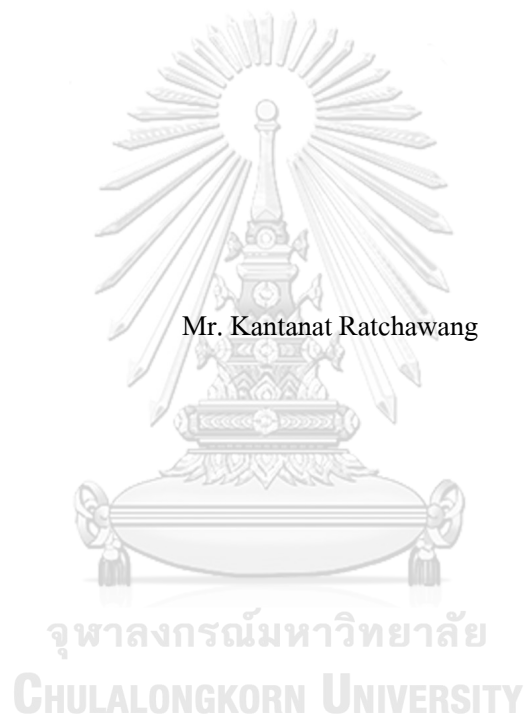


การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับ โพรเซสเซอร์ด้วยพีวีอินเวอร์เตอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2566

Optimal reverse power flow control for prosumers using PV inverter



Mr. Kantanat Ratchawang

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 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับ โพรเซสเซอร์ด้วยพีวีอินเวอร์เตอร์
โดย	นายกานตนาถ ราชฉวาง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)	
.....	กรรมการ
(ดร.พิสิษฐ์พล จีรพงสานานุรักษ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย งามหรุ)	

งานขนาด ราชฉวาง : การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโพรซูเมอร์ด้วยพีวีอินเวอร์เตอร์. (Optimal reverse power flow control for prosumers using PV inverter) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยพีวีอินเวอร์เตอร์ของโพรซูเมอร์ กำลังไฟฟ้าไหลย้อนที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดปริมาณด้วยแนวคิดการพิจารณาโครงข่ายไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นระบบกักเก็บพลังงานเสมือน แนวคิดดังกล่าวจะสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับปริมาณไฟฟ้าไหลย้อนของโพรซูเมอร์ อีกทั้งสร้างรายได้ให้แก่ผู้ดูแลโครงข่ายระบบจำหน่าย ผ่านทางอัตราค่าบริการพลังงานไฟฟ้าไหลย้อนที่ต่ำกว่าอัตราค่าไฟฟ้า โดยส่วนต่างของอัตราถือเป็นค่าบริการฝากพลังงาน ผลการศึกษา กรณีระบบการจัดการพลังงานที่นำเสนอควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์ของโพรซูเมอร์เพียงอย่างเดียว โดยอนุญาตให้มีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนที่จำกัด พบว่า จะช่วยลดค่าไฟฟ้าสุทธิ ลดการจำกัดปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสุทธิ โดยมีพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบการจัดการพลังงาน คือ อัตราค่าบริการฝากพลังงาน และขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าไหลย้อน เมื่อทดสอบในกรณีที่กำหนดขีดจำกัดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของโพรซูเมอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่จะเกิดผลกระทบแรงดันเกินในระบบจำหน่าย พบว่า ระบบจัดการพลังงานที่สามารถสั่งการโหลดที่ควบคุมได้ ร่วมกับการควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์ จะยังส่งผลต่อการช่วยลดค่าไฟฟ้าสุทธิลงได้อีกอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ทดลองใช้งานฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดันของอินเวอร์เตอร์โดยเลือกใช้แบบปรับค่าตัวประกอบกำลังตามกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลผ่านจุดเชื่อมต่อ โดยให้การควบคุมค่าตัวประกอบกำลังมีค่าอยู่ในช่วง 0.9 นำหน้า ถึง 0.9 ล้าหลัง ผลลัพธ์จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้งานฟังก์ชันดังกล่าวมีส่วนช่วยให้ขนาดของแรงดันกระจายตัวอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้ดียิ่งขึ้น ลดการปรับแก้ของหม้อแปลงรักษาแรงดัน จากโดยเฉลี่ยวันละประมาณ 10 เหลือ 6 ครั้งต่อวัน ขณะที่ พลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 0.03 เมื่อเทียบกับกรณี ไม่ใช้งานฟังก์ชันรักษาแรงดันของพีวีอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ดี ผลกระทบดังกล่าวสามารถละเลยได้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนิติ
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6470138021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: PV Inverter, Voltage regulation, Reverse power flow, Prosumer, Net zero energy

Kantanat Ratchawang : Optimal reverse power flow control for prosumers using PV inverter .

Advisor: NAEBBOON HOONCHAREON

This thesis proposes energy management for optimal reverse power flow control using a PV inverter of a prosumer. It treats a distribution network as a virtual energy storage system while limiting the magnitude of allowable reverse power flow. This concept adds value to the prosumer's reverse power flow and provides additional income for the distribution system operator through setting the purchasing rate of reverse power flow lower than the respective electricity tariff for the prosumer. Such rate difference can be taken as a service fee for prosumer's energy deposit to the grid. Test results revealed that when the proposed prosumer's energy management system controls only the PV inverter by allowing reverse power flow to the grid with set limit, the net cost of electricity, the curtailment of solar energy production and the net energy consumption can all be reduced. The key parameters affecting the energy management system performance are the service fee and the reverse power flow limit. In the case when the reverse power flow limit is set at 10 percent of peak demand of the prosumer, to avoid large amount of reverse power flow possibly causing an overvoltage problem in a distribution system, it was found that integrating control of flexible loads into the energy management system can further reduce the net electricity cost, significantly. Additionally, experiments on enabling a voltage support function of the PV inverter, with the characteristic of adjustable power factor in the range between 0.9 leading and 0.9 lagging with respect to the amount of real power at the point of common connection, showed that this could improve voltage regulation performance in the distribution network and reduced the number of transformer tap operations from an average of around 10 times to 6 times per day, while the total energy loss in the medium-voltage distribution increased approximately 0.03 percent, compared to the respective cases without enabling any voltage support function. Nonetheless, such an impact can be negligible.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2023

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จหากปราศจากคำชี้แนะจาก รองศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความอนุเคราะห์ด้านคำปรึกษาในการทำวิจัยตลอดจนถึง การอบรมสั่งสอน เพื่อให้ผู้เขียนสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปปรับใช้ในการดำเนินชีวิต ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ อาจารย์ ดร. พิสิษฐ์พล จิรพวงसानนุรักษ์ และ ศาสตราจารย์ ดร. อิศระชัย งามหรุ ที่ให้คำชี้แนะเพื่อปรับปรุงและ พัฒนางานวิจัยให้ดีขึ้น เนื้อหาบางส่วนในวิทยานิพนธ์ได้แนวคิดจากการไปฝึกงานที่ การไฟฟ้าส่วน ภูมิภาคสำนักงานใหญ่ ผู้เขียนขอขอบพระคุณ พี่ๆ กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผน ระบบไฟฟ้า ที่ให้คำแนะนำที่ดีตลอดระยะเวลาที่เข้าไปทำวิจัยและฝึกงาน ท้ายสุด ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบโอกาส ทุนการศึกษา ตลอดจน สนับสนุนค่าใช้จ่ายอื่นๆ ซึ่งช่วยส่งเสริมให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กานตนาถ ราชฉวาง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า	4
2.1.1 ผลกระทบด้านแรงดัน	4
2.1.2 ผลกระทบด้านกำลังสูญเสีย	5
2.2 การทำงานของพีวีอินเวอร์เตอร์	7
2.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทย	8

2.3.1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	8
2.3.2 การไฟฟ้านครหลวง	9
2.4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าใน ต่างประเทศ.....	9
2.4.1 เยอรมนี.....	9
2.4.2 สหรัฐอเมริกา.....	13
2.3.3 ญี่ปุ่น	15
2.4.4 สหราชอาณาจักร	16
2.5 เปรียบเทียบข้อกำหนดการเชื่อมต่อระหว่างประเทศไทยและต่างประเทศ	18
2.6 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของพีวอินเวอร์เตอร์.....	19
2.6.1 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี P(U).....	19
2.6.2 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U).....	20
2.6.3 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Fixed Q	21
2.6.4 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี $\cos\phi(P)$	23
2.6.5 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีตัวประกอบกำลังคงที่	24
2.7. การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการจัดการพลังงานของโพรซูเมอร์	24
บทที่ 3 ระบบจำหน่ายทดสอบ	29
3.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม	29
3.1.1 โครงสร้างของระบบ	29
3.1.2 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบ.....	31
3.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ธุรกิจ	34
3.2.1 โครงสร้างของระบบทดสอบ.....	34
3.2.2 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบ.....	36
บทที่ 4 การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโพรซูเมอร์.....	39

4.1 ภาพรวมระบบการจัดการพลังงานสำหรับโพรซูเมอร์	39
4.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์	40
4.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดปัญหา	40
4.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	41
4.2.2 การสร้างแบบจำลององค์ประกอบและข้อจำกัด	41
4.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์และโหลดที่ควบคุมได้	42
4.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดปัญหา.....	42
4.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	43
4.3.3 การสร้างแบบจำลององค์ประกอบและข้อจำกัด	43
4.4 ดัชนีเพื่อประเมินสมรรถนะระบบจัดการพลังงานของโพรซูเมอร์	45
4.4.1 ค่าไฟฟ้าสุทธิ	46
4.4.2 อัตราส่วนการจำกัดปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	46
4.4.3 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าสุทธิ.....	46
บทที่ 5 การศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนระบบจำหน่าย	47
5.1 การศึกษาผลกระทบบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม	47
5.1.1 ขั้นตอนการศึกษา	47
5.1.2 การกำหนดขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	47
5.1.3 กรณีศึกษาและสมมุติฐาน	48
5.1.4 ผลการศึกษา.....	49
5.2 การศึกษาผลกระทบบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ	52
5.2.1 ขั้นตอนการศึกษา	52
5.2.2 การกำหนดขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์	52
5.2.3 กรณีศึกษาและสมมุติฐาน	53
5.2.4 ผลการศึกษา.....	53

5.3 สรุป	55
บทที่ 6 การศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด	56
6.1 ผลการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์	56
6.1.1 ขั้นตอนการศึกษา	56
6.1.2 การศึกษาเชิงความไวการเปลี่ยนแปลงของส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้าและการจำกัด ปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อน	58
6.2 ผลการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์และโหลดที่ควบคุมได้	59
6.2.1 ขั้นตอนการศึกษา	59
6.2.2 การศึกษาเชิงความไวการเพิ่มขึ้นของปริมาณโหลดที่ควบคุมได้	61
บทที่ 7 การศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด พร้อมฟังก์ชันการช่วยรักษา แรงดัน	65
7.1 ขั้นตอนการศึกษา	65
7.1.1 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี $\cos\phi(P)$	68
7.1.2 คำนวณเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงข่าย	69
7.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดต่อระบบจำหน่าย	70
บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต	73
8.1 สรุปผลการดำเนินงาน	73
8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต	74
บรรณานุกรม	75
ประวัติผู้เขียน	79

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 มาตรฐานระดับแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	8
ตารางที่ 2 วิธีการควบคุมแรงดัน และ ความสามารถในการปรับตัวประกอบกำลัง	8
ตารางที่ 3 มาตรฐานระดับแรงดัน และ ความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง	9
ตารางที่ 4 ระบบจำหน่ายแรงดันสูงของประเทศเยอรมนี	10
ตารางที่ 5 ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางของประเทศเยอรมนี	11
ตารางที่ 6 ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำของประเทศเยอรมนี	11
ตารางที่ 7 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของประเทศเยอรมนี	12
ตารางที่ 8 การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของประเทศเยอรมนี	12
ตารางที่ 9 มาตรฐานแรงระดับแรงดันของประเทศสหรัฐอเมริกา.....	14
ตารางที่ 10 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของประเทศญี่ปุ่น	16
ตารางที่ 11 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของสหราชอาณาจักร	17
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบข้อกำหนดการเชื่อมต่อระหว่างประเทศไทยและต่างประเทศ.....	18
ตารางที่ 13 การปรับตั้งค่าวิธี P(U).....	19
ตารางที่ 14 การปรับตั้งค่าวิธี Q(U).....	21
ตารางที่ 15 การปรับตั้งค่าวิธี Fixed Q	22
ตารางที่ 16 พารามิเตอร์สายจำหน่ายของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม.....	29
ตารางที่ 17 พารามิเตอร์หม้อแปลงของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม	29
ตารางที่ 18 ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม	31
ตารางที่ 19 คณิตการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม.....	31
ตารางที่ 20 พารามิเตอร์สายจำหน่ายของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ.....	34
ตารางที่ 21 พารามิเตอร์หม้อแปลงของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ.....	34

ตารางที่ 22 ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ.....	36
ตารางที่ 23 คณิตการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ.....	36
ตารางที่ 24 กรณีศึกษาบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม.....	48
ตารางที่ 25 กรณีศึกษาบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ.....	53
ตารางที่ 26 กำหนดค่าสำหรับการศึกษา	57
ตารางที่ 27 ผลการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด.....	58
ตารางที่ 28 พารามิเตอร์ของโหลดที่ควบคุมได้.....	60
ตารางที่ 29 รายละเอียดทางพารามิเตอร์ของโพรซิวเมอร์.....	66



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ผลกระทบด้านแรงดันที่เกิดจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อน.....	4
รูปที่ 2 กำลังสูญเสียที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	5
รูปที่ 3 ค่าแรงดันของโพรซูเมอร์ตลอดสายป้อน.....	6
รูปที่ 4 เส้นโค้งขีดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์.....	7
รูปที่ 5 โครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเทศเยอรมนี.....	10
รูปที่ 6 ระบบไฟฟ้าของประเทศสหรัฐอเมริกา.....	13
รูปที่ 7 รัฐที่มีการใช้งานมาตรฐาน IEEE 1547.....	15
รูปที่ 8 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศญี่ปุ่น.....	15
รูปที่ 9 ผู้ดูแลระบบส่งและจำหน่ายของสหราชอาณาจักร.....	17
รูปที่ 10 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงด้วยวิธี P(U).....	19
รูปที่ 11 การควบคุมด้วยวิธี Q(U).....	20
รูปที่ 12 ขีดจำกัดของ Category A.....	22
รูปที่ 13 ขีดจำกัดของ Category B.....	22
รูปที่ 14 การทำงานของวิธี $\cos\phi(P)$	23
รูปที่ 15 การให้นิยามของเครื่องหมาย.....	24
รูปที่ 16 สิ่งพลิกลสถานการณ์สำหรับระบบไฟฟ้าเพื่อความเป็นกลางทางคาร์บอน.....	25
รูปที่ 17 ภาพรวมของการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับโพรซูเมอร์.....	25
รูปที่ 18 ระบบจัดการพลังงานภายในอาคาร.....	26
รูปที่ 19 ไมโครกริดพลังงานหมุนเวียน.....	27
รูปที่ 20 การกำหนดรูปแบบของโพลชนิดต่างๆ.....	28
รูปที่ 22 ระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม.....	30

รูปที่ 22 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมขนาดใหญ่.....	32
รูปที่ 23 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทผู้ใช้ทั่วไป.....	32
รูปที่ 24 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ.....	33
รูปที่ 25 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยรวม.....	33
รูปที่ 26 ระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ.....	35
รูปที่ 27 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจ โรงแรม.....	37
รูปที่ 28 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทผู้ใช้ทั่วไป.....	37
รูปที่ 29 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ.....	38
รูปที่ 30 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยรวม.....	38
รูปที่ 31 ภาพรวมระบบการจัดการพลังงานร่วมกับ VESS.....	39
รูปที่ 32 ภาพรวมการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อน.....	40
รูปที่ 33 ภาพรวมการจัดการพลังงานโดยมีโหลดที่ควบคุมได้.....	42
รูปที่ 34 โหลดแบบต่อเนื่อง.....	44
รูปที่ 35 โหลดแบบเปิด-ปิด.....	45
รูปที่ 36 จุดวัดแรงดันบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม.....	47
รูปที่ 37 ลักษณะการผลิตไฟฟ้า.....	48
รูปที่ 38 ขั้นตอนการศึกษา.....	49
รูปที่ 39 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา A.....	50
รูปที่ 40 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา B.....	50
รูปที่ 41 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา C.....	51
รูปที่ 42 แรงดันทุกจุดบนระบบทดสอบเมื่อมีกำลังผลิตสูงสุด.....	51
รูปที่ 43 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสีย.....	52
รูปที่ 44 จุดวัดแรงดันบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ.....	53
รูปที่ 45 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา A.....	54

รูปที่ 46 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา B	54
รูปที่ 47 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสีย.....	55
รูปที่ 48 สักยภาพการผลิตไฟฟ้า	56
รูปที่ 49 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าภายในอาคารสำนักงาน	57
รูปที่ 50 การเปลี่ยนแปลงของค่าไฟฟ้าสุทธิ.....	59
รูปที่ 51 การเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าสุทธิ	60
รูปที่ 52 เปรียบเทียบผลของปริมาณที่ควบคุมได้ร้อยละ 10.....	61
รูปที่ 53 การเปรียบเทียบ โหลดที่ควบคุมได้ด้านค่าไฟฟ้าสุทธิ	62
รูปที่ 54 การเปรียบเทียบ โหลดที่ควบคุมได้ด้านการผลิตพลังงาน	62
รูปที่ 55 การเปรียบเทียบ โหลดที่ควบคุมได้ด้านพลังงานสุทธิ	63
รูปที่ 56 ผลการศึกษาอัตราค่าไฟฟ้าต่อการจัดการพลังงาน	64
รูปที่ 57 สรุปการจัดการพลังงานรูปแบบต่างๆต่อสมรรถนะระบบจัดการพลังงานของ โพรซูเมอร์ ...	64
รูปที่ 58 สักยภาพการผลิต และ ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของ โพรซูเมอร์.....	65
รูปที่ 59 ตัวอย่างของสักยภาพการผลิต และ ลักษณะการใช้ไฟฟ้า.....	67
รูปที่ 60 ค่าเหมาะที่สุดสำหรับ โพรซูเมอร์ประเภทอุตสาหกรรมขนาดใหญ่.....	67
รูปที่ 61 ค่าเหมาะที่สุดสำหรับ โพรซูเมอร์ประเภทอาคารสำนักงาน	68
รูปที่ 62 ภาพรวมของการควบคุม	68
รูปที่ 63 ค่าของแรงดันตลอดสายป้อน	69
รูปที่ 64 เปรียบเทียบค่าของแรงดันกรณีที่ 1 กับ 2	70
รูปที่ 65 เปรียบเทียบค่าของแรงดันกรณีที่ 3 กับ 4	71
รูปที่ 66 เปรียบเทียบจำนวนการปรับแก้โดยเฉลี่ยต่อวัน	71
รูปที่ 67 เปรียบเทียบผลของกำลังสูญเสียรวมในระบบ	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ช่วยส่งเสริมให้ประเทศไทยสร้างหลักประกันให้ทุกคนสามารถเข้าถึงพลังงานสมัยใหม่ที่ยั่งยืน ในราคาที่ย่อมเยา ซึ่งเป็นเป้าหมายที่ 7 ของการพัฒนาที่ยั่งยืน การเข้าถึงพลังงานจะเปลี่ยนผู้ใช้ไฟฟ้าแบบดั้งเดิมไปเป็นโพรซูเมอร์ กล่าวคือ ผู้ที่จากเดิมใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เปลี่ยนมาเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าจากโครงข่าย และ ผลิตใช้เอง ซึ่งนอกจากจะเป็นการเข้าถึงพลังงานสะอาดแล้ว ยังส่งเสริมศักยภาพให้บรรลุเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม ภัยคุกคามหนึ่งในผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าคือ การเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเนื่องมาจากการไหลย้อนของกำลังไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง ได้กำหนดให้ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบ ต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการจ่ายกระแสไฟฟ้าไหลย้อนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า แม้ว่าข้อกำหนดนี้ยังช่วยให้ไม่เกิดปัญหาแรงดันเกิน แต่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียโอกาสของทั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้า และ เจ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวคือ ระบบจำหน่ายสูญเสียการได้รับพลังงานสะอาดเพิ่มเติม และสำหรับเจ้าของระบบไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

จากการสูญเสียโอกาสที่ได้กล่าวไปข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยพีวีอินเวอร์เตอร์พร้อมฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน และเสนอให้เปลี่ยนแปลงข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางของประเทศไทย ในกรณีที่ต้องปรับปรุงเพื่อให้สอดคล้องกับวิธีการควบคุม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เสนอวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดด้วยพีวีอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับแรงดันปานกลางพร้อมฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน โดยคำนึงถึง ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ และความสามารถในการควบคุม แรงดัน และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์
2. เสนอให้เปลี่ยนแปลงข้อกำหนดการเชื่อมต่อสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางของประเทศไทย (หากจำเป็น)

1.3 ขอบเขต

1. ระบบที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งเป็น โครงสร้างแบบเรเดียล
2. พิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการใช้ไฟฟ้าเป็นระบบสามเฟสสมดุล
3. ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะติดตั้งบนหลังคาและมีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อเดียวกัน
4. ไม่พิจารณาขนาดของพื้นที่หลังคาสำหรับการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อแรงดันของระบบจำหน่าย
2. ศึกษาข้อกำหนดการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายของทั้งประเทศไทย และ ต่างประเทศ
3. ศึกษาการควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อตามมาตรฐาน IEEE Standard 1547-2018 และ ข้อกำหนดของประเทศต่างๆ
4. ศึกษาการควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อน
5. ศึกษากระบวนการจัดการพลังงานของ โพรซูเมอร์
5. คัดแปลงระบบไฟฟ้าจริงเพื่อนำมาใช้เป็นแบบจำลองสำหรับการศึกษา
6. กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิทยานิพนธ์
7. ศึกษาและจำลองผลกระทบการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง
9. นำเสนอแนวทางการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนสำหรับ โพรซูเมอร์
- 10.สรุป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิทยานิพนธ์นี้มีประโยชน์ต่อผู้มีส่วนร่วม 3 ฝ่ายดังนี้

1. ผู้ดูแลระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือ จะได้รับพลังงานสะอาดจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มเติม โดยลดผลกระทบทางด้านแรงดันเกิน
2. ผู้ลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้งานเอง คือ ใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและสามารถติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้พื้นที่หลังคาตามต้องการ

3. ผู้ประกอบการธุรกิจพลังงานแสงอาทิตย์รูปแบบ Power purchase agreement (PPA) คือ มีโอกาสสร้างรายได้เพิ่มเติมจากการนำกำลังผลิตที่เหลือจากการจ่ายให้ผู้ใช้ไฟฟ้าขายให้กับระบบไฟฟ้า

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึง ที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขต ระเบียบวิธีวิจัย และ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึง ความรู้พื้นฐาน ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อ แรงดันของระบบจำหน่าย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ การควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของ อินเวอร์เตอร์ และการทบทวนวรรณกรรมของการจัดการพลังงานสำหรับ โพรซูเมอร์

บทที่ 3 นำเสนอระบบทดสอบที่ดัดแปลงมาจากระบบไฟฟ้าจริง และ ข้อมูลของโหลด ที่ ใช้สำหรับการศึกษา

บทที่ 4 นำเสนอแนวคิดการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสม ที่สุด

บทที่ 5 นำเสนอการจำลองผลกระทบการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงาน แสงอาทิตย์ต่อแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้า และ การวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 6 ผลการศึกษาของการจัดการพลังงานสำหรับ โพรซูเมอร์

บทที่ 7 ผลการศึกษาผลกระทบของกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดพร้อมฟังก์ชัน การช่วยรักษาแรงดัน

บทที่ 8 สรุป และ ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

บทที่ 2

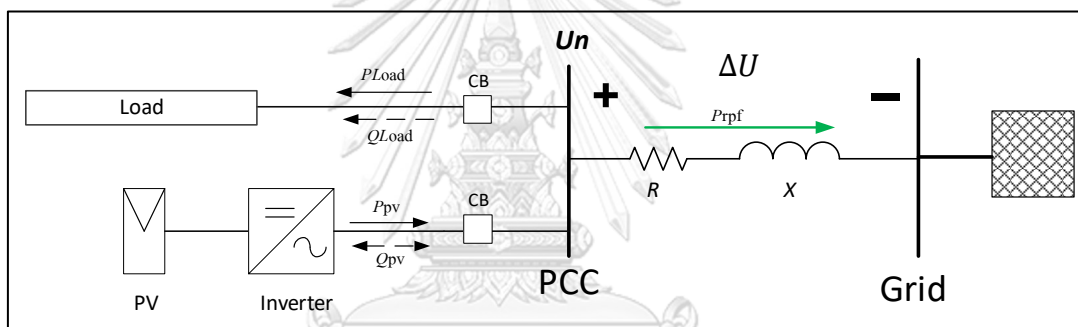
ความรู้พื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า และ ลักษณะการทำงานของฟิวอินเวอร์เตอร์ สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อ และ วิธีการควบคุมฟิวอินเวอร์เตอร์

2.1 ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.1.1 ผลกระทบด้านแรงดัน

เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ และ มีการผลิตกำลังไฟฟ้ามากกว่าการใช้งาน กำลังไฟฟ้าส่วนที่เหลือจะไหลย้อนเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น หากไม่มีการควบคุม จะทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกิน อธิบายได้ดังรูปที่ 1 และ สมการที่ 2.1 [1]



รูปที่ 1 ผลกระทบด้านแรงดันที่เกิดจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อน

$$\Delta U \approx \frac{R \cdot (P_{pv} - P_{Load}) + X \cdot (-Q_{Load} \pm Q_{pv})}{U_n} \quad (2.1)$$

กำหนดให้

- ΔU คือ ความต่างของขนาดแรงดัน
- U_n คือ แรงดันที่จุด U_n
- R, X คือ อิมพีแดนซ์ของสาย
- P_{pv} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- P_{Load} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด
- Q_{pv} คือ กำลังไฟฟัรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ผลิต หรือ ใช้งาน)
- Q_{Load} คือ กำลังไฟฟัรีแอกทีฟของโหลด
- P_{rpf} คือ กำลังไฟฟ้าไหลย้อน

จากสมการที่ (2.1) พิจารณาที่อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ($Q_{pv} = Q_{Load}$) หากความต้องการกำลังไฟฟ้จริง (P_{Load}) มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้จริงที่ผลิตได้ (P_{pv}) ทำให้ กำลังไฟฟ้ไหลย้อน (P_{rv}) มีค่าเป็นลบ ซึ่งจะทำให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อ (ΔU) มีค่าลดลง ในทางกลับกัน หากกำลังไฟฟ้จริงที่ผลิตได้ มีค่ามากกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้จริง กำลังไฟฟ้ไหลย้อนมีค่าเป็นบวก ส่งผลให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าเพิ่มขึ้น

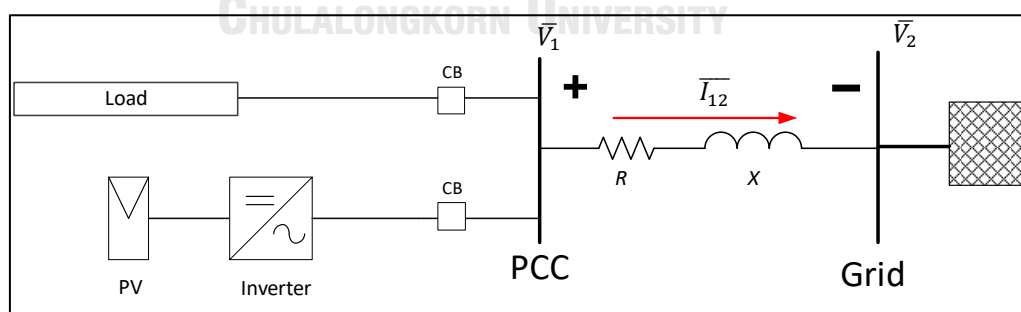
หากพิจารณาอินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้จริงเท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้จริงของโหลด ($P_{pv} = P_{Load}$) การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ที่จุดเชื่อมต่อสามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 กรณีคือ

1. อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากกว่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดต้องการ ($Q_{pv} (+) > Q_{Load}$) ทำให้พจน์ของ $X(Q_{pv} + Q_{Load}) > 0$ ซึ่งจะทำให้ ΔU มีค่าเพิ่มขึ้น
2. อินเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟมากกว่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่โหลดต้องการ ($Q_{pv} < 0$) ทำให้พจน์ของ $X(Q_{pv} (-) + Q_{Load}) < 0$ ซึ่งจะทำให้ ΔU มีค่าลดลง

