 ข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์ 71
บรรณานุกรม 72
ประวัติผู้เขียน 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาในการคำนวณหา PV hosting capacity [10] 11

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรอินพุตสำหรับแต่ละสถานการณ์ 16

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์หม้อแปลงในระบบทดสอบ 29

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สายส่ง 30

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 33

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุด 34

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่ง 35

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลง 35

ตารางที่ 4.1 ค่า PV hosting capacity กรณีไม่มีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 47

ตารางที่ 4.2 ค่า PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า 48

ตารางที่ 4.3 ค่า PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง . 49

ตารางที่ 4.4 ค่า PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง 50

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์กรณีค่า PV hosting capacity กรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 1 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า 62

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์กรณีค่า PV hosting capacity กรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 2 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า 63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 กำลังการผลิตติดตั้งสะสมและติดตั้งรายปีของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2545 – 2558 1

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 6

รูปที่ 2.2 ระดับแรงดันก่อนและหลังเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า [11] 7

รูปที่ 2.3 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่งระบบจำหน่ายก่อนมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 8

รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่งระบบจำหน่ายหลังมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 9

รูปที่ 2.5 ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียเปรียบเทียบกับสัดส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ [12] 10

รูปที่ 2.6 ความหมายของ PV hosting capacity 11

รูปที่ 2.7 ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในสหราชอาณาจักร 14

รูปที่ 2.8 วิธีในการเลือกปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 15

รูปที่ 2.9 เลือกใช้วิธีการ Monte-Carlo 17

รูปที่ 2.10 วิธีการหาค่า Hosting capacity โดยพิจารณาระบบไฟฟ้าทั้งแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง 18

รูปที่ 2.11 วิธีหา PV hosting capacity ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ 20

รูปที่ 2.12 วิธีหา PV hosting capacity ในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง 21

รูปที่ 2.13 ค่า Hosting capacity เทียบกับลักษณะเฉพาะของสายส่ง 23

รูปที่ 2.14 ค่า PV hosting capacity แต่ละสายป้อน เปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่แตกต่างกัน 23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.15 กราฟแท่งแสดงปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าสำหรับร้อยละของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และตัวประกอบกำลังที่แตกต่างกัน 24
รูปที่ 2.16 ระดับแรงดันสูงสุดของระบบแรงดันต่ำเปรียบเทียบแต่ละกรณี 25
รูปที่ 2.17 ระดับแรงดันในระบบในกรณีที่ PV ติดตั้งที่กลางสายส่ง 26
รูปที่ 3.1 ระบบทดสอบ 27
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 1 เฟส 28
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 3 เฟส 29
รูปที่ 3.4 ความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบต่อหน่วยของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภท 31
รูปที่ 3.5 ลักษณะกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใน 1 วัน 31
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการทำงานระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 33
รูปที่ 3.7 กรณีมีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่หลายตัว 33
รูปที่ 3.8 การสุ่มแบบเอกรูปเลือกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย 36
รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการสร้างสถานการณ์จำลอง 37
รูปที่ 3.10 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมสำหรับแต่ละสถานการณ์ 37
รูปที่ 3.11 วิธีคำนวณหาค่า PV hosting capacity 39
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณสถานีไฟฟ้า (ต้นสายส่ง) 40
รูปที่ 3.13 พิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณสถานีไฟฟ้า 40
รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณกลางสายส่ง 41
รูปที่ 3.15 พิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณกลางสายส่ง 41
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณปลายสายส่ง 42
รูปที่ 3.17 พิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณปลายสายส่ง 42
รูปที่ 3.18 อินพุตจำนวนครั้งในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity 43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.19 อินพุตสำหรับกรณีติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แล้ว 43
รูปที่ 3.20 ผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณ 44
รูปที่ 3.21 ผลลัพธ์หลังการคำนวณค่า PV hosting capacity 44
รูปที่ 4.1 วิเคราะห์ในการหาค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ 45
รูปที่ 4.2 วิเคราะห์ในการหาค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์ 46
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า PV hosting capacity 52
รูปที่ 4.4 ช่วงค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ ... 53
รูปที่ 4.5 ช่วงค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์ ... 53
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ 54
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าขนาด 1 เมกะวัตต์ 55
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งขนาด 1 เมกะวัตต์ 56
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งขนาด 1 เมกะวัตต์ 57
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์ 58
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าขนาด 2 เมกะวัตต์ 59
รูปที่ 4.12 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งขนาด 2 เมกะวัตต์ 60
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งขนาด 2 เมกะวัตต์ 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.14 ตัวอย่างตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดปัญหาแรงดันเกินกรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 1 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า..... 62

รูปที่ 4.15 ตัวอย่างตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดปัญหาแรงดันเกินกรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 2 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า..... 63

รูปที่ 4.16 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบกรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ . 64

รูปที่ 4.17 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบกรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์ . 65

รูปที่ 4.18 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าส่วนเกิน..... 66

รูปที่ 4.19 แรงดันและกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับในระบบ ก่อนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 68

รูปที่ 4.20 แรงดันและกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับในระบบ หลังติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณกลางสายส่ง..... 68

รูปที่ 4.21 แรงดันและกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับในระบบ หลังติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณสถานีไฟฟ้า..... 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

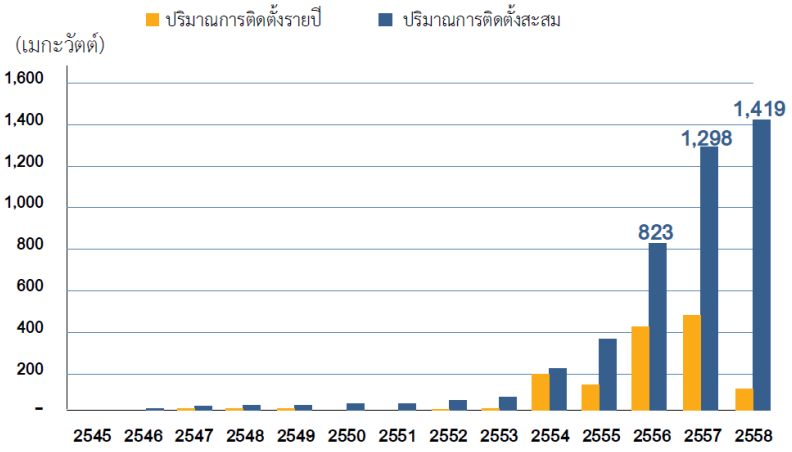
บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญ

จากรายงานสถานภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย พ.ศ. 2557-2558 [1] ซึ่งในปี พ.ศ. 2557 ประเทศไทยมีกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 35,668 เมกะวัตต์ และมีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สะสม 1,298 เมกะวัตต์สูงสุด ในปีเดียวกันมีปริมาณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน 706 เมกะวัตต์ คิดเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด โดยที่การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลมีปริมาณสูงสุด รองลงมาคือ พลังงานแสงอาทิตย์ และก๊าซชีวภาพ ตามลำดับ

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อระบบจำหน่ายมีปริมาณการติดตั้งสะสม 1,269 เมกะวัตต์สูงสุดโดยที่รวมการติดตั้งบนพื้นดินและที่ติดตั้งบนหลังคา ส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระมีปริมาณติดตั้งสะสม 29 เมกะวัตต์สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กำลังการผลิตติดตั้งสะสมและติดตั้งรายปีของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2545 – 2558

ซึ่งปัจจุบันภาครัฐบาล มีแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกพ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015) [2] โดยมีเป้าหมายโดยมีกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ 6,000 เมกะวัตต์ ภายในปี พ.ศ. 2579 และหากว่ามีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยที่ไม่ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นก่อนทำให้เกิดผลกระทบกับระบบไฟฟ้าเดิม อาทิเช่น ผลกระทบในด้านของแรงดัน [3, 4] เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าเปรียบเสมือนมีการเพิ่มแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้แรงดันของระบบไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบ และ ผลกระทบด้านค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่งและหม้อแปลงไฟฟ้า [5, 6] เมื่อมีกำลังไฟฟ้าไหลจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากระบบไฟฟ้าแต่เดิมออกแบบมาเพื่อรองรับการไหลของกำลังไฟฟ้าทิศทางเดียว นั้นก็คือจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า การที่มีการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะทำให้มีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายส่งมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังส่งผลต่อกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ทำให้ต้องทราบถึงขีดความสามารถในการรองรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละจุดเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้า เพื่อประเมินว่าจะไม่ทำให้ระบบไฟฟ้าเดิมได้รับผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน เป็นเทคโนโลยีที่ควบคู่ไปกับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อีกทั้งยังสามารถช่วยเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้เพื่อนำมาใช้เวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูง (peak) [7] สามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้าให้สามารถตอบสนองต่อระดับความต้องการและการผลิตที่มีความผันแปรได้อย่างทันท่วงที อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาความผันแปรของอุปสงค์และอุปทานในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งช่วยเพิ่มความมั่นคงและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการคำนวณหากำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ (PV hosting capacity) ในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางโดยพิจารณาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่โดยใช้เกณฑ์ด้านแรงดัน [8] , เกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง [9] และเกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า [9] ในการกำหนด PV hosting capacity ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนั้นตำแหน่งการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้การสุ่มแบบเอกรูป เนื่องจากการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อาจจะเป็นแบบกระจายตัวทั้งระบบ หรืออาจจะเป็นกลุ่มตามผู้ใช้ไฟฟ้าก็ได้ เพื่อที่จะให้ครอบคลุมถึงโอกาสที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อคำนวณหากำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ (PV hosting capacity) โดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเดิม โดยพิจารณาร่วมกับการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยใช้เกณฑ์ด้านแรงดัน, เกณฑ์พิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ เกณฑ์พิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า ในการพิจารณา

2) เพื่อออกแบบเครื่องมือคำนวณค่า PV hosting capacity และวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1) พิจารณาระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV จำนวน 1 สายป้อน ที่เชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้า 115/22 kV

2) พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าและวิเคราะห์ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

3) พิจารณาผลกระทบต่อระบบในด้านแรงดัน, ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

4) พิจารณาข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าและกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 วันโดยข้อมูลที่ใช้จะเป็นข้อมูลเฉลี่ยราย 1 ชั่วโมง

5) พิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าขนาด 1 เมกะวัตต์ (ความจุ 0.5 เมกกะวัตต์ชั่วโมง) และ 2 เมกะวัตต์ (ความจุ 0.5 เมกกะวัตต์ชั่วโมง)

6) ไม่พิจารณาอุปกรณ์ปรับระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulator) และตัวเก็บประจุ (Capacitor)

7) ไม่พิจารณาค่าใช้จ่ายการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

1) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์
2) ศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
3) ศึกษาข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า
4) ศึกษาวิธีการหากำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ในระบบจำหน่าย
5) ศึกษาวิธีการเพิ่มกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ในระบบจำหน่าย

6) พัฒนาระบบทดสอบจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า

7) ออกแบบวิธีการคำนวณกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ในระบบจำหน่ายบนโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

8) พัฒนาโปรแกรมในการคำนวณหากำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ในระบบจำหน่ายร่วมกับการติดตั้งแบตเตอรี่บนโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

9) ทดสอบโปรแกรมกับระบบทดสอบ

10) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) วิธีการในคำนวณกำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ที่ทำงานร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยที่ไม่เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเดิม

2) เครื่องมือสามารถวิเคราะห์และประเมินผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำงานร่วมกันแบตเตอรี่บนโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

3) ผลการศึกษาสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนสำหรับการจัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท โดยมีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 บทนำ โดยกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 การศึกษารายงาน และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยกล่าวถึงผลกระทบด้านต่างๆที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับ PV hosting capacity ความหมาย เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา วิธีการคำนวณ ปัจจัยที่ส่งผล และแนวทางในการเพิ่มค่า PV hosting capacity

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องมือในการคำนวณหา PV hosting capacity โดยกล่าวถึงข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity วิธีการคำนวณ เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา ขั้นตอนในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity และ เครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลลัพธ์ กล่าวถึงผลที่ได้มาจากการคำนวณได้แก่ ค่า PV hosting capacity และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย นำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

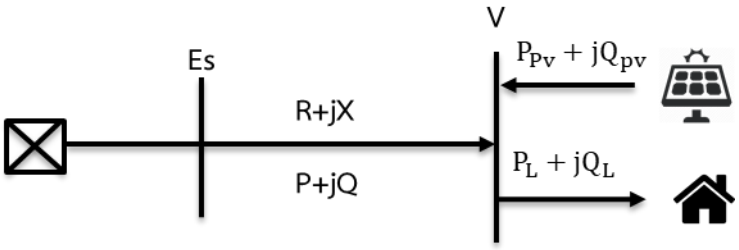
เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอสิ่งที่ได้จากการศึกษารายงานและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในประเทศและต่างประเทศ สรุปผลได้ดังต่อไปนี้

2.1 ผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

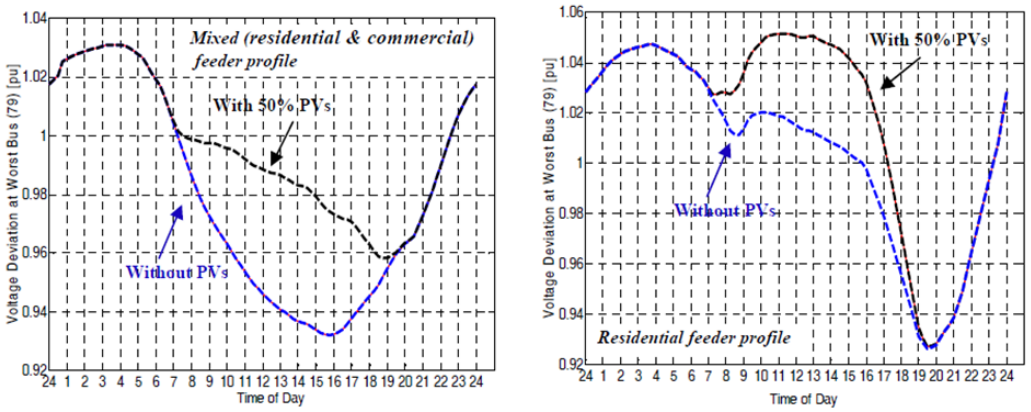
จากศึกษาทบทวนรายงาน ผลงานวิจัย และบทความวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย สามารถแบ่งออกเป็น 3 ปัญหาหลัก[10] ดังต่อไปนี้

2.1.1 ผลกระทบด้านแรงดัน

โดยปกติในระบบที่ไม่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แรงดันในระบบจะค่อยๆ ลดลงตามระยะทางของสายส่งจนมาถึงผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าจะต้องอยู่ช่วงที่การไฟฟ้า นั้นกำหนดตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้นก็คือควบคุมระดับแรงดันให้อยู่ระหว่าง 0.95-1.05 p.u. [8] ในระบบ 22 kV แต่เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาในระบบไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.1 หากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ในขณะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง ถึงแม้จะมีกำลังไฟฟ้าจริงที่เพิ่มจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด แต่ถ้าหากจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงในขณะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำ มีแนวโน้มที่จะทำให้ระดับแรงดันมีค่ามากกว่าช่วงที่มาตรฐานกำหนด จึงก่อให้เกิดปัญหาด้านแรงดันเกินต่อระบบไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 2.2 ระดับแรงดันก่อนและหลังเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า [11]

ผลกระทบของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถแบ่งการพิจารณาแยกออกเป็น 2 ปัจจัย คือ

1) ผลกระทบจากขนาดกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ถ้ามีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.1 จะทำให้แรงดัน ณ จุดที่เชื่อมต่อมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของผลรวมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์กับกำลังไฟฟ้าที่ไหลอยู่ของระบบไฟฟ้า ดังสมการที่ 1

$$\Delta V = (-R\Delta P_{PV} - X\Delta Q_{PV}) + j(-X\Delta P_{PV} + R\Delta Q_{PV}) \quad (1)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดย V คือ แรงดันที่เปลี่ยนแปลง ณ จุดที่เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

R คือ ความต้านทานของสายส่ง

X คือ รีแอคแตนซ์ของสายส่ง

P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

Q_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายออกของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ดังนั้น ขนาดของแรงดัน ณ จุดที่เชื่อมต่ออาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิต และ ทิศทางการไหลของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

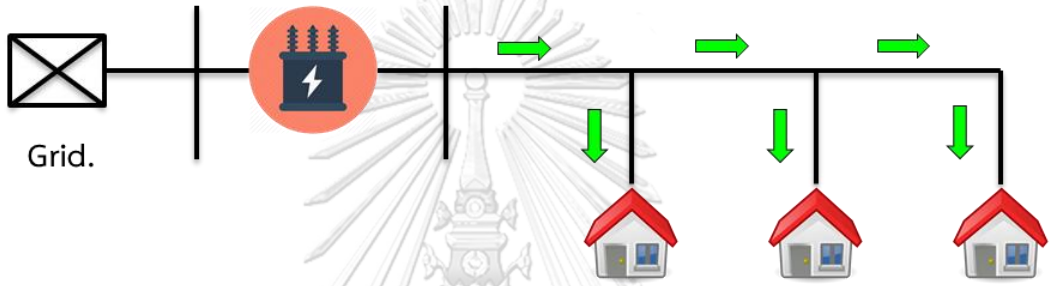
2) ผลกระทบจากตำแหน่งการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

โดยปกติระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะมีตำแหน่งการติดตั้งกระจายตัวตามผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแต่ละตำแหน่งการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีลักษณะความ

ต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าไหลที่ผ่านระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดลักษณะการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากน้อยแตกต่างกัน

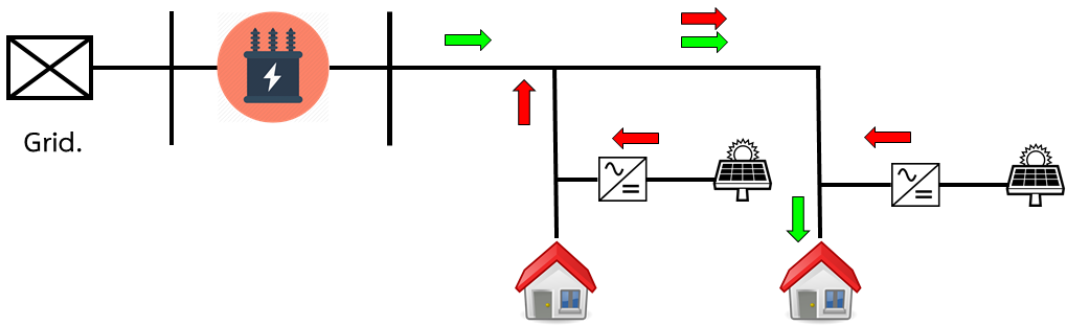
2.1.2 ผลกระทบด้านความสามารถในการรองรับกระแสของอุปกรณ์

ทุกอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เช่น สายส่ง อุปกรณ์ป้องกัน หม้อแปลง เป็นต้น จะมีค่าพิกัดในการรองรับกระแสของอุปกรณ์ ซึ่งโดยปกติระบบไฟฟ้าออกแบบให้สามารถรองรับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งแสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่งระบบจำหน่ายก่อนมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

แต่เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำนวนมาก ทำให้มีกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไหลเข้าสู่ระบบ เนื่องจากระบบไฟฟ้าแต่ก่อนออกแบบสำหรับรองรับการไหลของกระแสไฟฟ้าทิศทางเดียวคือจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า เมื่อมีกระแสไฟฟ้าส่วนเกินจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้มีโอกาสที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจะมีค่ามากเกินกว่าค่าพิกัดที่รองรับได้ของอุปกรณ์ หรืออาจจะเกิดการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไหลย้อนขึ้นไปที่หม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งอาจจะทำให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเกิดการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ ดังที่รูปที่ 2.4



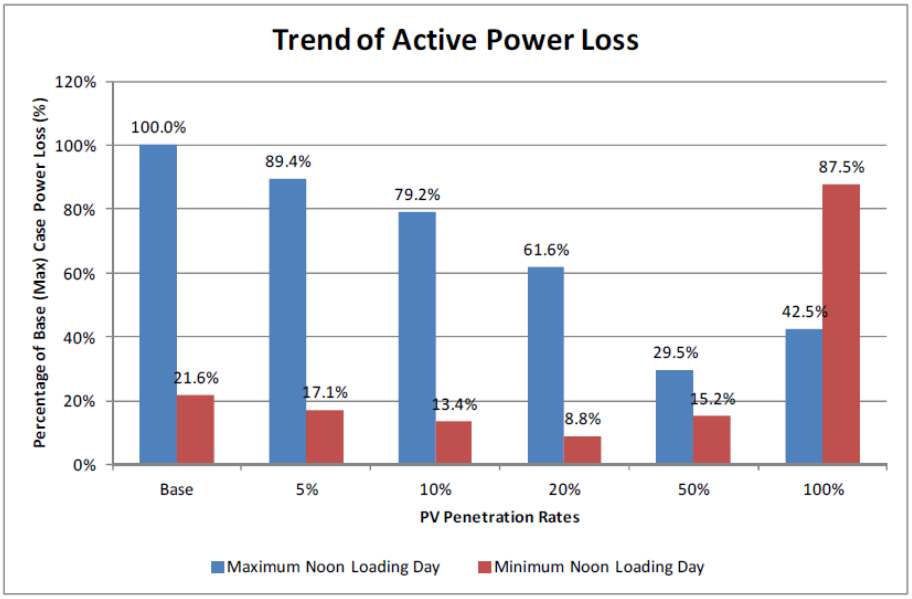
รูปที่ 2.4 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่งระบบจำหน่ายหลังมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

2.1.3 ผลกระทบด้านการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า

โดยระบบไฟฟ้าแต่เดิมมีทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าทิศทางเดียวคือกำลังไฟฟ้าไหลจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไหลไปสู่โหลดหรือผู้ที่ใช้ไฟฟ้า แต่ถ้าระบบมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยจะแบ่งกรณีพิจารณาออกเป็น 2 กรณี โดยกรณีที่ 1 พิจารณาขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงอาจจะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้านั้นมีค่าน้อยเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไหลสู่โหลดหรือผู้ที่ต้องการใช้ไฟฟ้า ส่วนในกรณีที่ 2 พิจารณาขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าในช่วงที่ระบบมีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำอาจจะทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้านั้นมีค่ามากเนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เกินความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าทำให้เกิดการไหลย้อนกลับจำนวนมากผ่านสายส่งระบบจำหน่าย ซึ่งปริมาณการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น โดยถ้าปริมาณการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้ามาก ก็จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบอาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อาจจะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น หรือ ลดลง ก็ได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ตำแหน่งการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และ ปริมาณความต้องการไฟฟ้า ณ ขณะนั้นว่าจะมีมากหรือน้อยเพียงใด เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



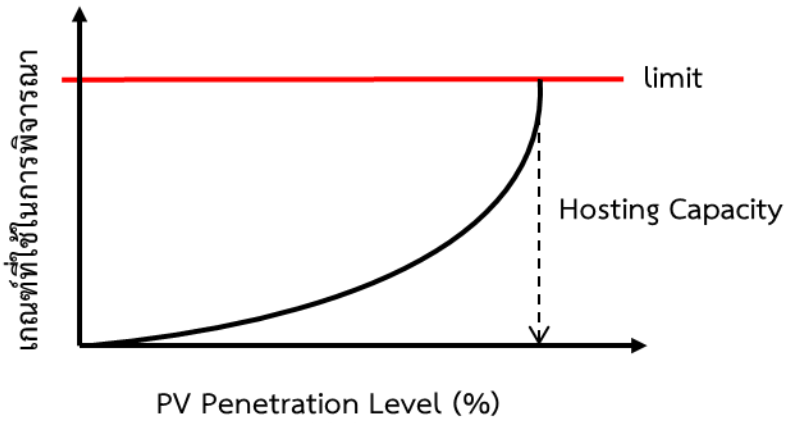
รูปที่ 2.5 ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียเปรียบเทียบกับสัดส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ [12]