จากการพิจารณาดังกล่าว ตัวแปรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ คือ กำลังไฟฟ้จริง และ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ซึ่งการควบคุมกำลังไฟฟ้ดังกล่าวเพื่อบรรเทาปัญหาแรงดันสามารถทำได้โดยผ่านอินเวอร์เตอร์

2.1.2 ผลกระทบด้านกำลังสูญเสีย

กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นจากระบบผลิตไฟฟ้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นผลมาจากขนาดของกระแสไฟฟ้ที่ไหลผ่านตัวต้านทานของสายจำหน่าย ซึ่งขนาดดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณกำลังไฟฟ้ไหลย้อน ณ เวลาใดๆ ที่พิจารณา ดังนั้นปริมาณกำลังสูญเสียจึงขึ้นอยู่กับ ตำแหน่งติดตั้ง และ กำลังผลิตติดตั้ง อธิบายได้ดังรูปที่ 2 และ สมการที่ (2.1)-(2.3) [2]



รูปที่ 2 กำลังสูญเสียที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้พลังงานแสงอาทิตย์

$$P_{loss} = |\bar{I}_{12}|^2 R \quad (2.1)$$

$$= \frac{|\bar{V}_1 - \bar{V}_2|^2}{R} \quad (2.2)$$

$$= G[V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (2.3)$$

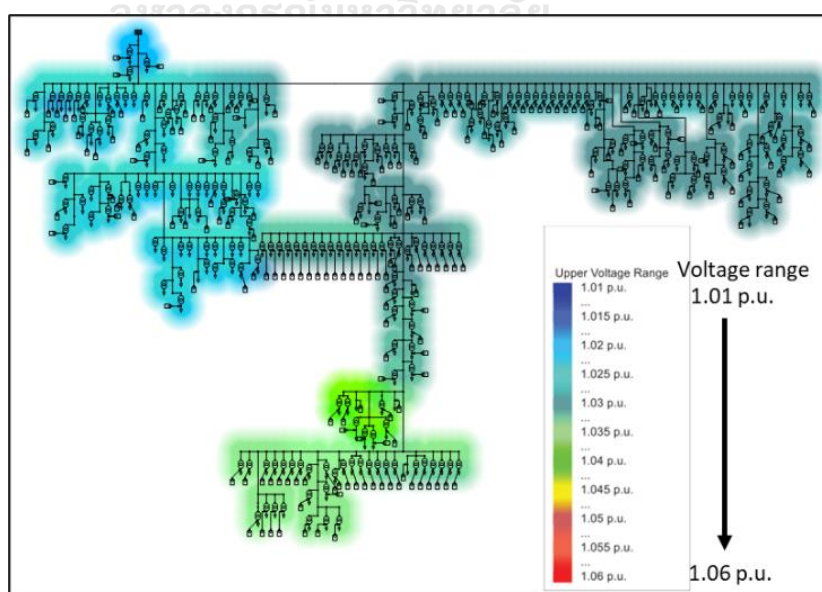
กำหนดให้

P_{loss}	คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย
\bar{I}_{12}	คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลจากโหนด 1 ไปยัง โหนด 2
\bar{V}_1, \bar{V}_2	คือ แรงดันที่โหนด
R	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า
G	คือ ค่าความนำไฟฟ้า

ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทางด้านแรงดันก่อให้เกิดปัญหาในระบบจำหน่าย คือ แรงดันเกิน และ การทำงานของอุปกรณ์รักษาแรงดัน[3]

งานวิจัย [4] ได้ศึกษาผลกระทบของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณมากอยู่ในระบบจำหน่าย การศึกษาได้แสดงให้เห็นปัญหาแรงดันเกินจะเกิดเมื่อมีขนาดกำลังผลิตมีค่ามากกว่าประมาณ 1.5 เท่า และ การทำงานของอุปกรณ์รักษาแรงดันที่จะถูกใช้งานมากขึ้น หากมีกำลังผลิตมาก นอกจากนั้นแล้วยังได้ชี้ให้เห็นว่าหากมีการควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์ด้วยการชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟ จะช่วยบรรเทาผลกระทบทั้งทางด้านแรงดัน และ กำลังสูญเสีย

งานวิจัย [5] ได้ทำการศึกษาผลกระทบระหว่างการติดตั้งแบบกระจายทั่วสายป้อนกับการติดตั้งเพียงตำแหน่งเดียวที่ปลายสาย โดยให้พลังงานที่ผลิตได้เท่ากัน ผลการศึกษาพบว่ากรณีติดตั้งแบบกระจาย (โพรซูเมอร์) มีค่าแรงดันตลอดสายป้อนอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาแรงดันเกินทั่วสายป้อนดังรูปที่ 3 ในทางตรงกันข้ามการติดตั้งแบบตำแหน่งเดียวจะส่งผลให้เกิดแรงดันเกิน



รูปที่ 3 ค่าแรงดันของโพรซูเมอร์ตลอดสายป้อน

2.2 การทำงานของพีวีอินเวอร์เตอร์

ขีดความสามารถหรือคุณลักษณะการทำงานของพีวีอินเวอร์เตอร์ ถูกจำกัดด้วยขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของตัวเครื่อง สามารถแสดงได้ดังรูป 4 ที่สภาวะปกติ (normal mode) พีวีอินเวอร์เตอร์ จะทำการจ่ายหรือรับกำลังไฟรีแอกทีฟได้สูงสุดที่ค่าพิกัด หรือหากจ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงก็จะมีค่าสูงสุดที่พิกัด ลักษณะการทำงานเช่นนี้บ่งบอกถึงหากต้องการให้พีวีอินเวอร์เตอร์ทำงานที่พิกัดคงที่และต้องการควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ จะต้องมีการปรับลดหรือเพิ่ม กำลังไฟฟ้าจริงหรือรีแอกทีฟ ดังสมการที่ (2.2)

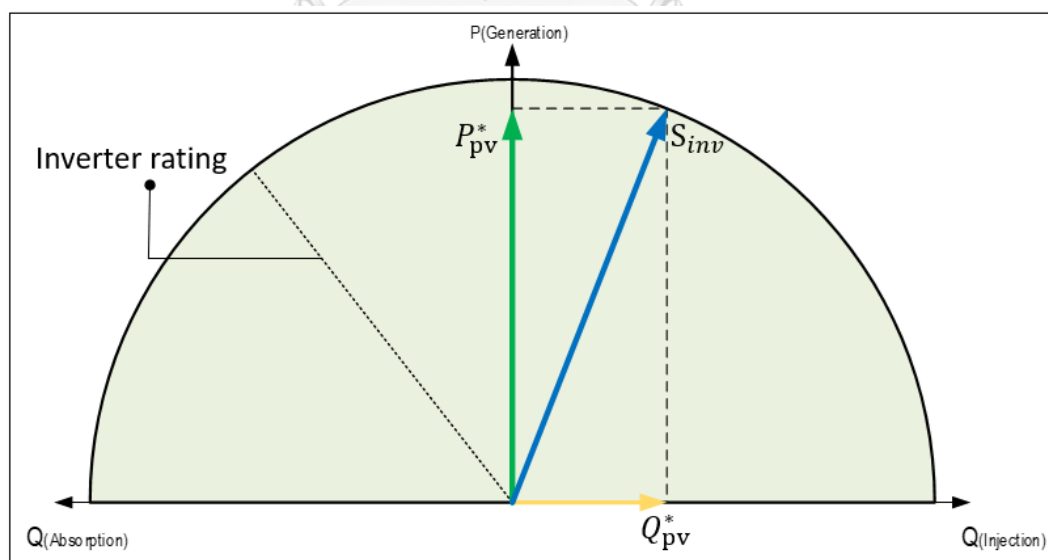
$$S_{inv} = \sqrt{(P_{pv})^2 + (Q_{pv})^2} \quad (2.2)$$

โดยที่

S_{inv} คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏของอินเวอร์เตอร์

P_{pv} คือ กำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Q_{pv} คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (ผลิต หรือ ใช้งาน)



รูปที่ 4 เส้นโค้งขีดความสามารถในการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์

2.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในประเทศไทย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาของกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อของพีวีอินเวอร์เตอร์ในระบบจำหน่ายที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบทางด้านแรงดัน โดยเนื้อหาประกอบไปด้วย มาตรฐานระดับแรงดัน และ วิธีการควบคุมแรงดัน อ้างอิงจาก [6] และ [7]

2.3.1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

พีวีอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต้องรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้เป็นไปตามตารางที่ 1 เพื่อควบคุมคุณภาพไฟฟ้า

ตารางที่ 1 มาตรฐานระดับแรงดันของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ช่วงแรงดันสภาวะปกติ
33 กิโลโวลต์	สูงสุดและต่ำสุดไม่เกินร้อยละ 5
22 กิโลโวลต์	สูงสุดและต่ำสุดไม่เกินร้อยละ 5
380 โวลต์	สูงสุดและต่ำสุดไม่เกินร้อยละ 10
220 โวลต์	สูงสุดและต่ำสุดไม่เกินร้อยละ 10

สำหรับวิธีการควบคุมแรงดัน และ ความสามารถในการปรับตัวประกอบกำลัง จะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตติดตั้ง และ ระดับแรงดันที่เชื่อมต่อ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 วิธีการควบคุมแรงดัน และ ความสามารถในการปรับตัวประกอบกำลัง

ระดับแรงดัน	ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง	วิธีการควบคุมกำลังรีแอกทีฟ		ความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง
		Q(U)	Fixed PF	
380 และ 220 โวลต์	ไม่ได้ระบุ	—	✓	0.95 ตามหลัง
33 และ 22 กิโลโวลต์	ไม่เกิน 500 กิโลวัตต์	—	✓	ถึง 0.95 นำหน้า หรือ ดีกว่า
	มากกว่า 500 กิโลวัตต์	✓	✓	0.90 ตามหลัง ถึง 0.90 นำหน้า หรือ ดีกว่า

2.3.2 การไฟฟ้านครหลวง

ฟิวอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายของการไฟฟ้านครหลวงต้องรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อและต้องมีความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลังตามที่กำหนดซึ่งขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่เชื่อมต่อ แสดงดังตารางที่ สำหรับวิธีการควบคุมแรงดันนั้น ไม่ได้มีการระบุไว้ในข้อกำหนด

ตารางที่ 3 มาตรฐานระดับแรงดัน และ ความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลังของการไฟฟ้านครหลวง

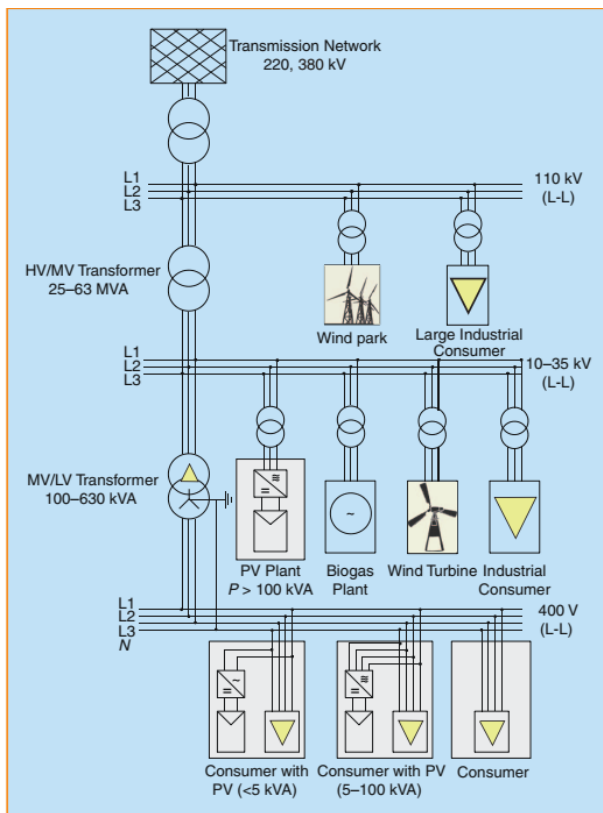
ระดับแรงดัน	ช่วงแรงดันสภาวะปกติ (ร้อยละของระดับแรงดัน)		ความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง
	ต่ำสุด	สูงสุด	
230 โวลต์	-7	+3	0.95 ตามหลัง ถึง 0.95 นำหน้า
400 โวลต์	-7.25	+2.5	
12 กิโลโวลต์	-10	-2	0.90 ตามหลัง ถึง 0.90 นำหน้า
24 กิโลโวลต์	-10	-2	

2.4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าในต่างประเทศ

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบด้านแรงดันจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่าย เพื่อทำการเปรียบเทียบ และ ศึกษาแนวทางการปรับปรุงข้อกำหนดของประเทศไทยสำหรับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากรายงานการสำรวจ “Snapshot of Global PV Markets 2021” [8] ทำการจัดอันดับประเทศที่มีกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากรายงานดังกล่าว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เลือกประเทศที่ทำการศึกษา 4 ประเทศ ได้แก่ เยอรมนี สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และ สหราชอาณาจักร

2.4.1 เยอรมนี

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมนีได้แบ่งออกเป็น 3 ระดับได้แก่ แรงดันสูง แรงดันปานกลาง แรงดันต่ำ รูปแบบโครงสร้างทั่วไปของระบบจำหน่ายแสดงดังรูปที่ 5 [9]



รูปที่ 5 โครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเทศเยอรมนี

ระดับแรงดันสูง

แรงดันใช้งานที่ระดับแรงดันสูงมีค่า 110 กิโลโวลต์(แรงดันระหว่างสาย) ในสภาวะปกติแรงดันจะอยู่ในช่วง 100 ถึง 123 กิโลโวลต์ โครงสร้างระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะเป็นวงจรมesh ใช้ระบบเคเบิล 3 เฟส 3 สาย โดยส่วนมากจะใช้สายพาดอากาศ และมีบางพื้นที่จะติดตั้งระบบโดยใช้สายไฟใต้ดิน ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มาเชื่อมต่อจะเป็น ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และ โรงไฟฟ้าระดับหลายเมกะวัตต์ มาตรฐานแรงดัน และ โครงสร้างระบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระบบจำหน่ายแรงดันสูงของประเทศเยอรมนี

Voltage	Nominal line-to-line voltage	110 kV
	Voltage range normal operation	100 kV/123 kV
	Voltage range transient fluctuations	96 kV/127 kV
Grid Layout	System topology	Mostly meshed
	Phase configuration	Three-wire/three-phase
	Installation type	Overhead lines/cables

ระดับแรงดันปานกลาง

แรงดันใช้งานที่ระดับแรงดันปานกลางโดยส่วนมากมีค่า 20 กิโลโวลต์ (แรงดันระหว่างสาย) แต่ในบางพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของความต้องการไฟฟ้ามาก และมีสถานีไฟฟ้าอยู่ใกล้พื้นที่แรงดันใช้งานจะมีค่า 10 กิโลโวลต์ (แรงดันระหว่างสาย) หรือ ในบางพื้นที่ที่มีการใช้งานแรงดันอยู่ที่ 35 กิโลโวลต์ (แรงดันระหว่างสาย) หม้อแปลงกำลังที่ใช้งานระหว่างแรงดันสูงและแรงดันปานกลาง มีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าคือ 25 ถึง 63 เมกะโวลต์แอมแปร์ ระบบไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นแบบ เดลต้า 3 เฟส 3 สาย โดยจะใช้สายพาดอากาศสำหรับพื้นที่ชนบท และจะใช้สายใต้ดินสำหรับพื้นที่ในเมือง โครงสร้างระบบไฟฟ้าจะเป็นวงจรมesh สำหรับพื้นที่ในเมือง และ วงรอบปิดและเปิด สำหรับพื้นที่ชนบท และ ชนเมือง ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มาเชื่อมต่อจะเป็น อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และ โรงไฟฟ้าระดับเมกะวัตต์ โครงสร้างระบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระบบจำหน่ายแรงดันปานกลางของประเทศเยอรมนี

Voltage	Nominal line-to-line voltage Voltage range normal operation Permissible voltage rise by feed-in (normal operation)	10 kV/20 kV/30 kV $\pm 10 \% V_{N,LL}$ (EN50160) $\Delta V_{max} < 2 \%$
Grid Layout	System topology Phase configuration Installation type	Radial and meshed systems Three-wire/three-phase Overhead lines/cables

ระดับแรงดันต่ำ

แรงดันใช้งานที่ระดับแรงดันปานกลางโดยส่วนมากมีค่า 400 โวลต์ (แรงดันระหว่างสาย) ระบบไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นแบบ สตาร์ 3 เฟส 4 สาย (รวมสายนิวทรัล) ใช้สายใต้ดินเป็นส่วนใหญ่แต่พื้นที่ชนบทจะใช้สายพาดอากาศ หม้อแปลงจำหน่ายใช้เพื่อเชื่อมต่อกับแรงดันปานกลาง มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าคือ 100 ถึง 630 กิโลโวลต์แอมแปร์ (ชนิด เดลต้า - สตาร์) ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มาเชื่อมต่อจะเป็น บ้านเรือน และ อาคารพาณิชย์ขนาดเล็ก มาตรฐานแรงดัน และ โครงสร้างระบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำของประเทศเยอรมนี

Voltage	Nominal line-to-line voltage Voltage range normal operation Permissible voltage rise by feed-in (normal operation)	0.4 kV $\pm 10 \% V_{N,LL}$ (EN50160) $\Delta V_{max} < 3 \%$
Grid Layout	System topology Phase configuration Installation type	Mostly radial, in urban areas also meshed systems Five-wire/three-phase Mostly cables

การควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อตามข้อกำหนดโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมนี จัดทำ โดย BDEW [10] สำหรับการเชื่อมต่อแรงดันปานกลาง และ VDE [11] สำหรับการเชื่อมต่อแรงดันต่ำ ได้กำหนดให้ผู้เชื่อมต่อต้องทำการติดตั้ง รีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำ และ แรงดันเกิน เพื่อลดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าหากเกิดสถานะแรงดันเกินกว่าที่กำหนด ข้อกำหนดดังกล่าวได้ระบุวิธีการควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ แบ่งออกเป็น การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และ รีแอกทีฟ

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง

ผู้ดูแลระบบมีหน้าที่ส่งสัญญาณสื่อสารไปยังระบบผลิตเท่านั้น ไม่สามารถเข้าไปยุ่งเกี่ยวกับระบบควบคุมได้ โดยจะส่งคำสั่งลดกำลังผลิตเมื่อ เกิดความเสี่ยงต่อความมั่นคงของระบบ โดยจะแบ่งวิธีการควบคุมตามขนาดกำลังผลิตติดตั้งดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงของประเทศเยอรมนี

ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง (กิโลวัตต์)	วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง
$P_N \geq 30$	ผู้ดูแลระบบส่งค่าพารามิเตอร์ผ่านระบบควบคุมระยะไกล
$P_N < 30$ (มีสองทางเลือก)	<ul style="list-style-type: none"> ผู้ดูแลระบบส่งค่าพารามิเตอร์ผ่านระบบควบคุมระยะไกล จำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 70 ของขนาดกำลังผลิตติดตั้ง (Feed-in limitation)

การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

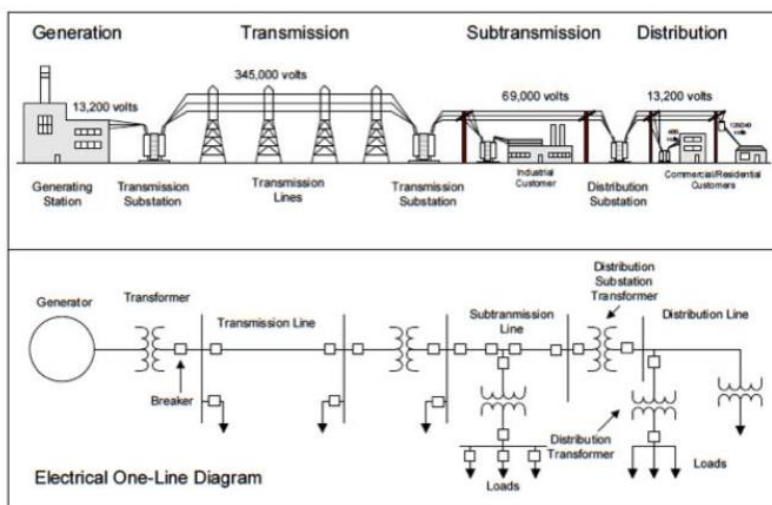
การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ถูกระบุกำหนด มีการใช้วิธีควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังรีแอกทีฟ การควบคุมตัวประกอบกำลัง หรือ การรับคำสั่งจากผู้ดูแลระบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตติดตั้ง และ ระดับแรงดันที่เชื่อมต่อ แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 8 การควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟของประเทศเยอรมนี

ระดับแรงดัน	ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง (กิโลวัตต์แอมแปร์)	วิธีควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ			
		Remote control (request) by DSO	Q(U)	Fixed PF	$\cos\phi(P)$
แรงดันปานกลาง	ทุกขนาด	✓	✓	ตั้งค่าได้ต่ำสุดที่ 0.95 ทั้งนำหน้าและตามหลัง	✓
แรงดันต่ำ	$s_n > 13.8$	—	✓	ตั้งค่าได้ต่ำสุดที่ 0.9 ทั้งนำหน้าและตามหลัง	—
	$3.68 \leq s_n \leq 13.8$	—	✓	ตั้งค่าได้ต่ำสุดที่ 0.95 ทั้งนำหน้าและตามหลัง	—
	$s_n < 3.68$	—	—	ตั้งค่าได้ต่ำสุดที่ 0.95 ทั้งนำหน้าและตามหลัง	—

2.4.2 สหรัฐอเมริกา

ระบบไฟฟ้าของประเทศสหรัฐอเมริกาประกอบด้วย 4 ระบบ ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้าย่อย และ ระบบจำหน่าย ดังแสดงในรูป 6 ระบบผลิตจะตั้งอยู่ห่างจากพื้นที่ที่มีความต้องการไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องส่งกำลังที่ผลิตได้ผ่านระบบส่งไฟฟ้า ส่งต่อไปให้กับระบบส่งไฟฟ้าย่อย และ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นลำดับสุดท้าย ผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไปจึงเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย แต่มีบางผู้ใช้ไฟฟ้าที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะเชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าย่อย



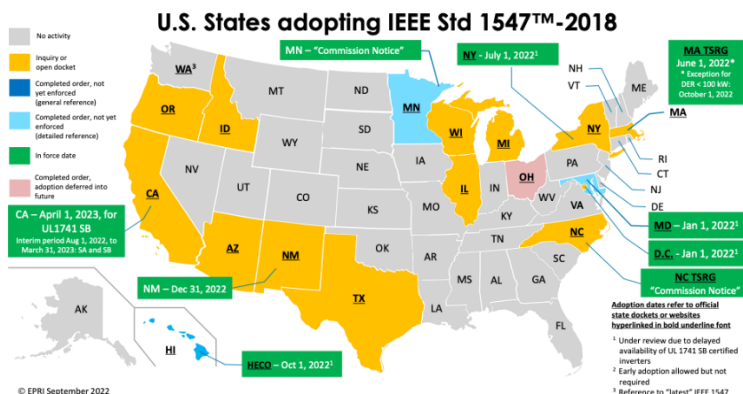
รูปที่ 6 ระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

แรงดันปานกลางที่ใช้งานในระบบจำหน่ายมีค่าตั้งแต่ 4.16 ถึง 34.5 กิโลโวลต์ โครงสร้างการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียล (Radial) 3 เฟส 4 สาย และ สำหรับแรงดันต่ำมีค่า 120/240 โวลต์ 1 เฟส 3 สาย และ 480 โวลต์ 3 เฟส 4 สาย โดยมาตรฐานแรงดันอ้างอิงจาก [12] แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 มาตรฐานแรงระดับแรงดันของประเทศสหรัฐอเมริกา

VOLTAGE CLASS	Nominal System Voltage			Nominal Utilization Voltage (Note h)	Voltage Range A (Note b)			Voltage Range B (Note b)		
	(Note a)				Maximum	Minimum		Maximum	Minimum	
	2-wire	3-wire	4-wire		Utilization and Service Voltage (Note c)	Service Voltage	Utilization Voltage	Utilization and Service Voltage	Service Voltage	Utilization Voltage
Low Voltage (Note 1)	120			115	126	114	110	127	110	106
	120/240			115/230	126/252	114/228	110/220	127/254	110/220	106/212
				200	218Y/126	197Y/114	191Y/110	220Y/127	191Y/110	184Y/106
				230/115	252/126	228/114	220/110	254/127	220/110	212/106
Medium Voltage	240			230	252	228	220	254	220	212
	480			460Y/266	504Y/291	456Y/263	440Y/254	508Y/293	440Y/254	424Y/245
	600			460	504	456	440	508	440	424
	(Note e)			575	630	570	550	635	550	530
				2520	2340	2160	2540	2280	2080	
	4160			4370/2520	4050Y/2340	3740Y/2160	4400Y/2540	3950Y/2280	3600Y/2080	
	4800			5040	4050	3740	4400	3950	3600	
	6900			5040	4680	4320	5080	4560	4160	
				7240	6730	6210	7260	6560	5940	
				8320Y/4800	8730Y/5040	8110Y/4680	8800Y/5080	7900Y/4560	(Note f)	
			12000Y/6900	12600Y/7270	11700Y/6760	12700Y/7330	11400Y/6560	(Note f)		
			12470Y/7200	13090Y/7560	12160Y/7020	13200Y/7620	11850Y/6840	(Note f)		
			13200Y/7620	13860Y/8000	12870Y/7430	13970Y/8070	12504Y/7240	(Note f)		
			13800Y/7970	14490	13460	14520	13110Y/7570	11880		
			20780Y/12000	21820Y/12600	20260Y/11700	22000Y/12700	19740Y/11400	(Note f)		
			22860Y/13200	24000Y/13860	22290Y/12870	24200Y/13970	21720Y/12540	(Note f)		
			24150	24150	22430	24340	21850	(Note f)		
			24940Y/14400	26190Y/15120	24320Y/14040	26400Y/15240	23690Y/13680	(Note f)		
			34500Y/19920	36230Y/20920	33640Y/19420	36510Y/21080	32780Y/18930	(Note f)		
			36230	36230	33640	36510	32780	(Note f)		
			46000	48300	45000	48300	45000	41600		
			69000	72000	67000	72000	67000	62000		
High Voltage	115000			121000						
	138000			145000						
	161000			169000						
	230000			242000						
Extra-High Voltage	345000			362000						
	400000			420000						
	500000			550000						
	765000			800000						
Ultra-High Voltage	1100000			1200000						

สำหรับข้อกำหนดการควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของประเทศสหรัฐอเมริกานั้น หลายๆ รัฐ ที่มีกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก ได้ใช้มาตรฐาน IEEE 1547-2018 (IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces) [13] เป็นข้อกำหนดในการเชื่อมต่อของแหล่งพลังงานแบบกระจายตัว (DER) รัฐที่มีการใช้งานแสดงดังรูปที่ 7 ดังนั้นสำหรับการศึกษาข้อกำหนดการควบคุมแรงดันของประเทศสหรัฐจึงอ้างอิงจากมาตรฐานดังกล่าว ซึ่งได้กำหนดวิธีการควบคุมแรงดันคือ P(U) Q(U) Fixed-Q Active power – reactive power (Watt/Var control) และ ตัวประกอบกำลังคงที่ โดยวิธีการที่กำหนดไว้ทั้งหมด จะมีเพียงค่าปรับตั้งเบื้องต้นเท่านั้น ทั้งนี้ในมาตรฐานได้ระบุไว้ว่าการปรับตั้งค่าของวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟ ผู้ดูแลระบบสามารถกำหนดได้



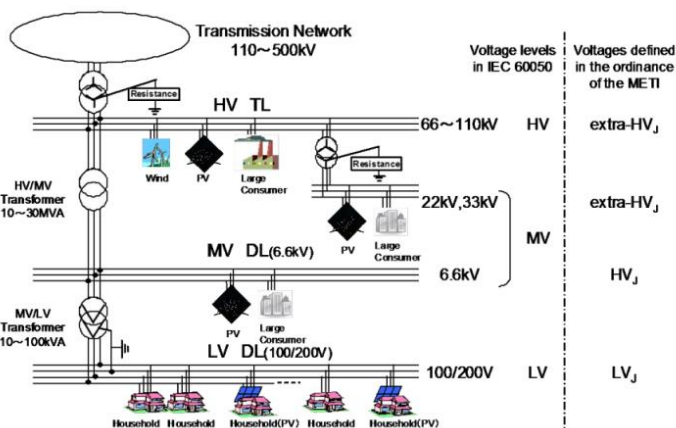
รูปที่ 7 รัฐที่มีการใช้งานมาตรฐาน IEEE 1547

2.3.3 ญี่ปุ่น

ระบบจำหน่ายของประเทศญี่ปุ่นประกอบไปด้วยระดับแรงดัน สูง ปานกลาง และต่ำ ระดับแรงดันสูง มีแรงดันใช้งานอยู่ที่ 110 77 และ 66 กิโลโวลต์ มีลักษณะการจ่ายไฟแบบ เรเดียล ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าที่มาเชื่อมต่อประกอบด้วย โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โรงไฟฟ้าระดับเมกะวัตต์ขึ้นไป

ระดับแรงดันปานกลาง ประกอบด้วยแรงดัน 3 ระดับคือ 7 22 และ 33 กิโลโวลต์ สำหรับระดับแรงดัน 7 กิโลโวลต์ มีแรงดันใช้งานที่อยู่ 6.6 กิโลโวลต์ ซึ่งจะใช้การจ่ายไฟแบบเรเดียลร่วมกับ แบบวงรอบ ในพื้นที่ที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้ามากจะใช้แรงดันระดับ 22 และ 33 กิโลโวลต์ มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ spot network เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบ

ระดับแรงต่ำ แรงดันระหว่างสายที่ใช้งานคือ 202 โวลต์ ที่สภาวะปกติสามารถทำงานในช่วง 192 ถึง 222 โวลต์ และ แรงดันระหว่างสายกับกราวด์ที่ใช้งานคือ 101 โวลต์ ที่สภาวะปกติสามารถทำงานในช่วง 95 ถึง 107 โวลต์ ขนาดพิกัดไฟฟ้าของหม้อแปลงจำหน่ายที่ใช้จะอยู่ในช่วง 10 ถึง 100 กิโลโวลต์แอมแปร์ มีลักษณะการจ่ายไฟแบบเรเดียล รูปที่ 8 [14] แสดงภาพรวมระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 8 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศญี่ปุ่น

การควบคุมแรงดัน

ข้อกำหนดไม่ได้ระบุวิธีการควบคุมแต่กำหนดให้รักษาระดับแรงดัน โดยควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และ อาจจะต้องควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อรักษาระดับแรงดัน สำหรับในกรณีที่ควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟไม่เพียงพอต่อการรักษาระดับแรงดัน ตัวประกอบกำลังและเงื่อนไขการควบคุมจะขึ้นอยู่กับ ระดับแรงดันที่เชื่อมต่อ ดังแสดงในตารางที่ 10

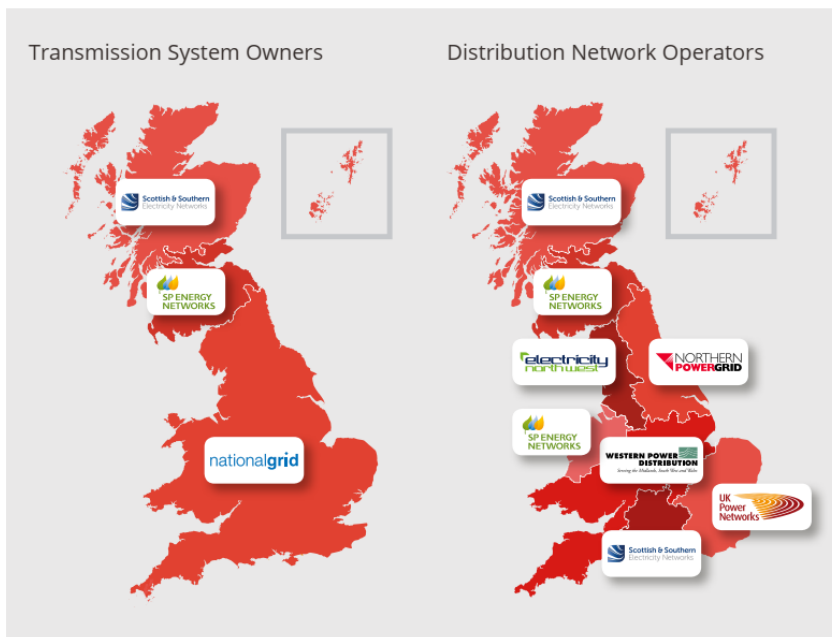
ตารางที่ 10 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของประเทศญี่ปุ่น

ระดับแรงดัน	กำลังผลิตติดตั้ง (kW)	ข้อกำหนดสำหรับการรักษาแรงดัน	ความสามารถในปรับค่าตัวประกอบกำลัง
32, 22 kV	<10,000	ต้องจำกัดโหลดหากคาดว่าความผันผวนของแรงดันไฟฟ้า มีขนาดใหญ่กว่า 1 ถึง 2% ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ โดยการลดกำลังการผลิต	N/A
7, 6.6 kV	<2,000	ต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระดับแรงต่ำที่เชื่อมต่อ (101 V \pm 6 V, 202 V \pm 20 V) โดยการลดกำลังการผลิต และ การจ่ายกำลังรีแอกทีฟ	0.8
202 V \pm 10 % (line to line) 101 V \pm 6 % (line to neutral)	< 50	การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ และ ลดกำลังการผลิต เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงมาตรฐาน	0.85

2.4.4 สหราชอาณาจักร

ระบบจำหน่ายของสหราชอาณาจักรเป็นการเชื่อมต่อกันของประเทศ อังกฤษ เวลส์ และ สก๊อตแลนด์ โดยมีผู้ดูแลโครงข่ายอยู่ทั้งหมด 6 บริษัท ซึ่งเป็นเจ้าของโครงข่ายและทำหน้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทุกประเภท บริษัทเหล่านี้ มีเขตรับผิดชอบตามภูมิภาค แสดงดังรูปที่ 9

ระดับแรงดันที่ใช้งานในระบบจำหน่ายคือ 132 66 33 และ 22 กิโลโวลต์ โดยแรงดัน 132 กิโลโวลต์จะใช้สำหรับระบบจำหน่ายในประเทศ อังกฤษ และ เวลส์ ระดับแรงดันต่ำที่ใช้งานคือ 400 และ 230 โวลต์



รูปที่ 9 ผู้ดูแลระบบส่งและจำหน่ายของสหราชอาณาจักร

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อพีวีอินเวอร์เตอร์จะอ้างอิงตาม “Engineering Recommendation G99” ซึ่งวิธีการควบคุมแรงดันจะขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตติดตั้ง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อของสหราชอาณาจักร

ระดับแรงดัน	ช่วงระดับแรงดันใช้งาน	กำลังผลิตติดตั้ง S_n	วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง	วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ				ความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง
				Q(U)	Q(P)	Remote control (request) by DSO	Cos ϕ (U)	
<110 kV	$\pm 10\%$	$0.8 \text{ kW} \leq S_n < 1 \text{ MW}$	*Remote control (request) by DSO	—	—	—	—	0.95
		$1 \text{ MW} \leq S_n < 10 \text{ MW}$	Remote control (request) by DSO	✓	—	—	—	
		$10 \text{ MW} \leq S_n < 50 \text{ MW}$	Remote control (request) by DSO	—	✓	✓	✓	

2.5 เปรียบเทียบข้อกำหนดการเชื่อมต่อระหว่างประเทศไทยและต่างประเทศ

จากการศึกษาข้อกำหนดการเชื่อมต่อระดับแรงดันปานกลางของทั้ง 4 ประเทศ และนำมาเปรียบเทียบกับประเทศไทย จะพบว่าสิ่งที่ประเทศไทยกำหนดเหมือนกับประเทศอื่นๆ คือ ความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง ยกเว้นประเทศสหรัฐอเมริกาที่ไม่ได้ระบุค่าตัวประกอบกำลัง แต่สิ่งที่แตกต่างจากประเทศอื่นๆคือ การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงโดยการห้ามไม่ให้เกิดการไหลย้อนของกำลังไฟฟ้า (Zero export) หากพิจารณาวิธีควบคุมทั้งกำลังไฟฟ้าจริง และรีแอกทีฟ จะพบว่าประเทศญี่ปุ่น ไม่ได้ระบุวิธีการควบคุมใดๆ แต่กำหนดให้พีวีอินเวอร์เตอร์รักษา ระดับแรงดัน โดยการลดกำลังการผลิต หรือ การชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง นอกจากการรับคำสั่งจากผู้ดูแลโครงข่ายแล้ว ประเทศสหรัฐ ยังได้กำหนดการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงโดยขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่ออีกด้วย สำหรับวิธีควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ประเทศเยอรมนี และ สหรัฐอเมริกา ได้กำหนดการควบคุมจากการรับคำสั่งจากผู้ดูแลโครงข่าย และ ให้พีวีอินเวอร์เตอร์สามารถชดเชยกำลังรีแอกทีฟโดยขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่ออีกด้วย สามารถสรุปข้อกำหนดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบข้อกำหนดการเชื่อมต่อระหว่างประเทศไทยและต่างประเทศ

ประเทศ	วิธีควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง			วิธีควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ					ความสามารถ ในปรับค่าตัว ประกอบ กำลัง
	Remote control (request) by DSO	P(U)	Zero export limit	Q(U)	Q(P)	Remote control (request) by DSO	Cos ϕ (P)	Fixed PF	
เยอรมนี	✓	—	—	✓	—	✓	✓	✓	0.95
ญี่ปุ่น	—	—	—	—	—	—	—	—	0.85
สหราชอาณาจักร	✓	—	—	—	—	—	—	—	0.95
ไทย	—	—	✓	✓	—	—	—	✓	0.9/0.95
สหรัฐอเมริกา	✓	✓	—	✓	✓	✓	—	✓	N/A

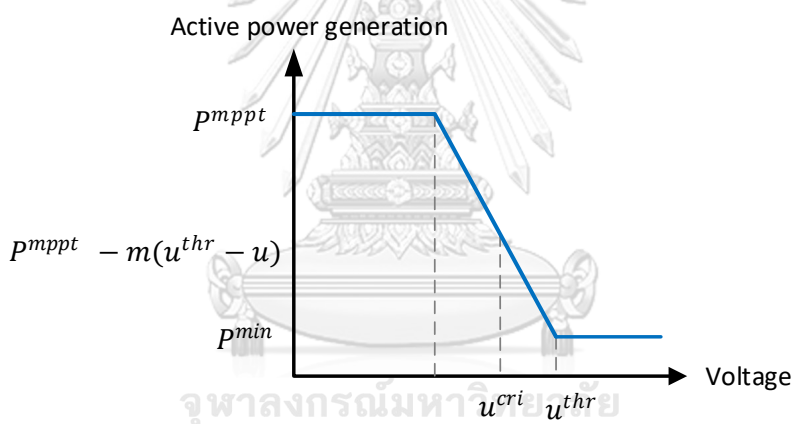
จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึง ข้อกำหนดของอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า สำหรับหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง และรีแอกทีฟ เพื่อรักษาระดับแรงดัน โดยจะนำเสนอวิธีที่ถูกกำหนดไว้ในข้อกำหนดการเชื่อมต่อตั้งที่กล่าวไปในหัวข้อที่ผ่านมา

2.6 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของพีวีอินเวอร์เตอร์

2.6.1 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี P(U)

การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อได้ถูกกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 1547-2018 ซึ่งเรียกรูปแบบนี้ว่า P(U) หรือ voltage – active power (Volt/watt) จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ในปัจจุบันมีเพียงวิธีนี้เท่านั้นที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อรักษาระดับแรงดัน

หลักการการทำงานของวิธี P(U) คือ อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงตามขนาดแรงดันของจุดเชื่อมต่อ หากแรงดันเกินกว่าที่กำหนด กำลังไฟจะถูกลดลงมาเป็นเชิงเส้น (Droop) ซึ่งจะลดถึงค่าต่ำสุดที่ยอมให้จ่ายกำลังได้ สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.3) และ รูปที่ 10 การกำหนดกราฟ P(U) ตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 เป็นไปตามตารางที่ 13



รูปที่ 10 การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงด้วยวิธี P(U)

$$P_{cal} = \begin{cases} P^{mppt} & u < u^{cri} \\ P^{mppt} - m(u^{thr} - u) & u^{cri} \leq u \leq u^{thr} \\ P^{min} & u^{thr} \leq u \end{cases} \quad (2.3)$$

ตารางที่ 13 การปรับตั้งค่าวิธี P(U)

Voltage-active power parameters	Default settings	Ranges of allowable settings	
		Minimum	Maximum
V_1	$1.06 V_N$	$1.05 V_N$	$1.09 V_N$
P_1	P_{rated}	N/A	N/A
V_2	$1.1 V_N$	$V_1 + 0.01 V_N$	$1.10 V_N$
P_2 (applicable to DER that can only generate active power)	The lesser of $0.2 P_{rated}$ or P_{min}^a	P_{min}	P_{rated}
P'_2 (applicable to DER that can generate and absorb active power)	0^b	0	P_{rated}
Open Loop Response Time	10 s ^c	0.5 s	60 s

2.6.2 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U)

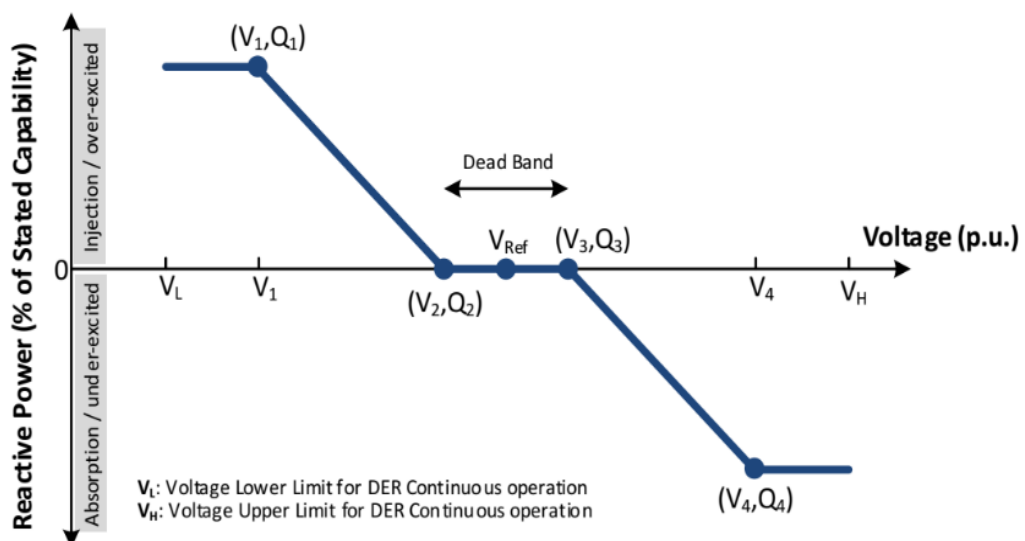
หลักการของวิธี Q(U) คือ อินเวอร์เตอร์จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ วิธีการนี้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

- แรงดันที่จุดเชื่อมต่ออยู่ในช่วง Dead band อินเวอร์เตอร์จะไม่จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

- แรงดันที่จุดเชื่อมต่อมากกว่าช่วง Dead band อินเวอร์เตอร์จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งปริมาณจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน

- แรงดันที่จุดเชื่อมต่อน้อยกว่าช่วง Dead band อินเวอร์เตอร์จะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งปริมาณจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน

สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 การควบคุมด้วยวิธี Q(U)

การกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 ได้แบ่งตามเทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์ (ชนิด A และ B) ได้เป็นไปตามตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การปรับตั้งค่าวิธี Q(U)

Voltage-reactive power parameters	Default settings		Ranges of allowable settings	
	Category A	Category B	Minimum	Maximum
V_{Ref}	V_N	V_N	$0.95 V_N$	$1.05 V_N$
V_2	V_N	$V_{Ref} - 0.02 V_N$	Category A: V_{Ref} Category B: $V_{Ref} - 0.03 V_N$	V_{Ref}^c
Q_2	0	0	100% of nameplate reactive power capability, absorption	100% of nameplate reactive power capability, injection
V_3	V_N	$V_{Ref} + 0.02 V_N$	V_{Ref}^f	Category A: V_{Ref} Category B: $V_{Ref} + 0.03 V_N$
Q_3	0	0	100% of nameplate reactive power capability, absorption	100% of nameplate reactive power capability, injection
V_1	$0.9 V_N$	$V_{Ref} - 0.08 V_N$	$V_{Ref} - 0.18 V_N$	$V_2 - 0.02 V_N^c$
Q_1^a	25% of nameplate apparent power rating, injection	44% of nameplate apparent power rating, injection	0	100% of nameplate reactive power capability, injection ^b
V_4	$1.1 V_N$	$V_{Ref} + 0.08 V_N$	$V_3 + 0.02 V_N^c$	$V_{Ref} + 0.18 V_N$
Q_4	25% of nameplate apparent power rating, absorption	44% of nameplate apparent power rating, absorption	100% of nameplate reactive power capability, absorption	0
Open loop response time	10 s	5 s	1 s	90 s

^aThe DER reactive power capability may be reduced at lower voltage.

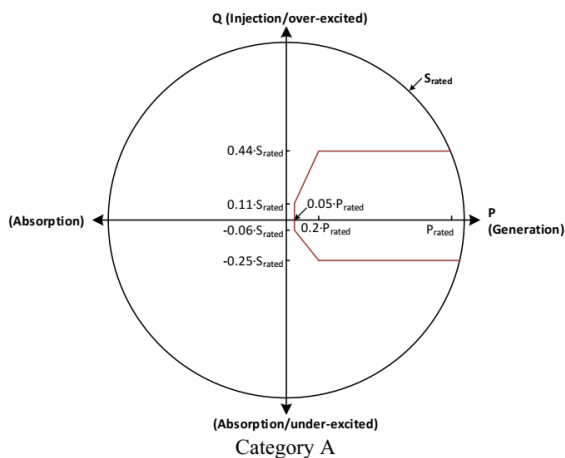
^bIf needed DER may reduce active power output to meet this requirement.

^cImproper selection of these values may cause system instability.

2.6.3 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Fixed Q

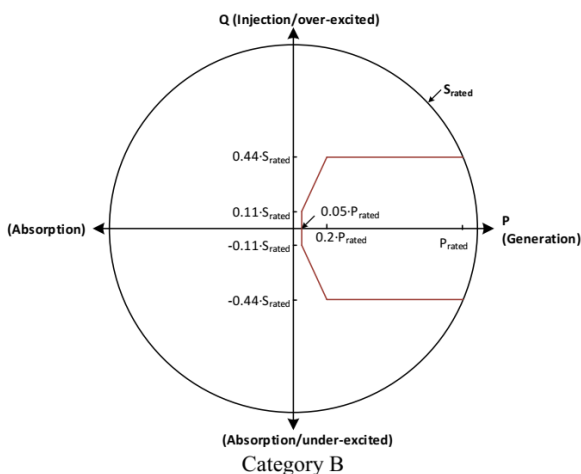
วิธี Fixed Q ตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 นั้น การตั้งค่าขึ้นอยู่กับชนิดของอินเวอร์เตอร์มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

- ชนิด A มีความสามารถเพียงพอที่จะควบคุมแรงดันซึ่งขีดความสามารถเหมาะสมกับ ระบบที่มีการเชื่อมต่อของแหล่งผลิตพลังงานแบบกระจายตัวในระบบ (DER) ไม่มากนัก และการผลิตพลังงานจาก DER ไม่ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า การกำหนดค่าสำหรับวิธี Fixed Q แสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ขีดจำกัดของ Category A

- ชนิด B ครอบคลุมความสามารถของชนิด A และ มีความสามารถเพิ่มเติมที่เหมาะสมกับระบบที่มีการเชื่อมต่อของ DER อยู่มาก ซึ่งการผลิตพลังงานจาก DER ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า การกำหนดค่าสำหรับวิธี Fixed Q แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ขีดจำกัดของ Category B

การตั้งค่าวิธี Fixed Q ทั้ง ชนิด A และ B สามารถสรุปได้ดังตาราง 18

ตารางที่ 15 การปรับตั้งค่าวิธี Fixed Q

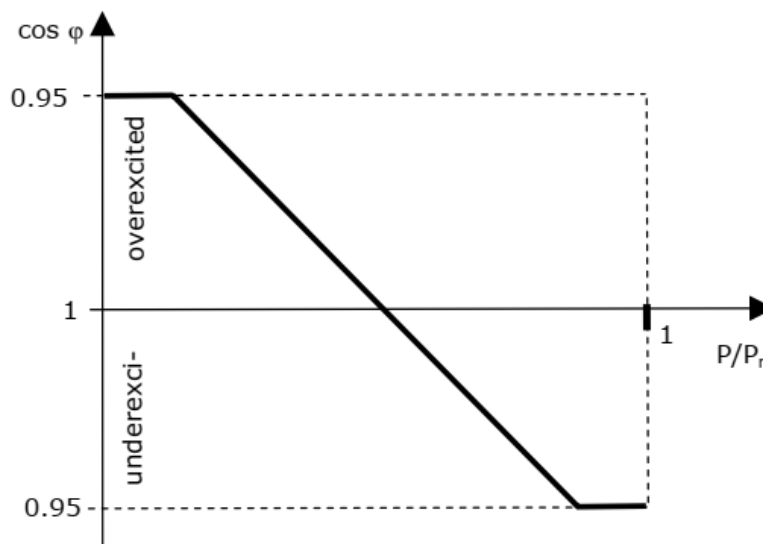
ชนิด	กำลังไฟฟ้าจริง	จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ	รับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ
A	$P < 0.05P_{rated}$	0	0
	$0.05 < P < 0.2P_{rated}$	ระหว่าง 0.11 ถึง 0.44 S _{rated}	ระหว่าง 0.06 ถึง 0.25 S _{rated}
	$P > 0.2P_{rated}$	0.44 S _{rated}	0.25 S _{rated}
B	$P < 0.05P_{rated}$	0	0
	$0.05 < P < 0.2P_{rated}$	ระหว่าง 0.11 ถึง 0.44 S _{rated}	ระหว่าง 0.11 ถึง 0.44 S _{rated}
	$P > 0.2P_{rated}$	0.44 S _{rated}	0.44 S _{rated}

2.6.4 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี $\cos\phi(P)$

หลักการการทำงานของวิธี $\cos\phi(P)$ คือ การปรับตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังผลิตที่ได้ในขณะนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 14 การปรับดังกล่าวจะส่งผลให้มีการเพิ่มหรือลด ขนาดกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.4 วิธีการดังกล่าวจะทำให้อินเวอร์เตอร์แบ่งการทำงานเป็น 2 ช่วงได้แก่ overexcited และ underexcited

การทำงานในแต่ละช่วงของอินเวอร์เตอร์สามารถอธิบายได้ดังนี้

- Overexcited อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ (ตัวประกอบกำลังตามหลัง) ส่งผลให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อเพิ่มขึ้น
- Underexcited อินเวอร์เตอร์รับกำลังไฟฟัรีแอกทีฟ (ตัวประกอบกำลังนำหน้า) ส่งผลให้แรงดันที่จุดเชื่อมต่อลดลง



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 14 การทำงานของวิธี $\cos\phi(P)$

$$Q_{max} = \tan(\cos^{-1} \phi) \cdot P_n \quad (2.4)$$

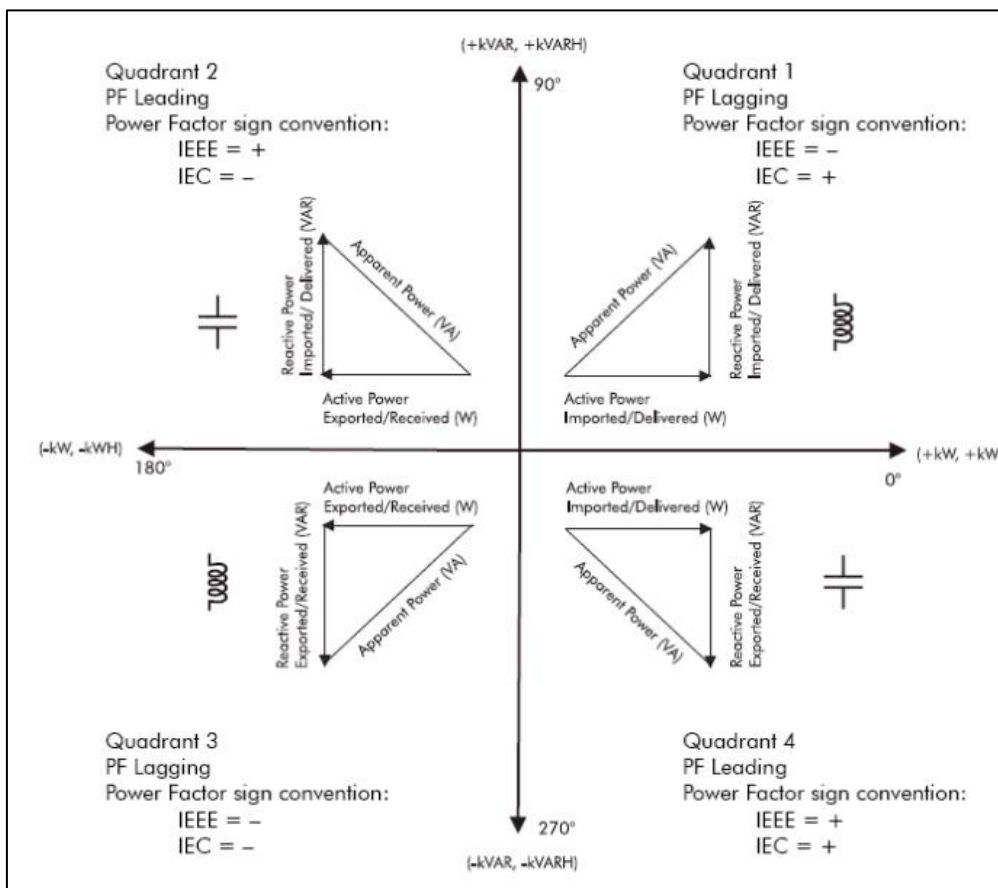
กำหนด Q_{max} คือ ขนาดกำลังไฟฟัรีแอกทีฟสูงสุด ที่สามารถรับหรือจ่ายได้

$\cos\phi$ คือ ค่าของตัวประกอบกำลัง

P_n คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าจริงที่อินเวอร์เตอร์จ่ายได้

2.6.5 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธีตัวประกอบกำลังคงที่

หลักการการทำงานของวิธี ตัวประกอบกำลังคงที่ คือ ตั้งค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์ด้วยค่าคงที่ซึ่งมีค่าระหว่าง -1 ถึง +1 และ กำหนดมาตรฐานที่ใช้อ้างอิง เครื่องหมายหน้าตัวเลขมีการให้ความหมายตามมาตรฐาน IEEE และ IEC [15] อธิบายได้ดังรูป 15

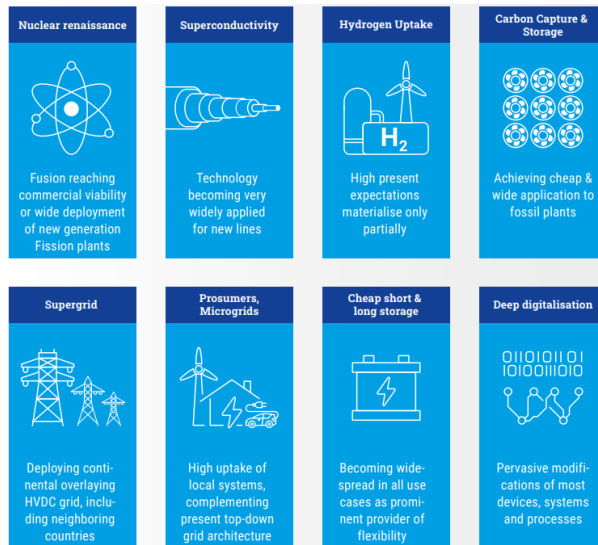


รูปที่ 15 การให้นิยามของเครื่องหมาย

- IEC ให้ความหมายว่า การจ่ายหรือผลิตกำลังให้ใช้เครื่องหมายบวก (+) และ ความต้องการใช้กำลังใช้เครื่องหมายลบ (-)
- IEEE ให้ความหมายว่า ตัวประกอบกำลังนำหน้าให้ใช้เครื่องหมาย + และ ตัวประกอบกำลังตามหลังใช้เครื่องหมาย -