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าเมื่อสัดส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นจาก 0-50 เปอร์เซ็นต์แนวโน้มของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียมีปริมาณลดลงเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยจ่ายโหลดหรือผู้ใช้ไฟฟ้าแทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้ามากกว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง แต่เมื่อสัดส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นถึง 100 เปอร์เซ็นต์ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับและส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับสัดส่วนอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 ความหมายและเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาของ PV hosting capacity

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถนิยามความหมายของค่า PV hosting capacity คือกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้ โดยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ หรือ ทำให้ระบบได้รับความเสียหาย ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจะเป็นเกณฑ์ในการกำหนดกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่รองรับได้ [10],[13] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความหมายของ PV hosting capacity

ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาถึงผลกระทบต่อระบบนั้นมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละงานวิจัย โดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ เช่น เกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้า เกณฑ์ด้านค่าพิกัด(Loading) เกณฑ์ด้านระบบป้องกัน และ เกณฑ์ด้านฮาร์โมนิก เป็นต้น และมีรายละเอียดเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาในการคำนวณหา PV hosting capacity ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาในการคำนวณหา PV hosting capacity [10]

เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา		ความหมาย	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณา
แรงดัน	แรงดันเกิน	แรงดันที่สายส่ง	≥ 1.05 p.u. ณ ฝั่งปฐมภูมิ ≥ 1.05 p.u. ณ ฝั่งทุติยภูมิ
	การเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้า	การเบี่ยงเบนแรงดันจากไม่มี PV (no PV) ถึงติดตั้ง PV ทั้งหมด (full PV)	≥ 3% ณ ฝั่งปฐมภูมิ ≥ 5% ณ ฝั่งทุติยภูมิ ≥ 1/2 แบนด์วิดท์ที่อุปกรณ์ปรับระดับ
	แรงดันไม่สมดุล	การเบี่ยงเบนแรงดันเฟสจากค่าเฉลี่ย	≥ 3% ของแรงดันเฟส
ค่าพิกัด (Loading)	ความร้อน	ค่าพิกัดของอุปกรณ์	≥ 100% พิกัดปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ระบบป้องกัน	อุปกรณ์กระแสผิดพร่อง	การเบี่ยงเบนของกระแสผิดพร่อง ณ ตำแหน่งแต่ละอุปกรณ์	≥ เพิ่มขึ้น 10%
	การตัดวงจรของเบรกเกอร์แบบซิมพาเทติก	กระแสลำดับที่ศูนย์ของเบรกเกอร์เนื่องจากความผิดพร่องต้นทาง	≥ 150A
	การลดลงของช่วงเบรกเกอร์	การเบี่ยงเบนของกระแสผิดพร่องในเบรกเกอร์สำหรับสายป้อนที่เกิดกระแสลัดวงจร	≥ ลดลง 10%
	การทำงานร่วมระหว่างเบรกเกอร์กับฟิวส์	การเพิ่มขึ้นของกระแสผิดพร่องที่ฟิวส์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงในกระแสผิดพร่องของเบรกเกอร์	≥ เพิ่มขึ้น 100A
	การป้องกันการจ่ายไฟในภาวะแยกโดด	เปอร์เซ็นต์ของโหลดต่ำสุด	≥ 50 %

2.3 วิธีการคำนวณหา PV hosting capacity ในงานวิจัยในอดีต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิธีการคำนวณหาค่า PV hosting capacity นั้นสามารถหาได้หลายวิธีแต่ก็ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ยกตัวอย่างเช่น ข้อมูลความเข้มแสงแต่ละพื้นที่ที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์, ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายเป็นระยะเวลา 1 วัน หรือการใช้ระบบทดสอบที่เป็นระบบไฟฟ้าจริง โดยระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันอาจทำให้ได้ค่า PV hosting capacity ที่แตกต่างกันตามจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า, ปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า, ลักษณะพฤติกรรมในการใช้ไฟฟ้า และ ระยะทางของสายส่ง เป็นต้น รวมทั้งเกณฑ์ที่เลือกใช้ในการกำหนดค่า PV hosting capacity หรือแม้กระทั่ง วิธีที่เลือกใช้ในการออกแบบการเชื่อมต่อหรือติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งแต่ละปัจจัยที่กล่าวมานั้นอาจทำให้คำนวณค่า PV hosting capacity ได้ไม่เท่ากัน โดยสามารถแบ่งวิธีการคำนวณหา PV hosting capacity โดยใช้เกณฑ์ต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 แบ่งตามตำแหน่งการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

หากพิจารณาตำแหน่งการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งวิธีการคำนวณหา PV hosting capacity ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. กำหนดตำแหน่งคงที่ของการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Fix PV location) โดยบทความที่ใช้วิธีนี้ได้แก่

บทความวิจัย [4] ได้นำเสนอวิธีในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ในบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงอย่างเดียว โดยคำนึงถึงผลกระทบของระบบทั้งหมด 3 เกณฑ์ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบน (voltage deviation), ขีดจำกัดกระแสของสายส่ง (cables current limits) และ ค่าพิกัดของหม้อแปลง (transformer nominal value) โดยออกแบบสถานการณ์จำนวน 3 สถานการณ์ คือ

1) ผู้ใช้ไฟฟ้าติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทุกราย

2) ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใกล้หม้อแปลงแรงดันต่ำ

3) ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ปลายสายส่งแรงดันต่ำ

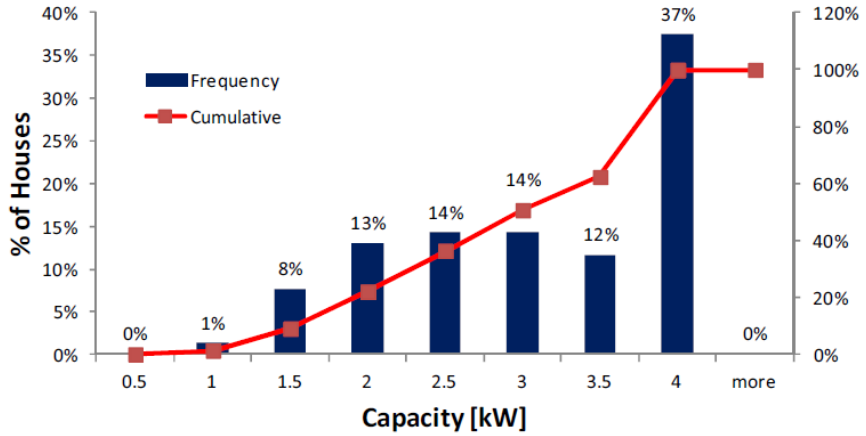
จากนั้นจึงคำนวณหากำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้โดยไม่ส่งผลกระทบกับระบบไม่ว่าจะใช้เกณฑ์ใดเกณฑ์หนึ่งจาก 3 เกณฑ์ที่กล่าวข้างต้น โดยนิยามค่า PV hosting capacity เป็นสัดส่วนของ PV penetration ซึ่งก็คือปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์หารด้วยปริมาณความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบไฟฟ้า จากผลลัพธ์ของบทความจะเห็นได้ว่า สถานการณ์ที่ 2 จะได้ PV penetration มากที่สุดเมื่อเทียบกับอีก 2 กรณีคือ 205 เปอร์เซ็นต์โดยเกณฑ์ที่เป็นตัวกำหนด PV hosting capacity คือ เกณฑ์ด้านค่าพิกัดของหม้อแปลง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 95.2 เปอร์เซ็นต์

2. สุ่มตำแหน่งการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Random PV location) โดยบทความที่ใช้วิธีนี้ได้แก่

บทความวิจัย [5] ได้นำเสนอวิธีการประเมินผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งเราสามารถนำแนวคิดนี้ไปใช้ในการหาค่า Hosting capacity ได้ จุดเด่นของบทความนี้คือใช้ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าของโหลดแต่ละกลุ่ม และข้อมูลสถิติของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละขนาด นอกจากนี้บทความใช้วิธี Monte Carlo ในการสร้างสถานการณ์จำลองต่างๆ เพื่อให้ครอบคลุมผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า โดยบทความนี้ได้คำนึงถึงผลกระทบต่อระบบทั้งหมด 2 ผลกระทบได้แก่ แรงดันเกิน (voltage rise) และความจุความร้อน (thermal capacity) ซึ่งวิธีการประเมินผลกระทบเริ่มจากกำหนดให้ 1 สายป้อน มี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

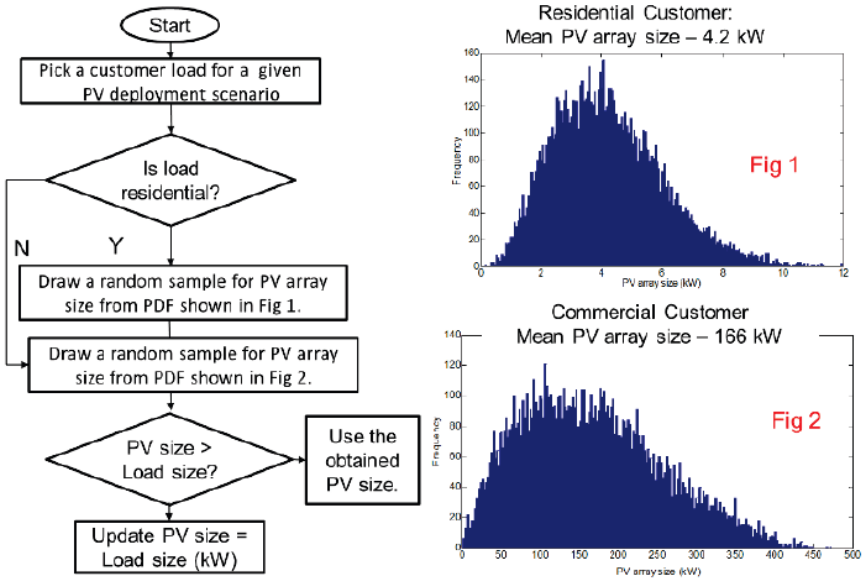
ผู้ใช้ไฟฟ้า N ราย และมี penetration level (ในบทความนี้นิยาม penetration level เป็นร้อยละของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์) จากนั้นทำการสุ่มเลือกข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าจำนวน N ข้อมูลจากกลุ่มข้อมูลของลักษณะการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด ใส่ข้อมูลลงผู้ใช้ไฟฟ้า N ราย และทำการสุ่มกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จากรูปที่ 2.7 หลังจากนั้นคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า เพื่อพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีโดยจะวนทำซ้ำตั้งแต่แรกเริ่มจาก penetration level เท่ากับ 0 จนถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยแต่ละ penetration level จะทำซ้ำ 100 รอบสำหรับแต่ละสายป้อน



รูปที่ 2.7 ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในสหราชอาณาจักร

บทความวิจัย [13] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหา PV hosting capacity โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเฉพาะด้านแรงดันโดยมีเกณฑ์พิจารณา 3 เกณฑ์ได้แก่ แรงดันเกิน (overvoltage), แรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบน (voltage deviation) และ แรงดันไม่สมดุล (voltage unbalance) จุดเด่นของบทความนี้คือใช้การสุ่มเลือกผู้ใช้ไฟฟ้าแล้วพิจารณาว่าผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทบ้านพักที่อยู่อาศัยหรือเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทเชิงพาณิชย์เพื่อจะสุ่มเลือกปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละขนาดที่มีกลุ่มข้อมูลอยู่โดยแต่ละขนาดจะมีความน่าจะเป็นในการถูกเลือกไม่เท่ากัน และจะมีปริมาณกำลังผลิตที่แตกต่างกันในแต่ประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งบทความนี้แบ่งการทดลองออกเป็นทั้งหมด 100 สถานการณ์ ซึ่งแต่ละสถานการณ์จะมี penetration level ตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยเพิ่มขึ้นทีละ 2 เปอร์เซ็นต์ (ในบทความนี้นิยาม penetration level เป็นเปอร์เซ็นต์ของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



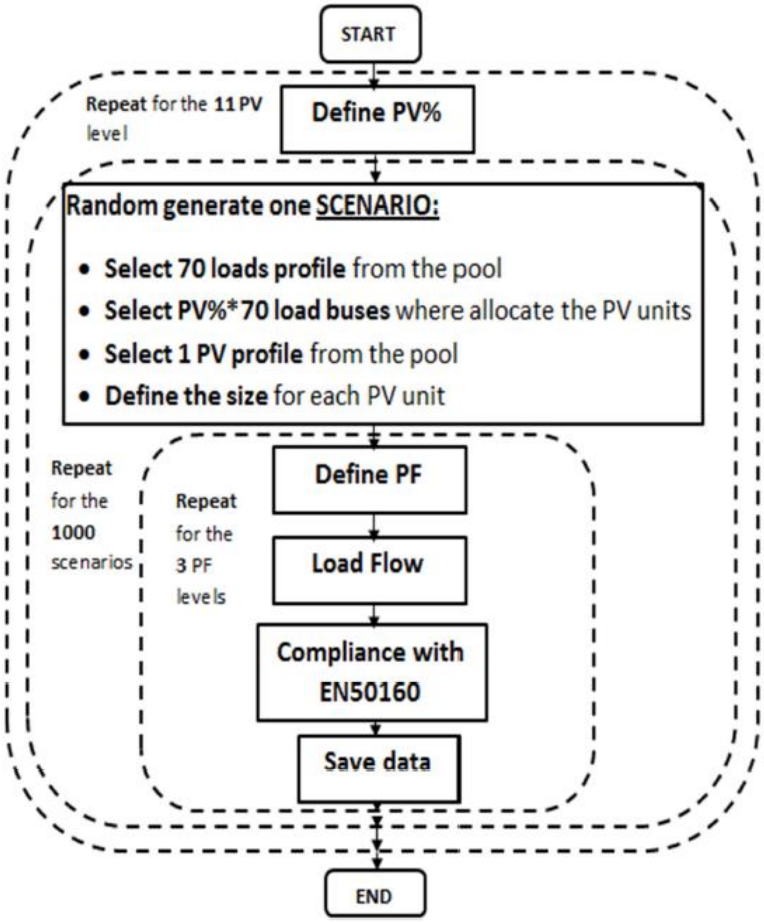
รูปที่ 2.8 วิธีในการเลือกปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

บทความวิจัย [14] นำเสนอแนวคิดในการออกแบบสถานการณ์เพื่อศึกษาผลกระทบด้านแรงดันเกินของระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบแรงดันต่ำของสหราชอาณาจักรโดยแนวคิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหา PV hosting capacity โดยใช้วิธี Monte Carlo โดยในบทความนี้ศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีค่าตัวประกอบกำลัง 3 ค่า คือ 1, 0.95 และ 0.975 (ในกรณีรับกำลังไฟฟ้าเสมือน) และพิจารณาค่า penetration level ตั้งแต่ 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์โดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ (ในบทความนี้นิยาม penetration level เป็นร้อยละของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์) โดยมีข้อมูลที่ใช้สำหรับออกแบบสถานการณ์จำนวน 4 ข้อมูล ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งข้อมูลที่ใช้จะแตกต่างกันไปสำหรับแต่ละค่า penetration level และ ตัวประกอบกำลัง จำลองสถานการณ์ทดสอบ 1000 สถานการณ์ จากข้อมูล ตารางที่ 2.2 โดยแต่ละสถานการณ์จะมีค่า penetration level แตกต่างกัน 11 ระดับ และค่าตัวประกอบกำลังที่แตกต่างกัน 3 ค่า และนำสถานการณ์ที่ได้คำนวณหา PV hosting capacity ดังรูปที่ 2.9

ตารางที่ 2.2 ตัวแปรอินพุตสำหรับแต่ละสถานการณ์

ตัวแปรอินพุต	เซตของขนาด	อินพุตโดเมน	หลักเกณฑ์
เซตของขนาดระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	70 x ร้อยละของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	ตั้งแต่ 0.5 ถึง 4kWp	สุ่มโดยสอดคล้องกับสถิติของสหราชอาณาจักร
เซตของโปรไฟล์การแผ่รังสี	1	กลุ่มของโปรไฟล์จริง 88 โปรไฟล์	การสุ่มแบบเอกรูป
เซตของตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	70 x ร้อยละของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	ผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวน 70	การสุ่มแบบเอกรูป
เซตของโปรไฟล์โหลด	70	กลุ่มของโปรไฟล์ 1000 โปรไฟล์	การสุ่มแบบเอกรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.9 เลือกใช้วิธีการ Monte-Carlo

2.3.2 แบ่งตามขอบเขตในการพิจารณาคำนวณหา PV hosting capacity

หากพิจารณาขอบเขตในการคำนวณหา PV hosting capacity สามารถแบ่งวิธีการคำนวณหา PV hosting capacity ได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. คำนวณหา PV hosting capacity โดยพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

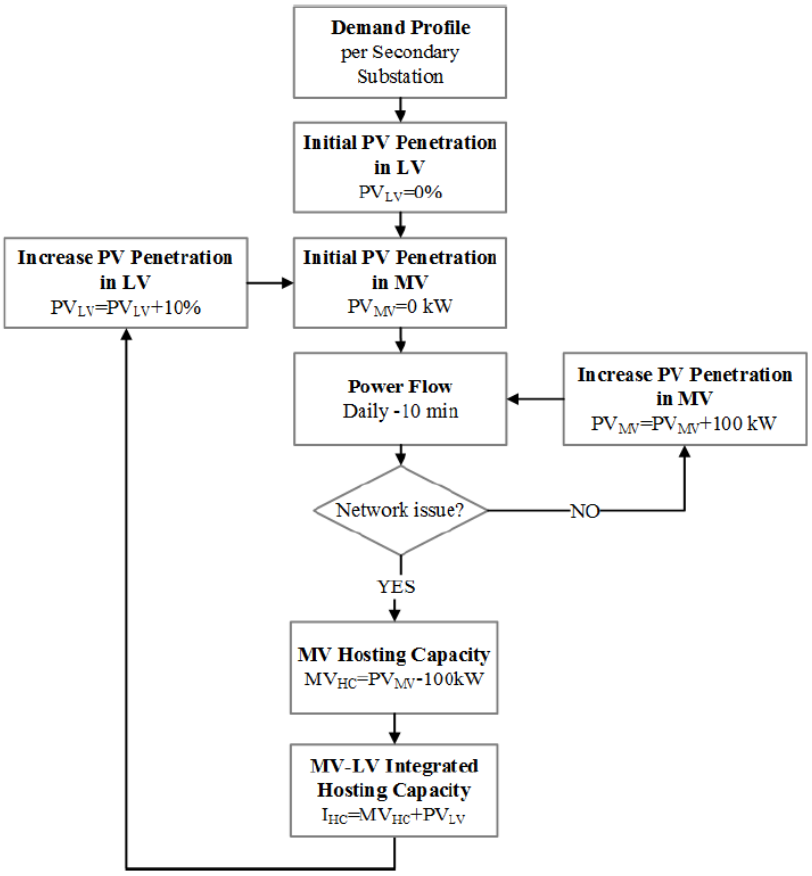
บทความวิจัยส่วนมากจะพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ เช่น บทความวิจัย [10]-[12] พิจารณาในระดับแรงดันไฟฟ้า 400 โวลต์ที่กล่าวไปในหัวข้อ 2.3.1 เนื่องจากบทความวิจัยดังกล่าวพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดอยู่ในหน่วยกิโลวัตต์

2. คำนวณหา PV hosting capacity โดยพิจารณาระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันปานกลางร่วมกัน โดยบทความวิจัยที่พิจารณาระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันปานกลางร่วมกัน ได้แก่

บทความวิจัย [15] ได้นำเสนอวิธีการหา PV hosting capacity โดยพิจารณาระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำและแรงดันปานกลางร่วมกัน โดยพิจารณาเกณฑ์ 2 เกณฑ์ก็คือ แรงดันเกิน (overvoltage)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และ ความร้อนของหม้อแปลง (transformer thermal) สัญลักษณ์ของตัวแปรที่ใช้ในวิธีการหา PV hosting capacity ของบทความนี้โดยจะมีทั้งหมด 4 สัญลักษณ์ PV_{LV} หมายถึง ร้อยละของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ, PV_{MV} หมายถึงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง, MV_{HC} เป็นค่า PV hosting capacity ในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง และ I_{HC} หมายถึงค่า PV hosting capacity ในระบบไฟฟ้าโดยพิจารณาร่วมกันทั้งแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง ขั้นตอนการคำนวณหา PV hosting capacity เริ่มต้นให้ PV_{LV} และ PV_{MV} เท่ากับ 0 แล้วทำการเพิ่ม PV_{MV} ครั้งละ 100 กิโลวัตต์ จนกระทั่งเกิดผลกระทบต่อระบบ จากนั้นทำการลด 100 กิโลวัตต์ เพื่อจะได้ค่า PV_{MV} สูงสุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า จากนั้นพิจารณารวมกับค่า PV_{LV} ซึ่งจะเพิ่มทีละ 10 เปอร์เซ็นต์ แล้วจะให้ PV_{MV} เท่ากับ 0 อีกครั้งเพื่อหาค่า PV_{MV} สูงสุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า จากนั้นนำค่า PV_{LV} และ PV_{MV} รวมกันจะได้ค่า I_{HC} ดังรูปที่ 2.10

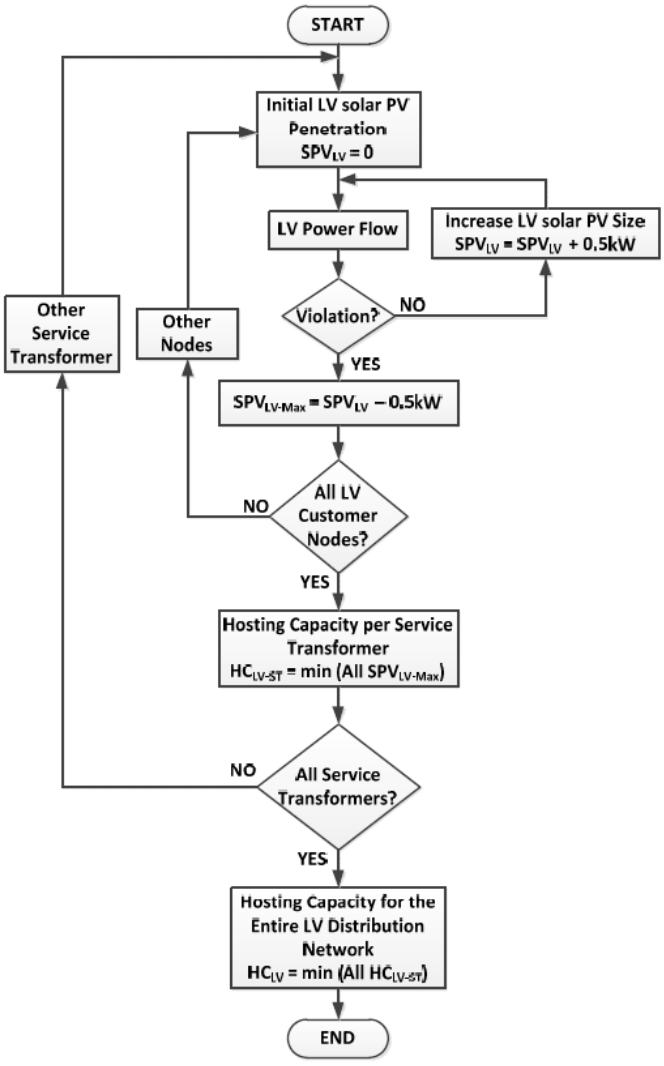


รูปที่ 2.10 วิธีการหาค่า Hosting capacity โดยพิจารณาระบบไฟฟ้าทั้งแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง

บทความวิจัย [16] ได้นำเสนอวิธีการหา PV hosting capacity โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือจะหา PV hosting capacity โดยพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ และพิจารณาระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางโดยคำนึงถึงผลกระทบจากระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำด้วย ซึ่งบทความนี้ใช้เกณฑ์ในการพิจารณา 2 เกณฑ์ก็คือ แรงดันเกิน (overvoltage) และ ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง (line loading) ในบทความนี้จะแยกวิธีการคำนวณค่า PV hosting capacity ออกเป็น 2 วิธีตามแรงดันระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

สำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำจะมีขั้นตอนในการหา PV hosting capacity เริ่มจากกำหนดให้ค่า PV penetration ของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (SPV_{LV}) หรือปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้ากับผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ โดยจะคำนวณหาค่า $SPV_{LV\text{-}Max}$ ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อในระบบในด้านแรงดันเกิน (overvoltage) และ ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง (line loading) โดยพิจารณาทุกจุดที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระบบแรงดันต่ำ ซึ่งจะได้ $HC_{LV\text{-}ST}$ ซึ่งเป็นค่า $SPV_{LV\text{-}Max}$ ที่น้อยที่สุดเทียบกับค่า $SPV_{LV\text{-}Max}$ ตัวอื่นที่รับไฟฟ้าจากหม้อแปลงตัวเดียวกัน แล้วคำนวณจนกระทั่งครบหม้อแปลงทุกตัวที่จ่ายโหลดอยู่ในระบบก็จะได้ค่า HC_{LV} เป็นค่า $HC_{LV\text{-}ST}$ ที่น้อยที่สุดซึ่งหมายถึงเป็นค่า PV hosting capacity ของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ดังรูปที่ 2.11

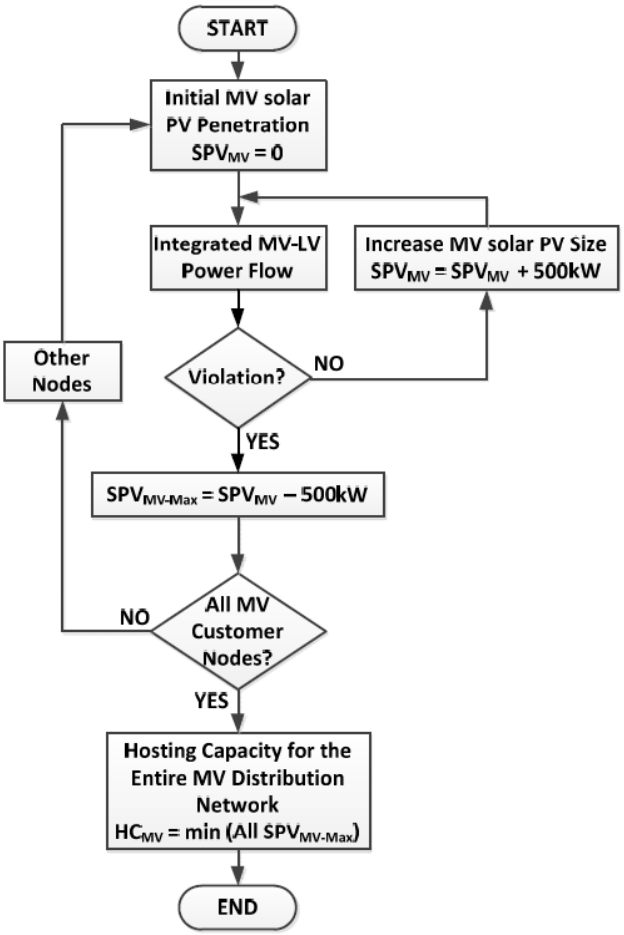
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.11 วิธีหา PV hosting capacity ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางจะมีขั้นตอนในการหา PV hosting capacity เริ่มจากกำหนดให้ค่า PV penetration ของระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (SPV_{MV}) หรือปริมาณกำลังผลิดติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้ากับผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง โดยจะคำนวณหาค่า $SPV_{MV\text{-}Max}$ ที่ไม่ส่งผลกระทบต่อในระบบในด้านแรงดันเกิน (overvoltage) และ ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง (line loading) โดยคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้ารวมกันระหว่างระบบแรงดันต่ำและแรงดันปานกลาง และพิจารณาทุกจุดที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าเชื่อมต่อระบบแรงดันปานกลาง เมื่อคำนวณครบทุกตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้าจะได้ HC_{MV} ซึ่งค่า $SPV_{MV\text{-}Max}$ ที่น้อยที่สุดเทียบกับ $SPV_{MV\text{-}Max}$ ตำแหน่งอื่นในระบบแรงดันปานกลาง จะเป็นค่า PV hosting capacity ของระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วิธีหา PV hosting capacity ในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity

ในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity เกณฑ์ที่กำหนดขึ้นเพื่อจำกัดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า เช่น เกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น จะเป็นตัวกำหนดค่า PV hosting capacity หากกำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการจำกัดผลกระทบที่เกิดขึ้นต่างกันจะทำให้ได้ค่า PV hosting capacity ที่แตกต่างกันด้วย นอกเหนือจากเกณฑ์ที่กล่าวไปข้างต้นแล้วยังมีปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity ดังต่อไปนี้

1) ตำแหน่งของการเชื่อมต่อและปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากผลลัพธ์ที่ได้จากบทความวิจัย [4] ซึ่งเปรียบเทียบตำแหน่งของการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ 3 กรณีคือ

- กรณีผู้ใช้ไฟฟ้าติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทุกราย จะได้ค่าระดับ penetration อยู่ที่ 129.6 เปอร์เซ็นต์ซึ่งถูกกำหนดโดยเกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบน (voltage deviation)

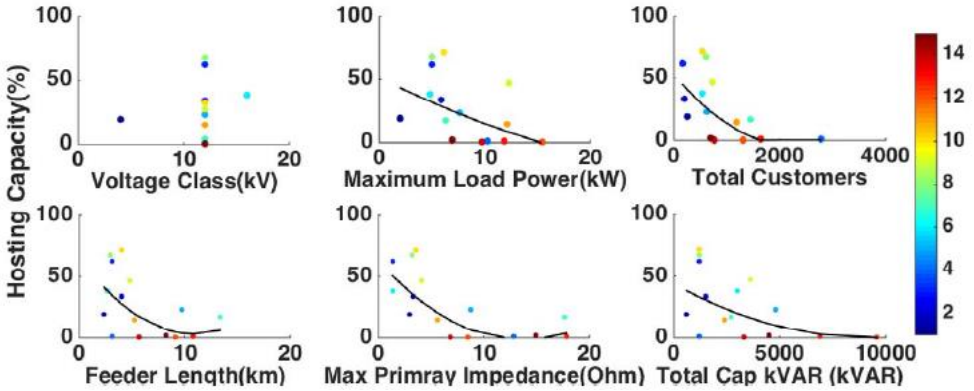
- กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งใกล้หม้อแปลงแรงดันต่ำ จะได้ค่าระดับ penetration อยู่ที่ 205 เปอร์เซ็นต์ซึ่งถูกกำหนดโดยเกณฑ์ค่าพิกัดของหม้อแปลง (transformer nominal value)

- กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งที่ปลายสายส่งแรงดันต่ำ จะได้ค่าระดับ penetration อยู่ที่ 81 เปอร์เซ็นต์ซึ่งถูกกำหนดโดยเกณฑ์ขีดจำกัดของกระแสสายส่ง (cable current limits)

จากผลลัพธ์ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีผลต่อ PV hosting capacity เช่น ถ้าติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งที่ปลายสายส่งจะส่งผลกระทบในด้านขีดจำกัดของกระแสสายส่งเนื่องจากในระบบไฟฟ้าส่วนมากบริเวณปลายสายที่เชื่อมต่อกับผู้ใช้ไฟฟ้าจะมีขนาดสายส่งที่เล็กกว่าเมื่อเทียบกับสายส่งบริเวณอื่น ทำให้ค่าพิกัดกระแสมีค่าน้อยกว่า เป็นต้น ซึ่งแต่ละตำแหน่งของการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จะส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่แตกต่างกันทำให้เกณฑ์ที่เป็นตัวกำหนดค่า PV hosting capacity แตกต่างกันรวมทั้งได้ค่า PV hosting capacity ที่ไม่เท่ากันในแต่ละตำแหน่ง

2) ลักษณะเฉพาะของสายส่ง หรือ พารามิเตอร์ของสายส่ง

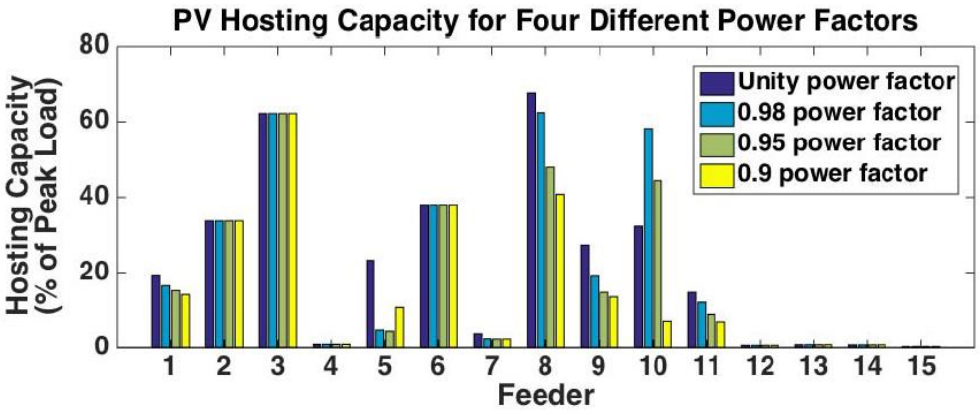
จากผลลัพธ์ที่ได้จากบทความวิจัย [17] จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์และระยะทางของสายส่งมีผลต่อค่า PV hosting capacity ดังรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าเมื่อสายส่งมีความยาวมากขึ้นค่า PV hosting capacity จะมีแนวโน้มลดลง และ ถ้าสายส่งมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ค่า PV hosting capacity จะมีแนวโน้มลดลง แต่ก็ยากจะสรุปความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะเฉพาะของสายส่งกับค่า PV hosting capacity ให้ชัดเจนเนื่องจากในบทความวิจัยนี้ทดสอบสายส่งเพียง 15 สายส่ง ผลลัพธ์ที่ได้อาจจะแตกต่างกันตามลักษณะเฉพาะของสายส่งของระบบไฟฟ้าแต่ละระบบหรือต่างกันตามเกณฑ์ผลกระทบของระบบไฟฟ้าที่กำหนดค่า PV hosting capacity แต่ปัจจัยนี้แก้ไขหรือปรับเปลี่ยนได้ยากเพราะเป็นโครงสร้างที่มีอยู่แล้วและอาจจะไม่คุ้มค่า



รูปที่ 2.13 ค่า Hosting capacity เทียบกับลักษณะเฉพาะของสายส่ง

3) ค่าตัวประกอบกำลังของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

บทความวิจัย [17] พิจารณาค่าตัวประกอบกำลังของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด 4 ค่า คือ 1, 0.98, 0.95 และ 0.9 (leading) ซึ่งจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละค่าตัวประกอบกำลังจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อระดับแรงดันไฟฟ้า เช่น จากรูปที่ 2.14 สายส่งที่ 1, 7, 8, 9, 11 จะมีค่า PV hosting capacity ลดลง เมื่อตัวประกอบกำลังมีค่าลดลงเนื่องจากยิ่งตัวประกอบกำลังน้อยลง ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) เข้าสู่ระบบได้มากยิ่งขึ้น แต่ในสายส่งที่ 5 จะเห็นได้ว่ามีค่า PV hosting capacity สูงที่สุดเมื่อตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 อาจจะเป็นผลเนื่องจากเมื่อมีกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดผลกระทบด้านแรงดันเกินในระบบ เป็นต้น เพราะฉะนั้นค่าตัวประกอบกำลังของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีผลต่อค่า PV hosting capacity



รูปที่ 2.14 ค่า PV hosting capacity แต่ละสายป้อน เปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังที่แตกต่างกัน

2.5 แนวทางในการเพิ่มค่า PV hosting capacity

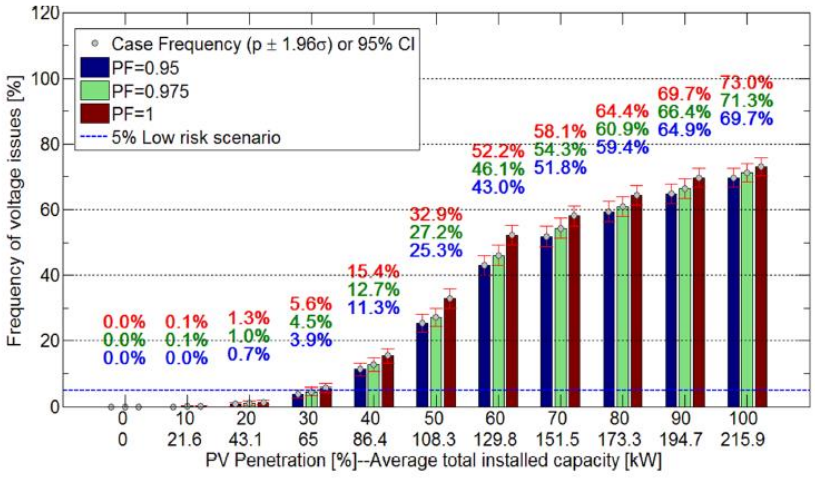
แนวทางหรือวิธีการในการเพิ่มค่า PV hosting capacity สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) อุปกรณ์ปรับเปลี่ยนแท็ปของหม้อแปลงขณะมีโหลด (On-Load Tap Changer Transformers)

บทความวิจัย [18] ได้ศึกษาการเพิ่มค่า PV hosting capacity โดยใช้ OLTC ของหม้อแปลง ซึ่งจากบทความทำให้ทราบว่า OLTC สามารถช่วยลดปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำทำให้ค่า PV hosting capacity เพิ่มขึ้นได้ แต่วิธีการเปลี่ยนแท็ปหม้อแปลงไม่สามารถทำได้บ่อย เนื่องจากส่งผลต่อการบำรุงรักษาหม้อแปลง

2) การรับกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Var absorption)

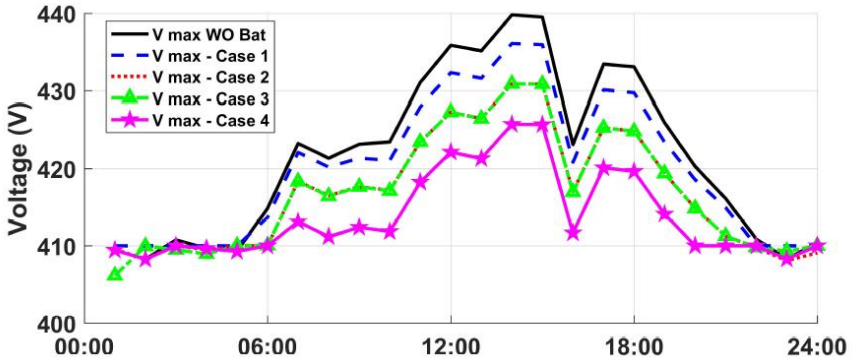
บทความวิจัย [14],[18] ได้ศึกษาการเพิ่ม PV hosting capacity โดยพิจารณากรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเปรียบเทียบกับกรณีที่ควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์รับกำลังไฟฟ้าเสมือนด้วย บทความนี้พิจารณาถึงผลกระทบต่อระบบในด้านแรงดันไฟฟ้า [14],[18] ค่าพิกัดของหม้อแปลง และ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย [18] ซึ่งจากผลลัพธ์ทำให้ทราบว่ากรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถรับกำลังไฟฟ้าเสมือนช่วยลดปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าทำให้ค่า PV hosting capacity เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟแท่งแสดงปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าสำหรับร้อยละของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และตัวประกอบกำลังที่แตกต่างกัน

3) ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System : BESS)

บทความวิจัย [7] ได้กล่าวถึงผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งทำให้เกิดปัญหากำลังไฟฟ้าไหลย้อนและแรงดันเกิน และได้นำเสนอวิธีการแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้นโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ โดยควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อปรับปรุงแรงดันไฟฟ้า โดยติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง แต่ละกรณีจะมีสัดส่วนขนาดของแบตเตอรี่กับขนาดของคอนเวอร์เตอร์ที่แตกต่างกันและเปรียบเทียบกรณีที่ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อที่จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนและควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าโดยรับกำลังไฟฟ้าที่ไหลย้อน ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.16 จะเห็นว่ากรณีที่ไม่มีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (กรณี WO Bat) จะมีแรงดันไฟฟ้าในระบบจะสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (กรณี 1-4) ซึ่งมีการควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนช่วยลดแรงดันไฟฟ้าในระบบทำให้สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น

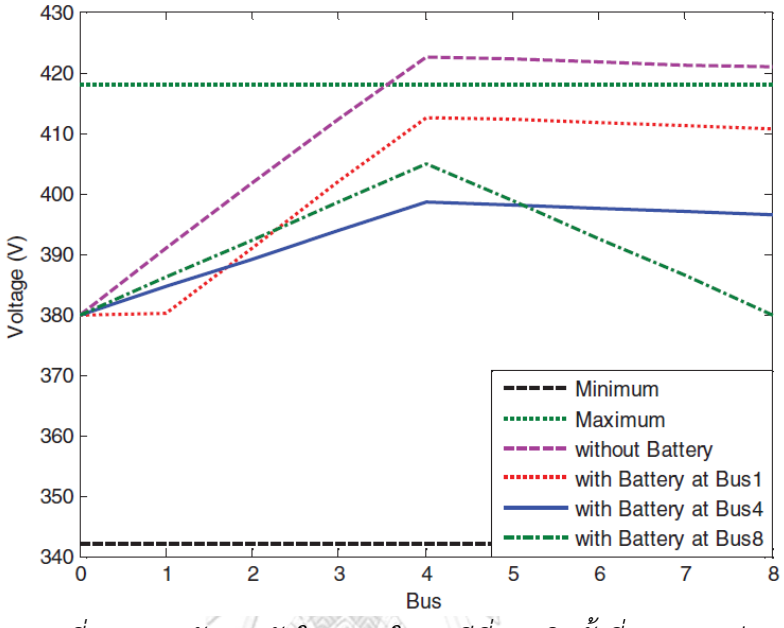


รูปที่ 2.16 ระดับแรงดันสูงสุดของระบบแรงดันต่ำเปรียบเทียบแต่ละกรณี

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทความวิจัย [19] ได้กล่าวถึงการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อช่วยลดปัญหาแรงดันเกินจากการที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาในระบบไฟฟ้า ในบทความนี้ได้พิจารณาแบ่งการพิจารณาตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ออกเป็น 4 ตำแหน่ง คือ ต้นสายส่ง, กลางสายส่ง, ปลายสายส่ง และ กระจายติดตั้งตามผู้ใช้ไฟฟ้า ส่วนการพิจารณาตำแหน่งของแบตเตอรี่แบ่งออกเป็น 3 ตำแหน่งคือ ต้นสายส่ง, กลางสายส่ง และ ปลายสายส่ง ผลลัพธ์จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งใดก็ตาม การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะช่วยลดแรงดันในระบบไฟฟ้า อาทิเช่น ในกรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งที่กลางสายส่งเปรียบเทียบระดับแรงดันในระบบก่อนและหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ตามตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งถ้าใช้เกณฑ์ด้านแรงดันเป็นเกณฑ์

พิจารณาในการกำหนดค่า PV hosting capacity การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ก็จะเป็นส่วนช่วยในการลดแรงดันในระบบ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า PV hosting capacity มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.17 ระดับแรงดันในระบบในกรณีที่ PV ติดตั้งที่กลางสายส่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องมือในการคำนวณหา PV hosting capacity

เครื่องมือในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity นั้นถูกพัฒนาบนโปรแกรม DIgSILENT Powerfactory ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ซึ่งองค์ประกอบโดยรวมของการออกแบบเครื่องมือในการคำนวณมีดังต่อไปนี้

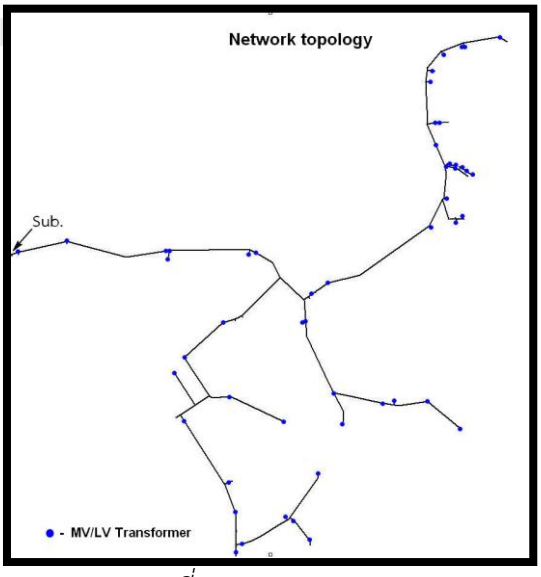
3.1 ข้อมูลที่ต้องใช้ประกอบในการออกแบบเครื่องมือ

ในการออกแบบเครื่องมือต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ดังต่อไปนี้

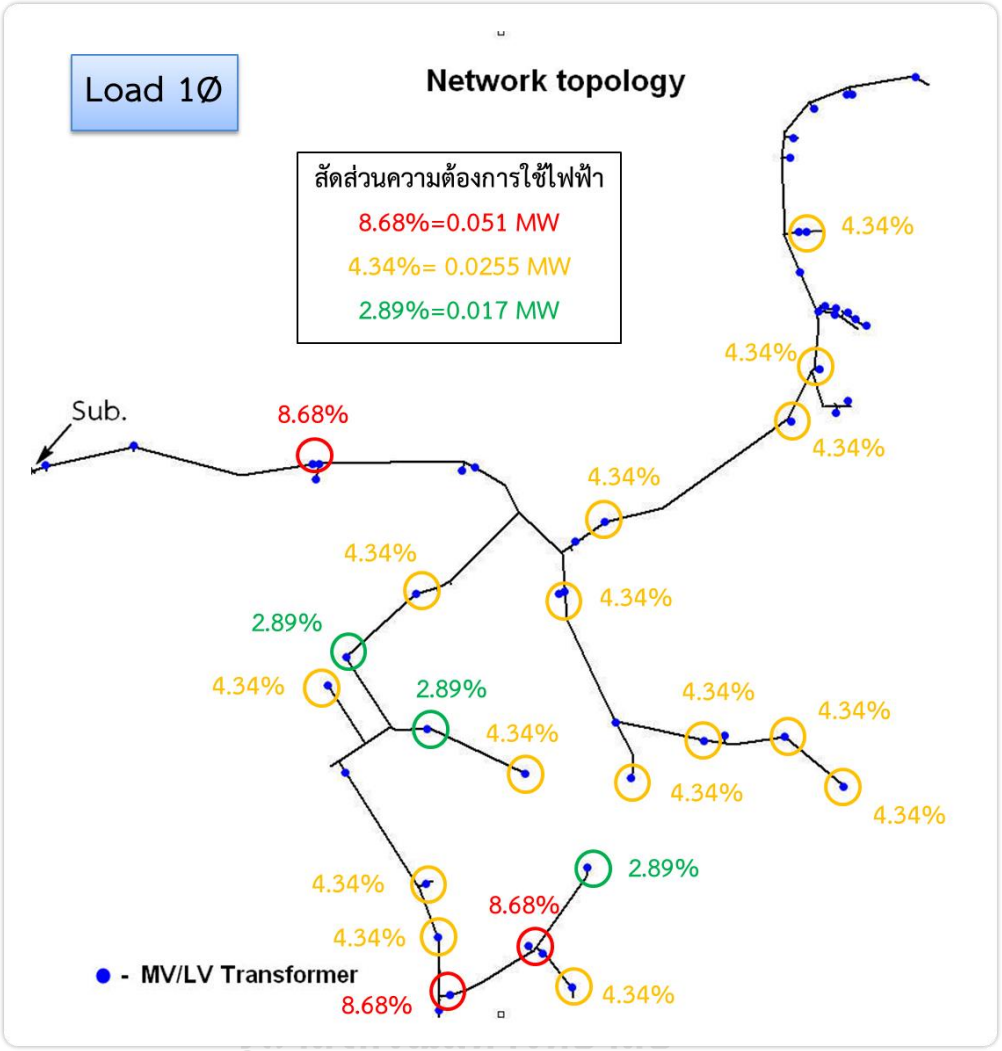
3.1.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้า