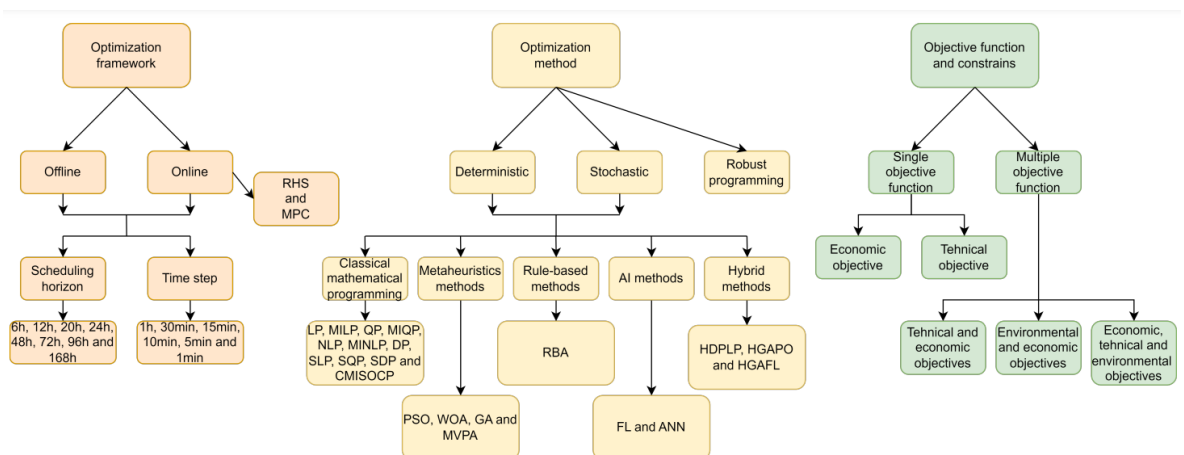
2.7. การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการจัดการพลังงานของโพรซิวเมอร์

โพรซิวเมอร์คือหนึ่งในสิ่งพลิกสถานการณ์ (Game changer) ในการเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้าไปสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน [16] โดยผลกระทบที่จะเกิดขึ้นคือ การเปลี่ยนแปลงรูปแบบตลาดซื้อขายไฟฟ้า ลดการไหลของกำลังไฟฟ้า สนับสนุนการดำเนินการ และ เพิ่มความยืดหยุ่นของระบบไฟฟ้าผ่านการรูปแบบการควบคุมหลายชั้น



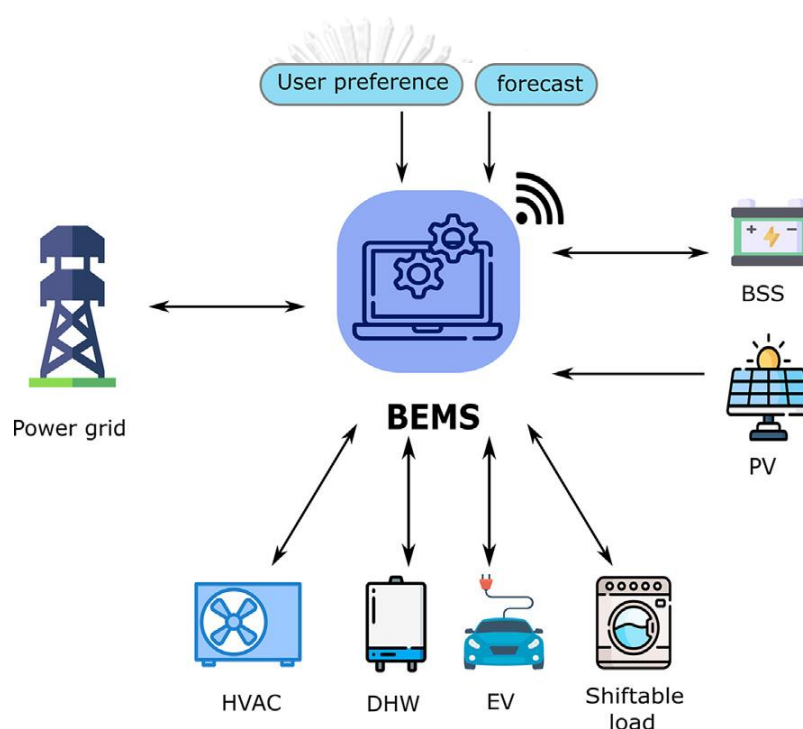
รูปที่ 16 สิ่งพลิกสถานการณ์สำหรับระบบไฟฟ้าเพื่อความเป็นกลางทางคาร์บอน

การหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) ของการจัดการพลังงานของโพรซิวเมอร์ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก [17] คือ กรอบการหาค่าเหมาะที่สุด วิธีการหาค่าตอบ วัตถุประสงค์และเงื่อนไข โดยภาพรวมวัตถุประสงค์แบ่งได้ 2 ประเภทคือ วัตถุประสงค์เดียว และ หลายวัตถุประสงค์ สำหรับวัตถุประสงค์เดียวจะทำการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อประโยชน์ของโพรซิวเมอร์ 2 ด้านคือ เศรษฐศาสตร์ และ เทคนิค หากเป็นหลายวัตถุประสงค์จะเพิ่มด้านสิ่งแวดล้อมเข้ามาพิจารณา และ หาค่าเหมาะที่สุดสำหรับประโยชน์หลายด้านซึ่งเงื่อนไขและข้อจำกัดที่ถูกลำนำมาพิจารณาโดยส่วนมากจะเป็นข้อจำกัดขององค์ประกอบทางกายภาพของโพรซิวเมอร์ และ ความสมดุลของการไหลไฟฟ้า แต่หากวัตถุประสงค์เกี่ยวกับด้านเทคนิค องค์ประกอบทางกายภาพของระบบไฟฟ้าจะถูกนำมาเข้ามาเป็นข้อจำกัด ภาพรวมของการหาค่าเหมาะที่สุดแสดงในรูป 17



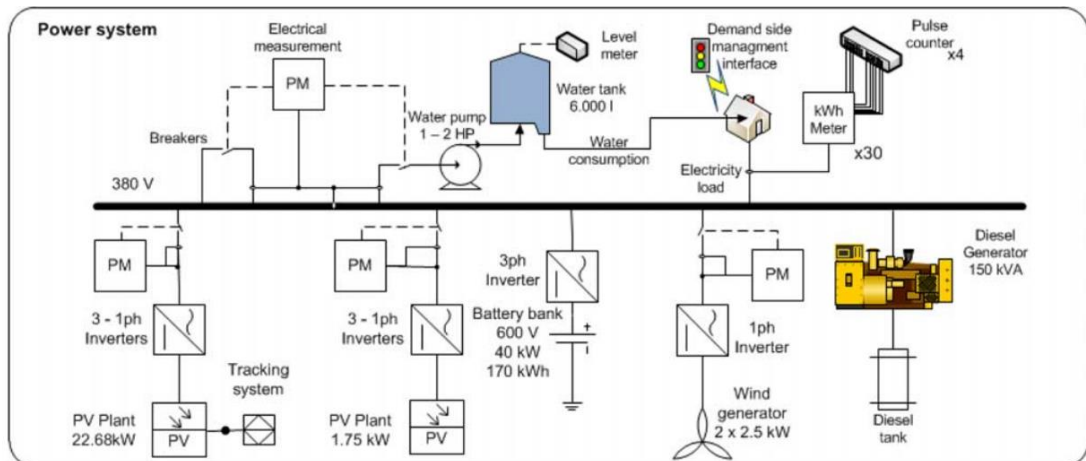
รูปที่ 17 ภาพรวมของการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับโพรซิวเมอร์

วัตถุประสงค์ด้านเศรษฐศาสตร์มีเป้าหมายเพื่อลดค่าไฟฟ้าโดยงานวิจัย [18] นำเสนอระบบจัดการพลังงานภายในอาคาร (Building Energy Management System ; BEMS) ซึ่งจะหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อไปควบคุม ระบบกักเก็บพลังงาน ยานยนต์ไฟฟ้า และ โหลดที่ควบคุมได้ มีการใช้ข้อมูลการพยากรณ์ของการผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และ ความต้องการไฟฟ้า มาใช้ในการคำนวณ ภาพรวมของระบบดังกล่าว แสดงในรูปที่ 18 สำหรับวัตถุประสงค์ด้านเทคนิคจะมีเป้าหมายไปที่การควบคุมองค์ประกอบต่างๆ เพื่อลดผลกระทบต่อระบบจำหน่าย หรือ การควบคุมปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านจุดเชื่อมต่อ โดยงานวิจัย [19] นำเสนอการประจุและคายประจุของยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านจุดเชื่อมต่อเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 18 ระบบจัดการพลังงานภายในอาคาร

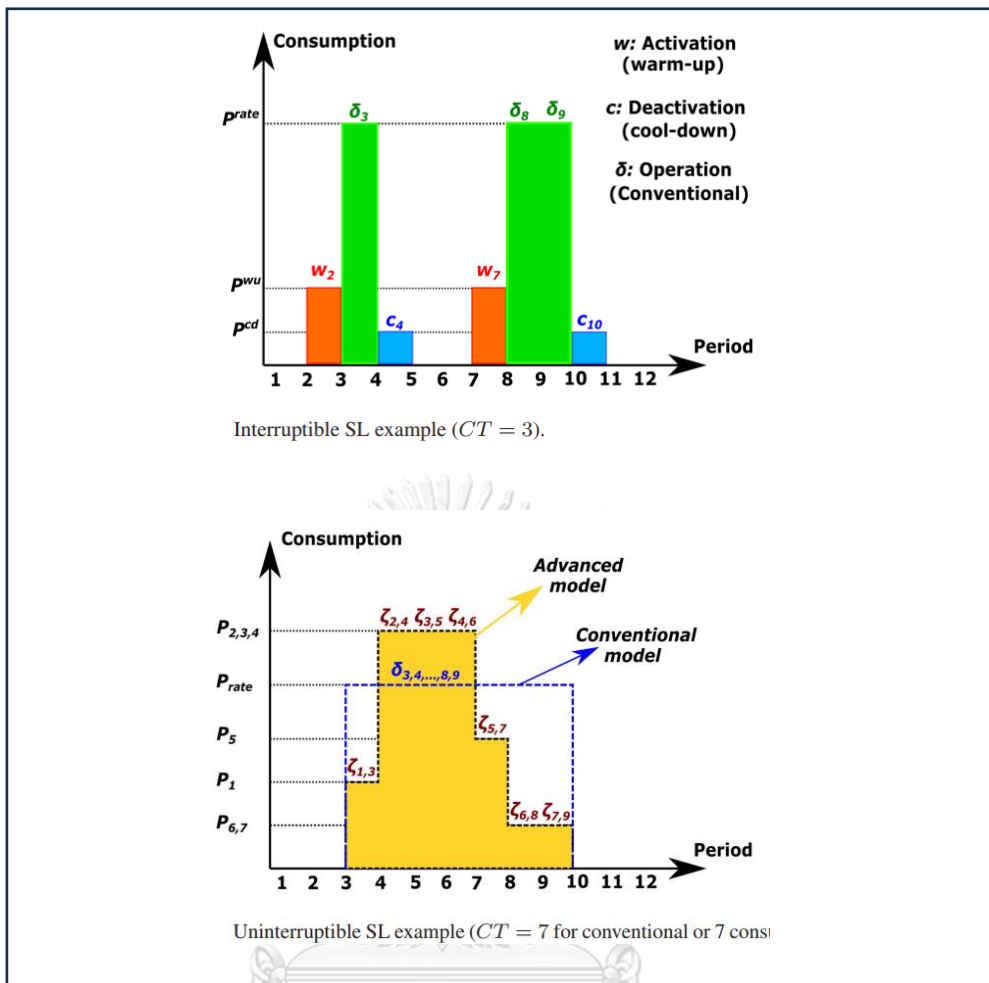
องค์ประกอบของระบบการจัดการพลังงานของโพรซูเมอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ด้านการผลิตไฟฟ้า (Supply side) และ ด้านการใช้ไฟฟ้า (Demand side) โดยงานวิจัย [20] ได้นำเสนอการควบคุมองค์ประกอบทั้ง 2 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายการผลิตไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการประยุกต์ใช้วิธี Rolling Horizon (RH) องค์ประกอบทางกายภาพแสดงในรูป 19 การจัดการพลังงานในวิจัยนี้จะทำการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับควบคุม ด้านการผลิตไฟฟ้าประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดดีเซล ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และ ระบบกักเก็บพลังงาน สำหรับทางด้านการใช้ไฟฟ้าจะควบคุมการเปิด-ปิด บัมพ์น้ำ และ คำสั่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตอบสนองด้านโหลด (Demand response)



รูปที่ 19 ไมโครกริดพลังงานหมุนเวียน

สำหรับโพรซูเมอร์มีการระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่ได้สร้างมลพิษทางอากาศ และ ต้องอาศัยการพึ่งพาพลังงานจากระบบไฟฟ้า งานวิจัย[21]ได้นำเสนอการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานเพื่อให้โพรซูเมอร์ที่อยู่ในไมโครกริด มีการปล่อยมลพิษสุทธิเท่ากับศูนย์ (Zero Net Energy) ผลการศึกษาพบว่า การใช้งานระบบกักเก็บพลังงานของโพรซูเมอร์จะช่วยลดขนาดแบตเตอรี่ขนาดใหญ่หากไมโครกริดต้องดำเนินการลงทุนเอง จากการศึกษาหากเปรียบผู้ดูแลไมโครกริด เสมือนผู้ดูแลโครงข่าย จะสรุปได้ว่ากรณีที่โพรซูเมอร์ลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานเอง และ ได้รับค่าชดเชยเมื่อถูกรื้อของการใช้งานแบตเตอรี่ก็จะเป็นประโยชน์ทั้ง 2 ฝ่าย

การจัดการพลังงานเพื่อให้บรรลุเป้าหมายพลังงานสุทธิเท่ากับศูนย์ (Net Zero Energy) สำหรับอาคารสำนักงาน นอกจากมีระบบผลิตพลังงานสะอาดของตนเองแล้ว ควรจะมีความยืดหยุ่นของโหลดเพื่อเพิ่มศักยภาพในการจัดการพลังงานให้เป็นที่น่าพอใจ จาก [22] ได้นำเสนอเงื่อนไขการจัดการจัดกักพลังงานสุทธิรายเดือนโดยนิยามจากกำลังไฟฟ้านำเข้าหักลบกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกสู่ระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โหลดชนิด Shiftable load ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบคือ 1. Interruptible Load และ 2. Uninterruptible Load แสดงคุณลักษณะการใช้กำลังไฟฟ้าดังรูปที่ 20 หากพิจารณาโหลดที่ควบคุม เงื่อนไขอื่น ๆ นอกเหนือจากคุณสมบัติทางกายภาพ ควรจะนำพิจารณาเพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิห้องสำหรับการควบคุมเครื่องปรับอากาศ



รูปที่ 20 การกำหนดรูปแบบของโหลดชนิดต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัย [23] ได้ศึกษาศักยภาพของโปรซูเมอร์สามารถมีส่วนช่วยส่งเสริมระบบไฟฟ้าในด้านลดกำลังสูญเสีย และการรักษาแรงดัน โดยที่นำเสนอแนวคิดการหาค่าเหมาะที่สุดของการคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง และรีแอกทีฟของโปรซูเมอร์พร้อมทั้งแสดงประโยชน์ที่โปรซูเมอร์ได้รับได้ชี้วัดจาก ค่าไฟฟ้า การใช้งานของระบบผลิต และ ค่าชดเชยจากการให้บริการสนับสนุน โครงข่าย อีกทั้งยังเสนอผลการศึกษาการช่วยรักษาแรงดันผ่านการควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์

บทที่ 3

ระบบจำหน่ายทดสอบ

3.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

ระบบทดสอบนี้ดัดแปลงมาจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยนำสายป้อนจำนวน 1 วงจรของสถานีไฟฟ้าที่ให้บริการกับพื้นที่อุตสาหกรรมมาปรับแต่งข้อมูล มีผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดอยู่ 3 ประเภทได้แก่ อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ผู้ใช้ทั่วไป และ ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3.1.1 โครงสร้างของระบบ

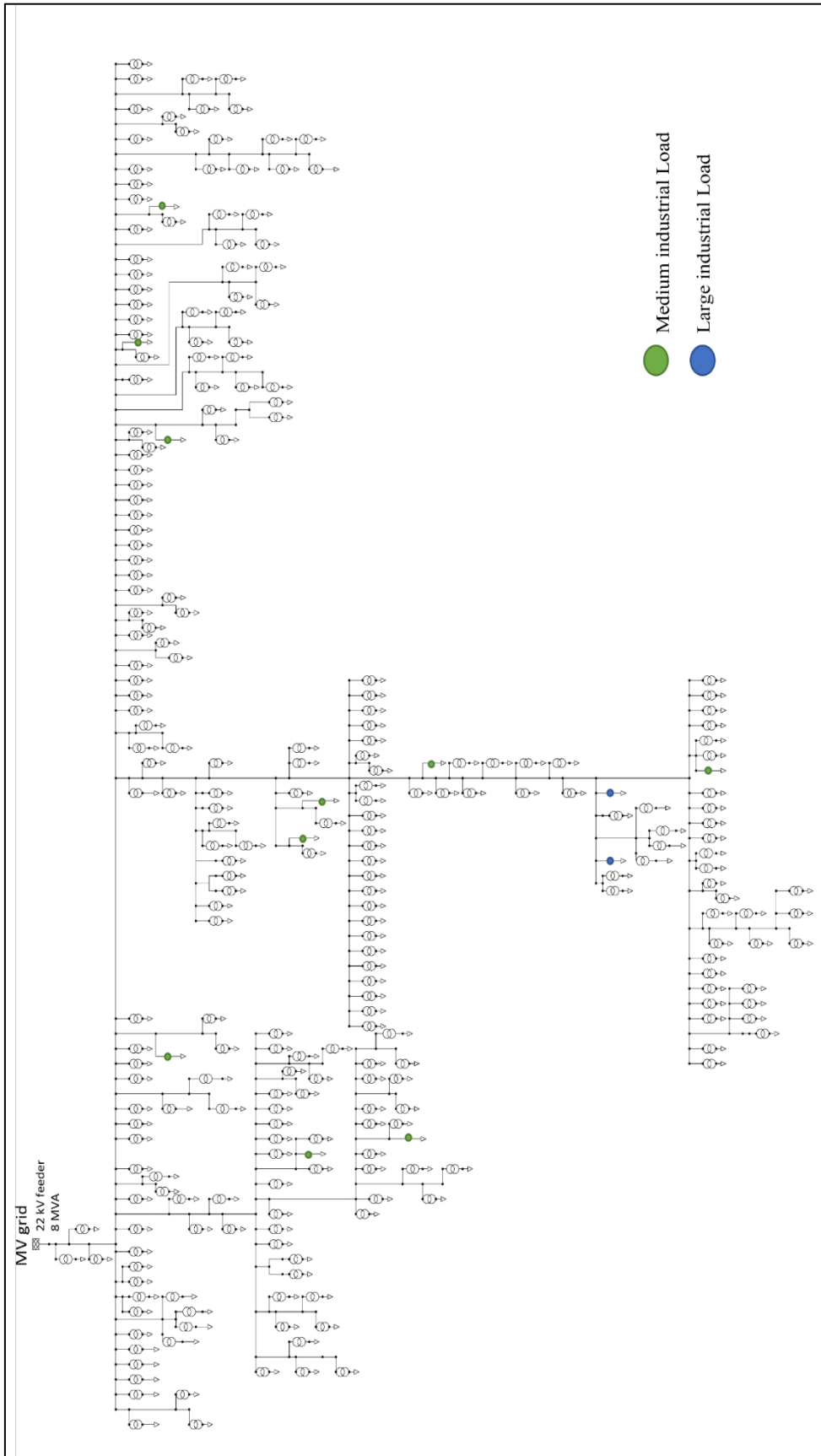
ลักษณะโครงสร้างระบบจำหน่ายเป็นแบบเรเดียล (Radial) รูปแบบ 3 เฟส 3 สาย พิกัดกำลังไฟฟ้าของสายป้อนคือ 8 เมกะวัตต์แอมป์ ระดับแรงดันที่ใช้งานคือ 22 กิโลโวลต์ (แรงดันระหว่างสาย) มีผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น 266 ราย ความยาวของสายป้อนมีระยะประมาณ 15.42 กิโลเมตร อุปกรณ์ที่อยู่ในระบบประกอบด้วย หม้อแปลงจำหน่าย สายป้อนหลัก สายป้อนรอง และสายเซอร์วิส สามารถเขียนแสดงเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวดังรูปที่ 21 พร้อมทั้งแสดงพารามิเตอร์ของสายจำหน่าย และ หม้อแปลงจำหน่าย ดังตารางที่ 16 และ 17

ตารางที่ 16 พารามิเตอร์สายจำหน่ายของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

ประเภท	ขนาดพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	พิกัดกระแส (แอมแปร์)	ค่าความต้านทาน (โอห์มต่อ กิโลเมตร)	ค่ารีแอกแตนซ์ (โอห์มต่อ กิโลเมตร)
สายป้อนหลัก	185	429	0.2106576	0.4144061
สายป้อนรอง	50	186	0.8219279	0.4553402
สายเซอร์วิส	50	186	0.8219279	0.4553402

ตารางที่ 17 พารามิเตอร์หม้อแปลงของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

	พิกัดกำลังไฟฟ้า (กิโลโวลต์แอมแปร์)	Short circuit Voltage (%)
หม้อแปลง 3 เฟส 22/0.4 กิโลโวลต์ Dyn 11	50	5
	100	
	160	
	250	



3.1.2 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบ

ลักษณะการใช้ไฟฟ้ารายวันของผู้ไฟฟ้าแต่ละประเภทอ้างอิงจาก [24] ซึ่งมีการบันทึกข้อมูลราย 15 นาที และ ค่าความต้องการไฟฟ้าของสายป้อนกำหนดให้มีปริมาณร้อยละ 80 ของพิกัดสาย กำหนดให้โหลดทุกประเภทมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 ค่าความต้องการไฟฟ้าของโหลดแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

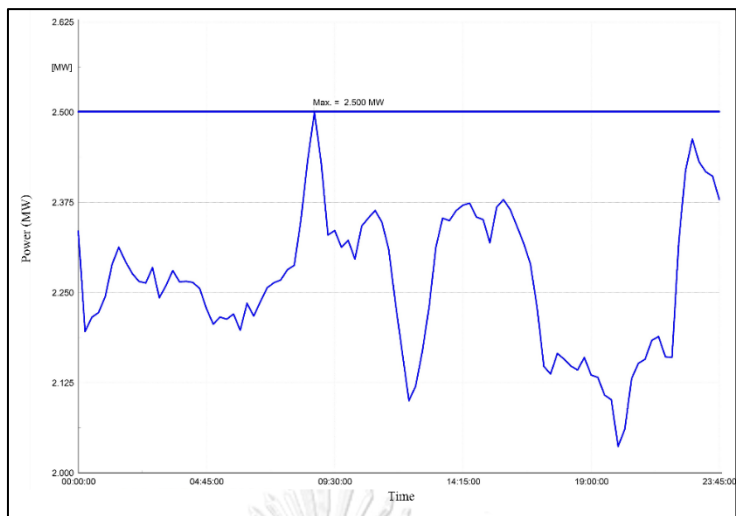
ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	จำนวน	ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์)
อุตสาหกรรมขนาดใหญ่	2	2.5
ผู้ใช้ทั่วไป	10	2
ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ	254	2
รวม	266	6.5

ดัชนีลักษณะการใช้ไฟฟ้าของสายป้อนสามารถแสดงค่า ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ดัชนีการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

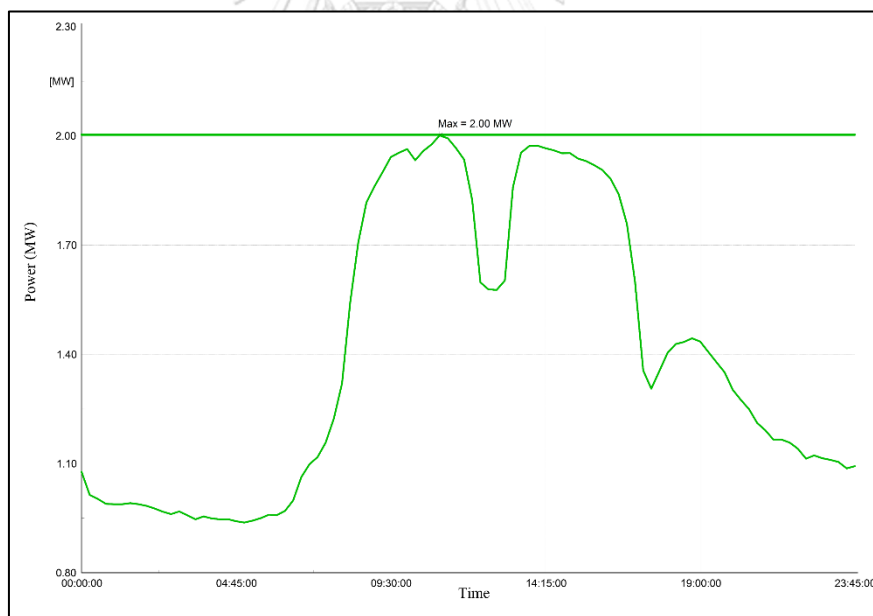
ดัชนี	ค่าของดัชนี
Load factor	0.87
Utilization factor (Feeder rated)	0.75
Coincident factor	1.086

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทนี้ทั้งหมด) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเวลา 08.45 น. มีค่า 2.5 เมกะวัตต์ แสดง
 ดังรูป 22



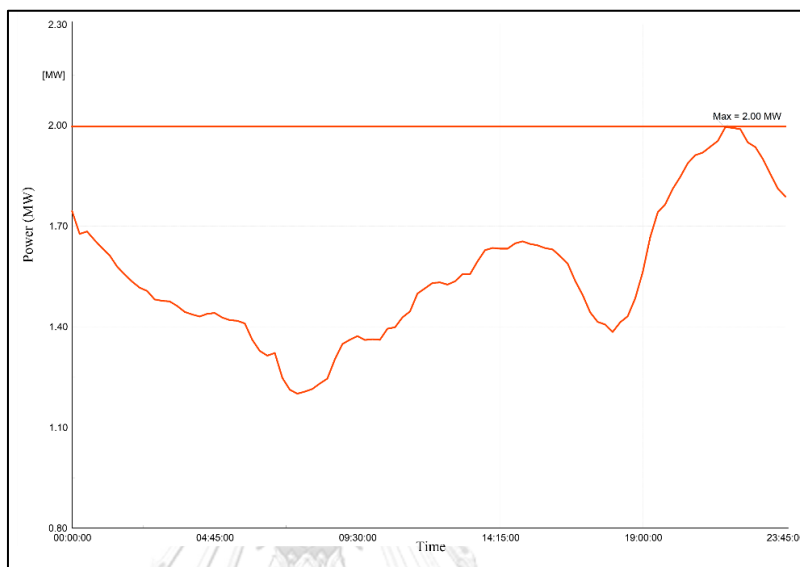
รูปที่ 22 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทผู้ใช้ทั่วไป (พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทนี้ทั้งหมด) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเวลา 11.00 น. มีค่า 2 เมกะวัตต์ แสดงดังรูป 23



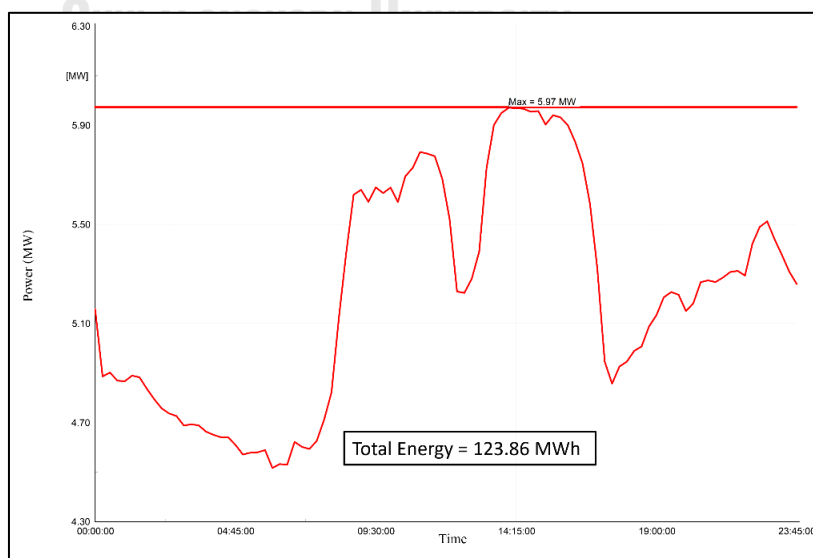
รูปที่ 23 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทผู้ใช้ทั่วไป

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ (พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทนี้ทั้งหมด) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเวลา 21.45 น. มีค่า 2 เมกะวัตต์ แสดงดังรูป 24