ระบบทดสอบที่ใช้เป็นหนึ่งในสายป้อนของระบบจำหน่าย ซึ่งประกอบด้วยระดับแรงดันปานกลาง (22 kV) และแรงดันต่ำ (0.4 kV และ 0.46 kV) โดยมีผู้ใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำทั้งหมด 51 จุด, หม้อแปลงแรงดันปานกลาง 115 kV/22 kV ขนาด 50 MVA 1 ตัว และหม้อแปลงแรงดันต่ำ 22 kV/0.4 kV อีก 51 ตัว ดังรูปที่ 3.1 ผู้ใช้ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผู้ใช้ไฟฟ้า 1 เฟสดังรูปที่ 3.2 และผู้ใช้ไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ดังรูปที่ 3.3 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 3.1 และพารามิเตอร์ของสายส่งระบบจำหน่ายแสดงดังตารางที่ 3.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

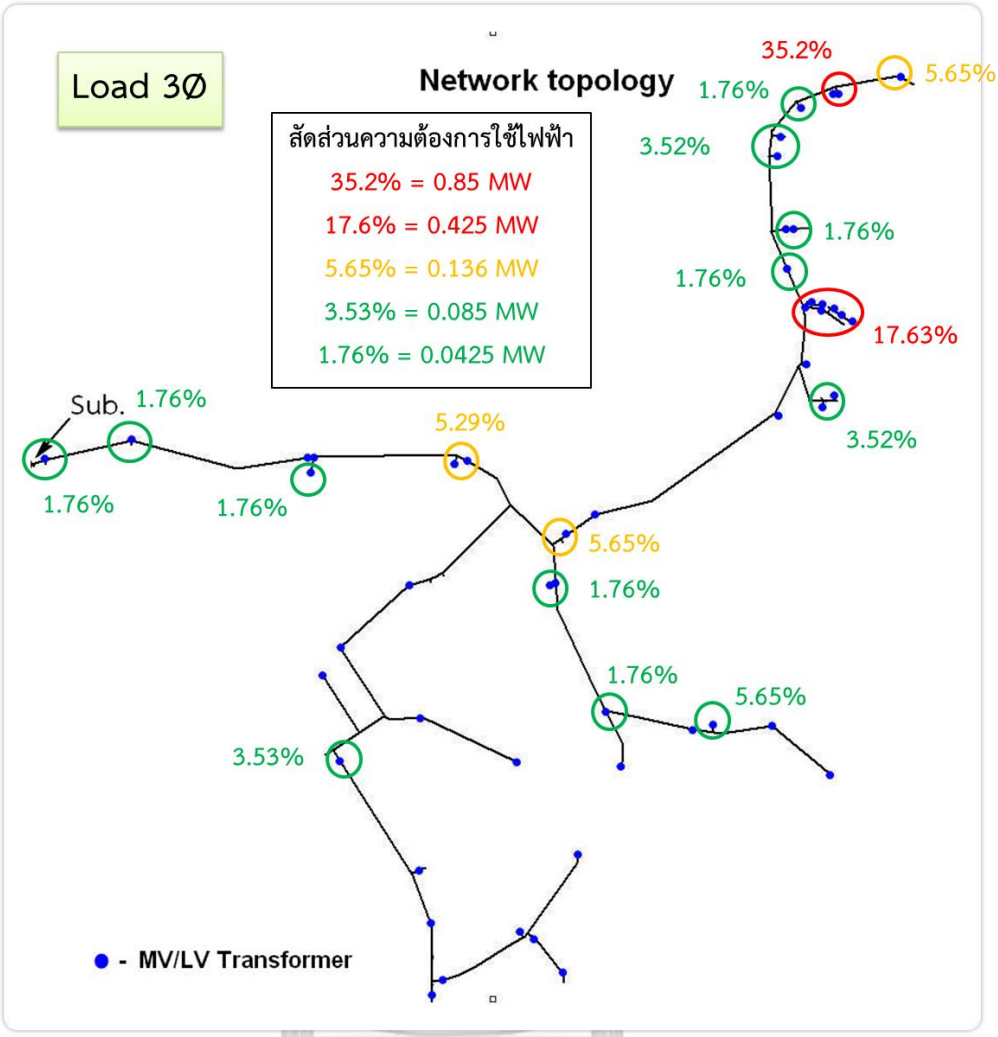


รูปที่ 3.1 ระบบทดสอบ



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 1 เฟส

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท 3 เฟส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์หม้อแปลงในระบบทดสอบ

ชนิดหม้อแปลง	จำนวนเฟส	จำนวน (ตัว)	ขนาด (MVA)	ระดับแรงดัน
BSG-TP1	3	1	50	115 kV/22 kV
MT3500D	3	2	0.5	22 kV/0.4 kV
MT3160D	3	3	0.16	22 kV/0.4 kV
MT3100D	3	5	0.1	22 kV/0.4 kV
MT350D	3	15	0.05	22 kV/0.4 kV
MT150X	1	2	0.05	22 kV/0.46 kV
MT130X	1	21	0.03	22 kV/0.46 kV
MT120X	1	3	0.02	22 kV/0.46 kV

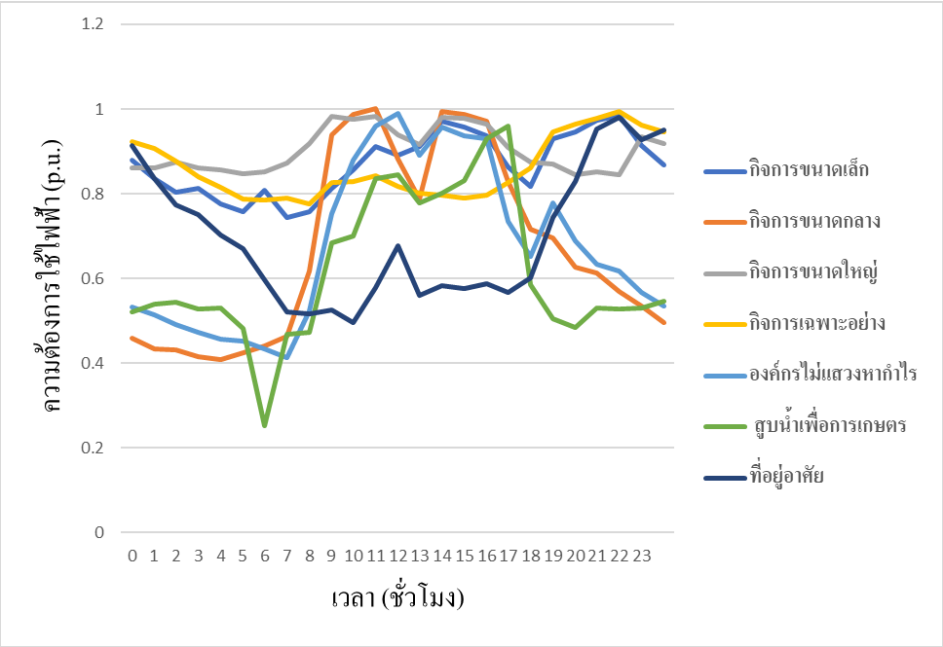
ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สายส่ง

ชนิดสายส่ง	กระแสพิกัด (kA)	ประเภทสายส่ง	จำนวนเฟส	ความต้านทาน Ohm/km	รีแอคแตนซ์ Ohm/km
ML3H50S3C	0.186	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.8219353	0.3395188
ML3H50R3E	0.17	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.6668626	0.4709061
ML3H50P3E	0.186	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.8219279	0.4553402
ML3H185S4O	0.429	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.2106598	0.2985855
ML3H185P3E	0.429	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.2106576	0.4144061
ML3H185A4K	0.52	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.1765311	0.3914838
ML3H185A3E	0.52	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.1763507	0.4090921
M50S3	0.186	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.8219353	0.3395188
M400X3	0.502	สายเคเบิล	3	0.001	0.02
MEL3	0.52	สายส่งเหนือศีรษะ	3	0.1763507	0.4090921
MEL2	0.52	สายส่งเหนือศีรษะ	2	0.1763489	0.4408275
ML2H50S3V	0.186	สายส่งเหนือศีรษะ	2	0.8219269	0.4870755
ML2H50R3V	0.17	สายส่งเหนือศีรษะ	2	0.6668609	0.5026416

3.1.2 ข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้า

ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบต่อหน่วย แบ่งตามประเภท ประกอบด้วย กิจการขนาดเล็ก, กิจการขนาดกลาง, กิจการขนาดใหญ่, กิจการเฉพาะอย่าง, องค์กรไม่แสวงหากำไร, สูบน้ำเพื่อการเกษตร และที่อยู่อาศัย ซึ่งเป็นข้อมูลโดยรวมของภาคกลางช่วงเดือน เมษายน พ.ศ. 2560 แสดงดังรูปที่ 3.4 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบต่อหน่วย (โดยใช้ความต้องการสูงสุดเป็นค่าฐาน) ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทจะสุ่มเลือกให้กับผู้ใช้ในระบบทดสอบแบบเอกรูปเพื่อที่จะพิจารณาความหลากหลายของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบ

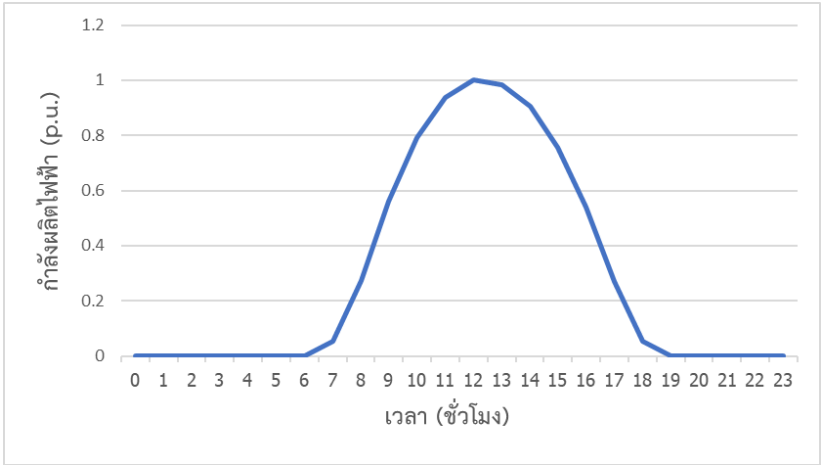
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.4 ความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบต่อหน่วยของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภท

3.1.3 ข้อมูลกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ลักษณะกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใน 1 วันจะพิจารณา กรณีท้องฟ้าปลอดโปร่งไม่มีเมฆปกคลุม เพื่อคำนวณค่า PV hosting capacity จากกำลังผลิตสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันโดยไม่มีการบังแสงอาทิตย์จากเมฆ ดังรูปที่ 3.5 และให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้อย่างเดียวหรือทำงานในโหมดควบคุมตัวประกอบกำลัง โดยให้ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 เพื่อให้ปริมาณกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มากที่สุด [20]



รูปที่ 3.5 ลักษณะกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใน 1 วัน

3.1.4 ข้อมูลของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะทำหน้าที่รับหรือจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง โดยควบคุมให้กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่มีค่า ดังสมการที่ 2 ซึ่งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินในช่วงเวลาที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าและจ่ายให้กับระบบในช่วงเวลาที่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่าความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า

$$P_{load} = P_{external\ grid} + P_{pv} + P_{battery} \quad (2)$$

โดย P_{load} คือ ความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า

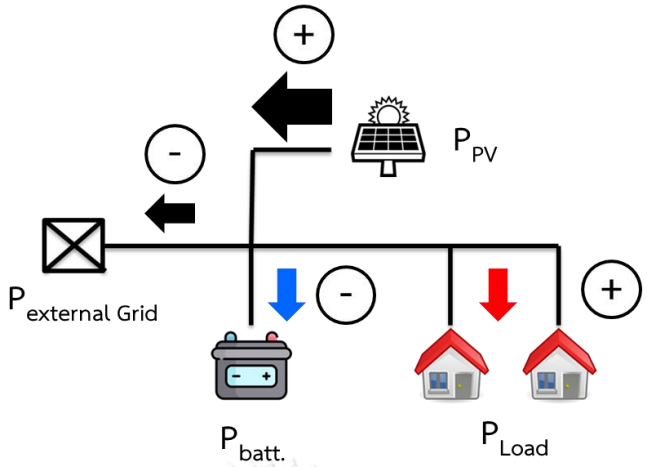
$P_{external\ grid}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าภายนอก

P_{pv} คือ กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

$P_{battery}$ คือ กำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ซึ่งจะควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ผ่านตัวแปร $P_{battery}$ ซึ่งหมายความว่าถ้า $P_{battery}$ เป็นค่าบวกแสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้า ณ ขณะนั้น ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะในสภาวะดิสชาร์จก็คือจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า แต่ถ้า $P_{battery}$ เป็นค่าลบแสดงว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้า ณ ขณะนั้น ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะในสภาวะชาร์จนั้นก็คือรับกำลังไฟฟ้าให้ระบบไฟฟ้า โดยกำหนดให้ P_{load} และ P_{pv} จะมีค่าเป็นบวกเสมอในกรณีผู้ใช้ไฟฟ้ารับกำลังไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ส่วน $P_{external\ grid}$ จะเป็นบวก เมื่อกำลังไฟฟ้าไหลเข้ามาจากระบบไฟฟ้าภายนอก และเป็นลบ เมื่อกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ ยกตัวอย่างดังรูปที่ 3.6 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (P_{pv}) ได้มากกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า (P_{load}) ทำให้กำลังไฟฟ้าไหลมาเก็บไว้ในแบตเตอรี่ ($P_{battery}$) ส่วนกำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือที่แบตเตอรี่ไม่สามารถจัดเก็บได้จะไหลย้อนกลับไปที่สถานีไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าภายนอก ($P_{external\ grid}$) และมีค่าพารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบทดสอบ ดังตารางที่ 3.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



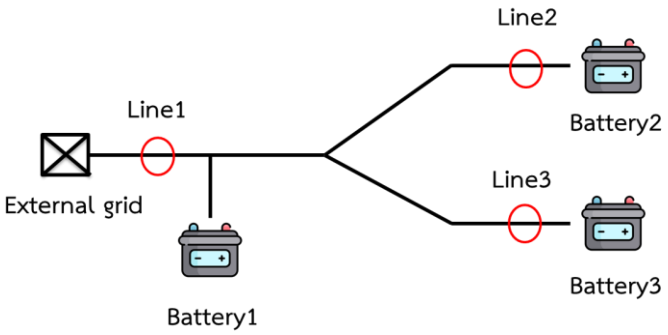
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการทำงานระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

ชื่อตัวแปร	ค่าพารามิเตอร์
ความจุของแบตเตอรี่	0.5 เมกกะวัตต์ชั่วโมง
ระดับการเก็บประจุขั้นต่ำ	20 %
ระดับการเก็บประจุสูงสุด	80 %
กำลังไฟฟ้าที่รับได้สูงสุด	1 เมกะวัตต์ / 2 เมกะวัตต์
กำลังไฟฟ้าที่จ่ายได้สูงสุด	1 เมกะวัตต์ / 2 เมกะวัตต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในกรณีที่พิจารณาร่วมกันระหว่างระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่หลายตัว จะควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงผ่านสมการที่ 2 ในแต่ละตัว โดยจะพิจารณาสมการที่ตำแหน่งต่างกันออกไป ซึ่งจะพิจารณาที่สายส่งที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และเป็นสายส่งฝั่งที่อยู่ใกล้กับสถานีไฟฟ้าดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กรณีมีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่หลายตัว

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นว่าระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะพิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกันนั้นคือจุดวงกลมสีแดง ในการคำนวณโปรแกรมจะทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนหนึ่งครั้งในขณะระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ยังไม่ทำงานเพื่อเก็บค่าการไหลของกำลังไฟฟ้า จากนั้นก็นำค่าที่ได้มาเป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณว่าระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานะของแบตเตอรี่และกำลังไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในระบบ ณ ขณะนั้น ผลการคำนวณของรอบนี้ก็จะใช้เป็นค่าตั้งต้นในการคำนวณของช่วงเวลาถัดไป

3.2 เกณฑ์ที่ใช้ในการหา PV hosting capacity

จากการศึกษาบทความวิจัยและรายงานที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้เกณฑ์ในการพิจารณาหาค่า PV hosting capacity เพื่อให้ทำให้แน่ใจว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะไม่ส่งผลกระทบในด้านดังกล่าว ซึ่งประกอบด้วย 3 เกณฑ์ ก็คือ เกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้า, เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า รวมทั้งยังพิจารณาถึงกำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนและหลังติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 เกณฑ์ด้านแรงดันไฟฟ้า

การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) นั้นจะต้องควบคุมระดับแรงดันเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันของ กฟภ. โดยให้ระดับแรงดันอยู่ในช่วงแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุด [8] ดังตารางที่ 3.4 ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาระดับแรงดัน 22 kV เนื่องจากศึกษาในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง

Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุด

ระดับแรงดัน	กรณีจ่ายไฟปกติ	
	แรงดันต่ำสุด	แรงดันสูงสุด
115 kV	109.2 kV (0.95 p.u.)	120.7 kV (1.05 p.u.)
33 kV	31.3 kV (0.95 p.u.)	34.7 kV (1.05 p.u.)
22 kV	20.9 kV (0.95 p.u.)	23.1 kV (1.05 p.u.)
380 V	342 V (0.9 p.u.)	418 V (1.1 p.u.)
220 V	200 V (0.91 p.u.)	240 V (1.09 p.u.)

3.2.2 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่ง

ในการวางแผนระบบไฟฟ้าปัจจุบันจะมีการพิจารณาการรับโหลดของสายส่งด้วยเนื่องจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบทำให้กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลในสายส่งเปลี่ยนแปลงไป โดยสายส่งประเภทเรเดียล กรณีจ่ายไฟปกติต้องมีค่าพิกัดการรับโหลด (Loading) ไม่เกิน 80 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัดสาย [9] ซึ่งจะแตกต่างจากบทความวิจัยต่างประเทศที่จะกำหนดค่าพิกัดการรับโหลดไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์ [16] ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่งไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากที่ 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นกรณีจ่ายไฟฉุกเฉินไม่จำกัดเวลา ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่ง

อุปกรณ์	กรณีจ่ายไฟปกติ	กรณีจ่ายไฟฉุกเฉิน
สายส่งแบบเรเดียล	80% พิกัด	100% พิกัด ไม่จำกัดเวลา
สายจำหน่ายแรงสูงแบบเรเดียล	80% พิกัด	100% พิกัด ไม่จำกัดเวลา
สายส่งแบบวงรอบ	50% พิกัด	100% พิกัด ไม่จำกัดเวลา
สายจำหน่ายแรงสูงแบบวงรอบ	50% พิกัด	100% พิกัด ไม่จำกัดเวลา

3.2.3 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า

การเชื่อมต่อ PV เข้ากับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) นั้นจะต้องพิจารณาถึงเกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง [9] ในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าไม่เกิน 100 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากที่ 100 เปอร์เซ็นต์ เป็นกรณีจ่ายไฟฉุกเฉินไม่จำกัดเวลา ดังตารางที่ 3.6

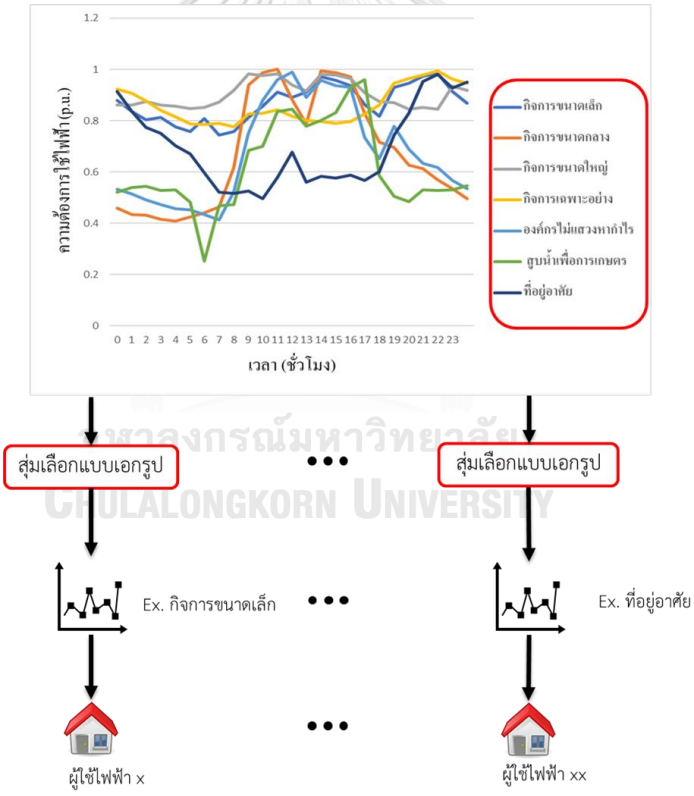
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลง

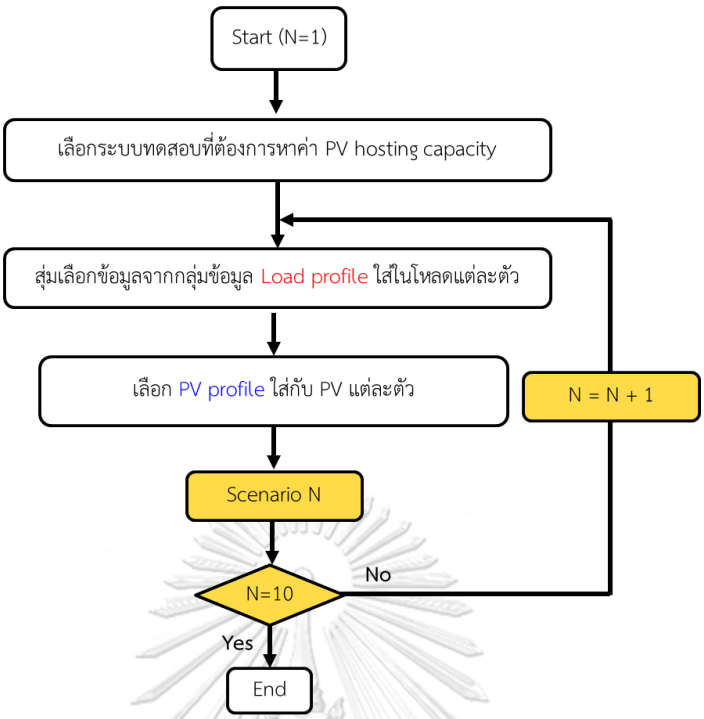
อุปกรณ์	กรณีจ่ายไฟปกติ	กรณีจ่ายไฟฉุกเฉิน
หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง	75 % ของพิกัด	100% ของพิกัด ไม่จำกัดเวลา 112% ของพิกัด ภายใน 4 ชั่วโมง (ตามมาตรฐาน IEC60076-2)
หม้อแปลงจำหน่าย	80% ของพิกัด	100% ของพิกัด ไม่จำกัดเวลา

3.3 การสร้างสถานการณ์จำลองของระบบทดสอบ

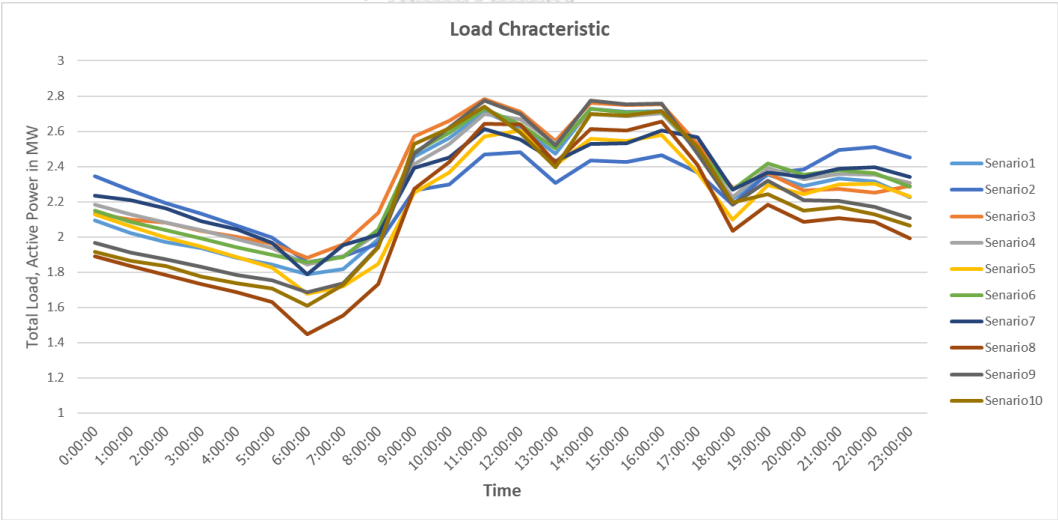
เริ่มต้นจะต้องมีระบบทดสอบซึ่งเป็นระบบที่ต้องการจะหาค่า PV hosting capacity จากนั้นจะทำการสุ่มแบบเอกรูปเลือกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายจากกลุ่มข้อมูลประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดแล้วใส่ค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายในระบบทดสอบ ดังรูปที่ 3.8 ส่วนลักษณะกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะพิจารณาในลักษณะท้องฟ้าปลอดโปร่ง (clear sky model) เมื่อเสร็จขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้นแล้วจะได้ 1 สถานการณ์จำลองระบบทดสอบ แล้วจากนั้นทำการกลับไปสุ่มแบบเอกรูปเลือกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าใหม่อีกครั้ง ทำแบบนี้ทั้งหมด 10 ครั้งจนได้ 10 สถานการณ์จำลองมีการใช้ความต้องการไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละสถานการณ์ โดยจะมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.9 และแต่ละสถานการณ์จำลองจะมีความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมของระบบ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.8 การสุ่มแบบเอกรูปเลือกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการสร้างสถานการณ์จำลอง



รูปที่ 3.10 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้ารวมสำหรับแต่ละสถานการณ์

3.4 วิธีคำนวณหาค่า PV hosting capacity

ในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity จะแบ่งประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ออกเป็น 2 ประเภท ประกอบด้วย

- ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งอยู่ในหน่วยกิโลวัตต์ ซึ่งจะติดตั้งใกล้กับผู้ใช้ไฟฟ้า

- ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งอยู่ในหน่วยเมกะวัตต์ ซึ่งจะติดตั้งผ่านหม้อแปลงเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบแรงดันปานกลางโดยตรง ซึ่งจะกำหนดขนาดของหม้อแปลงเป็น 1.5 เท่าของขนาดระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเพื่อป้องกันกระแสเกิน

จากนั้นเลือกสถานการณ์จำลองระบบทดสอบมา 1 สถานการณ์จำลอง แล้วจะนำมาคำนวณหาค่า PV hosting capacity ด้วยวิธีการต่อไปนี้

1) เริ่มต้นให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทุกตัวที่เชื่อมต่อระบบมีกำลังผลิตติดตั้งเท่ากับศูนย์

2) สุ่มเลือกตำแหน่งแบบเอกรูปในการเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

3) พิจารณาว่าตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อยู่บนระบบไฟฟ้าแรงดันเท่าใด ถ้าอยู่ในระบบแรงดันปานกลาง 22 kV ให้ไปที่ข้อ 4 ถ้าไม่ใช่ให้ไปที่ข้อ 5

4) เพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เลือก 0.25 เมกะวัตต์ ซึ่งจะต้องพิจารณาขนาดของหม้อแปลงให้เหมาะสมกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย จากนั้นไปที่ข้อ 6

5) เพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่เลือก 1 กิโลวัตต์ จากนั้นไปที่ข้อ 6

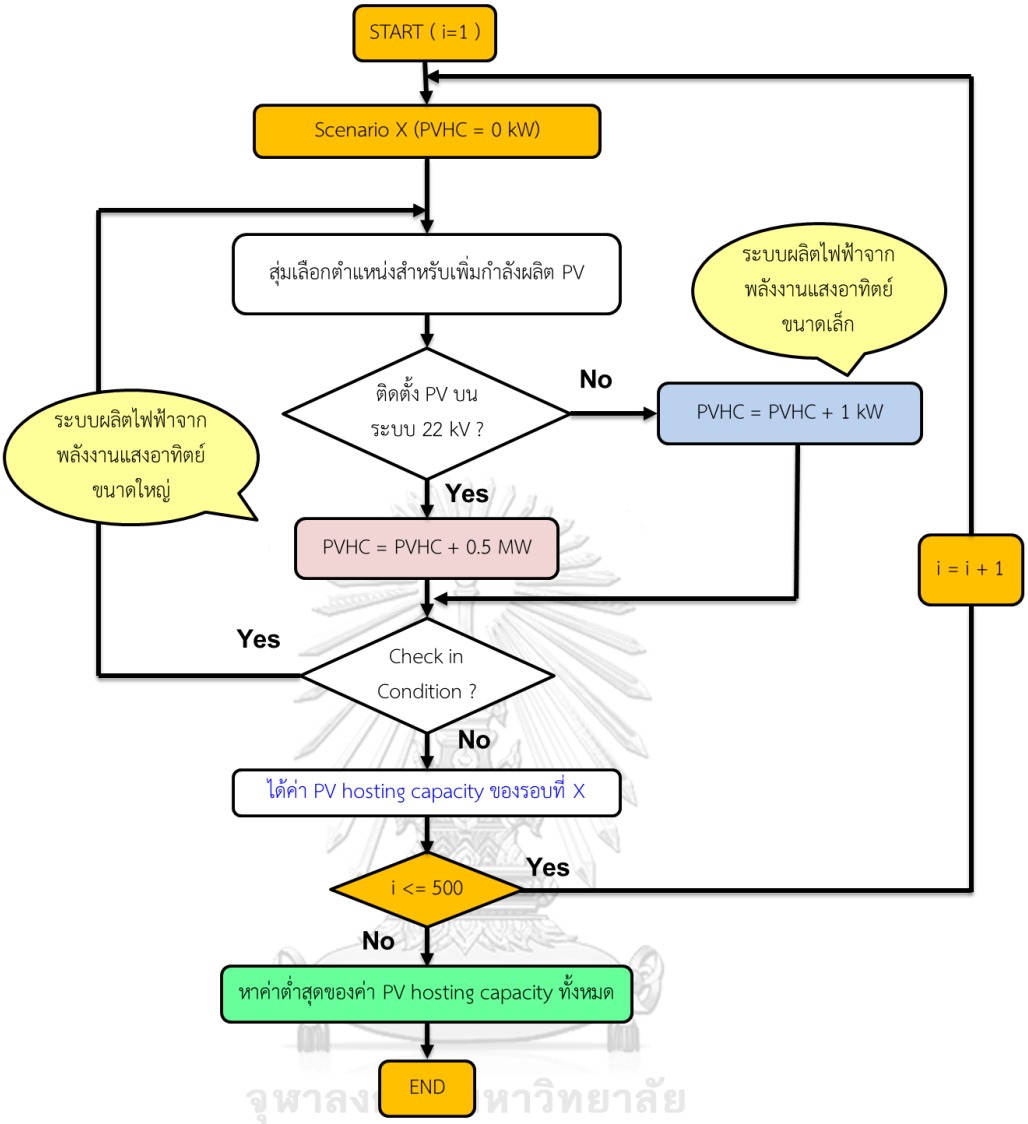
6) คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ตรวจสอบว่ามีผลกระทบต่อระบบในด้านแรงดันไฟฟ้า, ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงหรือไม่ ถ้าไม่มีผลกระทบให้กลับไปข้อ 2 แต่ถ้าส่งผลกระทบต่อระบบด้านใดด้านหนึ่งให้ไปที่ข้อ 7

7) ลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวที่เพิ่มขึ้นล่าสุด ซึ่งถ้าเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ต้องลดขนาดหม้อแปลงที่เชื่อมต่อด้วย เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อระบบ

8) หาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบทั้งหมดก็จะได้ค่า PV hosting capacity ของระบบ

9) ทำซ้ำข้อ 1-8 ทั้งหมด 500 ครั้ง

ซึ่งจะสรุปวิธีการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ได้ดังรูปที่ 3.11



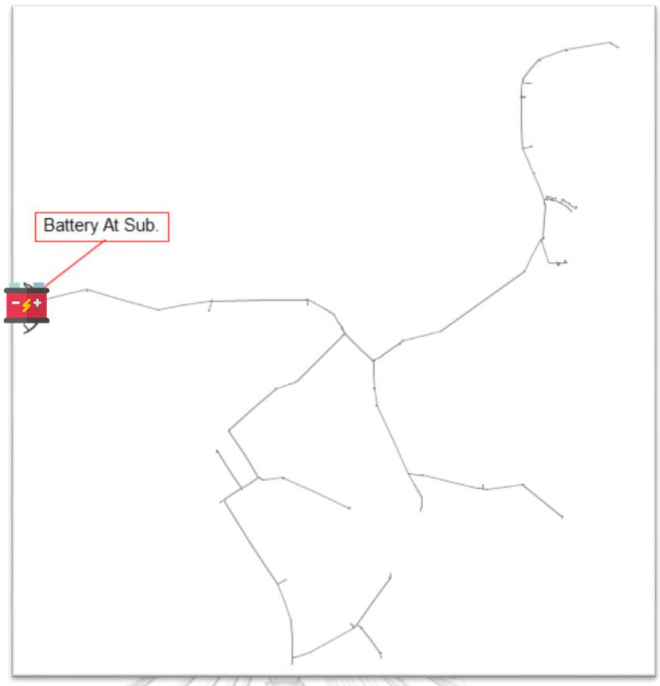
รูปที่ 3.11 วิธีคำนวณหาค่า PV hosting capacity

3.5 การพิจารณาผลของการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

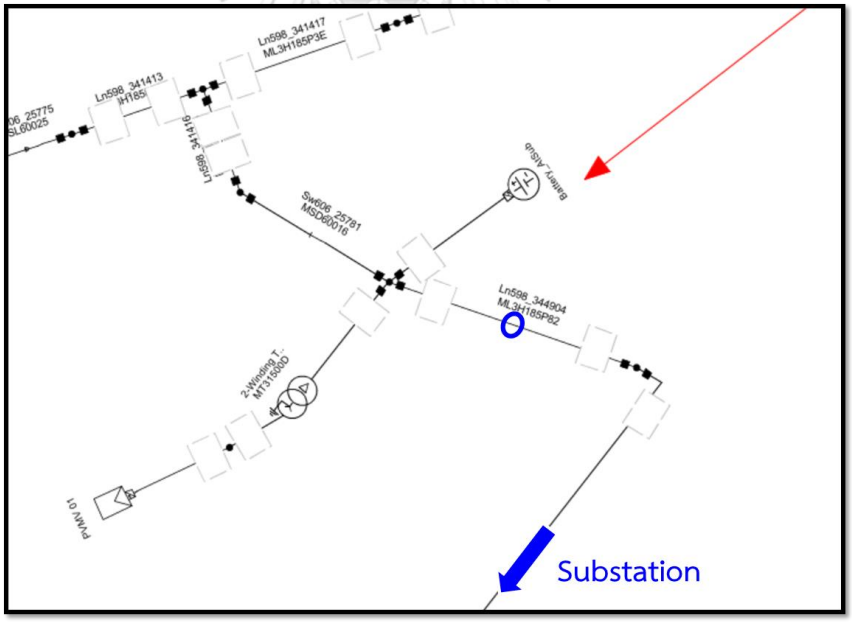
ในการคำนวณค่า PV hosting capacity จะพิจารณาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ 2 ขนาดคือ 1 และ 2 เมกะวัตต์ ใน 4 กรณี ดังนี้

1) ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

2) ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณสถานีไฟฟ้า (ต้นทางของสายส่งระบบจำหน่าย) ดังรูปที่ 3.12 และพิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับการควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณสถานีไฟฟ้าผ่านสายส่ง ณ ตำแหน่งที่วงกลมสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 3.13

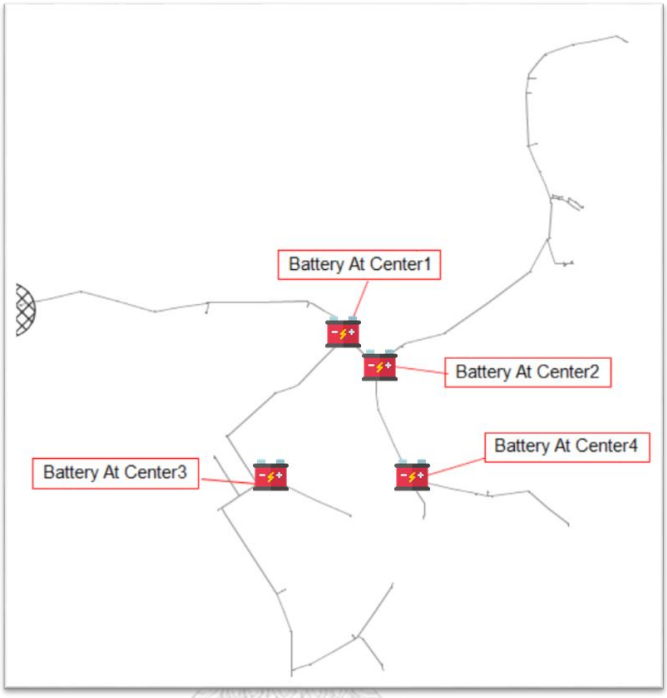


รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณสถานีไฟฟ้า (ต้นสายส่ง)

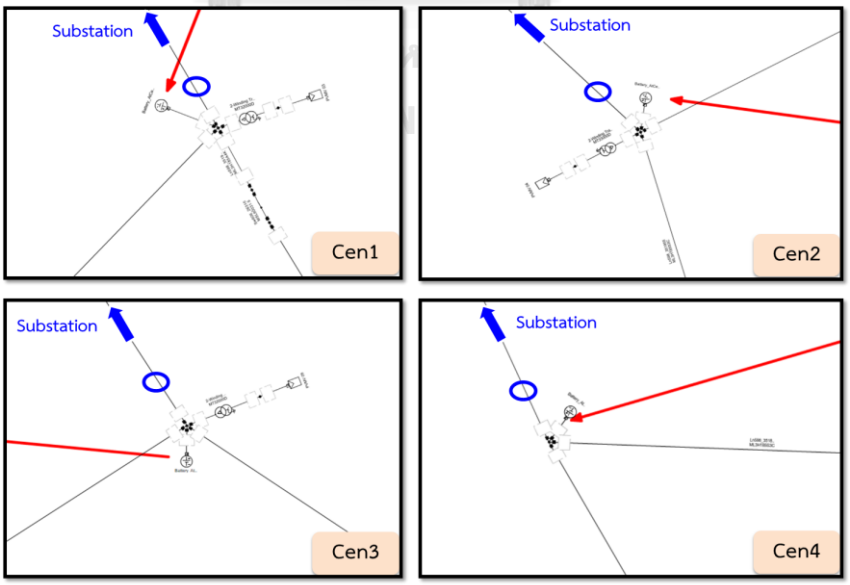


รูปที่ 3.13 พิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณสถานีไฟฟ้า

3) ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งระบบจำหน่าย จำนวน 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.14 และพิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับการควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายแต่ละตัวส่งผ่านสายส่ง ณ ตำแหน่งที่วงกลมสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 3.15

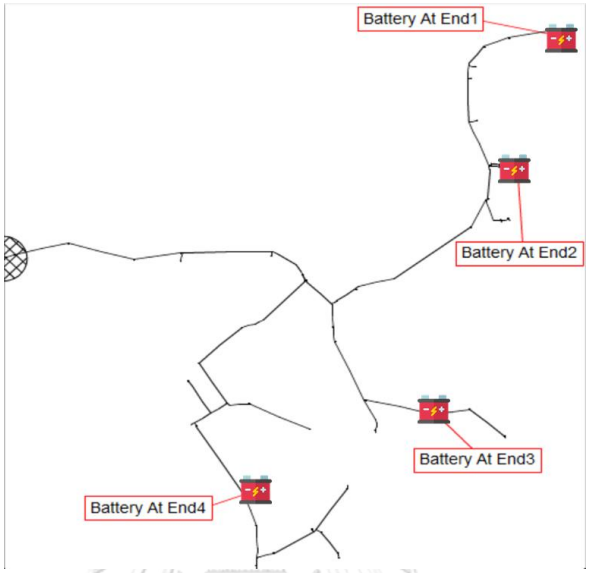


รูปที่ 3.14 ตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณกลางสายส่ง

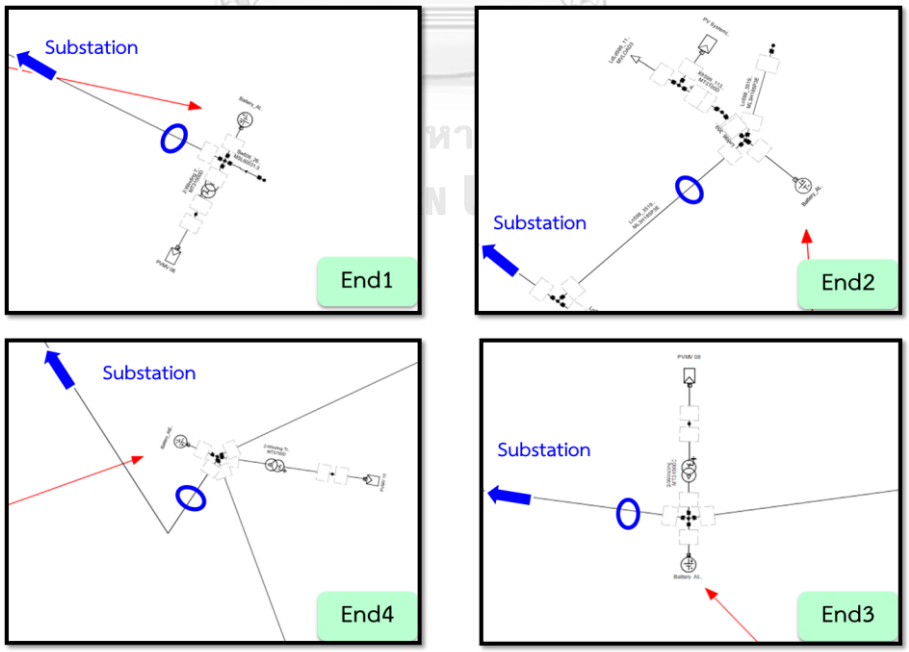


รูปที่ 3.15 พิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณกลางสายส่ง

4) ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งระบบจำหน่าย จำนวน 4 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.16 และพิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับการควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งแต่ละตัวส่งผ่านสายส่ง ณ ตำแหน่งที่วงกลมสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 3.17



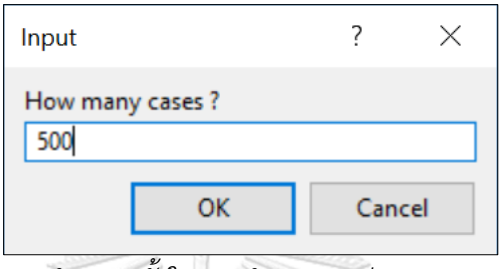
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณปลายสายส่ง



รูปที่ 3.17 พิจารณาทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้ากรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณปลายสายส่ง

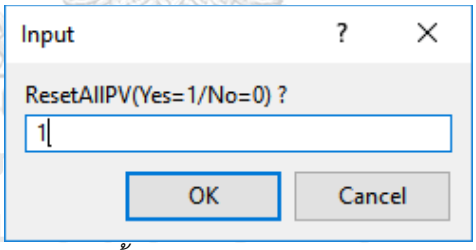
3.6 เครื่องมือคำนวณค่า PV hosting capacity บนโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

เครื่องมือในการคำนวณค่า PV hosting capacity จะอยู่ในรูปของสคริปท์ ซึ่งเขียนด้วยภาษาโปรแกรมของ DIgSILENT หรือ DPL (DIgSILENT Programming Language) โดยเครื่องมือจะรับจำนวนครั้งในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ในระบบทดสอบจากผู้ใช้ ดังรูปที่ 3.18



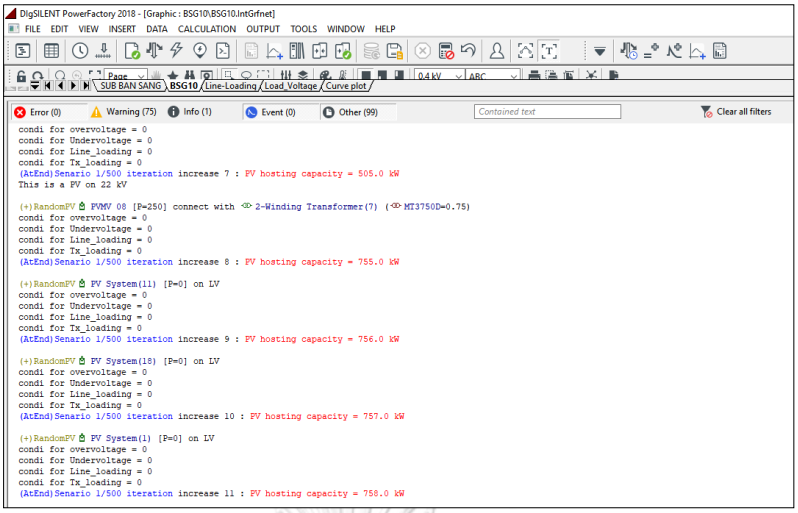
รูปที่ 3.18 อินพุตจำนวนครั้งในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity

จากนั้นเครื่องมือจะถามผู้ใช้ว่าต้องการเก็บค่ากำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แล้วในระบบทดสอบหรือไม่ ถ้าต้องการเก็บกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แล้วให้พิม 0 แต่ถ้าไม่ต้องการให้พิม 1 ดังรูปที่ 3.19



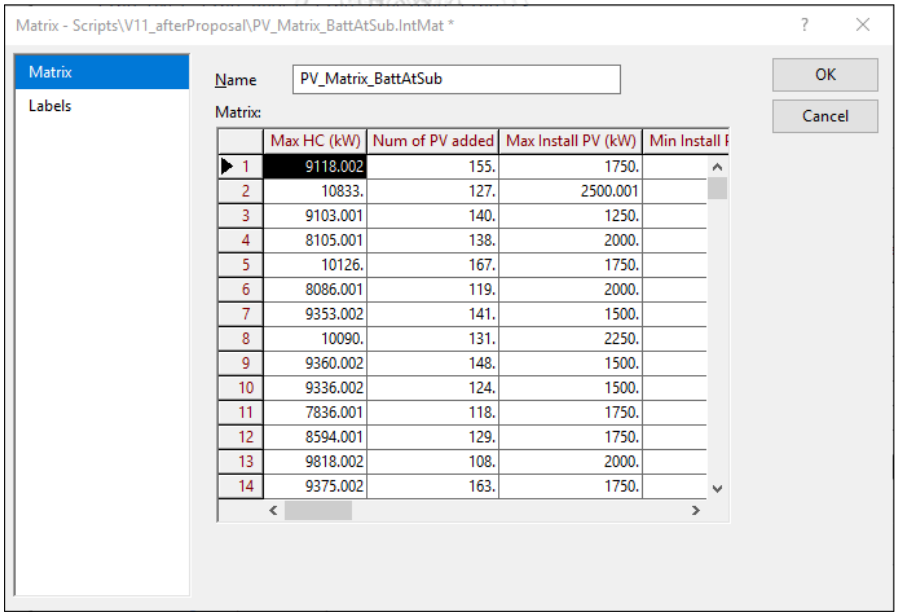
รูปที่ 3.19 อินพุตสำหรับกรณีติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แล้ว