รูปที่ 24 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของสายป้อน(รวมผู้ใช้ไฟฟ้าทุกประเภท) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเวลา 14.00 น. มีค่า 5.97 เมกะวัตต์ แสดงดังรูป พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดวันมีค่า 123.86 เมกะวัตต์ชั่วโมง แสดงดังรูป 25



รูปที่ 25 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยรวม

3.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

ระบบทดสอบนี้ดัดแปลงมาจากระบบจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยปรับแต่งข้อมูลของสายป้อนจำนวน 1 วงจรซึ่งจำหน่ายไฟฟ้าให้กับพื้นที่ธุรกิจ มีผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดอยู่ 3 ประเภทได้แก่ ธุรกิจโรงแรม หน่วยงานราชการ และระบบจำหน่ายแรงดันต่ำของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

3.2.1 โครงสร้างของระบบทดสอบ

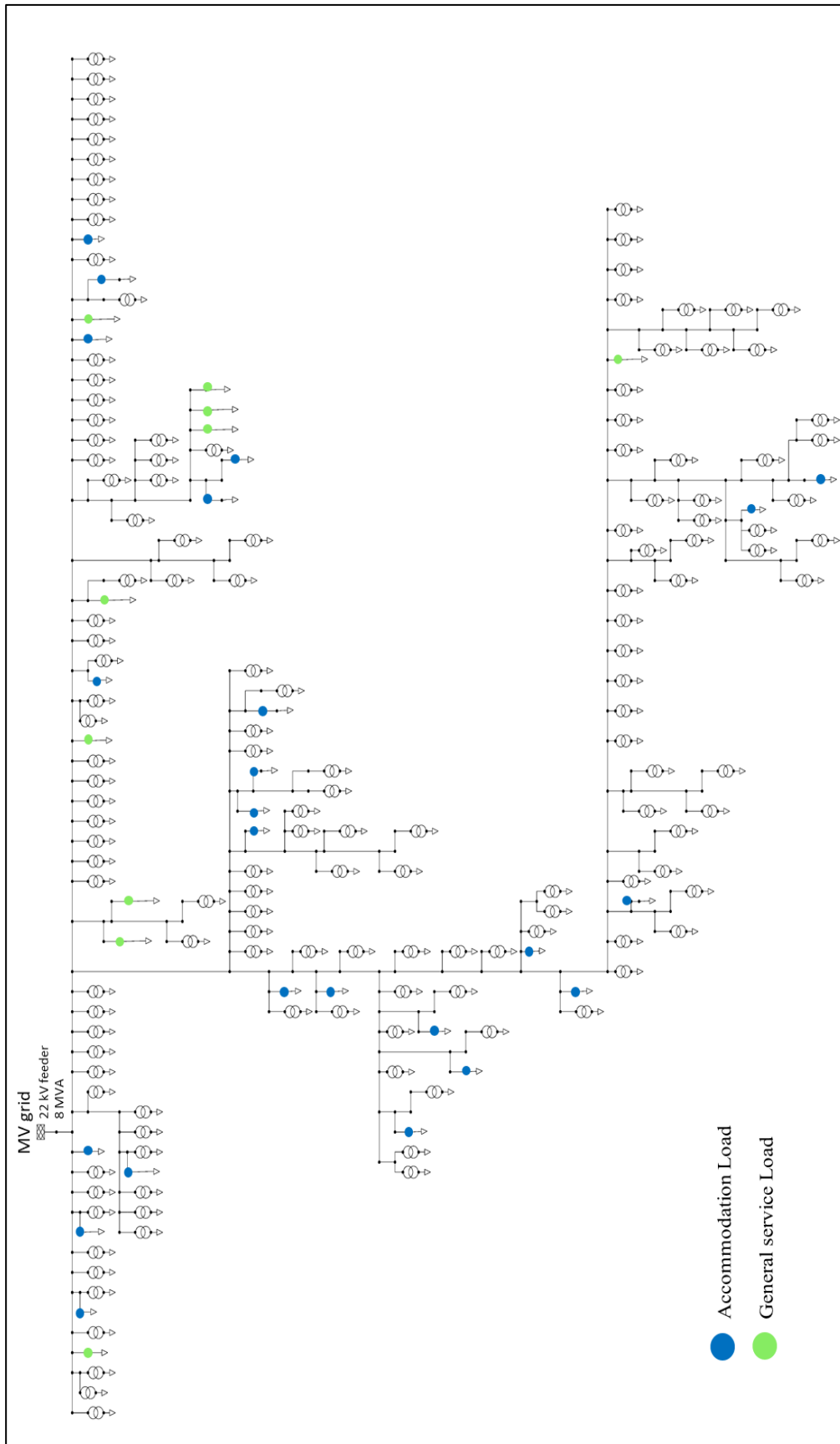
ลักษณะโครงสร้างระบบจำหน่ายเป็นแบบเรเดียล (Radial) รูปแบบ 3 เฟส 3 สาย พิกัดกำลังไฟฟ้าของสายป้อนคือ 8 เมกะวัตต์แอมป์ ระดับแรงดันที่ใช้งานคือ 22 กิโลโวลต์ (แรงดันระหว่างสาย) มีผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น 180 ราย ความยาวของสายป้อนมีระยะประมาณ 4.64 กิโลเมตร อุปกรณ์ที่อยู่ในระบบประกอบด้วย หม้อแปลงจำหน่าย สายป้อนหลัก สายป้อนรอง สายเซอร์ และสายเซอร์วิส สามารถเขียนแสดงเป็นไดอะแกรมเส้นเดียวดังรูปที่ 26 พร้อมทั้งแสดงพารามิเตอร์ของสายจำหน่าย และ หม้อแปลง ดังตารางที่ 20 และ 21 ตามลำดับ

ตารางที่ 20 พารามิเตอร์สายจำหน่ายของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

ประเภท	ขนาดพื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)	พิกัดกระแส (แอมแปร์)	ค่าความต้านทาน (โอห์มต่อ กิโลเมตร)	ค่ารีเอกแตนซ์ (โอห์มต่อ กิโลเมตร)
สายป้อนหลัก	185	429	0.2106576	0.4144061
สายป้อนรอง	50	186	0.8219279	0.4553402
สายเซอร์วิส	50	186	0.8219279	0.4553402

ตารางที่ 21 พารามิเตอร์หม้อแปลงของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

	พิกัดกำลังไฟฟ้า (กิโลโวลต์แอมแปร์)	Short circuit Voltage (%)
หม้อแปลง 3 เฟส 22/0.4 กิโลโวลต์ Dyn 11	100	5
	160	
	250	



รูปที่ 26 ระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

3.2.2 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบ

ลักษณะการใช้ไฟฟ้ารายวันของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทอ้างอิงจาก [24] ซึ่งมีการบันทึกข้อมูลราย 15 นาที และ ค่าความต้องการไฟฟ้าของสายป้อนกำหนดให้มีปริมาณร้อยละ 90 ของพิกัดสาย กำหนดให้โหลดทุกประเภทมีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.9 ค่าความต้องการไฟฟ้าของโหลดแต่ละประเภทแสดงดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

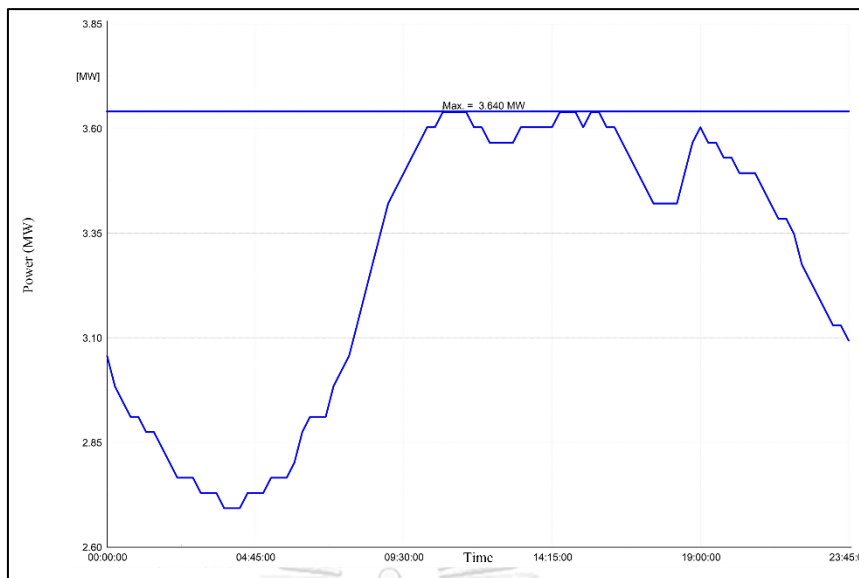
ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	จำนวน	ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์)
ธุรกิจ โรงแรม	23	3.64
ผู้ใช้ทั่วไป	11	1.02
ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ	146	2.6
รวม	180	7.26

ดัชนีของลักษณะการใช้ไฟฟ้าของสายป้อนสามารถแสดงค่าดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ดัชนีการใช้ไฟฟ้าของระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

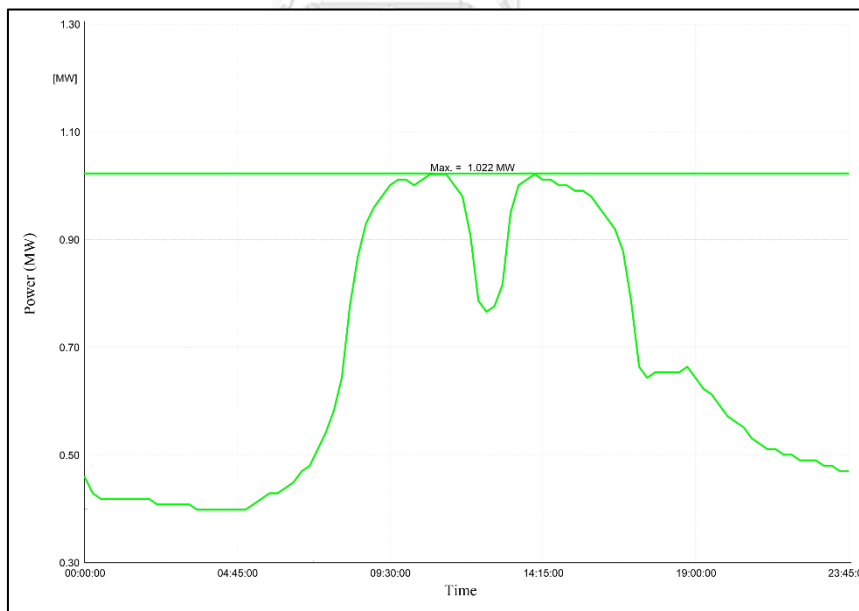
ดัชนี	ค่าของดัชนี
Load factor	0.87
Utilization factor (Feeder rated)	0.85
Coincident factor	0.95

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจ โรงแรม (พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทนี้ทั้งหมด) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดครั้งแรกของวันเกิดขึ้นเมื่อ เวลา 11.30 น. ถึง 12.00 น. ครั้งที่สองเกิดขึ้นเมื่อเวลา 14.30 น. มีค่า 2.5 เมกะวัตต์ แสดงดังรูป 27



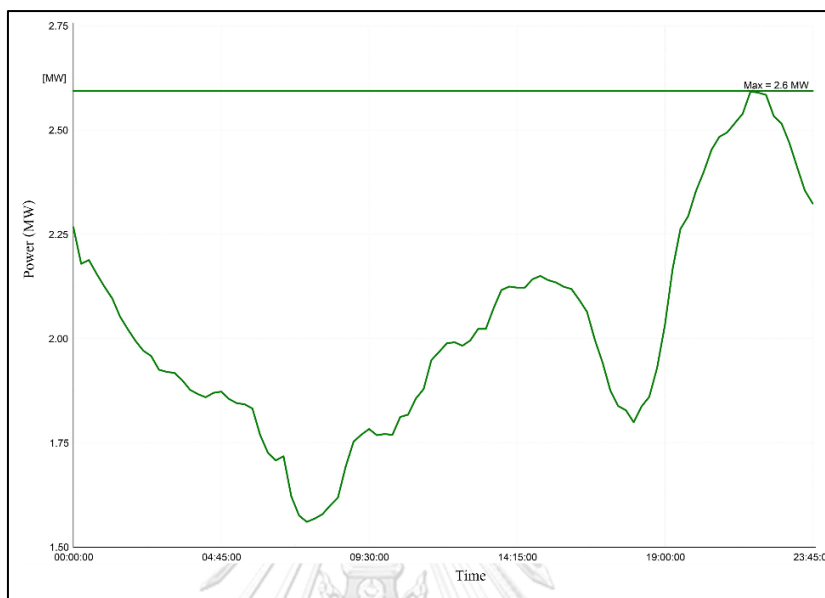
รูปที่ 27 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจ โรงแรม

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทผู้ใช้ทั่วไป (พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทนี้ทั้งหมด) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเวลา 14.00 น. มีค่า 1.022 เมกะวัตต์ แสดงดังรูป 28



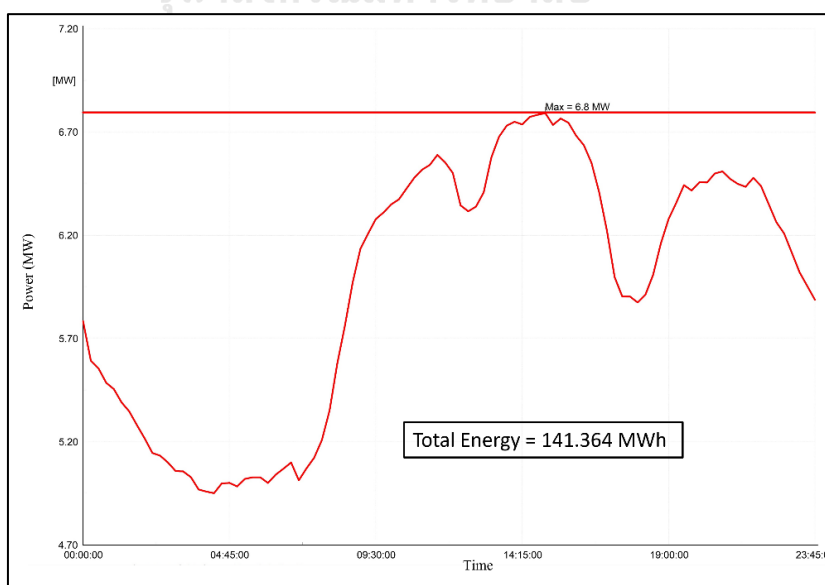
รูปที่ 28 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทผู้ใช้ทั่วไป

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ (พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทนี้ทั้งหมด) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเวลา 21.45 น. มีค่า 2.6 เมกะวัตต์ แสดงดังรูป 29



รูปที่ 29 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของสายป้อน(รวมผู้ใช้ไฟฟ้าทุกประเภท) มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเวลา 15.00 น. มีค่า 6.8 เมกะวัตต์ แสดงดังรูป พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ตลอดวันมีค่า 141.364 เมกะวัตต์ชั่วโมง แสดงดังรูป 30



รูปที่ 30 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าโดยรวม

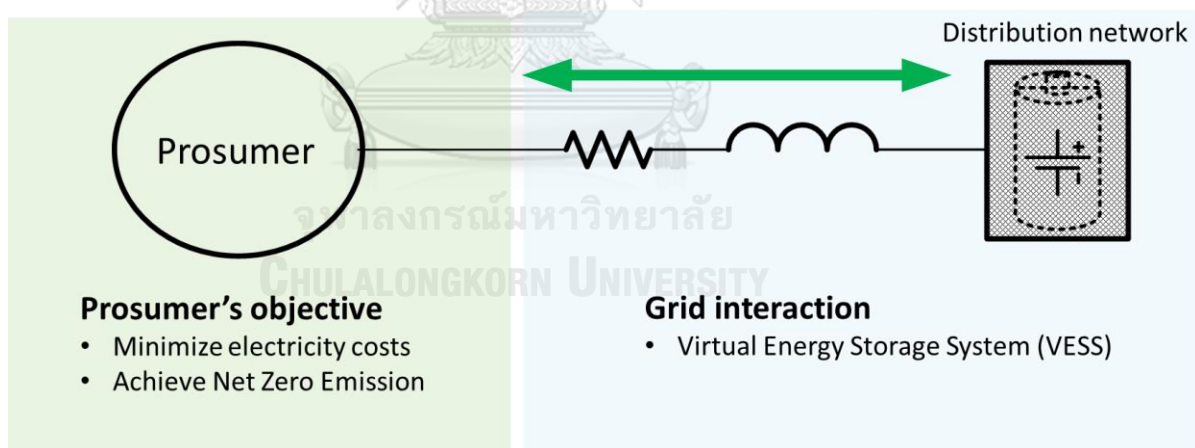
บทที่ 4

การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโพรซูเมอร์

สำหรับบทที่ 4 จะนำเสนอแนวคิดการจัดการพลังงานของโพรซูเมอร์โดยจะมุ่งเน้นไปที่การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อน และการให้บริการโครงข่ายไฟฟ้า โดยคำสั่งสำหรับการควบคุมได้มาจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้มีการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอ ดัชนีที่ชี้วัดประโยชน์ของโพรซูเมอร์

4.1 ภาพรวมระบบการจัดการพลังงานสำหรับโพรซูเมอร์

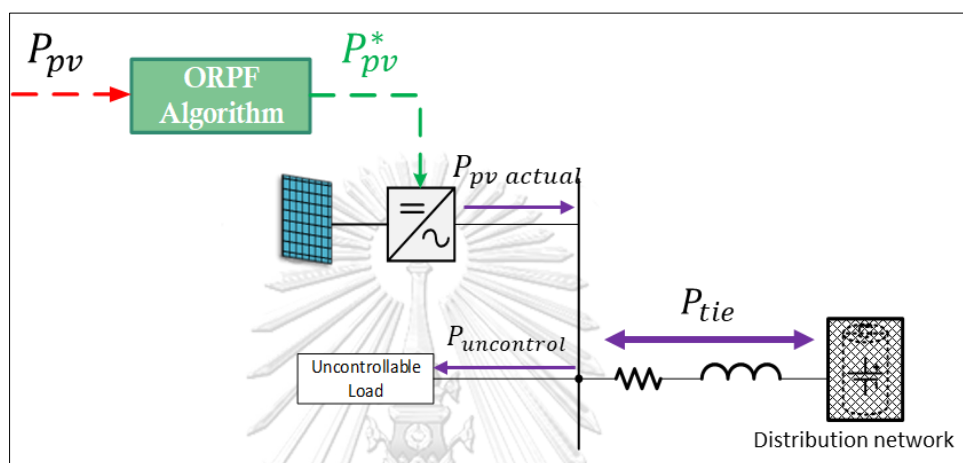
แนวคิดการจัดการพลังงานโดยคำนึงถึงกำลังไฟฟ้าไหลย้อน มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดประโยชน์ระหว่าง โพรซูเมอร์ และ โครงข่ายไฟฟ้า กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าไหลย้อน สามารถสร้างรายได้ให้กับโพรซูเมอร์ และ การนำแนวคิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net zero emission) ไปใช้ ซึ่งการรับซื้อไฟฟ้าจะพิจารณาโครงข่ายไฟฟ้าให้เป็นระบบกักเก็บพลังงานเสมือน (Virtual Energy Storage System; VESS) เพื่อให้ผู้ดูแลโครงข่ายสามารถเก็บค่าธรรมเนียมสำหรับการให้บริการ อีกทั้ง ยังจำกัดปริมาณการรับซื้อไฟฟ้า และ ข้อจำกัดอื่นๆ ที่ใช้ประยุกต์มาจากระบบกักเก็บพลังงานทั่วไป ภาพรวมของระบบดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 ภาพรวมระบบการจัดการพลังงานร่วมกับ VESS

4.2 การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์

การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์จะใช้การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเวลาจริง (Real time optimization) ทำการหาคำตอบราย 15 นาที โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โพรซูเมอร์มีค่าใช้จ่ายจากค่าไฟฟ้าน้อยที่สุดในทุกครั้งที่มีการควบคุม และ พิจารณาการใช้งาน VESS ทั้งด้านค่าบริการ และ ข้อจำกัดทางไฟฟ้า สามารถแสดงภาพรวมของระบบดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 ภาพรวมการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อน

4.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดปัญหา

สำหรับตัวแปรที่ใช้สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดจะมีเพียงตัวแปรแบบต่อเนื่อง (Continuous variable) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ โพรซูเมอร์ และ VESS

1) โพรซูเมอร์

P_{pv} คือ ศักยภาพกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

P_{PV}^* คือ กำลังกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์

$P_{pv\ actual}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

$P_{uncontrol}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่โหลดต้องการ

2) VESS

P_{import} คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโพรซูเมอร์

P_{export} คือ กำลังไฟฟ้าที่รับจากโพรซูเมอร์ (กำลังไฟฟ้าไหลย้อน)

P_{tie} คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างโพรซูเมอร์ และ VESS

E_{tie} คือ พลังงานที่สะสมอยู่ใน VESS

4.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์สำหรับการจัดการพลังงานสำหรับ โพรซูเมอร์คือ การลดค่าไฟฟ้า โดยพิจารณาให้มีรายได้จากการขายกำลังไฟฟ้าให้ลายน โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$CP_{import}\Delta t - (1 - \Delta C)CP_{export}\Delta t \quad (4.1)$$

โดย C คือ อัตราค่าไฟฟ้าที่ซื้อจากโครงข่ายไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)

ΔC คือ ส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้า (คิดเป็นอัตราส่วน 0 ถึง 1)

4.2.2 การสร้างแบบจำลององค์ประกอบและข้อจำกัด

การกำหนดเงื่อนไขจะพิจารณาข้อจำกัดทางกายภาพ เช่น ข้อจำกัดพิกัดทางไฟฟ้า เงื่อนไขของพลังงานสะสมใน VESS เป็นต้น โดยจะประกอบไปด้วย ข้อจำกัดแบบสมการ (Equality Constraint) และ ข้อจำกัดแบบอสมการ (Inequality constraint)

1. เงื่อนไขสมดุลทางไฟฟ้า (Power balance)

กำลังการผลิตไฟฟ้า และ ความต้องการไฟฟ้า ต้องเท่ากันทุกช่วงเวลา

$$P_{pv}^* + P_{import} = P_{export} + P_{load} \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) พิจารณาการไหลของกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง โพรซูเมอร์ และ โครงข่ายไฟฟ้า ด้านซ้ายมือคือ กำลังผลิตที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ และ กำลังไฟฟ้าที่ไหลมาจากโครงข่าย ทางด้านขวามือ คือ กำลังไฟฟ้าให้ลายน และ ความต้องการไฟฟ้า

2. แบบจำลองฟิวอินเวอร์เตอร์

สำหรับข้อจำกัดของฟิวอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาเฉพาะพิกัดกำลังไฟฟ้าที่เป็นไปได้ ณ ขณะเวลาใดๆ เท่านั้น

$$0 \leq P_{pv}^* \leq P_{pv} \quad (4.3)$$

3. แบบจำลองระบบกักเก็บพลังงานเสมือน

แบบจำลอง VESS จะประยุกต์ข้อจำกัดจากระบบกักเก็บพลังงานทั่วไปแต่จะละเลยพลังงานที่จ่ายออกไปให้กับโพรซูเมอร์ (ไม่พิจารณาความจุในสถานะปล่อยพลังงาน) กล่าวคือ ผู้ดูแลโครงข่ายสามารถขายไฟฟ้าได้ตามที่โพรซูเมอร์ต้องการ

$$P_{tie} = P_{import} - P_{export} \quad (4.4)$$

$$E_{tie} = E_{tie,RT} + P_{tie}\Delta t \quad (4.5)$$

$$0 \leq P_{import} \leq P_{import}^{max} \quad (4.6)$$

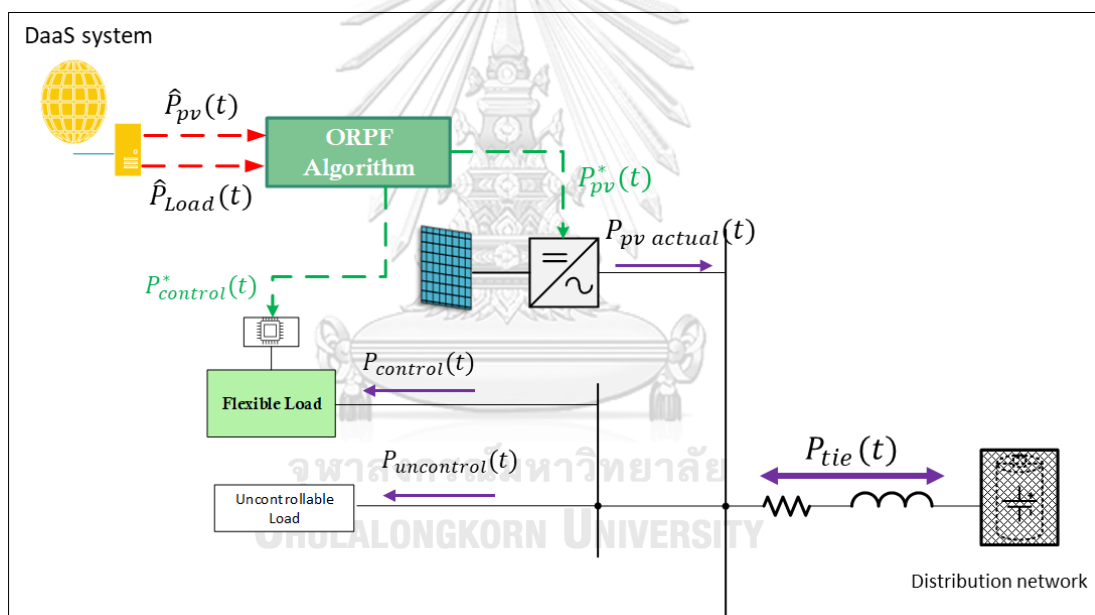
$$0 \leq P_{export} \leq P_{export}^{max} \quad (4.7)$$

$$E_{tie}^{min} \leq E_{tie} \quad (4.8)$$

สมการที่ (4.4) แสดงถึงกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่าง โพรซูเมอร์ และ โกรข่ายไฟฟ้า ซึ่งจะ ถูกนำไปปรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานสะสมของ VESS ในสมการ (4.5) โดยที่ P_{import}^{max} และ P_{export}^{max} ใน (4.6) และ (4.7) คือการจำกัดความต้องการไฟฟ้า และ ปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อน ตามลำดับ โดยเงื่อนไขพลังงานสะสมแสดงในสมการที่ (4.8)

4.3 การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์และโหลดที่ควบคุมได้

การเพิ่มโหลดควบคุมได้ (Flexible load) เข้ามาในการจัดการพลังงาน จะใช้การหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับรายวัน (Day ahead optimization) ทำการหาค่าตอบราย 15 นาที โดยมี วัตถุประสงค์เพื่อให้โพรซูเมอร์มีค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้ายาววันน้อยที่สุด ซึ่งการควบคุมรูปแบบนี้ต้อง อาศัยการพยากรณ์ของกำลังผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ และ โหลด ราย 15 นาที ล่วงหน้า 1 วัน สามารถแสดงภาพรวมของระบบดังรูปที่ 33



รูปที่ 33 ภาพรวมการจัดการพลังงาน โดยมีโหลดที่ควบคุมได้

4.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดปัญหา

ตัวแปรที่ใช้สำหรับการหาค่าเหมาะที่สุดจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มคือ การผลิตไฟฟ้า โหลด และ VESS โดยที่ ตัวแปรต่อเนื่องจะใช้ในการผลิตไฟฟ้า และ VESS ส่วนโหลดจะมีทั้งตัวแปร ต่อเนื่อง และ ไม่ต่อเนื่อง (Discrete variable)

1) การผลิตไฟฟ้า

$\hat{P}_{pv}(t)$ คือ ค่าพยากรณ์กำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

$P_{pv}^*(t)$ คือ คำสั่งกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพีวีอินเวอร์เตอร์

$P_{pv\ actual}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

2) โหลด

$\hat{P}_{Load}(t)$ คือ ค่าพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าของโหลด

$P_{control}^*(t)$ คือ คำสั่งกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโหลดที่ควบคุมได้ (ตัวแปรต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง)

$P_{Uncontrol}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าของโหลดที่ควบคุมไม่ได้

3) VESS

$P_{import}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโพรซูเมอร์

$P_{export}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่รับจากโพรซูเมอร์ (กำลังไฟฟ้าไหลย้อน)

$P_{tie}(t)$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างโพรซูเมอร์ และ VESS

$E_{tie}(t)$ คือ พลังงานที่สะสมอยู่ใน VESS

4.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์สำหรับการจัดการพลังงานสำหรับ โพรซูเมอร์ที่มีโหลดแบบควบคุมได้คือ การลดค่าไฟฟ้า ซึ่งจะคล้ายกับสมการ (4.1) แต่จะพิจารณาค่าใช้จ่ายตลอดวัน ดังสมการ

$$\sum_t^T \{CP_{import}(t)\Delta t - (1 - \Delta C)CP_{export}(t)\Delta t\} \quad (4.9)$$