เมื่อรับอินพุตเรียบร้อยเครื่องมือจะทำการคำนวณหาค่า PV hosting capacity อัตโนมัติ ระหว่างการทำงานของเครื่องมือจะแสดงผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณ อาทิเช่น ข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่สุ่มเลือกได้ และ กำลังผลิตรวมจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดในระบบ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณ

เมื่อเครื่องมือคำนวณจนครบจำนวนครั้งในการหาค่า PV hosting capacity เครื่องมือจะหยุดการทำงานและแสดงค่า PV hosting capacity ในแต่ละครั้งและในแต่ละกรณี ยกตัวอย่างดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ผลลัพธ์หลังการคำนวณค่า PV hosting capacity

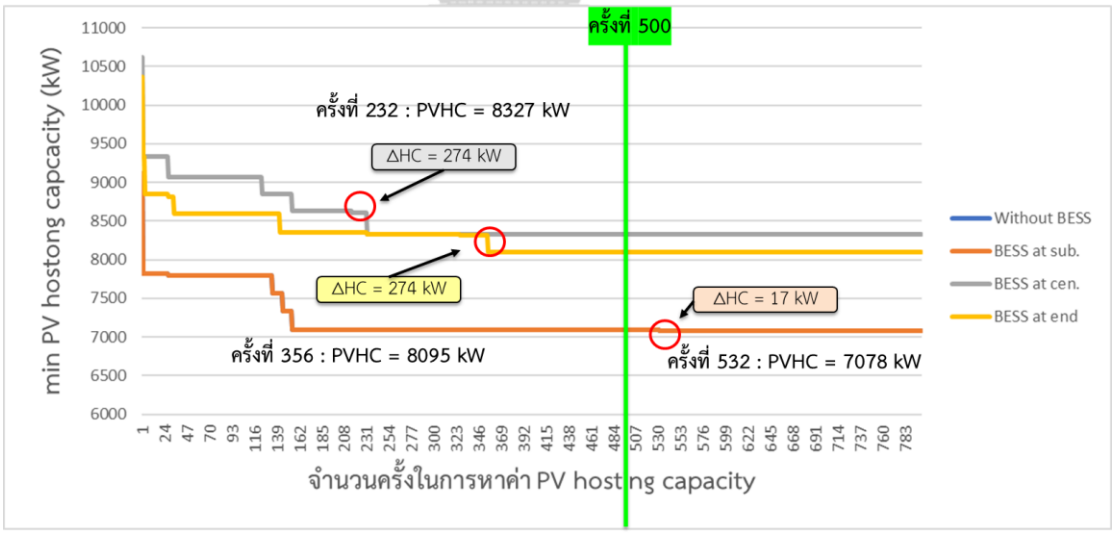
บทที่ 4

ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลลัพธ์

ในการจำลองสถานการณ์ทดสอบในการคำนวณหาค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ (PV hosting capacity) แบ่งออกเป็น 10 สถานการณ์จำลอง แต่ละสถานการณ์จำลองจะทำการหาค่า PV hosting capacity ทั้งหมด 500 ครั้ง เพื่อดูแนวโน้มผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลการคำนวณจากสถานการณ์ทั้งหมดดังต่อไปนี้

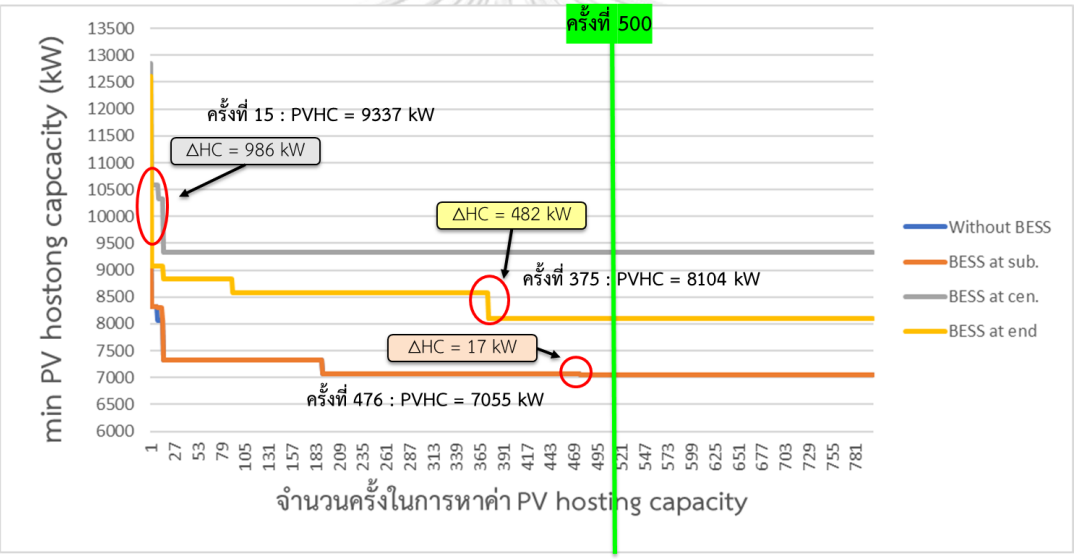
4.1 การวิเคราะห์จำนวนครั้งในการหาค่า PV hosting capacity

ในแต่ละสถานการณ์จำลองสาเหตุที่เลือกคำนวณหาค่า PV hosting capacity ที่ 500 ครั้ง เนื่องจากได้ทำการหาค่า PV hosting capacity ทั้งหมด 800 ครั้งพบว่าหลังคำนวณหาค่า PV hosting capacity ผ่านครั้งที่ 500 ค่า PV hosting capacity ที่ต่ำที่สุดไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 และ 2 เมกะวัตต์ ดังแสดงรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 วิเคราะห์ในการหาค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าหลังการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ที่ประมาณ 400 ครั้ง ค่า PV hosting capacity ที่ต่ำที่สุดในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งและปลายสายส่งจะเริ่มคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ในกรณีไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า (เส้นกราฟกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าทับเส้นกราฟกรณีไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่) จะเปลี่ยนแปลงครั้งสุดท้าย ในการคำนวณครั้งที่ 532 โดยค่า PV hosting capacity เปลี่ยนแปลงเพียง 17 กิโลวัตต์ และคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งครบครั้งที่ 800 เพราะฉะนั้นจากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ทั้งหมด พบว่าการคำนวณหาค่า PV hosting capacity จำนวน 500 ครั้งสามารถบ่งบอกได้ถึงค่า PV hosting capacity ที่ต่ำที่สุดของระบบทดสอบในกรณีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.2 วิเคราะห์ในการหาค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าหลังการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ที่ประมาณ 500 ครั้งค่า PV hosting capacity ที่ต่ำที่สุดในทุกกรณีคงที่และไม่เปลี่ยนแปลง (เส้นกราฟกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าทับเส้นกราฟกรณีไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่) จนกระทั่งครบครั้งที่ 800 เพราะฉะนั้นจากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ทั้งหมด พบว่าการคำนวณหาค่า PV hosting capacity จำนวน 500 ครั้งสามารถบ่งบอกได้ถึงค่า PV hosting capacity ที่ต่ำที่สุดของระบบทดสอบในกรณีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์

4.2 ผลการคำนวณค่า PV hosting capacity

4.2.1 กรณีไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

จากการคำนวณหาค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ (PV hosting capacity) ในระบบทดสอบโดยพิจารณาถึงผลกระทบของระบบไฟฟ้าโดยใช้เกณฑ์ด้านแรงดัน, เกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ เกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ในกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะทำการคำนวณแยกกันระหว่างกรณีไม่มีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 และ 2 เมกะวัตต์ ซึ่งหมายความว่า การสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ก็จะแตกต่างกัน ซึ่งจะได้ค่า PV hosting capacity จากทั้งหมดของแต่ละสถานการณ์จำลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า PV hosting capacity กรณีไม่มีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

สถานการณ์จำลอง	PV hosting capacity กรณีไม่พิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 MW (kW)	PV hosting capacity กรณีไม่พิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 MW (kW)
สถานการณ์จำลองที่ 1	7095	7055
สถานการณ์จำลองที่ 2	7053	6838
สถานการณ์จำลองที่ 3	7078	7368
สถานการณ์จำลองที่ 4	7338	7318
สถานการณ์จำลองที่ 5	7325	7074
สถานการณ์จำลองที่ 6	7312	7310
สถานการณ์จำลองที่ 7	6819	6830
สถานการณ์จำลองที่ 8	7295	7328
สถานการณ์จำลองที่ 9	7303	7344
สถานการณ์จำลองที่ 10	7067	7060

จากตารางที่ 4.1 ในกรณีไม่พิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 และ 2 เมกะวัตต์ จะเห็นว่าจากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ทั้ง 10 สถานการณ์จะได้ค่า PV hosting capacity ที่น้อยที่สุดคือ 6819 กิโลวัตต์ และ 6830 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ในระบบทดสอบนี้สามารถรองรับการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังผลิตร่วมทุกตัวสูงสุดในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในด้านแรงดันไฟฟ้า, ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ 6819 กิโลวัตต์ และ 6830 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 180.9 กิโลวัตต์ และ 179.1 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

โดยจากทั้งหมด 10 สถานการณ์จำลอง จะพบว่าทั้งหมด 10 สถานการณ์ค่า PV hosting capacity ถูกกำหนดด้วยเกณฑ์ด้านแรงดันเกิน

4.2.2 กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า

จากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity โดยพิจารณาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณใกล้กับสถานีไฟฟ้าในระบบทดสอบโดยพิจารณาถึงผลกระทบของระบบไฟฟ้าโดยใช้เกณฑ์ด้านแรงดัน, เกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ เกณฑ์ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะได้ค่า PV hosting capacity จากทั้งหมดของแต่ละสถานการณ์จำลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า

สถานการณ์จำลอง	PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 MW (kW)	PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 MW (kW)
สถานการณ์จำลองที่ 1	7095	7055
สถานการณ์จำลองที่ 2	7053	6838
สถานการณ์จำลองที่ 3	7078	7368
สถานการณ์จำลองที่ 4	7338	7318
สถานการณ์จำลองที่ 5	7325	7074
สถานการณ์จำลองที่ 6	7312	7310
สถานการณ์จำลองที่ 7	6819	6830
สถานการณ์จำลองที่ 8	7295	7328
สถานการณ์จำลองที่ 9	7303	7344
สถานการณ์จำลองที่ 10	7067	7060

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.2 ในกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ และ 2 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า จะเห็นว่าจากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ทั้ง 10 สถานการณ์จะได้ค่า PV hosting capacity ที่น้อยที่สุดคือ 6819 กิโลวัตต์ และ 6830 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าในระบบทดสอบนี้สามารถรองรับการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังผลิตร่วมทุกตัวสูงสุดในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในด้านแรงดันไฟฟ้า, ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ 6819 กิโลวัตต์ และ 6830 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 180.9 กิโลวัตต์ และ 179.1 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

โดยจากทั้งหมด 10 สถานการณ์จำลอง จะพบว่าทั้งหมด 10 สถานการณ์ค่า PV hosting capacity ถูกกำหนดด้วยเกณฑ์ด้านแรงดันเกิน

4.2.3 กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง

จากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity โดยพิจารณาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณกลางสายส่งในระบบทดสอบ ซึ่งจะได้ค่า PV hosting capacity จากทั้งหมดของแต่ละสถานการณ์จำลอง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง

สถานการณ์จำลอง	PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 MW (kW)	PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 MW (kW)
สถานการณ์จำลองที่ 1	8327	9337
สถานการณ์จำลองที่ 2	8304	9112
สถานการณ์จำลองที่ 3	8588	9843
สถานการณ์จำลองที่ 4	8584	9585
สถานการณ์จำลองที่ 5	8363	9357
สถานการณ์จำลองที่ 6	8341	9820
สถานการณ์จำลองที่ 7	7863	9318
สถานการณ์จำลองที่ 8	8080	9597
สถานการณ์จำลองที่ 9	8310	9108
สถานการณ์จำลองที่ 10	8334	9338

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.3 ในกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ และ 2 เมกะวัตต์ ที่กลางสายส่ง จะเห็นว่าจากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ทั้ง 10 สถานการณ์จะได้ค่า PV hosting capacity ที่น้อยที่สุดคือ 7863 กิโลวัตต์ และ 9108 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าในระบบทดสอบนี้สามารถรองรับการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังผลิตร่วมทุกตัวสูงสุดในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในด้านแรงดันไฟฟ้า, ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ 7863 กิโลวัตต์ และ 9108 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 177.9 กิโลวัตต์ และ 181.9 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

โดยจากทั้งหมด 10 สถานการณ์จำลอง จะพบว่าทั้งหมด 10 สถานการณ์ค่า PV hosting capacity ถูกกำหนดด้วยเกณฑ์ด้านแรงดันเกิน

4.2.4 กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง

จากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity โดยพิจารณาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่บริเวณปลายสายส่งในระบบทดสอบ ซึ่งจะได้ค่า PV hosting capacity จากทั้งหมดของแต่ละสถานการณ์จำลอง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง

สถานการณ์จำลอง	PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 MW (kW)	PV hosting capacity กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 MW (kW)
สถานการณ์จำลองที่ 1	8095	8104
สถานการณ์จำลองที่ 2	8065	8582
สถานการณ์จำลองที่ 3	8338	9081
สถานการณ์จำลองที่ 4	8330	8823
สถานการณ์จำลองที่ 5	7598	9068
สถานการณ์จำลองที่ 6	8090	8311
สถานการณ์จำลองที่ 7	7863	8827
สถานการณ์จำลองที่ 8	8080	8591
สถานการณ์จำลองที่ 9	8085	9075
สถานการณ์จำลองที่ 10	8091	8593

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.4 ในกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ และ 2 เมกะวัตต์ ที่ปลายสายส่ง จะเห็นว่าจากการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ทั้ง 10 สถานการณ์จะได้ค่า PV hosting capacity ที่น้อยที่สุดคือ 7598 กิโลวัตต์ และ 8104 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าในระบบทดสอบนี้สามารถรองรับการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังผลิตร่วมทุกตัวสูงสุดในระดับแรงดันปานกลางโดยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในด้านแรงดันไฟฟ้า, ค่าพิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ ค่าพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ 7598 กิโลวัตต์ และ 8104 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเท่ากับ 183.4 กิโลวัตต์ และ 186.3 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

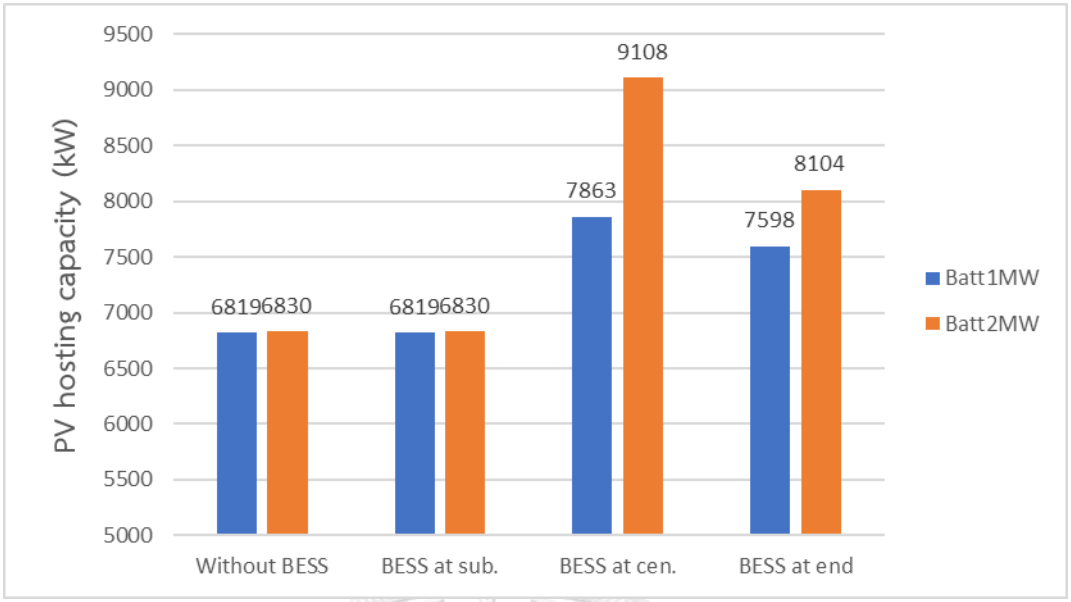
โดยจากทั้งหมด 10 สถานการณ์จำลอง จะพบว่าทั้งหมด 10 สถานการณ์ค่า PV hosting capacity ถูกกำหนดด้วยเกณฑ์ด้านแรงดันเกิน

4.3 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลลัพธ์จากการคำนวณ

4.3.1 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่า PV hosting capacity

จากผลการคำนวณจะเห็นได้ว่าจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละสถานการณ์จำลอง แต่ละตำแหน่งการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เกณฑ์ที่เป็นตัวกำหนดค่า PV hosting capacity ที่ระบบสามารถรองรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในสถานการณ์จำลองทั้งหมด นั้นก็คือ เกณฑ์ด้านแรงดัน เนื่องจากเมื่อกำลังผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนส่งผลให้แรงดันในระบบมีค่าเพิ่มมากขึ้น ส่วนเกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของสายส่งจะอยู่ที่ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ของสายส่งที่รับโหลดสูงสุด และ เกณฑ์ด้านพิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงจะอยู่ที่ประมาณ 72 เปอร์เซ็นต์ของหม้อแปลงที่รับโหลดสูงสุด เมื่อนำค่า PV hosting capacity มาเปรียบเทียบกันสำหรับกรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ และ 2 เมกะวัตต์ ดังรูปที่ 4.3

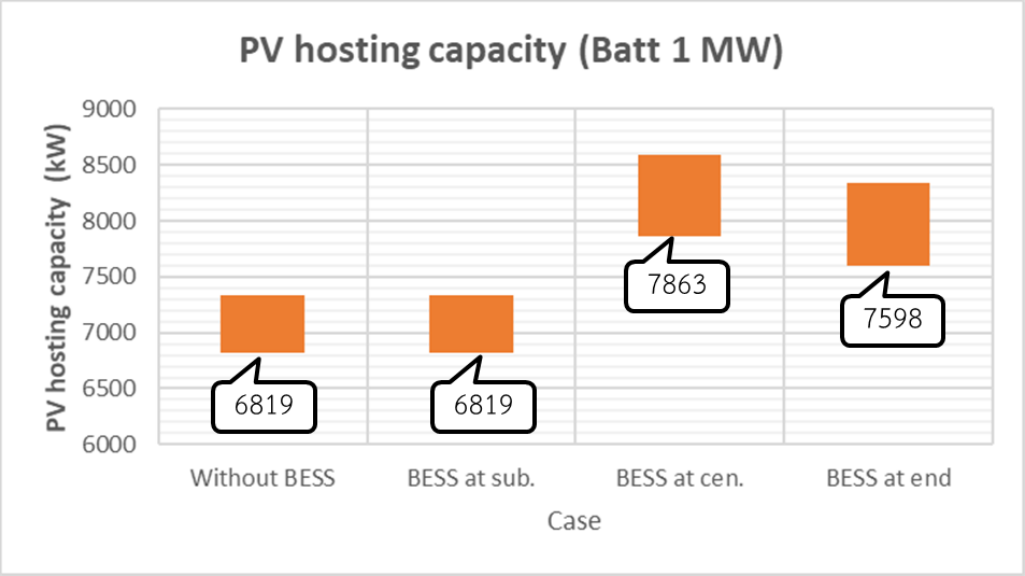
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า PV hosting capacity

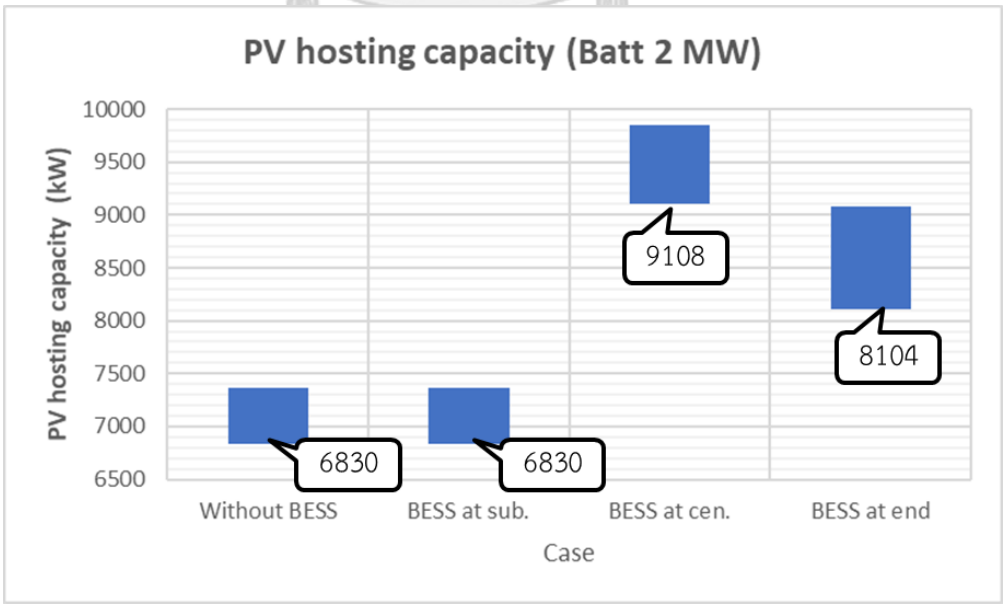
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งแบตเตอรี่จะได้ค่า PV hosting capacity น้อยที่สุดซึ่งเท่ากับกรณีที่ติดตั้งแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า เนื่องจากเกณฑ์ที่เป็นตัวกำหนดค่า PV hosting capacity คือเกณฑ์ด้านแรงดัน ดังนั้นการติดตั้งแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าซึ่งอยู่ไกลจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อจึงไม่สามารถช่วยลดแรงดันได้ และกรณีที่ติดตั้งแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งมีค่า PV hosting capacity มากที่สุด เนื่องจากการติดตั้งแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง ทำให้แบตเตอรี่มีการกระจายตัวช่วยให้แบตเตอรี่สามารถรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินในระบบที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้แรงดันในระบบลดลงมากกว่ากรณีอื่น รองลงมาก็คือกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง โดยถ้าพิจารณาถึงช่วงของค่า PV hosting capacity แต่ละกรณีจะได้ดังรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5 จะเห็นว่าความแตกต่างระหว่างกรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่กับกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งและที่ปลายสายส่ง จะมีค่ามากขึ้นเมื่อขนาดของแบตเตอรี่มีขนาดเพิ่มมากขึ้น เพราะในช่วงเวลาที่แบตเตอรี่อยู่ในสภาวะชาร์จจะทำให้แบตเตอรี่สามารถรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกินในระบบได้มากขึ้นทำให้แรงดันในระบบลดลง ส่งผลให้สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.4 ช่วงค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์

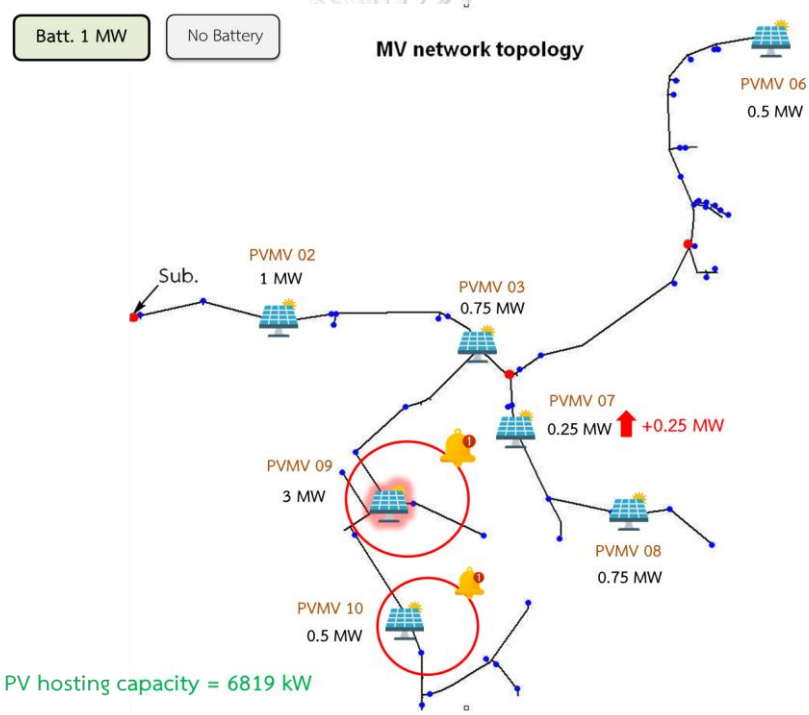
จากรูปที่ 4.4 ค่า PV hosting capacity ที่น้อยที่สุดในกรณีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1เมกะวัตต์ คือ 6819 กิโลวัตต์ ในกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ และกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า, 7863 กิโลวัตต์ ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง และ 7598 กิโลวัตต์ ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง



รูปที่ 4.5 ช่วงค่า PV hosting capacity กรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์

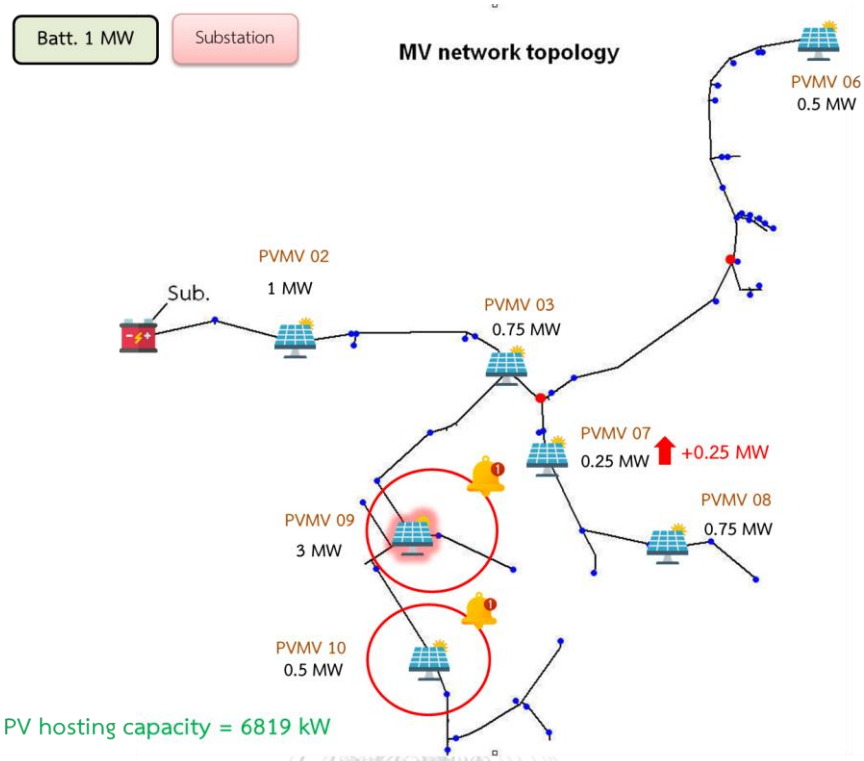
จากรูปที่ 4.5 ค่า PV hosting capacity ที่น้อยที่สุดในกรณีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์ คือ 6830 กิโลวัตต์ ในกรณีไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ และกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า, 9108 กิโลวัตต์ ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง และ 8104 กิโลวัตต์ ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง

ตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่เป็นค่า PV hosting capacity ที่ต่ำที่สุดของทั้ง 10 สถานการณ์ในกรณีพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์ และ 2 เมกะวัตต์ แสดงดังรูปที่ 4.6 - รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์

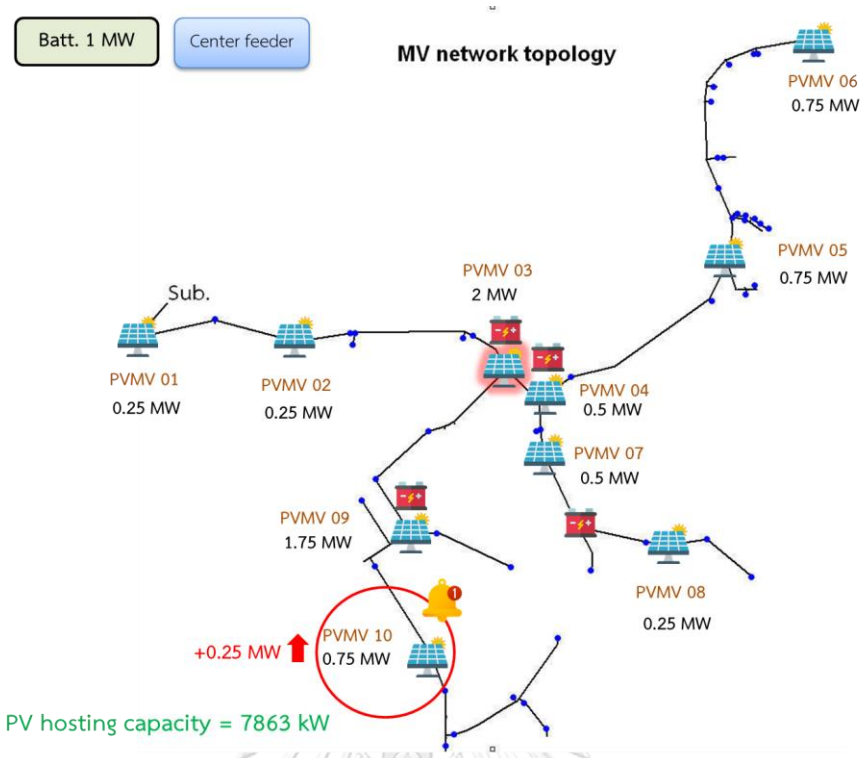
จากรูปที่ 4.6 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 6819 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 3 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 07 เนื่องจากมี PVMV 07 อยู่แล้วจึงเพิ่มกำลังผลิตจาก 0.25 เมกะวัตต์ เป็น 0.5 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 09 และ 10



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าขนาด 1 เมกะวัตต์

จากรูปที่ 4.7 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าขนาด 1 เมกะวัตต์ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 6819 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 3 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 07 เนื่องจากมี PVMV 07 อยู่แล้ว จึงเพิ่มกำลังผลิตจาก 0.25 เมกะวัตต์ เป็น 0.5 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 09 และ 10 โดยขณะนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าอยู่ในสภาวะชาร์จรับกำลังไฟฟ้าจริง 1 เมกะวัตต์

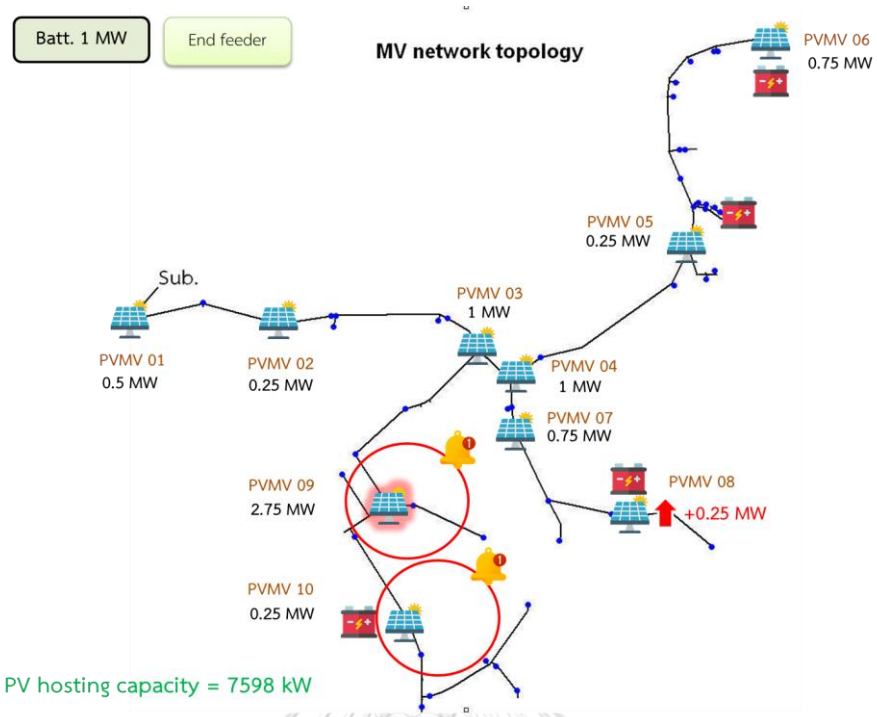
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งขนาด 1 เมกะวัตต์

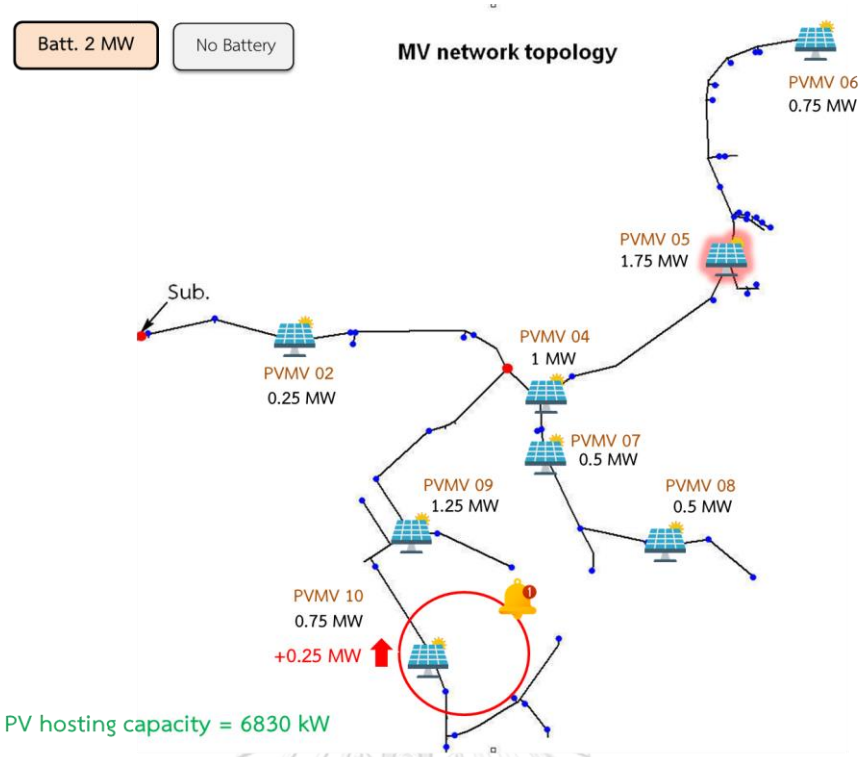
จากรูปที่ 4.8 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งขนาด 1 เมกะวัตต์ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 7863 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 2 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 10 เนื่องจากมี PVMV 10 อยู่แล้ว จึงเพิ่มกำลังผลิตจาก 0.75 เมกะวัตต์ เป็น 1 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 10 โดยขณะนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าที่กลางสายตัวที่ 1-3 อยู่ในสภาวะชาร์จรับกำลังไฟฟ้าจริง 0.25 เมกะวัตต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งขนาด 1 เมกะวัตต์

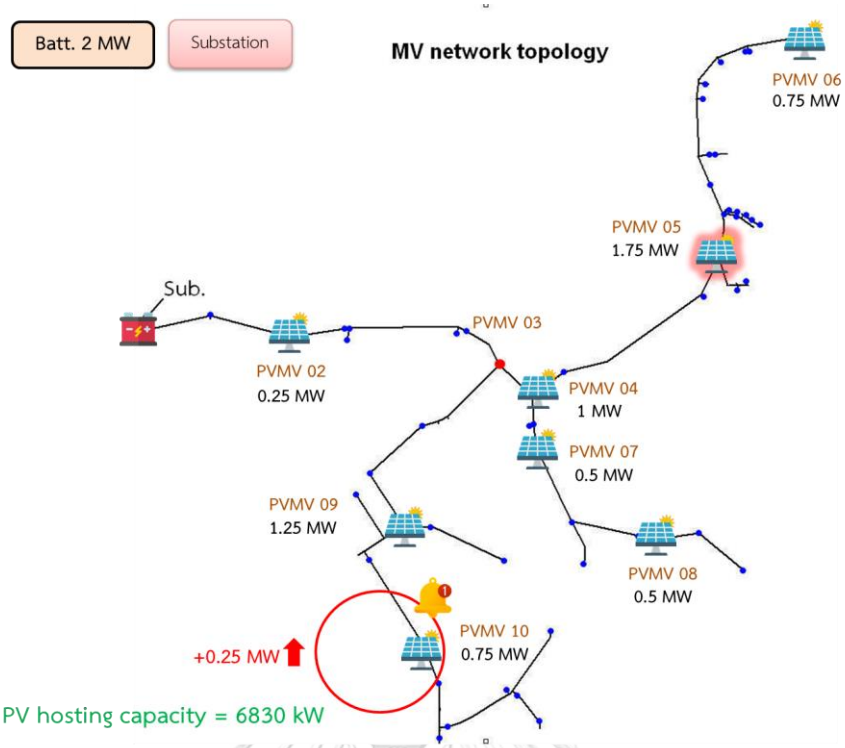
จากรูปที่ 4.9 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งขนาด 1 เมกะวัตต์ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 7598 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 2.75 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 08 เนื่องจากไม่มี PVMV 08 อยู่ จึงติดตั้ง PVMV 08 ขนาด 0.25 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 9 และ 10 โดยขณะนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าที่ปลายสายส่งตัวที่ 1 อยู่ในสภาวะชาร์จรับรับกำลังไฟฟ้าจริง 0.25 เมกะวัตต์ และตัวที่ 2 อยู่ในสภาวะชาร์จรับรับกำลังไฟฟ้าจริง 0.17 เมกะวัตต์



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์

จากรูปที่ 4.10 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 6830 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 1.75 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 10 เนื่องจากมี PVMV 10 อยู่แล้วจึงเพิ่มกำลังผลิตจาก 0.75 เมกะวัตต์ เป็น 1 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 10

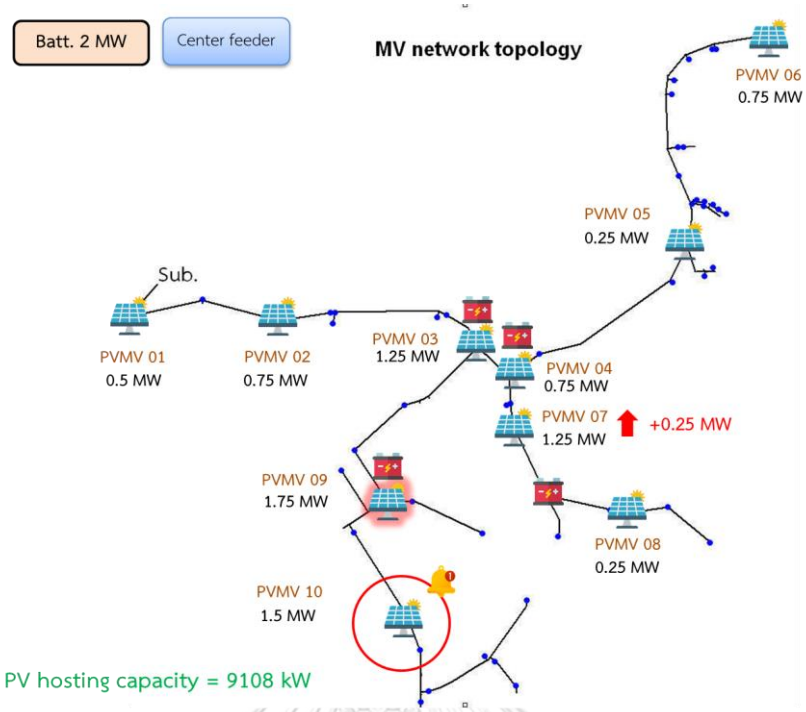
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าขนาด 2 เมกะวัตต์

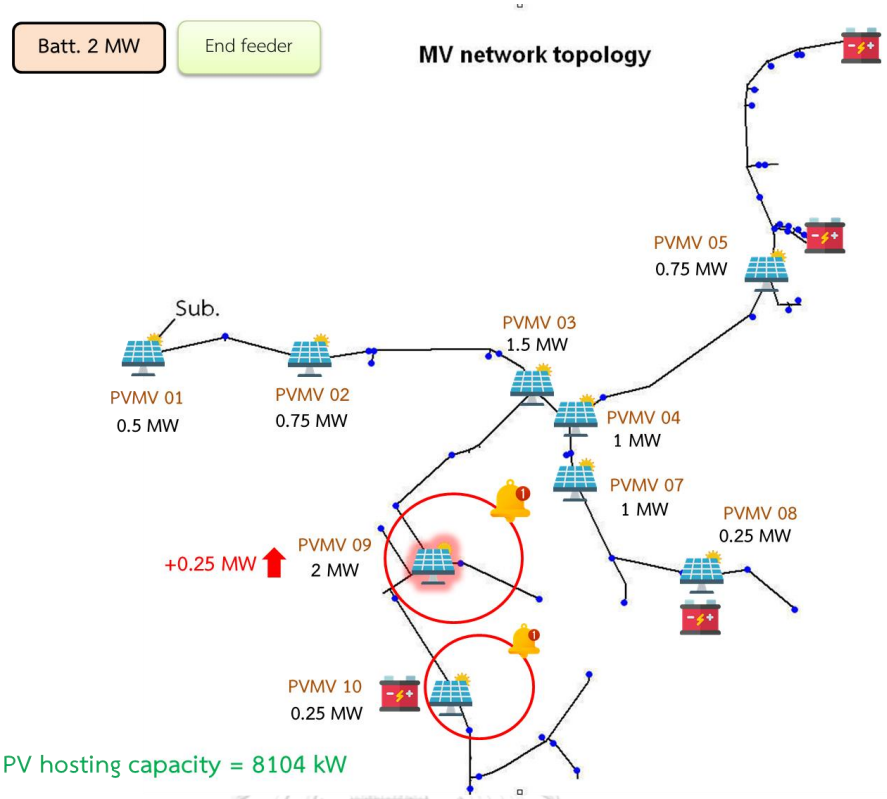
จากรูปที่ 4.11 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าขนาด 2 เมกะวัตต์ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 6830 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 1.75 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 10 เนื่องจากมี PVMV 10 อยู่แล้ว จึงเพิ่มกำลังผลิตจาก 0.75 เมกะวัตต์ เป็น 1 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 10 โดยขณะนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าอยู่ในสภาวะชาร์จรับกำลังไฟฟ้าจริง 2 เมกะวัตต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.12 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งขนาด 2 เมกะวัตต์

จากรูปที่ 4.12 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่งขนาด 2 เมกะวัตต์ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 9108 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 1.75 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 07 เนื่องจากมี PVMV 07 อยู่แล้ว จึงเพิ่มกำลังผลิตจาก 1.25 เมกะวัตต์ เป็น 1.5 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 10 โดยขณะนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าที่กลางสายตัวที่ 1-3 อยู่ในสภาวะชาร์จรับกำลังไฟฟ้าจริง 0.5 เมกะวัตต์



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งขนาด 2 เมกะวัตต์

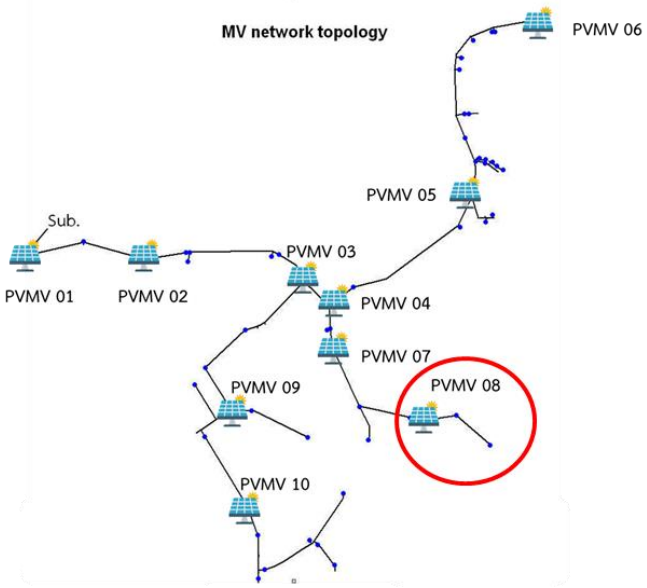
จากรูปที่ 4.13 จะแสดงเฉพาะตำแหน่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับระบบทดสอบและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งขนาด 2 เมกะวัตต์ ซึ่งมีค่า PV hosting capacity เท่ากับ 8104 กิโลวัตต์ โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่สุดขนาด 2 เมกะวัตต์ เมื่อทำการสุ่มแบบเอกรูปเพิ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ตัวถัดไปก็คือ PVMV 09 เนื่องจากมี PVMV 09 อยู่แล้ว จึงเพิ่มกำลังผลิตจาก 2 เมกะวัตต์ เป็น 2.25 เมกะวัตต์ พบว่าเกิดปัญหาด้านแรงดันเกิน 1.05 p.u. ที่ PVMV 9 และ 10 โดยขณะนั้นระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าที่ปลายสายส่งตัวที่ 3 อยู่ในสภาวะชาร์จรับรับกำลังไฟฟ้าจริง 0.12 เมกะวัตต์

ส่วนในการพิจารณาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ตำแหน่งการติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ จากค่า PV hosting capacity ที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่า ค่า PV hosting capacity กรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่กับกรณีติดตั้งแบตเตอรี่ที่สถานที่ไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน แต่กำลังไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับกับ แรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าต่างกันดัง

ตารางที่ 4.5 และตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดปัญหาแรงดันเกินดังรูปที่ 4.14 แต่จะเห็นชัดมากขึ้นในกรณีแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์ ดังตารางที่ 4.6 และตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดปัญหาแรงดันเกินดังรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์กรณีค่า PV hosting capacity กรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 1 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า

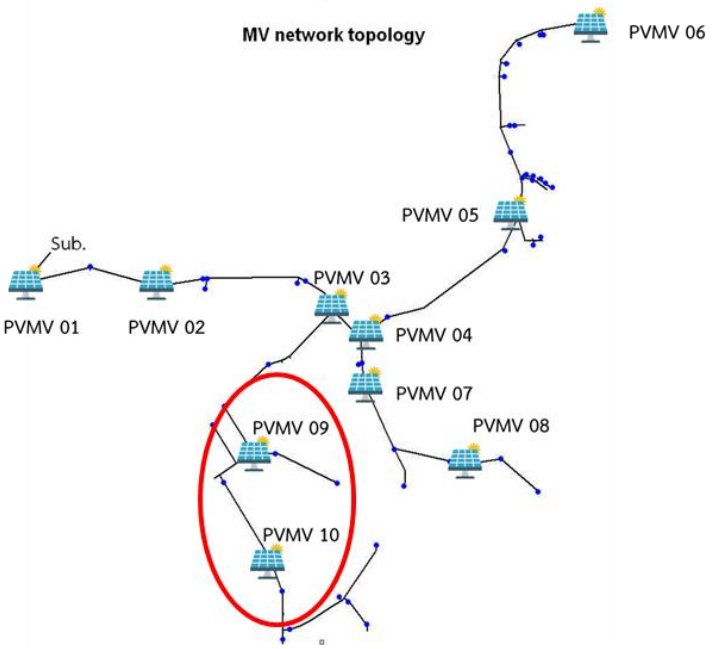
กรณี	กำลังไฟฟ้าไหลย้อน (MW)	PVMV 08	แบตเตอรี่ (ชาร์จ)
		V (p.u.)	P (MW)
ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่	6.53	1.05034	0
ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า	5.53	1.05033	1



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดปัญหาแรงดันเกินกรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 1 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์กรณีค่า PV hosting capacity กรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 2 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า