4.3.3 การสร้างแบบจำลององค์ประกอบและข้อจำกัด

การกำหนดเงื่อนไขจะคล้ายกับหัวข้อ 4.2.3 และ ได้เพิ่มแบบจำลองของโหลดที่ควบคุมได้ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ โหลดแบบต่อเนื่อง (Continuous load) และ โหลดแบบเปิด-ปิด (ON/OFF load)

1. เงื่อนไขสมดุลทางไฟฟ้า (Power balance)

$$P_{pv}^*(t) + P_{import}(t) = P_{export}(t) + \hat{P}_{Load}(t) \quad , \forall t \quad (4.10)$$

$$\hat{P}_{Load}(t) = (P_{control}^*(t)) + P_{Uncontrol}(t) \quad , \forall t \quad (4.11)$$

$$P_{control}^*(t) = P_{con}(t) + P_{rated}U(t) \quad (4.12)$$

2. แบบจำลองพีวีอินเวอร์เตอร์

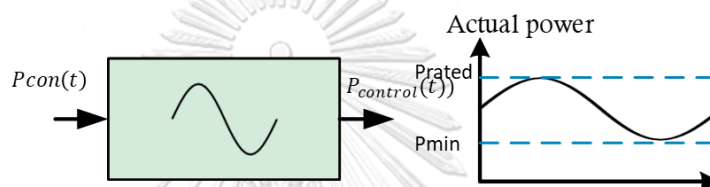
$$0 \leq P_{pv}^* \leq \hat{P}_{pv}(t) \quad , \forall t \quad (4.13)$$

3.แบบจำลองโหลดที่ควบคุมได้

โหลดที่ควบคุมได้จะถูกกำหนดให้เป็น 2 ลักษณะคือ ออกเป็น 2 ประเภทคือ โหลดแบบต่อเนื่อง และ โหลดแบบเปิด-ปิด ดังที่ได้กล่าวไป ความแตกต่างของแบบจำลองคือตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดปัญหา ซึ่งจะมีทั้ง ตัวแปรต่อเนื่อง และ ตัวแปรไม่ต่อเนื่อง (Discrete variable)

3.1 โหลดแบบต่อเนื่อง

โหลดแบบต่อเนื่อง สามารถปรับเปลี่ยนการคุณลักษณะกำลังไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 34 ซึ่งหากเป็น โหลดจะเป็นอุปกรณ์ที่ราคาแพง หรือ มีความซับซ้อนในการหาอุปกรณ์สั่งคำสั่งในการควบคุม (controller) ยกตัวอย่างเช่น เครื่องปรับอากาศ ชนิด Inverter



รูปที่ 34 โหลดแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร และ พารามิเตอร์ ในการสร้างแบบจำลอง

$P_{con}(t)$ คือ กำลังควบคุมกำลังไฟฟ้าสำหรับโหลดแบบต่อเนื่อง (ตัวแปรต่อเนื่อง)

$Rated\ power$ คือ พิกัดไฟฟ้าของโหลดแบบต่อเนื่อง (พารามิเตอร์)

P_{min} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าต่ำสุดของโหลดแบบต่อเนื่อง (พารามิเตอร์)

เงื่อนไขในการควบคุม

1.พลังงานไฟฟ้าที่ใช้

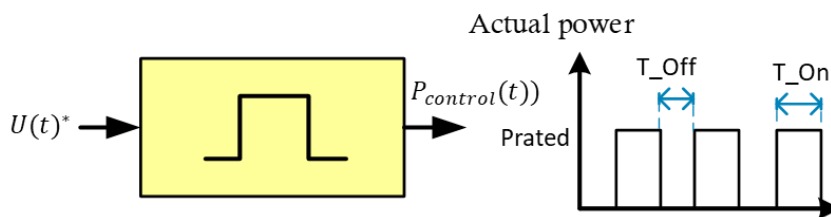
$$\sum_t^T P_{con}(t) = \text{Energy consumption (Daily)} \quad (4.14)$$

2.พิกัดด้านกำลังไฟฟ้า

$$P_{min} \leq P_{con}(t) \leq \text{Rated power} \quad \forall t \quad (4.15)$$

3.2 โหลดแบบเปิด-ปิด

คุณลักษณะกำลังไฟฟ้าของโหลดประเภทนี้คือ มีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ กล่าวคือมีสถานะใช้งาน หรือ หยุดใช้งานเท่านั้นซึ่งไม่จำเป็นต้องมีเวลาให้หยุดรอ (Minimum down/up) time ระหว่างทำงานหรือหยุด ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดอุปกรณ์นั้น ดังแสดงในรูปที่ 35 ตัวอย่างโหลดที่พบได้คือ บัมพ์น้ำ



รูปที่ 35 โหลดแบบเปิด-ปิด

ตัวแปร และ พารามิเตอร์ ในการสร้างแบบจำลอง

$U(t)^*$	คือ คำสั่งเปิด-ปิด การใช้งานของโหลด (ตัวแปรไม่ต่อเนื่อง)
$Prated$	คือ พิกัดไฟฟ้าของโหลดแบบเปิด-ปิด (พารามิเตอร์)
$V(t), W(t)$	คือ ตัวแปรกำหนดสถานะ (ตัวแปรไม่ต่อเนื่อง)
T_{on}	คือ ระยะเวลาค้างสถานะเปิดใช้งาน (พารามิเตอร์)
T_{off}	คือ ระยะเวลาค้างสถานะปิดใช้งาน (พารามิเตอร์)

เงื่อนไขในการควบคุม

1. พลังงานไฟฟ้าที่ใช้

$$Prated \sum_t^T U(t)^*(t) = \text{Energy consumption (Daily)} \quad (4.16)$$

2. เงื่อนไขการสั่งเปิด-ปิด (ประยุกต์มาจาก [25])

$$U(t) - U(t - 1) = V(t) - W(t) \quad \forall t \quad (4.17)$$

$$V(t) + W(t) \leq 1 \quad \forall t \quad (4.18)$$

$$\sum_{i=t-T_{on}+1}^t V(i) \leq U(t) \quad \forall t \in [T_{on}, T] \quad (4.19)$$

$$\sum_{i=t-T_{off}+1}^t W(i) \leq 1 - U(t) \quad \forall t \in [T_{off}, T] \quad (4.20)$$

$$U(t), V(t), W(t) \in \{0,1\}$$

4.4 ดัชนีเพื่อประเมินสมรรถนะระบบจัดการพลังงานของโพรซูเมอร์

การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดจะชี้วัดประโยชน์ที่โพรซูเมอร์ได้รับ 3 ด้าน คือ ค่าไฟฟ้าสุทธิ (Net Billing cost) การผลิตพลังงานจากระบบแสงอาทิตย์ (PV generation) และ พลังงานสุทธิ (Net energy) โดยจะประเมินรายเดือน (30 วัน)

4.4.1 ค่าไฟฟ้าสุทธิ

การประเมินค่าไฟฟ้าจะพิจารณาในรูปแบบ ค่าไฟฟ้าสุทธิ (Net billing) ซึ่งจะประกอบด้วย ค่าไฟฟ้าที่ซื้อจากโครงข่าย และ รายได้จากการฝากพลังงานให้กับ VESS ใช้สมการ (4.9)

4.4.2 อัตราส่วนการจำกัดปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

สำหรับการประเมินการผลิตพลังงานจะแสดงในรูปของปริมาณที่ถูกลดกำลังการผลิต (Curtailment) ดังสมการ

$$1 - \frac{\sum_t P_{pv}(t)\Delta t - P_{pv}^*(t)\Delta t}{\sum_t P_{pv}(t)\Delta t} \times 100 \quad (4.10)$$

4.4.3 ปริมาณพลังงานไฟฟ้าสุทธิ

จากแนวคิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ นำมาปรับใช้เพื่อแสดงศักยภาพของ โพรซูเมอร์ โดยพิจารณาจากพลังงานของ VESS ณ เวลาสิ้นสุดของเดือน หรือ จากกำลังไฟฟ้าที่ไหล ระหว่างโพรซูเมอร์ และ โครงข่าย ณ เวลาสิ้นสุดของเดือน ดังสมการ

$$E_{tie}(T) = E_{tie}(T-1) + P_{tie}(T)\Delta t \quad (4.11)$$

บทที่ 5

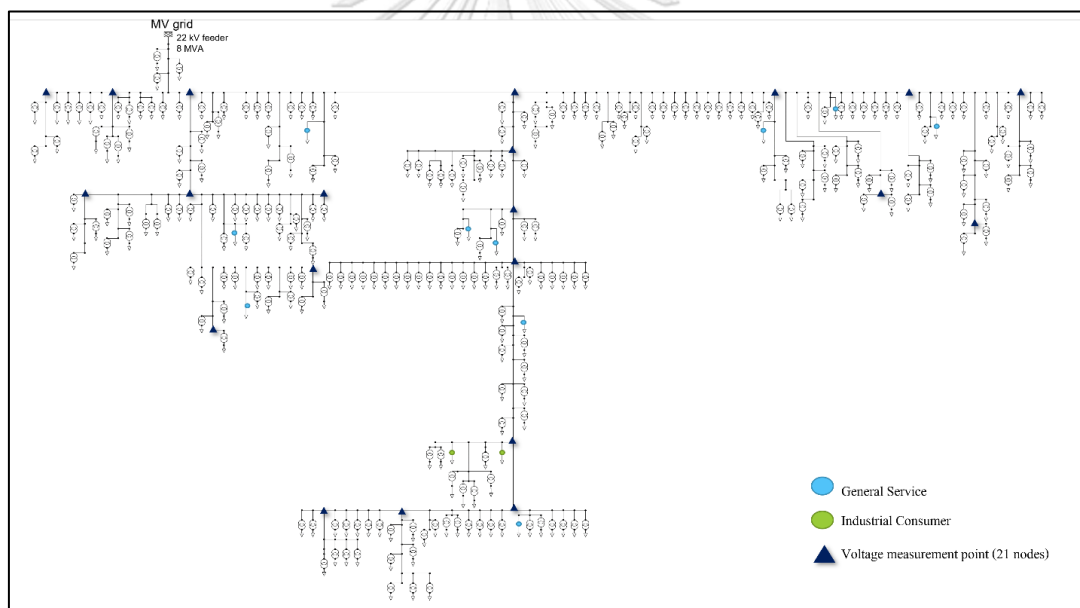
การศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนระบบจำหน่าย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม และ พื้นที่ธุรกิจ โดยอาศัยการจำลองผ่านโปรแกรม PowerFactory 2018 (DigSilent)

5.1 การศึกษาผลกระทบบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

5.1.1 ขั้นตอนการศึกษา

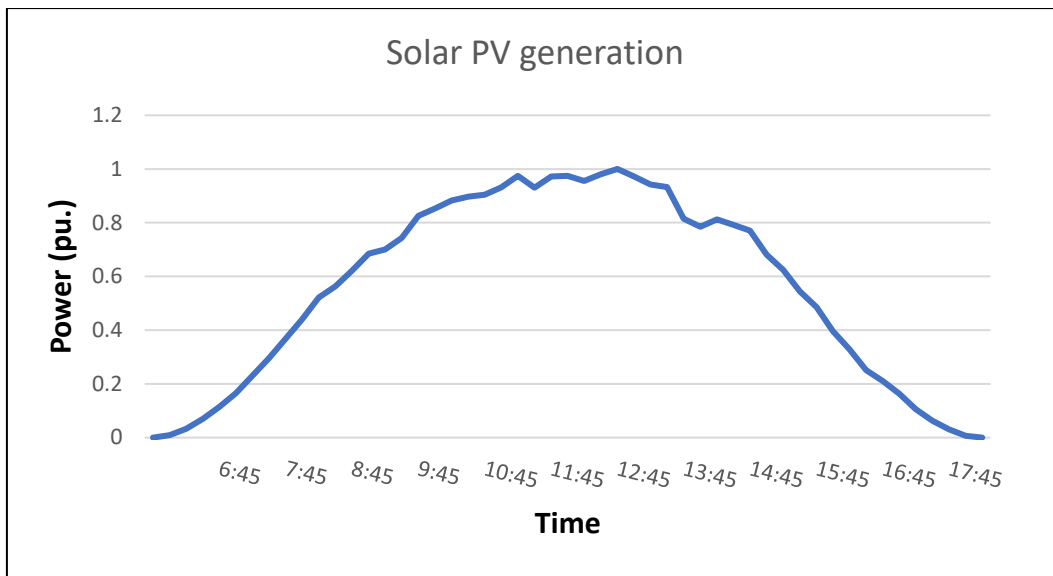
กำหนดให้อินเวอร์เตอร์จ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น จุดวัดแรงดันถูกกำหนดขึ้นทั้งหมด 21 จุด กระจายครอบคลุมทั้งสายป้อน โดยจะวัดขนาดแรงดันระหว่างสาย กำหนดจุดวัดแรงดันแสดงดังรูปที่ 36



รูปที่ 36 จุดวัดแรงดันบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

5.1.2 การกำหนดขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ขนาดกำลังผลิตติดตั้งพิจารณาจาก ประเภทผู้ใช้ไฟและความต้องการไฟฟ้าสูงสุด กล่าวคือ หากเป็นประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และ ผู้ใช้ทั่วไป จะมีขนาดติดตั้งคือ 1000 300 และ 100 กิโลวัตต์ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละราย สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะติดตั้งที่ร้อยละ 15 ของขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงจำหน่าย มีขนาดติดตั้งคือ 37.5 22.5 15 และ 7.5 กิโลวัตต์ โดยระบบผลิตไฟฟ้าจะใช้ลักษณะการผลิตรายวันเหมือนกัน ดังรูปที่ 37



รูปที่ 37 ลักษณะการผลิตไฟฟ้า

5.1.3 กรณีศึกษาและสมมุติฐาน

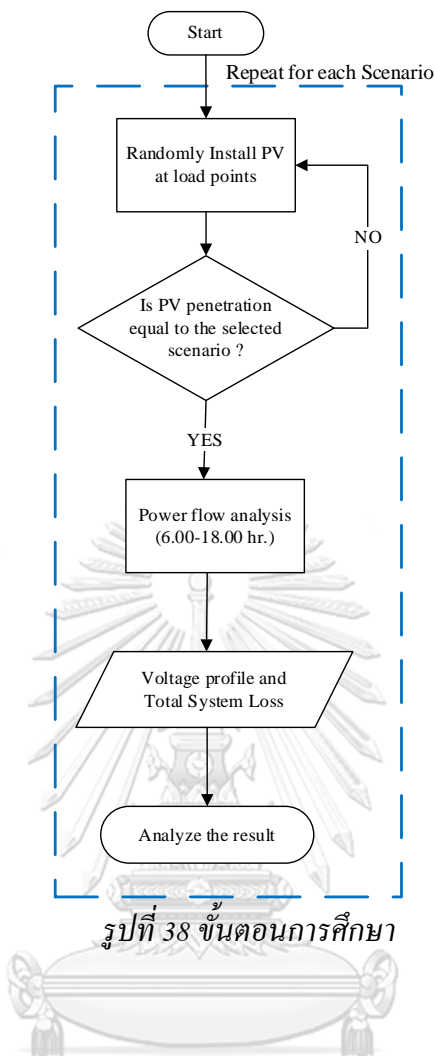
จำนวนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการจำลองพิจารณาจากร้อยละของปริมาณพลังงานที่ระบบผลิตออกมาได้ต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ที่ ดังสมการที่ (5.1) โดยจะจำลอง 4 กรณี แสดงดังตารางที่ 24 และสามารถอธิบายขั้นตอนการศึกษาได้ดังผังงาน รูปที่ 38

$$PV_{penetration} = \frac{PV_{energy}}{Total\ Load_{energy}} \quad (5.1)$$

ตารางที่ 24 กรณีศึกษาบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่อุตสาหกรรม

กรณีศึกษา	PV penetration	จำนวนจุดติดตั้ง						
		1000 kW	300 kW	100 kW	37.5 kW	22.5 kW	15 kW	7.5 kW
Base*	0%	-	-	-	-	-	-	-
A	20%	1	1	5	-	1	-	2
B	50%	1	2	8	40	1	30	30
C	80%	2	2	8	77	1	37	58

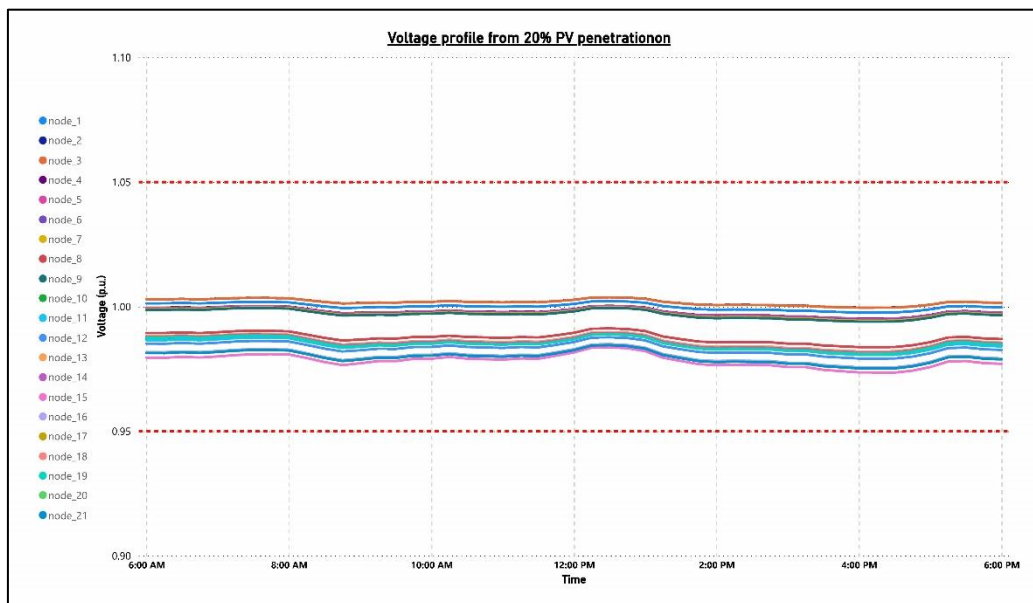
(กรณี Base จะแสดงผลเฉพาะการศึกษาด้านกำลังสูญเสียเท่านั้น)



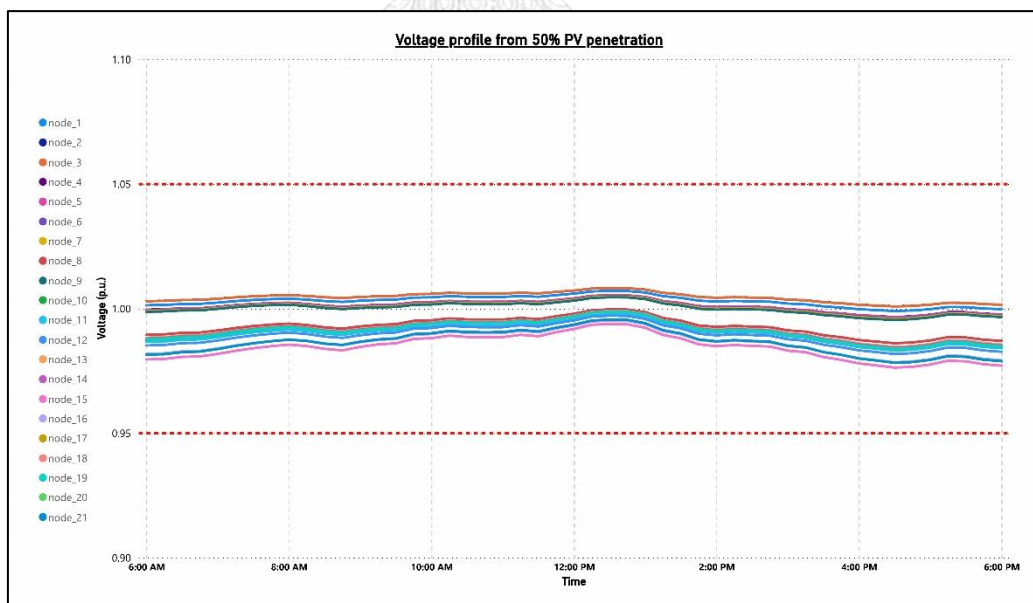
5.1.4 ผลการศึกษา

จากรูปที่ 39 แรงดันที่จุดวัดอยู่ในช่วงมาตรฐาน [6] ทุกจุด หากเพิ่มการติดตั้งให้มีปริมาณพลังงานที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 50 จะเห็นว่าส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อขนาดแรงดันเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 40

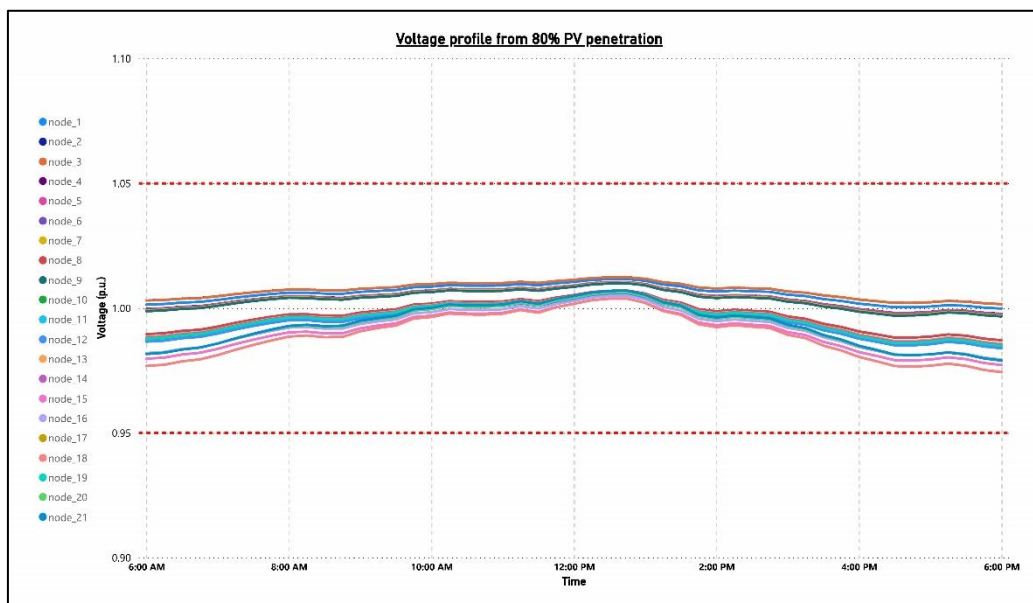
สำหรับกรณีศึกษา C ได้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และ ยังส่งผลให้แรงดันบางจุดวัดเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในช่วงที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าได้มาก แสดงดังรูปที่ 41



รูปที่ 39 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา A

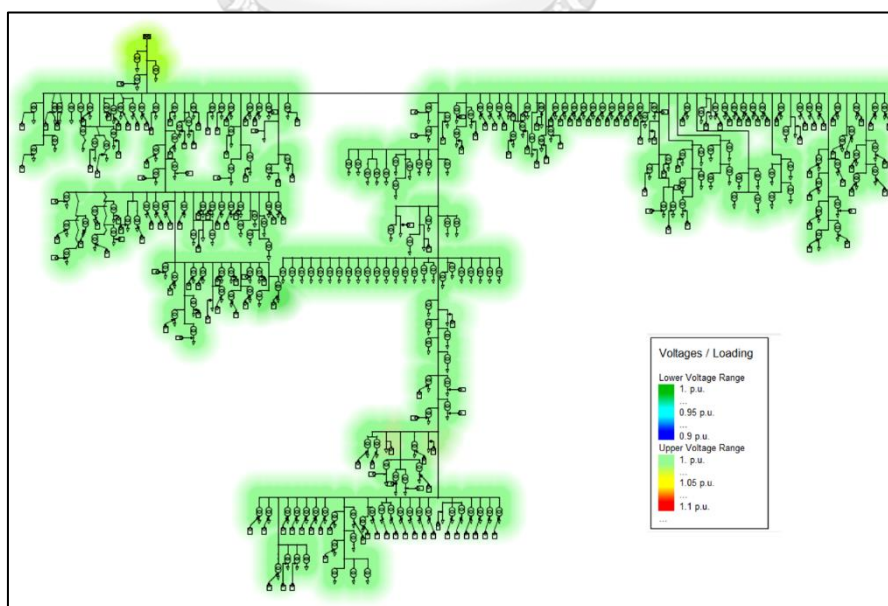


รูปที่ 40 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา B



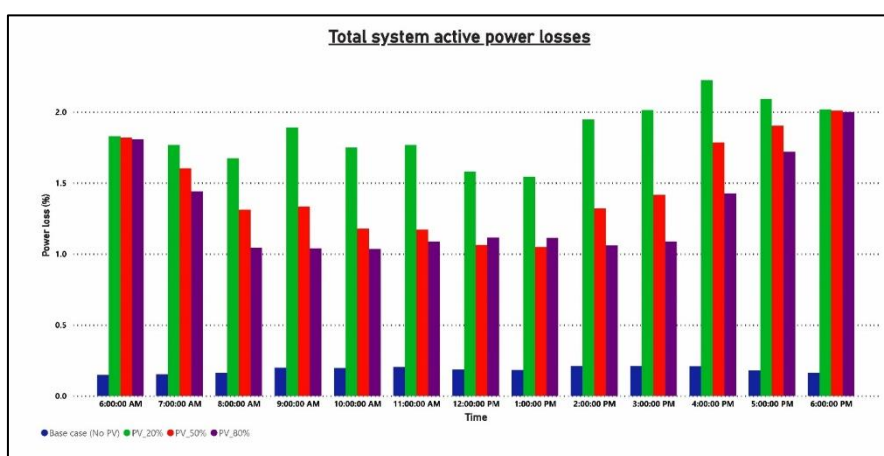
รูปที่ 41 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา C

จากรูปที่ 42 ซึ่งให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ครอบคลุมการใช้พลังงานถึงร้อยละ 80 และ ในช่วงเวลาที่ผลิตพลังงานสูงสุด ไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดันทุกจุดเชื่อมต่อมีค่าเกินกว่ามาตรฐาน.



รูปที่ 42 แรงดันทุกจุดบนระบบทดสอบเมื่อมีกำลังผลิตสูงสุด

ผลการจำลองเพื่อวิเคราะห์กำลังสูญเสีย แสดงดังรูปที่ 43 พบว่ากำลังสูญเสียมากที่สุดจะเกิดขึ้นในกรณีที่พลังงานที่ผลิตได้คิดเป็นร้อยละ 20 ของพลังงานที่ใช้ หากพิจารณาค่าแรงดันของทั้งสามกรณีจะพบว่า ความต่างของค่าแรงดันมีผลต่อกำลังสูญเสียในระบบ กล่าวคือ หากค่าของแรงดันมีค่าใกล้เคียงกันจะส่งผลให้กำลังสูญเสียในระบบมีค่าต่ำ แม้ว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังสูญเสียจากการติดตั้งจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการติดตั้ง (กรณีฐาน) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบ กำลังสูญเสียมียังมีค่ามากที่สุดคิดเป็นประมาณร้อยละ 3



รูปที่ 43 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสีย

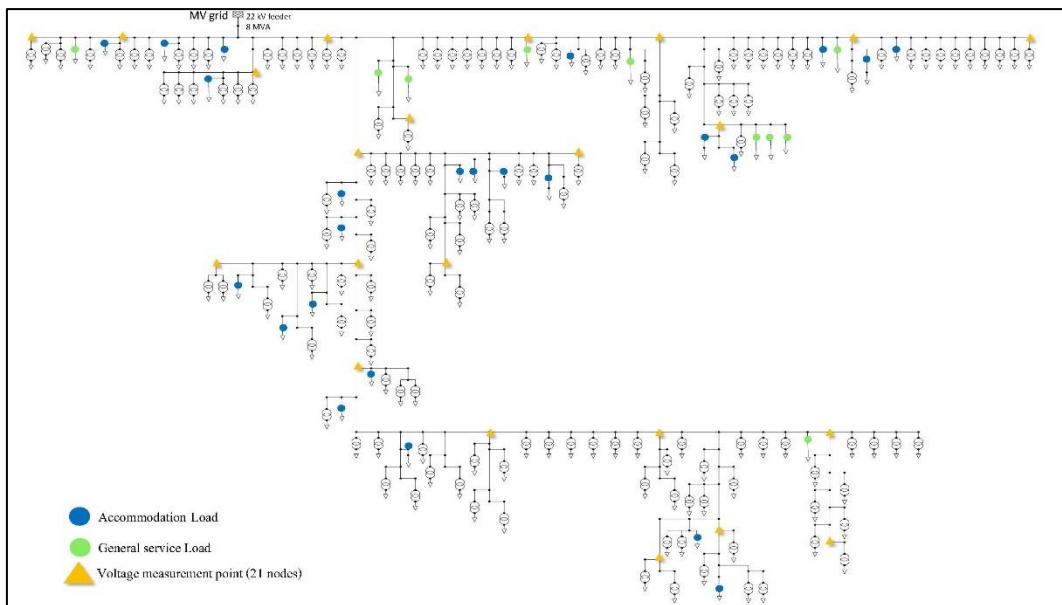
5.2 การศึกษาผลกระทบบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

5.2.1 ขั้นตอนการศึกษา

กำหนดให้อินเวอร์เตอร์จ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น จุดวัดแรงดันถูกกำหนดขึ้นทั้งหมด 21 จุด กระจายครอบคลุมทั้งสายป้อนโดยจะวัดขนาดแรงดันระหว่างสาย กำหนดจุดวัดแรงดันแสดงดังรูปที่ 44

5.2.2 การกำหนดขนาดกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

ขนาดกำลังผลิตติดตั้งพิจารณาจาก ประเภทผู้ใช้ไฟและความต้องการไฟฟ้าสูงสุด กล่าวคือ หากเป็นประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า ธุรกิจโรงแรม และ ผู้ใช้ทั่วไป จะมีขนาดติดตั้งคือ 300 และ 100 กิโลวัตต์ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละราย สำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำจะติดตั้งที่ร้อยละ 15 ของขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงจำหน่าย มีขนาดติดตั้งคือ 37.5 22.5 และ 15 กิโลวัตต์ โดยระบบผลิตไฟฟ้าจะใช้ลักษณะการผลิตรายวันเหมือนกัน ดังรูปที่ 37



รูปที่ 44 จุดวัดแรงดันบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

5.2.3 กรณีศึกษาและสมมุติฐาน

จำนวนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการจำลองพิจารณาจากร้อยละของปริมาณพลังงานที่ระบบผลิตออกมาได้ต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ที่ ดังสมการที่ 4.1 โดยจะจำลอง 3 กรณี แสดงดังตารางที่ 25 และสามารถอธิบายขั้นตอนการศึกษาได้ดังผังงาน รูปที่ 38

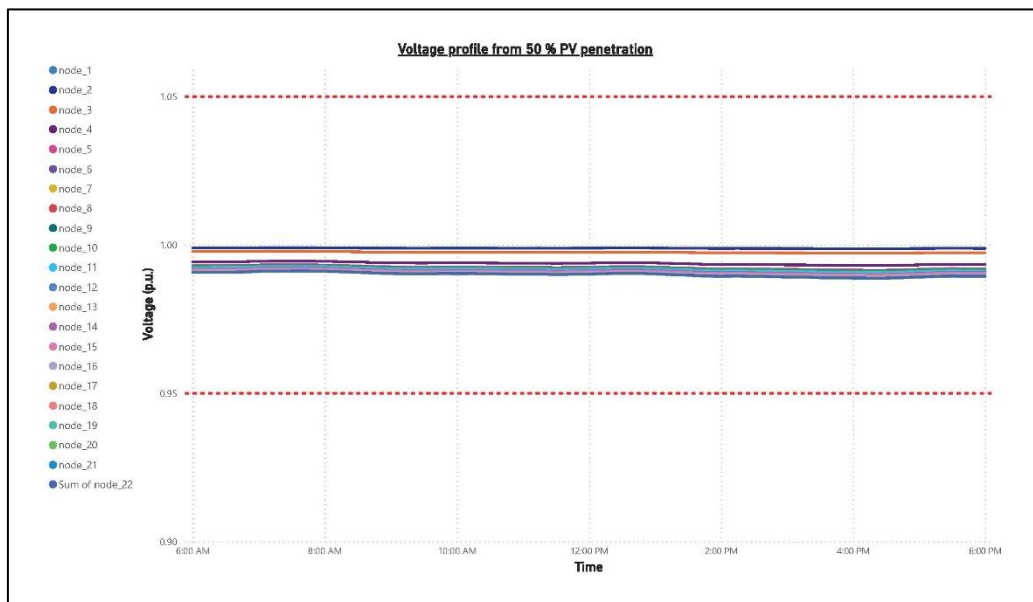
ตารางที่ 25 กรณีศึกษาบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจ

กรณีศึกษา	PV penetration	จำนวนจุดติดตั้ง				
		300 kW	100 kW	37.5 kW	22.5 kW	15 kW
Base*	0%	-	-	-	-	-
A	50%	6	28	6	10	10
B	76%	6	28	35	54	57

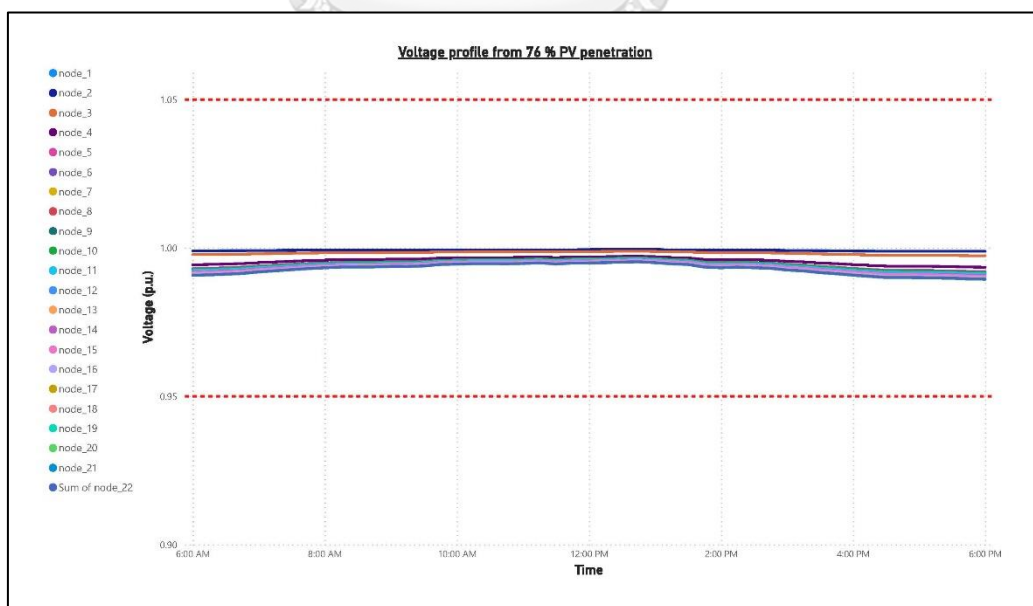
(กรณี Base จะแสดงผลเฉพาะการศึกษาด้านกำลังสูญเสียเท่านั้น)

5.2.4 ผลการศึกษา

จากการจำลองตามกรณีศึกษาต่างๆ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันอย่างมีนัยสำคัญ พิจารณารูปที่ 45 และ 46 จะสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันในช่วงเวลาที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าจำนวนมาก แม้ว่าค่าของแรงดันในกรณี B (ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ทุกจุดโหลด) จะยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน แต่ผลการจำลองได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเนื่องมาจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อน

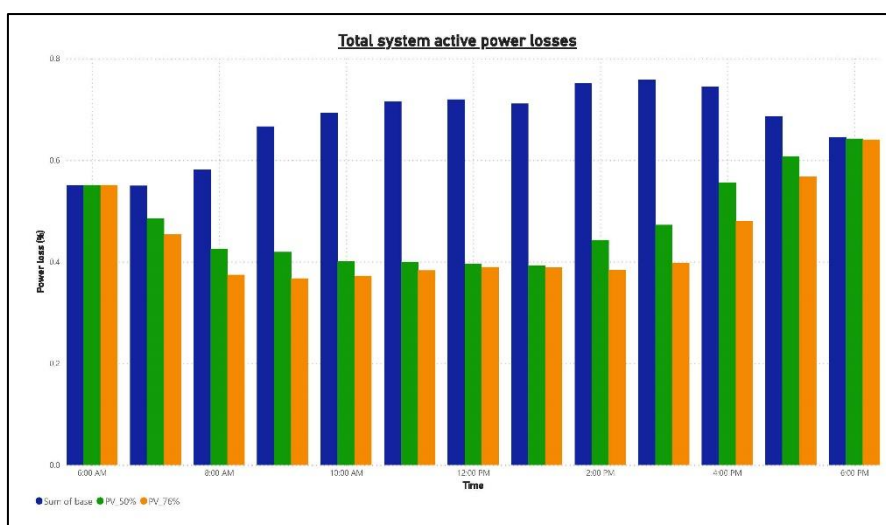


รูปที่ 45 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา A



รูปที่ 46 แรงดันที่จุดวัดกรณีศึกษา B

ผลการจำลองเพื่อวิเคราะห์กำลังสูญเสีย แสดงดังรูปที่ 47 พบว่าการติดตั้งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์ทั้ง 2 กรณี ทำให้กำลังสูญเสียลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน และมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าต่ำเมื่ออยู่ในช่วงที่มีการผลิตกำลังไฟฟ้ามาก การจำลองบนระบบทดสอบสำหรับพื้นที่ธุรกิจแสดงให้เห็นว่า กำลังสูญเสียของระบบลดลงเมื่อมีการติดตั้งการติดตั้งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าแสงอาทิตย์แบบกระจายตัว



รูปที่ 47 การเปรียบเทียบกำลังสูญเสีย

5.3 สรุป

การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนระบบจำหน่ายส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงดัน โดยการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อน กล่าวคือ หากมีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนเพิ่มขึ้น แรงดันมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น สำหรับผลกระทบด้านกำลังสูญเสีย หากมีการกระจายตัวของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แนวโน้มกำลังสูญเสียจะลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังผลิตติดตั้ง เพราะ ปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนทำให้ความต่างของแรงดันลดลง เป็นผลทำให้ขนาดกระแสไฟฟ้าลดลง

บทที่ 6

การศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด

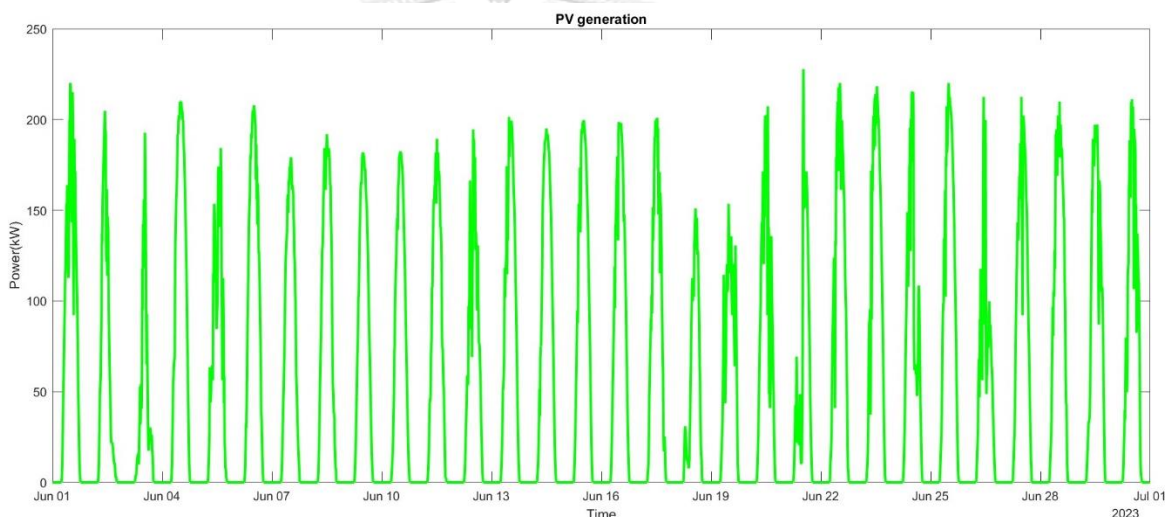
เนื้อหาภายในบทนี้จะนำเสนอผลลัพธ์จากการหาค่าเหมาะที่สุดเพื่อการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อน ซึ่งประกอบไปด้วยการควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์ และการควบคุมโหลด นอกจากนี้ยังนำเสนอผลการศึกษาอัตราค่าไฟฟ้าต่อแนวทางการจัดการพลังงานสำหรับโพซูเมอร์

6.1 ผลการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์

6.1.1 ขั้นตอนการศึกษา

ศักราฟกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

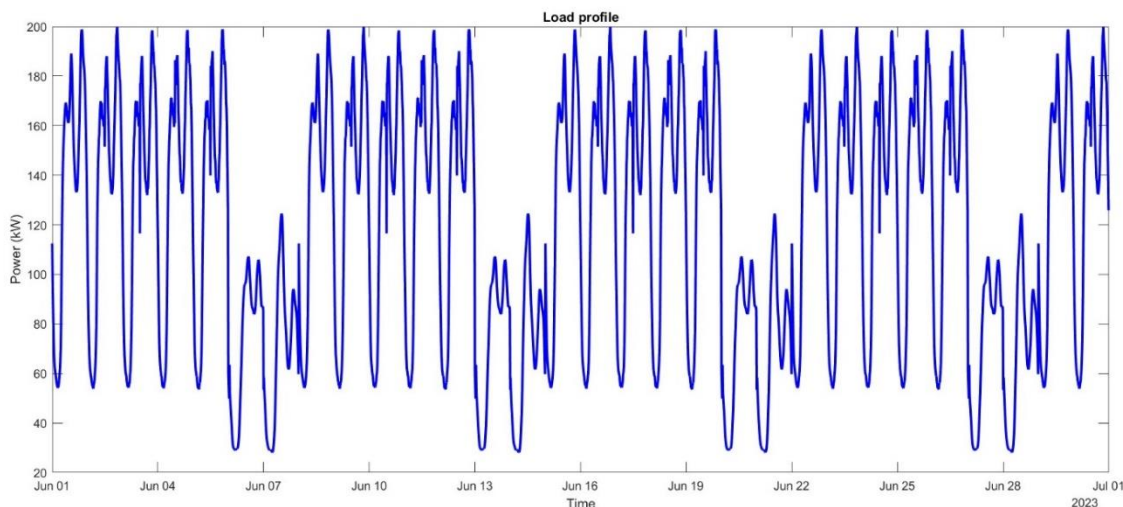
กำลังผลิตติดตั้งของโพซูเมอร์มีค่า 240 กิโลวัตต์โดยนำข้อมูลการวัดจริง ราย 15 นาที ระยะเวลา 30 วัน มาคัดแปลง โดยมีกำลังผลิตสูงสุดประมาณ 230 กิโลวัตต์ แสดงดังรูป 48



รูปที่ 48 ศักราฟการผลิตไฟฟ้า

ลักษณะการใช้ไฟฟ้า

พฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของโพซูเมอร์คัดแปลงมากจากลักษณะการใช้ไฟฟ้าในอาคารสำนักงาน ราย 15 นาที ระยะเวลา 30 วัน มีพฤติกรรมที่เหมือนกันในวันจันทร์ ถึง สุกร์ และ มีการลดการใช้ไฟฟ้าในวันเสาร์ และ อาทิตย์ โดยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 200 กิโลวัตต์ และ ต่ำสุดที่ประมาณ 29 กิโลวัตต์ แสดงดังรูปที่ 49



รูปที่ 49 ลักษณะการใช้ไฟฟ้าภายในอาคารสำนักงาน

กรณีฐาน

กรณีฐานจะใช้ข้อกำหนดการเชื่อมโครงข่ายไฟฟ้าในประเทศไทยกล่าวคือ ห้ามเกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนจากโพรซูเมอร์ ซึ่งวัตถุประสงค์ของการเปรียบเทียบเพื่อชี้ให้ประโยชน์ของแนวคิดการใช้โครงข่ายไฟฟ้าให้เป็นระบบกักเก็บพลังงานเสมือน สำหรับการศึกษารจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อน ทำการจำลอง 30 วัน โดยเทียบกับกรณีฐาน ซึ่งจะกำหนดความจุ VESS ดังสมการ (6.1) และ กำหนดพารามิเตอร์ตามตารางที่ 26

$$-PV \text{ Installed capacity} * \text{Energy yield}(Y_a) \quad (6.1)$$

โดยที่

PV Installed capacity คือ กำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์

Energy yield(Y_a) คือ ความสามารถในการผลิตพลังงาน (ชั่วโมง)

ตารางที่ 26 กำหนดค่าสำหรับการศึกษา

พารามิเตอร์	
C	3.1471 (บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง)
ΔC	0.1
(Y_a)	5 (ชั่วโมง)
E_{tie}^{min}	-1.2 (เมกะวัตต์ชั่วโมง)
P_{export}^{max}	200 (กิโลวัตต์)
P_{import}^{max}	ไม่จำกัด

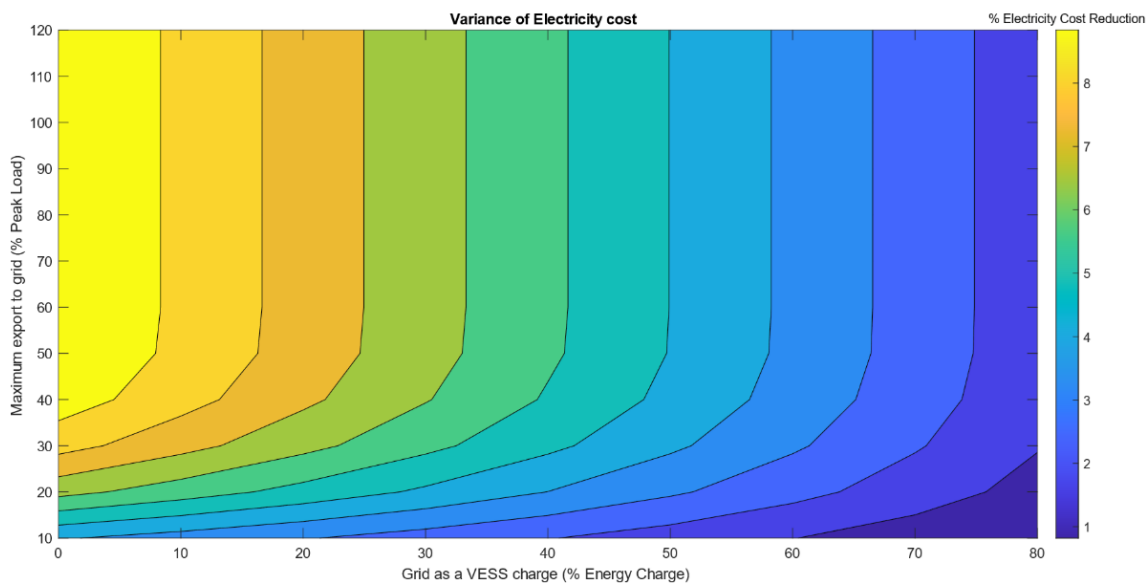
จากผลการจำลองแสดงในตารางที่ 27 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าค่าไฟฟ้าของโพรซูเมอร์ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน แม้ว่าจะใช้พลังงานจากโรงจ่ายเท่ากัน แต่กำลังไฟฟ้าไหลย้อนสามารถสร้างรายได้ ซึ่งส่งผลให้ค่าไฟฟ้าสุทธิลดลงประมาณร้อยละ 9 และ พิจารณาว่าการผลิตไฟฟ้าจะพบว่าแนวคิดการใช้ VESS เพื่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนทำให้ไม่ต้องลดกำลังการผลิต แต่หากเป็นกรณีฐาน จะต้องทำการลดกำลังการผลิตลงร้อยละ 13 นอกจากนี้ พลังงานสุทธิตามมีค่าน้อยกว่ากรณีฐาน เนื่องจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อนเปรียบเสมือนการชดเชยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้พลังงานจากโรงจ่าย

ตารางที่ 27 ผลการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด

	กรณีฐาน	การควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด
นำเข้าพลังงาน (เมกะวัตต์ชั่วโมง)	53	53
ส่งออกพลังงาน (เมกะวัตต์ชั่วโมง)	0	5
ค่าซื้อไฟฟ้า (บาท)	166,586.47	166,586.47
รายรับ (บาท)	0	14,457.43
ค่าไฟฟ้าสุทธิ (บาท)	166,586.47	152,129.04 (-9%)
ปริมาณการลดพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (ร้อยละ)	13	0
พลังงานสุทธิ (เมกะวัตต์ชั่วโมง)	53	48

6.1.2 การศึกษาเชิงความไวการเปลี่ยนแปลงของส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้าและการจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อน

จากผลการศึกษาในหัวข้อ 6.1 พบว่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าไฟฟ้าสุทธิจะถูกกำหนดโดยผู้ดูแลโรงจ่าย คือ อัตราค่าบริการ โรงจ่ายซึ่งเป็นพารามิเตอร์ทางเศรษฐศาสตร์ และ ค่าจำกัดของปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนซึ่งเป็นพารามิเตอร์ทางเทคนิค การศึกษาในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าว กับ ค่าไฟฟ้าสุทธิ



รูปที่ 50 การเปลี่ยนแปลงของค่าไฟฟ้าสุทธิ

จากรูปที่ 50 แสดงการลดค่าไฟฟ้าสุทธิต่อการเปลี่ยนแปลงของส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้า และ ค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อน (เทียบกับค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด) ผลการศึกษาได้ชี้ให้เห็นว่า หากผู้ดูแลโครงข่ายกำหนดให้ค่าจำกัดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนร้อยละ 50 และ อัตราค่าบริการร้อยละ 10 จะทำให้เกิดการลดค่าไฟฟ้าสุทธิสูงสุด แต่หากปรับอัตราค่าบริการเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้การลดลงของค่าไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในทางเดียวกัน แม้ว่าจะกำหนดให้ค่าบริการเพียงร้อยละ 10 แต่หากจำกัดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนลดลง ทำให้การลดลงของค่าไฟฟ้าสุทธิเปลี่ยนแปลงน้อย เช่นกัน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 ผลการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนผ่านพีวีอินเวอร์เตอร์และโหลดที่ควบคุมได้

หัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของโพรซูเมอร์จากการมีโหลดที่ควบคุมได้ มาประยุกต์ใช้กับการจัดการพลังงาน โดยจะใช้ ศักยภาพกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตพลังงาน แสงอาทิตย์ และ ลักษณะการใช้ไฟฟ้า จากหัวข้อ 6.1.1

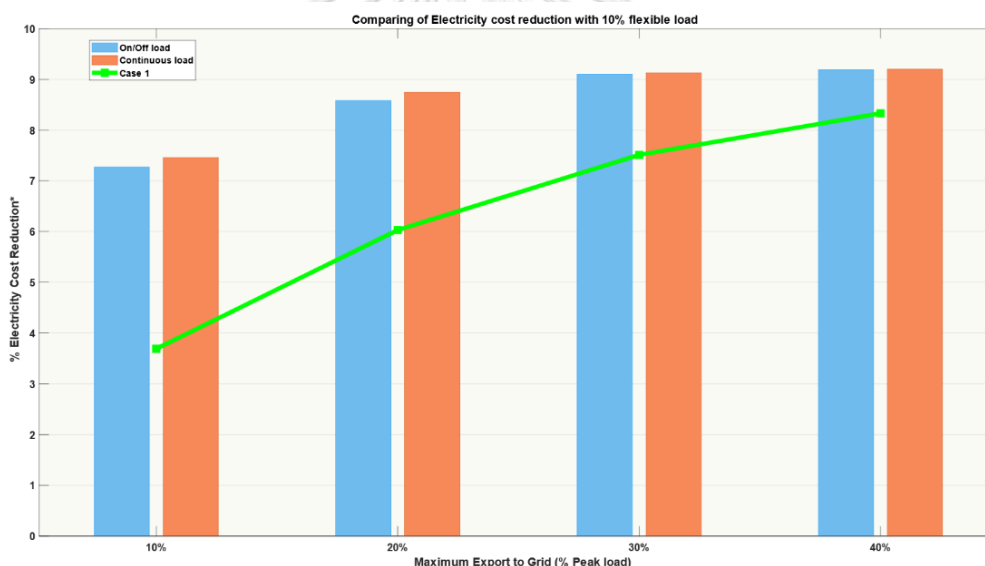
6.2.1 ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษานี้จะกำหนดให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของโพรซูเมอร์เท่ากับกรณีฐานกล่าวคือ แม้ว่าจะมีการควบคุมโหลด แต่พลังงานการใช้ไฟฟ้าโดยรวมยังคงเท่าเดิม โดยจะกำหนดให้พลังงานของโหลดที่ควบคุมได้มีค่าร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานทั้งหมด และ การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับโหลดที่ควบคุมได้แสดงในตารางที่ 28

ตารางที่ 28 พารามิเตอร์ของโหลดที่ควบคุมได้

โหลดแบบต่อเนื่อง	<i>Rated power</i>	50 (กิโลวัตต์)
	<i>P_{min}</i>	0 (กิโลวัตต์)
โหลดแบบเปิด-ปิด	<i>P_{rated}</i>	50 (กิโลวัตต์)
	<i>T_{on}</i>	1 (ชั่วโมง)
	<i>T_{off}</i>	1 (ชั่วโมง)

การศึกษาในหัวข้อ 6.1.2 แสดงให้เห็นว่าค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนมีผลต่อค่าไฟฟ้าสุทธิ ดังนั้นการจำลองในครั้งนี้จึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยที่กำหนดส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้าเป็นร้อยละ 10 (ΔC เท่ากับ 0.1)

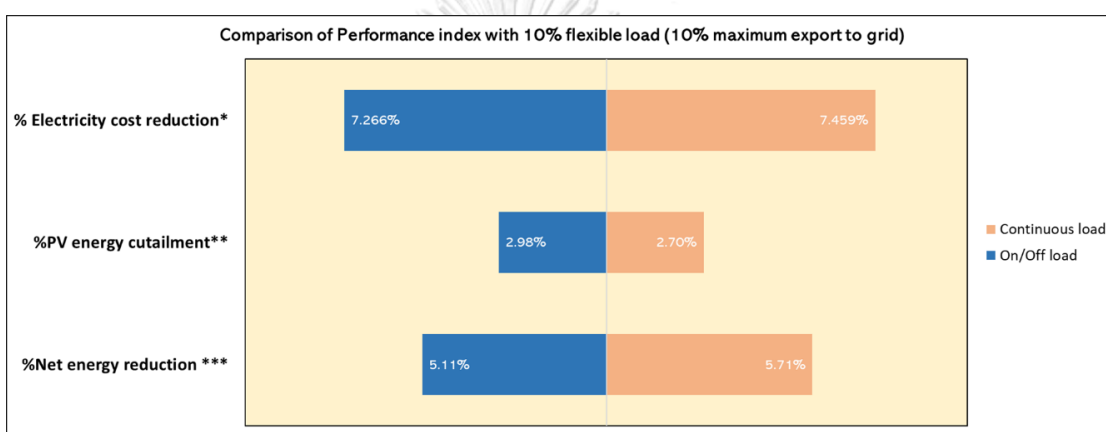


รูปที่ 51 การเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าสุทธิ

(*ใช้กรณีห้ามเกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนเป็นฐาน และ ** Case 1 คือ กรณีควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว)

ผลการจำลองการลดค่าไฟฟ้าสุทธิแสดงในรูปที่ 51 สังเกตได้ว่าการลดค่าไฟฟ้าสุทธิของกรณีโหลดที่ควบคุมได้ ทั้ง 2 ชนิด มีค่าต่างกันเล็กน้อยในทุกค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อน การเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าว ส่งผลให้การลดค่าไฟฟ้าสุทธิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย หากพิจารณากรณีค่าจำกัดอยู่ที่ร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่าการมีโหลดที่ควบคุมได้จะเพิ่มการลดค่าไฟฟ้าสุทธิจากเดิมอยู่ที่ประมาณ ร้อยละ 3.5 เป็น 7 (เทียบกับผลการศึกษาในหัวข้อ 6.1.2) ในทางกลับกันการปรับค่าจำกัดเพิ่มขึ้น การมีโหลดที่ควบคุมได้จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของการลดค่าไฟฟ้าสุทธิไม่มาก ในกรณีค่าจำกัดอยู่ที่ร้อยละ 30 และ 40 การลดลงของค่าไฟฟ้าสุทธิมีค่าประมาณเท่ากันคือร้อยละ 9

จากผลการศึกษาในรูปที่ 51 บ่งชี้ว่าการมีโหลดควบคุมได้จะเพิ่มสมรรถนะในด้านการลดค่าไฟฟ้าสุทธิอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อผู้ดูแลโครงข่ายกำหนดค่าจำกัดอยู่ที่ร้อยละ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โหลดแต่ละชนิดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงไม่ต่างกัน และ เพื่อเป็นการศึกษาผลของโหลดแต่ละชนิดที่มีต่อสมรรถนะอื่นๆของโพรซูเมอร์ จึงเลือกกรณีดังกล่าวมาวิเคราะห์ให้เห็นความแตกต่างของโหลดทั้ง 2 ชนิด ผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 52 ผลการศึกษาพบว่านอกจากการลดค่าไฟฟ้าสุทธิแล้ว ปริมาณการลดพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ และ พลังสุทธิ มีค่าต่างกันไม่มากนัก ในกรณีที่มีการจำกัดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนให้มีค่าร้อยละ 10 ของความต้องการสูงสุด การมีโหลดที่ควบคุมได้ ทั้ง 2 ชนิด ส่งผลต่อโพรซูเมอร์ไม่ต่างกันมากอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 52 เปรียบเทียบผลของปริมาณที่ควบคุมได้ร้อยละ 10

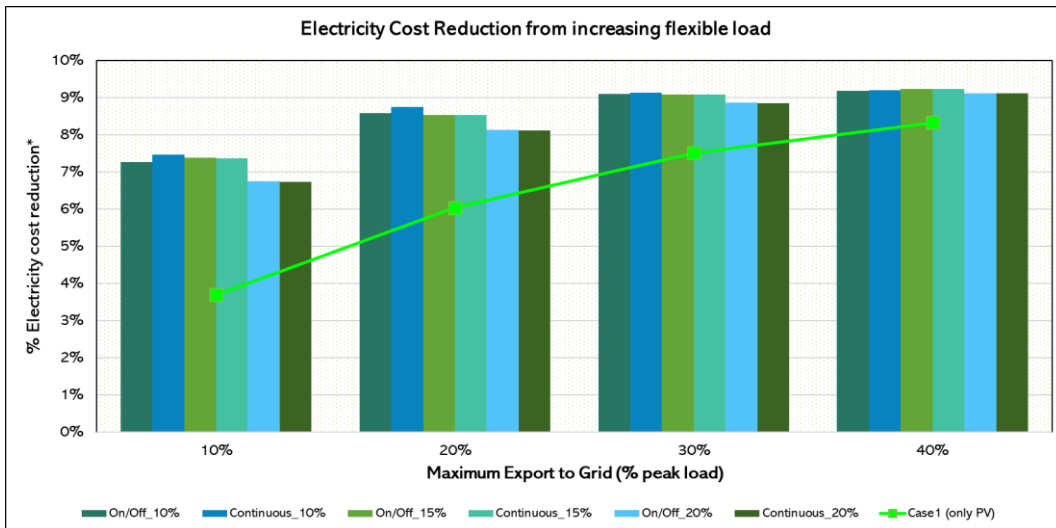
(*ใช้กรณีห้ามเกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนเป็นฐาน ** และ *** ใช้กรณีควบคุมที่อินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียวเป็นฐาน)

6.2.2 การศึกษาเชิงความไวการเพิ่มขึ้นของปริมาณโหลดที่ควบคุมได้

จากผลการศึกษาในหัวข้อ 6.2.1 ได้กล่าวถึงการนำโหลดที่ควบคุมได้มาประยุกต์ใช้กับระบบการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อน โดยแสดงให้เห็นว่าโหลดที่ควบคุมได้จะส่งผลต่อการลดค่าไฟฟ้าสุทธิเมื่อผู้ดูแลโครงข่ายจำกัดให้มีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนเข้าสู่ระบบเพียงเล็กน้อย สำหรับในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของปริมาณพลังงานของโหลดที่ควบคุมได้ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโพรซูเมอร์ ซึ่งกำหนดส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 10 (ΔC เท่ากับ 0.1) ขั้นตอนการศึกษาจะทำเหมือนกับหัวข้อ 6.2.1 และ ปริมาณพลังงานโหลดที่ควบคุมได้มีค่าร้อยละ 10 15 และ 20

การเพิ่มขึ้นของปริมาณพลังงานของโหลดที่ควบคุมได้ ส่งผลต่อค่าไฟฟ้าสุทธิเพียงเล็กน้อยในทุกค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนดังแสดงในรูป 53 นอกจากนี้แล้วผลการจำลองยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณพลังงานของโหลดที่ควบคุมได้ร้อยละ 20 ลดค่าไฟฟ้าสุทธิน้อยกว่าปริมาณร้อยละ 10 และ 15 ในทุกกรณี และ เช่นเดียวกับผลการศึกษาในหัวข้อ 6.2.1 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ

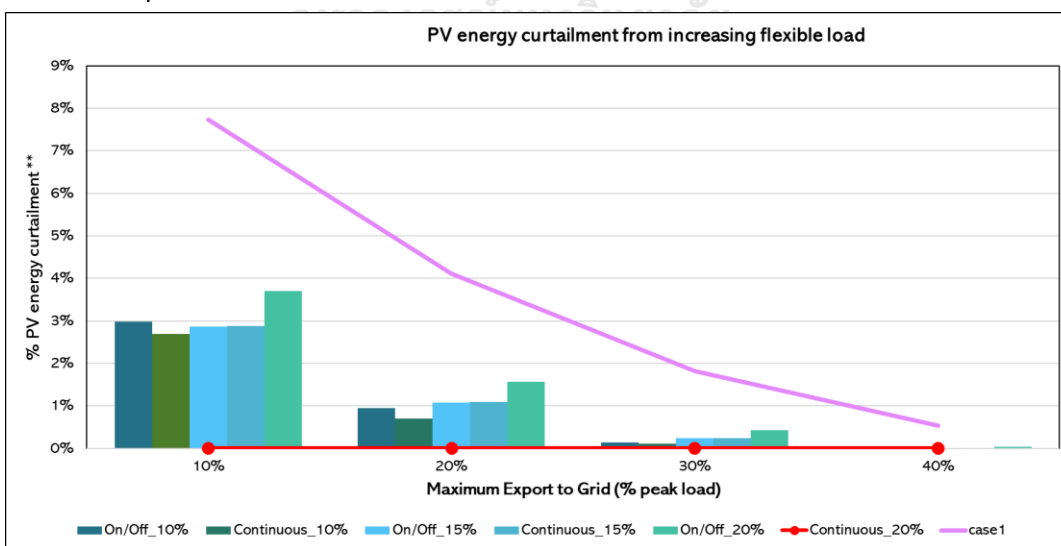
การลดค่าไฟฟ้าสุทธิมีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มค่าจำกัดการมีโหลดที่ควบคุมได้จะลดค่าไฟฟ้าสุทธิมากกว่า ผลการศึกษาในหัวข้อ 6.1.2 ทุกกรณี



รูปที่ 53 การเปรียบเทียบโหลดที่ควบคุมได้ด้านค่าไฟฟ้าสุทธิ

(*ใช้กรณีห้ามเกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนเป็นฐาน)

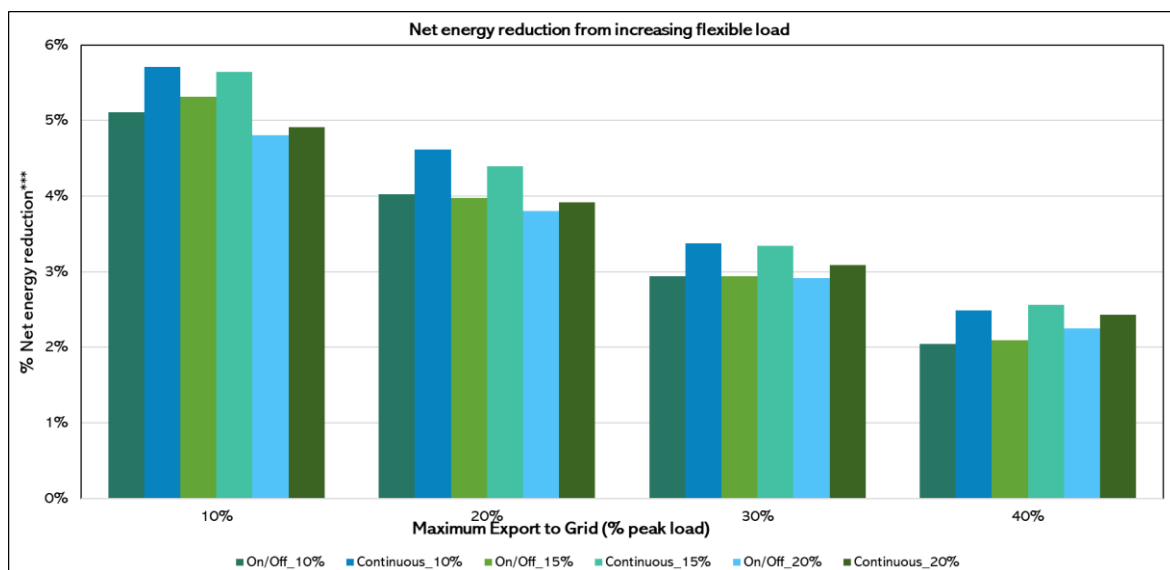
สำหรับผลการศึกษาปริมาณการลดพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 54 พิจารณาในกรณีค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนร้อยละ 10 พบว่าการลดพลังงานมากที่สุด ในโหมดชนิดเปิด-ปิด ที่มีพลังงานร้อยละ 20 และ ลดพลังงานน้อยที่สุดในโหมดชนิดต่อเนื่อง ที่มีพลังงานร้อยละ 15 สำหรับปริมาณอื่น ๆ มีค่าประมาณเท่ากัน ในทุกกรณี ซึ่งแนวโน้มการลดพลังงานลดลงเมื่อเพิ่มค่าจำกัด แต่หากเป็นโหมดชนิดต่อเนื่องที่มีปริมาณร้อยละ 20 จะไม่ถูกลดพลังงานในทุกกรณี ในทางเดียวกันการลดพลังงานจะน้อยกว่าการศึกษาหัวข้อ 6.1.1



รูปที่ 54 การเปรียบเทียบโหลดที่ควบคุมได้ด้านการผลิตพลังงาน

(**ใช้พลังงานจากศักยภาพการผลิตเป็นฐาน)

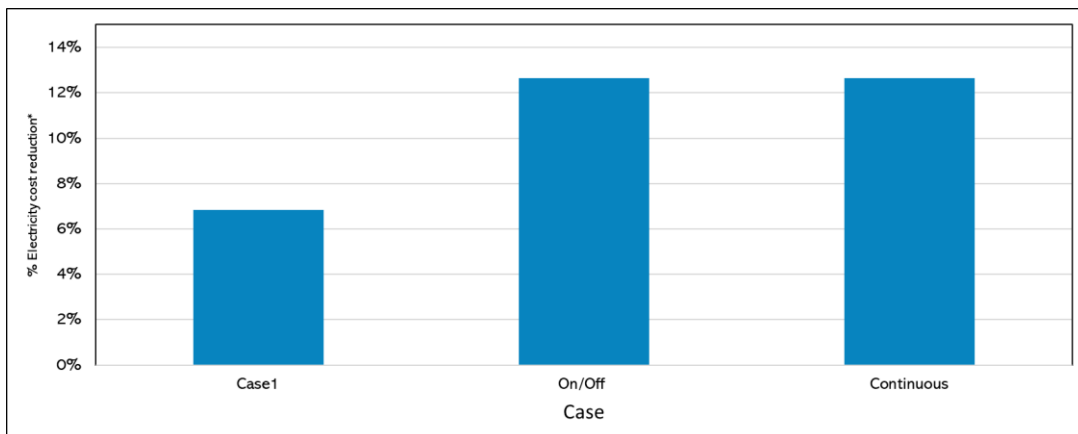
ผลการศึกษาลักษณะของพลังงานสุทธิแสดงรูปที่ 55 การเพิ่มขึ้นของค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนส่งผลให้พลังงานสุทธิในทุกกรณีมีแนวโน้มลดลงซึ่ง โหลดชนิดต่อเนื่องที่มีปริมาณพลังงานร้อยละ 10 และ 15 ส่งผลกระทบต่อพลังงานสุทธิมากที่สุด และ สำหรับโหลดชนิดต่อเนื่องจะทำให้พลังงานสุทธิลดลงมากกว่าชนิดเปิด-ปิดทุกกรณีเมื่อเทียบกับปริมาณพลังงานที่เท่ากัน



รูปที่ 55 การเปรียบเทียบ โหลดที่ควบคุมได้ด้านพลังงานสุทธิ

(**ใช้กรณีควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียวเป็นฐาน)

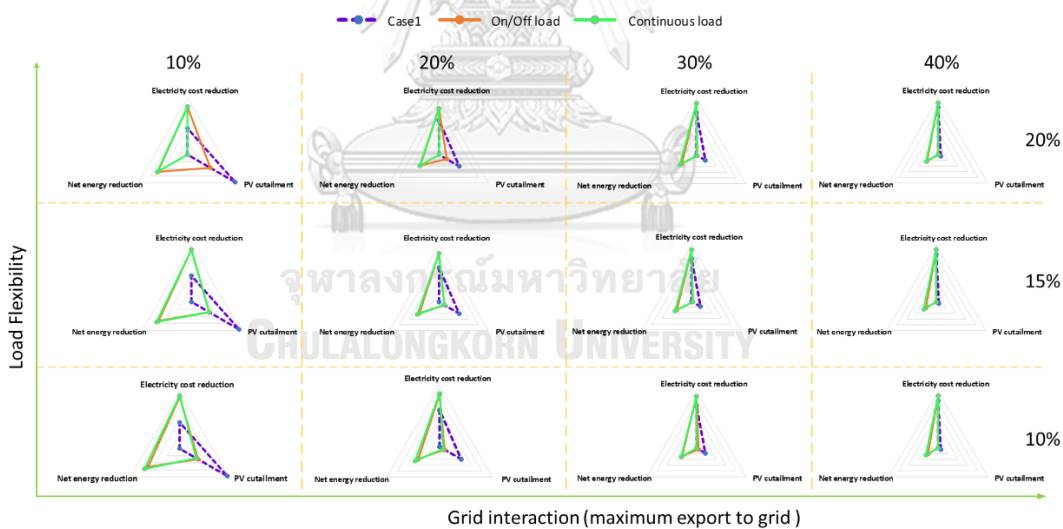
ระบบการจัดการพลังงานที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าไฟฟ้าของโพรซูเมอร์นอกจากการควบคุมองค์ประกอบต่างๆ ให้เหมาะสมที่สุดแล้ว อัตราค่าไฟฟ้า (C) ยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อการบริหารพลังงานซึ่งรูปที่ 56 แสดงผลลัพธ์ของการนำอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use : TOU) มาคำนวณ การศึกษานี้ใช้อัตราค่าไฟฟ้า 4.1839 และ 2.6037 บาทต่อหน่วย สำหรับช่วง On peak และ Off peak ตามลำดับ โดยกำหนดส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้ามีค่าร้อยละ 10 (ΔC เท่ากับ 0.1) และ ค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนร้อยละ 30 จากการจำลองพบว่า การมีโหลดที่ควบคุมได้ส่งผลต่อการลดลงของค่าไฟฟ้าสุทธิอย่างมีนัยสำคัญโดยเปรียบเทียบกับกรณีที่มีการควบคุมเพียงอย่างเดียว ทำให้ค่าการลดลงของค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 6 และ โหลดแต่ละชนิดให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 56 ผลการศึกษาค่าไฟฟ้าต่อการจัดการพลังงาน

(*ใช้กรณีห้ามเกิดกำลังไฟฟ้าไหลย้อนเป็นฐาน)

รูปที่ 57 แสดงการสรุปสมรรถนะของโพรซิวเมอร์โดยเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว กับ การมีโหลดที่ควบคุมได้ การชี้วัดจะใช้ดัชนีที่เสนอไว้ในหัวข้อ 4.4 และ ทำการเปรียบเทียบใน 2 ด้านคือ ปฏิสัมพันธ์กับโครงข่าย (Grid interaction) แสดงเป็นค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อน และ ความยืดหยุ่นของโหลด (Load flexibility) แสดงเป็นร้อยละพลังงานของโหลดที่ควบคุมได้



รูปที่ 57 สรุปการจัดการพลังงานรูปแบบต่างๆต่อสมรรถนะระบบจัดการพลังงานของโพรซิวเมอร์

กล่าวโดยสรุปหากผู้ดูแลโครงข่ายกำหนดให้โพรซิวเมอร์มีปฏิสัมพันธ์กับโครงข่ายอย่างจำกัด (จากรูปมีค่าร้อยละ 10) ความยืดหยุ่นของโหลดจะส่งผลกับสมรรถนะของโพรซิวเมอร์ในทุกๆ ด้าน ซึ่งหากมีความยืดหยุ่นมาก โหลดที่มีความต่อเนื่องจะส่งผลต่อการลดพลังงานจากการลดพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ในทางกลับกัน หากผู้ดูแลโครงข่ายอนุญาตให้มีปฏิสัมพันธ์กับโครงข่ายค่อนข้างมาก (จากรูปตั้งแต่ร้อยละ 30) การมีโหลดที่ควบคุมได้ และ การควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียวจะส่งผลต่อสมรรถนะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

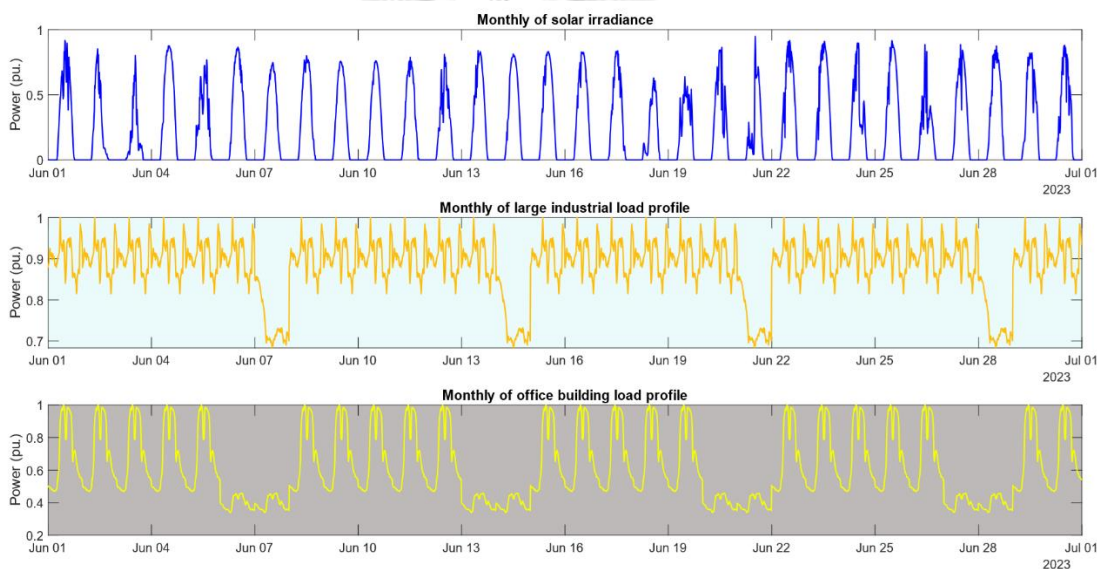
บทที่ 7 การศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด

พร้อมฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดโดยจะเปรียบเทียบระหว่าง การไม่รักษาแรงดัน และการใช้งานฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดันของ โพรซูเมอร์ บนระบบทดสอบพื้นที่อุตสาหกรรม อาศัยการจำลองผ่านโปรแกรม PowerFactory 2018 (DigSilent)

7.1 ขั้นตอนการศึกษา

โพรซูเมอร์ที่ใช้ในการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และ อาคารสำนักงาน โดยลักษณะการใช้ไฟฟ้า และ ศักยภาพกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้า แสงอาทิตย์ แสดงในรูป 58



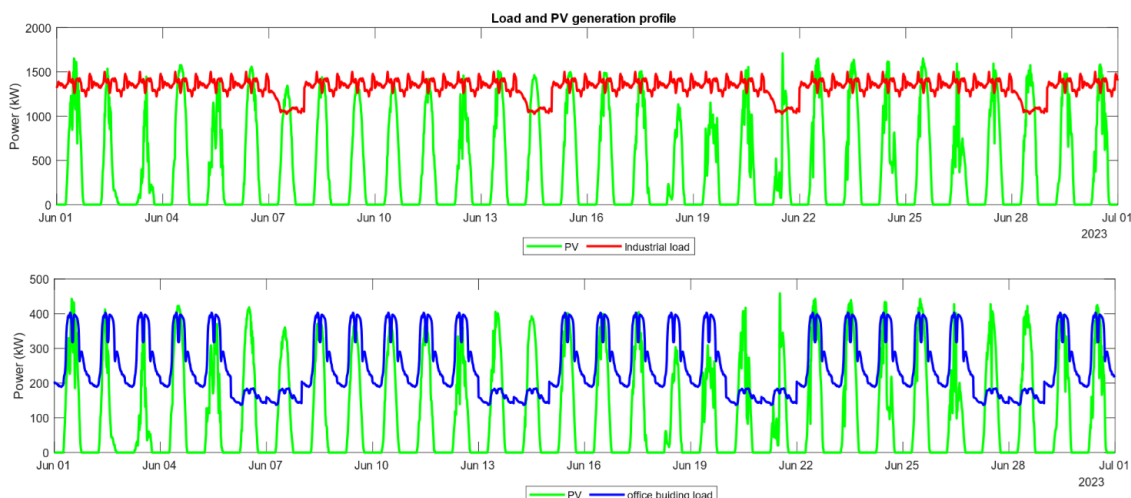
รูปที่ 58 ศักยภาพการผลิต และ ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของโพรซูเมอร์

กำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าแสงอาทิตย์แต่ละราย กำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 120 เทียบกับความต้องการไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งในระบบทดสอบนี้มีโพรซูเมอร์ทั้งหมด 12 ราย โดยในการศึกษานี้จะเลือกทดสอบกับการควบคุมพีวีอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว และ กำหนดให้ค่าจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนมีค่าร้อยละ 30 รายละเอียดของค่าดังกล่าวแสดงในตาราง 29

ตารางที่ 29 รายละเอียดทางพารามิเตอร์ของโพรซูเมอร์

โพรซูเมอร์	ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (กิโลวัตต์)	กำลังผลิตติดตั้ง (กิโลวัตต์)	P_{export}^{max} (กิโลวัตต์)	E_{tie}^{min} (กิโลวัตต์ชั่วโมง)
อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ 1	1500.00	1800.00	450.00	-9000.00
อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ 2	1000.00	1200.00	300.00	-6000.00
อาคารสำนักงาน 1	402.29	482.74	120.69	-2413.71
อาคารสำนักงาน 2	300.57	360.69	90.17	-1803.43
อาคารสำนักงาน 3	171.43	205.71	51.43	-1028.57
อาคารสำนักงาน 4	167.77	201.33	50.33	-1006.63
อาคารสำนักงาน 5	148.57	178.29	44.57	-891.43
อาคารสำนักงาน 6	120.00	144.00	36.00	-720.00
อาคารสำนักงาน 7	118.40	142.08	35.52	-710.40
อาคารสำนักงาน 8	104.00	124.80	31.20	-624.00
อาคารสำนักงาน 9	102.86	123.43	30.86	-617.14
อาคารสำนักงาน 10	365.14	438.17	109.54	-2190.86

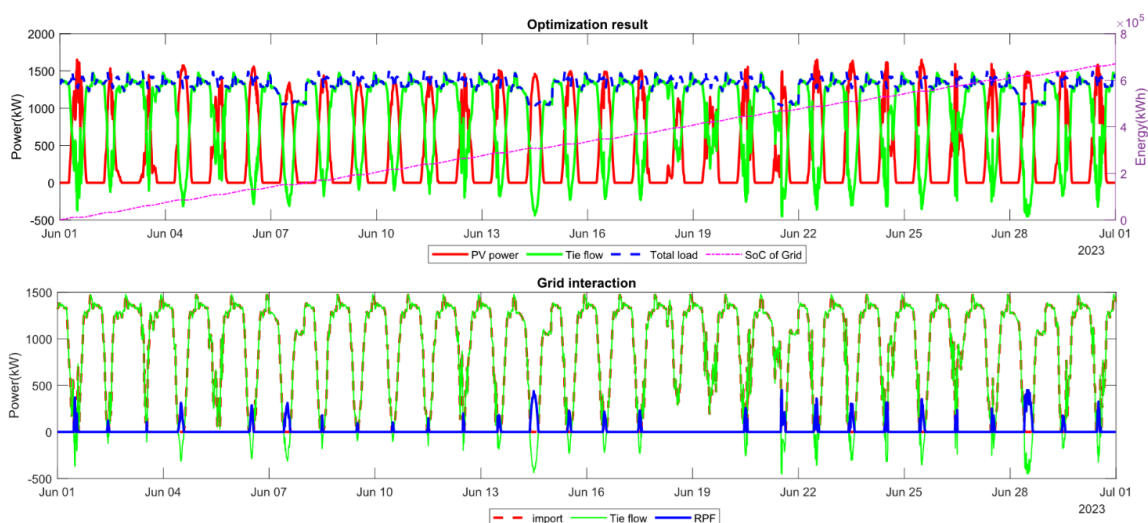
จากการกำหนดขั้นตอนการศึกษาที่ได้กล่าวไว้ จึงเลือก อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ 1 และ อาคารสำนักงาน 1 มาแสดงลักษณะศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้า และ การใช้ไฟฟ้า แสดงดังรูป 59 จะสังเกตเห็นได้ว่าโพรซูเมอร์ประเภทอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มีแนวโน้มการใช้พลังงานเท่ากับพลังงานที่ได้ระบบผลิต ซึ่งมีเพียง 1 วันในสัปดาห์เท่านั้นที่มีโอกาสเกิดพลังงานจากระบบผลิตมากกว่าการใช้อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันหากเป็นประเภทอาคารสำนักงาน จะพลังงานผลิตที่เหลือจากการใช้งาน 2 วันต่อสัปดาห์ และมีปริมาณมากเนื่องจากเกิดการลดการใช้กำลังไฟฟ้าเหลือเพียงครึ่งเมื่อเทียบกับวันอื่นๆ



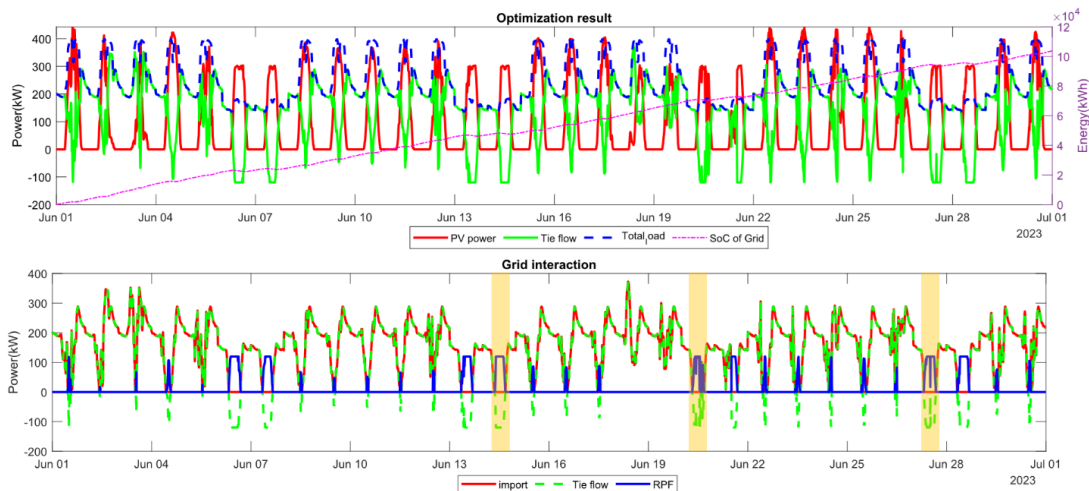
รูปที่ 59 ตัวอย่างของศักยภาพการผลิต และ ลักษณะการใช้ไฟฟ้า

ผลลัพธ์การจัดการพลังงานโพรซูเมอร์ประเภทอุตสาหกรรมขนาดใหญ่แสดงในรูปที่ 60 ปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนที่เหมาะสมที่สุด (เส้นสีฟ้าทึบ) มีค่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความต้องการใช้ไฟฟ้า (เส้นประสีแดง) ในทางกลับกันผลลัพธ์ของการจัดการพลังงานของอาคารสำนักงานในรูปที่ 61 ปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลย้อนมีค่าประมาณกึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดของความต้องการไฟฟ้า และมีลักษณะกำลังไฟฟ้าคงที่ในบางเวลา ซึ่งบ่งบอกถึงการควบคุมการผลิตเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด กำลังไฟฟ้าไหลย้อนที่เกิดขึ้นแบ่งได้ 3 รูปแบบ (สังเกตจากช่วงเวลาที่มีการแรงเงาพื้นหลังสีเหลือง) คือ ราบเรียบ ผันผวนน้อย และ ผันผวนมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