กรณี	กำลังไฟฟ้าไหลย้อน (MW)	PVMV 09	PVMV 10	แบตเตอรี่ (ชาร์จ)
		V (p.u.)	V (p.u.)	P (MW)
ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่	-7.01	1.05045	1.05050	0
ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้า	-5.01	1.05040	1.05045	2



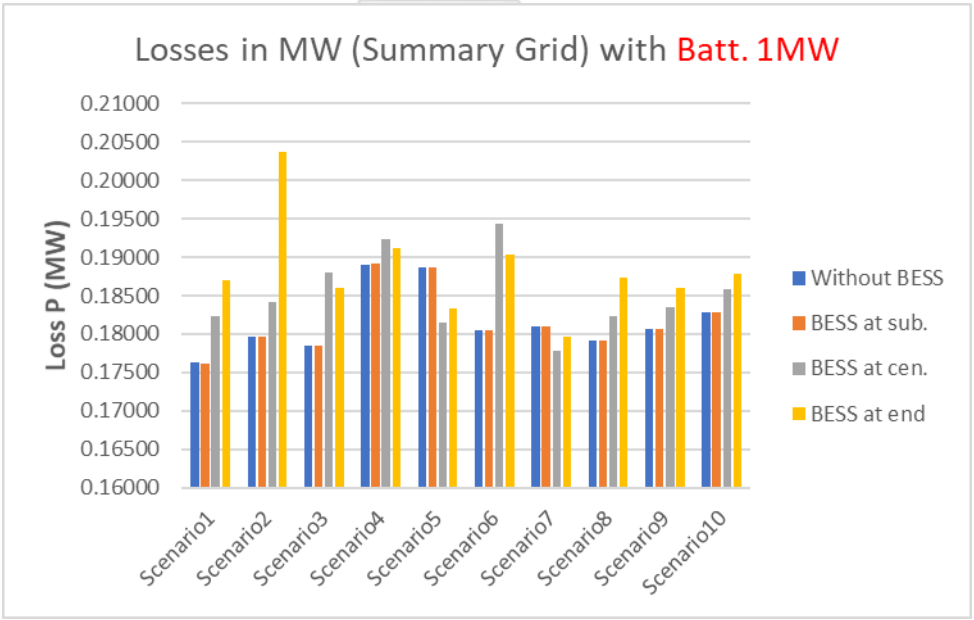
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดปัญหาแรงดันเกินกรณีที่ไม่ติดตั้งแบตเตอรี่และติดตั้งแบตเตอรี่ 2 เมกะวัตต์ ที่สถานีไฟฟ้า

แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าค่า PV hosting capacity กรณีที่ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่กับกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าทุกกรณีจะมีค่าเท่ากันตลอด เพราะบางกรณีที่มีสุ่มการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ลงบริเวณใกล้กับสถานีไฟฟ้า ทำให้ค่า PV hosting capacity ที่กรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้ามีค่า

มากกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ การที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ช่วยเพิ่มค่า PV hosting capacity ได้เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ช่วยลดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในระบบลดลงทำให้สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่า PV hosting capacity จะเท่าเดิมหรือมากขึ้นมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งการติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

4.3.2 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบในแต่ละสถานการณ์จำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบทดสอบจะเท่ากับ 0.145 เมกะวัตต์ ซึ่งในทุกกรณีที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เท่ากับค่า PV hosting capacity จะเห็นว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งสิ้น เมื่อพิจารณาสถานการณ์จำลอง พบว่าบางสถานการณ์ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน แต่บางสถานการณ์ก็มีแนวโน้มที่ต่างออกไป ดังรูปที่ 4.16 และ รูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบกรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 1 เมกะวัตต์

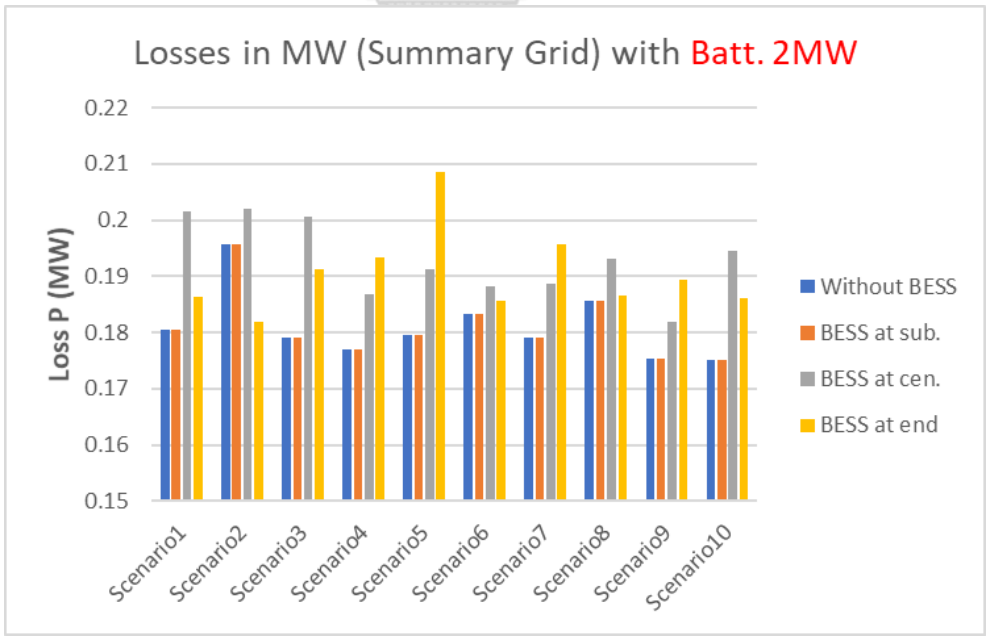
จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าแทบจะไม่ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเลย เนื่องจากเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดปัญหากำลังไฟฟ้าไหลย้อนไหล ซึ่งกว่า

กำลังไฟฟ้าส่วนเกินนี้จะไหลไปเก็บที่ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่อยู่สถานีไฟฟ้าก็ทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียระหว่างทาง ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบทดสอบแต่ละสถานการณ์จะมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ยกตัวอย่างเช่น

- ในสถานการณ์จำลองที่ 2 (Scenario2) ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งแต่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตมากที่สุด (2 เมกะวัตต์) ติดตั้งบริเวณกลางสายส่ง เพราะฉะนั้นทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเกิดขึ้นในระบบมาก เมื่อเทียบกับกรณีที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

- ในสถานการณ์จำลองที่ 5 (Scenario5) ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตมากที่สุด (2.75 เมกะวัตต์) ซึ่งติดตั้งอยู่ใกล้กับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงมาก เมื่อเทียบกับกรณีอื่น

- ในสถานการณ์จำลองที่ 6 (Scenario6) ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตมากที่สุด (1.75 เมกะวัตต์) ซึ่งติดตั้งอยู่ใกล้กับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่ง ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงเมื่อเทียบกับกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง



รูปที่ 4.17 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบกรณีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขนาด 2 เมกะวัตต์

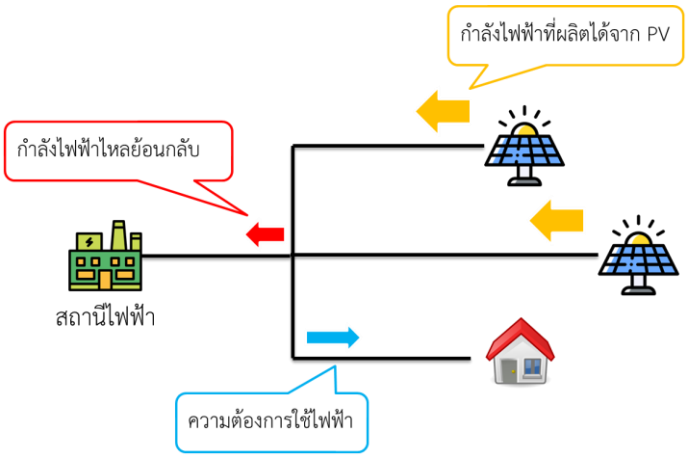
จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าถึงแม้จะเพิ่มขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขึ้นเป็น 2 เมกะวัตต์ การติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่สถานีไฟฟ้าแทบจะไม่ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเลย โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบก็ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งและกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ รวมทั้งตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ยกตัวอย่างเช่น

- ในสถานการณ์จำลองที่ 2 (Scenario2) ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่กลางสายส่ง ถึงแม้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตมากที่สุด (2 เมกะวัตต์) ติดตั้งบริเวณกลางสายส่ง แต่กำลังไฟฟ้าสูญเสียก็ขึ้นกับกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ามาในระบบไฟฟ้าด้วย ยิ่งมี ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ายิ่งส่งผลให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น ถ้าเกิดไม่มีระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ช่วยกักเก็บกำลังไฟฟ้าส่วนที่เกิดความต้องการ

- ในสถานการณ์จำลองที่ 5 (Scenario5) ในกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ปลายสายส่งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตมากที่สุด (2 เมกะวัตต์) ติดตั้งบริเวณกลางสายส่ง ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับเกิดขึ้นในระบบมาก

4.3.3 ปัจจัยของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ในช่วงเวลาที่ปริมาณกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบ ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ยิ่งกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งห่างจากสถานีไฟฟ้ามากก็ยิ่งทำให้กำลังไฟฟ้าไหลย้อนอยู่ในระบบนานยิ่งขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียก็ยิ่งเพิ่ม ดังกรณีในรูปที่ 4.18



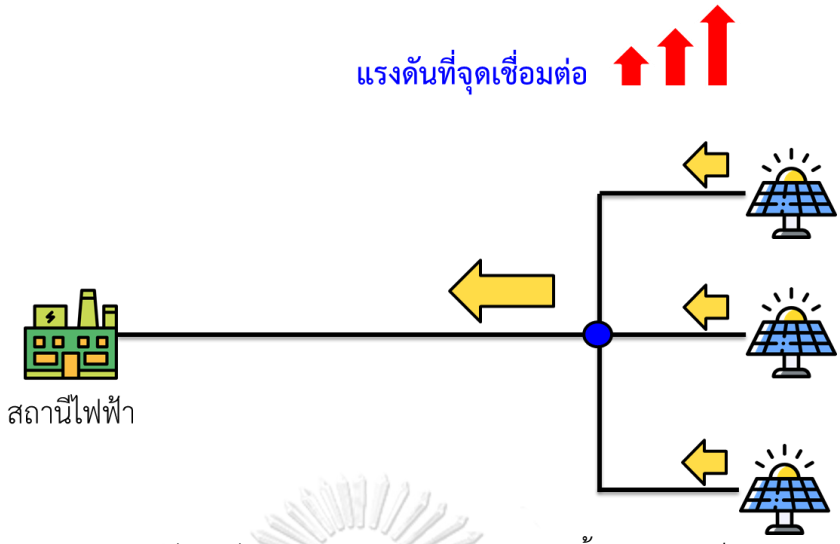
รูปที่ 4.18 ทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าส่วนเกิน

จากรูปที่ 4.18 สามารถสรุปได้ว่าทั้งกำลังผลิตและตำแหน่งการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้า รวมทั้งถ้าความต้องการใช้ไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้นก็สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เพิ่ม ส่งผลให้ค่า PV hosting capacity เพิ่มขึ้น

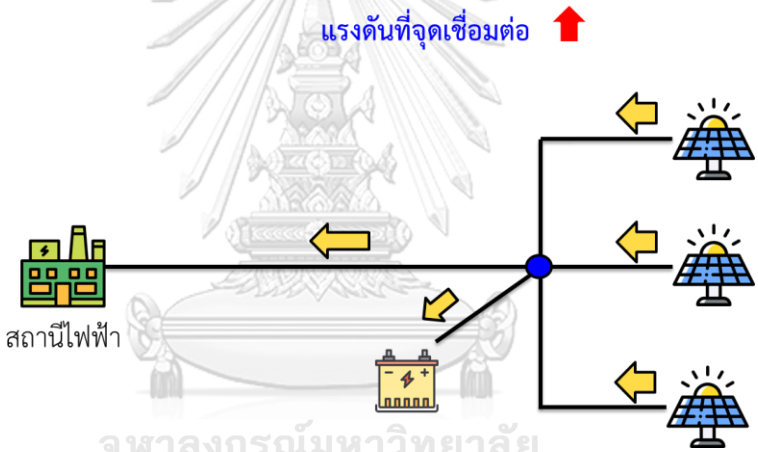
4.3.4 ปัจจัยของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย

ในการพิจารณาควบคู่กับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่กรณีที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณสถานีไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มค่า PV hosting capacity มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ถ้าเกิดระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งเพิ่มบริเวณสถานีไฟฟ้าการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ก็จะช่วยเพิ่มค่า PV hosting capacity ได้แต่ถึงอย่างนั้นการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในระบบก็เป็นการช่วยลดกำลังไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในระบบลดลงทำให้สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไม่มากก็น้อยขึ้นอยู่กับขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ส่วนกรณีที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณกลางสายส่งช่วยเพิ่มค่า PV hosting capacity ได้อย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากว่าการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณกลางสายส่ง เป็นตำแหน่งที่มีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับจากบริเวณต่างๆ ในระบบไฟฟ้าไหลมารวมกันและระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ก็จะทำหน้าที่เก็บกำลังไฟฟ้าส่วนเกินนั้นไปทำให้แรงดันในระบบลดลง ดังรูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20 และในกรณีที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณปลายส่งก็จะช่วยเพิ่มค่า PV hosting capacity ได้น้อยกว่าเพราะว่าโอกาสที่จะเกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่ตำแหน่งนั้นมีน้อยกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.19 แรงดันและกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับในระบบ ก่อนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

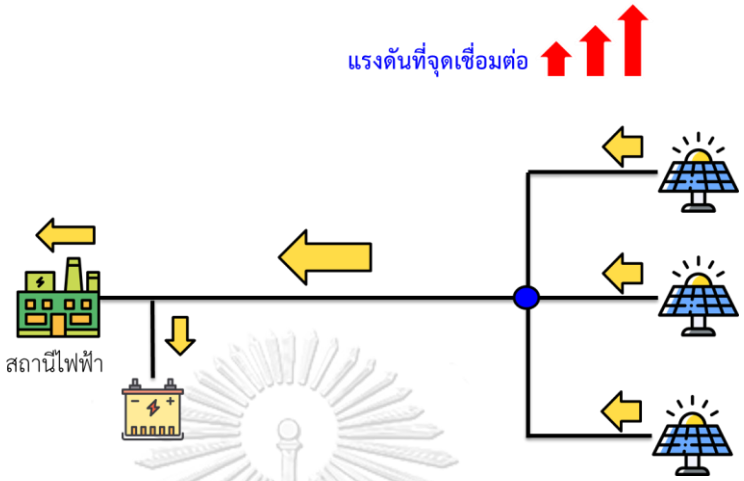


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.20 แรงดันและกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับในระบบ หลังติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณกลางสายส่ง

จากรูปที่ 4.19 และ รูปที่ 4.20 จะเห็นว่าการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ใกล้กับตำแหน่งที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะช่วยรับกำลังไฟฟ้าส่วนเกิน รวมทั้งส่งผลให้แรงดัน ณ ตำแหน่งที่เชื่อมต่อลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณสถานีไฟฟ้าจะพบว่าแรงดันที่ตำแหน่งที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงมีค่าสูงเท่าเดิม เนื่องจากตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่อยู่ห่างจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มาก แต่ก็ยังสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าที่ไหลย้อนกลับเข้า

สถานีไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 4.21 เพราะฉะนั้นค่า PV hosting capacity จะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่



รูปที่ 4.21 แรงดันและกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับในระบบ หลังติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่บริเวณสถานีไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีคำนวณกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตยที่รองรับได้ (PV hosting capacity) ของระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางโดยพิจารณาระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ เนื่องจากในปัจจุบันภาครัฐบาลมีการสนับสนุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ส่งผลให้มีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้ามากขึ้น โดยพิจารณาร่วมกับเกณฑ์ด้านแรงดัน, เกณฑ์พิกัดการรับโหลดของสายส่ง และ เกณฑ์พิกัดการรับโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า ในการคำนวณหาค่า PV hosting capacity ตำแหน่งการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้การสุ่มแบบเอกรูป (uniform random) เนื่องจากการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์อาจจะเป็นแบบกระจายตัวทั้งระบบ หรืออาจจะเป็นกลุ่มตามผู้ใช้ไฟฟ้าก็ได้ เพื่อที่จะให้ครอบคลุมถึงโอกาสที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีต่างๆ

จากการสร้างสถานการณ์ทดสอบเพื่อหาค่า PV hosting capacity ของระบบทดสอบในกรณีที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ติดตั้งเข้ามาในระบบในตำแหน่งต่างๆ โดยพิจารณาควบคู่กับกรณีที่ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่และกรณีติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ในบริเวณสถานีไฟฟ้า, บริเวณกลางสายส่ง และ บริเวณปลายสายส่ง พบว่าเกณฑ์ที่ส่งผลต่อค่า PV hosting capacity ในการกำหนดค่า PV hosting capacity ของระบบทดสอบคือ เกณฑ์ด้านแรงดัน (แรงดันเกิน)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยสถานการณ์ทดสอบทั้งหมด ค่า PV hosting capacity จะโดนกำหนดด้วยเกณฑ์ด้านแรงดัน แต่ที่เลือกค่า PV hosting capacity ที่ต่ำที่สุดในแต่ละสถานการณ์จำลอง เพราะว่าเป็นการยืนยันว่าไม่ว่าจะติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเท่าไหร่ถ้ารวมกันไม่เกินค่า PV hosting capacity นี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ ซึ่งค่า PV hosting capacity ที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีการเพิ่มขึ้นมากหรือน้อย หรือไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการติดตั้งและขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ รวมทั้งต้องพิจารณาควบคู่ไปกับตำแหน่งการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพราะต้องคำนึงถึงเรื่องกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับ ดังนั้นค่า PV hosting capacity ในระบบทุกระบบจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้

1. กำลังการผลิตและตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
2. ขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่
3. โครงสร้างของระบบไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของอุปกรณ์
4. ความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า

โดยส่วนของภาพรวมกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจะเพิ่มขึ้นตามกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ามาในระบบ เนื่องจากความต้องการการใช้ไฟฟ้าเท่าเดิมแต่มีกำลังการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้นทำให้เกิดการไหลย้อนกลับของกำลังไฟฟ้า แต่ถ้าพิจารณาควบคู่กับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าส่วนเกิน ส่งผลให้ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและแรงดันในระบบไฟฟ้าลดลง แต่ก็ขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่

5.2 ข้อเสนอแนะของวิทยานิพนธ์

- การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ควรคำนวณหาค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบทดสอบนั้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันส่งผลให้ความสามารถในการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่แตกต่างกันออกไป อีกทั้งยังส่งผลให้ได้ค่า PV hosting capacity ที่แตกต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ในการเพิ่มค่า PV hosting capacity โดยการใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ที่ติดตั้งอยู่บนระบบไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด อาจจะต้องใช้เทคนิคการ optimization ในการพิจารณาเลือกตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งของแบตเตอรี่ เพื่อที่จะได้ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุด

- การคำนวณหาค่า PV hosting capacity เป็นการสุ่มแบบเอกรูปจำลองสถานการณ์ในการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าที่อาจจะเกิดขึ้น ดังนั้นขอบเขต ความแม่นยำและถูกต้องขึ้นอยู่กับสถานการณ์จำลองที่เกิดขึ้น เนื่องจากไม่สามารถคาดเดาได้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของ PV บริเวณใด ขนาดเท่าไหร่บ้าง

บรรณานุกรม

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "รายงานสถานภาพการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย พ.ศ. 2557- 2558," กรุงเทพฯ.

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 – 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015)," กรุงเทพฯ2015.

[3] S. Eftekharnejad, V. Vittal, Heydt, B. Keel, and J. Loehr, "Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 28, no. 2, pp. 893-901, 2013.

[4] R. A. Kordkheili, B. Bak-Jensen, R. Jayakrishnan, and P. Mahat, "Determining maximum photovoltaic penetration in a distribution grid considering grid operation limits," in *IEEE PES General Meeting*, 2014, pp. 1-5.

[5] A. Navarro, L. F. Ochoa, and D. Randles, "Monte Carlo-based assessment of PV impacts on real UK low voltage networks," in *IEEE PES General Meeting*, 2013, pp. 1-5.

[6] H. Quan, B. Li, X. Xiu, and D. Hui, "Impact analysis for high-penetration distributed photovoltaic generation integrated into grid based on DIgSILENT," in 2017 *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2017, pp. 1-6.

[7] P. H. Divshali and L. Söder, "Improving hosting capacity of rooftop PVs by quadratic control of an LV-central BSS," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 10, no. 1, pp. 919-927, 2019.

[8] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559," กรุงเทพฯ2016.

[9] กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้าฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, "หลักเกณฑ์การวางแผนระบบไฟฟ้า ปี 2560 (Power System Planning Criteria : PSPC)," กรุงเทพฯ2017.

[10] J. Smith, "Alternatives to the 15% Rule Modeling and Hosting Capacity Analysis of 16 Feeders," Electric Power Research Institute (EPRI), USAApril 2015.

[11] A. S. Masoum, P. S. Moses, M. A. Masoum, and A. Abu-Siada, "Impact of rooftop

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

PV generation on distribution transformer and voltage profile of residential and commercial networks," in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT),* 2012 *IEEE PES*, 2012, pp. 1-7.

[12] L. Xu, "Impact studies of PV integration in distribution systems," IEEE PES General Meeting, National Harbor, MDJuly 29 2014.

[13] A. Dubey, S. Santoso, and A. Maitra, "Understanding photovoltaic hosting capacity of distribution circuits," in *IEEE PES General Meeting*, 2015, pp. 1-5.

[14] A. Ballanti, F. Pilo, A. Navarro-Espinosa, and L. F. Ochoa, "Assessing the benefits of PV var absorption on the hosting capacity of LV feeders," in *Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE),* 2013 4*th IEEE/PES*, 2013, pp. 1-5.

[15] A. Ballanti and L. F. Ochoa, "On the integrated PV hosting capacity of MV and LV distribution networks," in *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM),* 2015 *IEEE PES*, 2015, pp. 366-370.

[16] B. B. Navarro and M. M. Navarro, "A comprehensive solar PV hosting capacity in MV and LV radial distribution networks," in *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe),* 2017 *IEEE PES*, 2017, pp. 1-6.

[17] F. Ding, B. Mather, and P. Gotseff, "Technologies to increase PV hosting capacity in distribution feeders," in *Power and Energy Society General Meeting (PESGM),* 2016, 2016, pp. 1-5.

[18] D. A. Sarmiento, P. P. Vergara, L. C. Da Silva, and M. C. De Almeida, "Increasing the PV hosting capacity with OLTC technology and PV VAr absorption in a MV/LV rural Brazilian distribution system," in *Harmonics and Quality of Power (ICHQP),* 2016 17*th International Conference on*, 2016, pp. 395-399.

[19] T. Chaiyatham and I. Ngamroo, "Bee colony optimization of battery capacity and placement for mitigation of voltage rise by PV in radial distribution network," in *IPEC,* 2012 *Conference on Power & Energy*, 2012, pp. 13-18.

[20] สุทธิพล พฤกษะวัน และ พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์, "ผลของการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อปริมาณกำลังผลิตที่สามารถติดตั้งได้สูงสุดในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง," *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 41*, อุบลราชธานี, 21-23 พฤศจิกายน 2561, หน้า 113-116.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุทธิพล พฤกษะวัน
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤศจิกายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ที่อยู่ปัจจุบัน	91/1049 ซอยนวลจันทร์ 56 แยก1 แขวงนวลจันทร์ เขตบึงกุ่ม กรุงเทพฯ 10230
ผลงานตีพิมพ์	สุทธิพล พฤกษะวัน และ พิสิษฐ์พล จิรพงศานานุรักษ์, "ผลของการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อปริมาณกำลังผลิตที่สามารถติดตั้งได้สูงสุดในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 41, อุบลราชธานี, 21-23 พฤศจิกายน 2561, หน้า 113-116.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY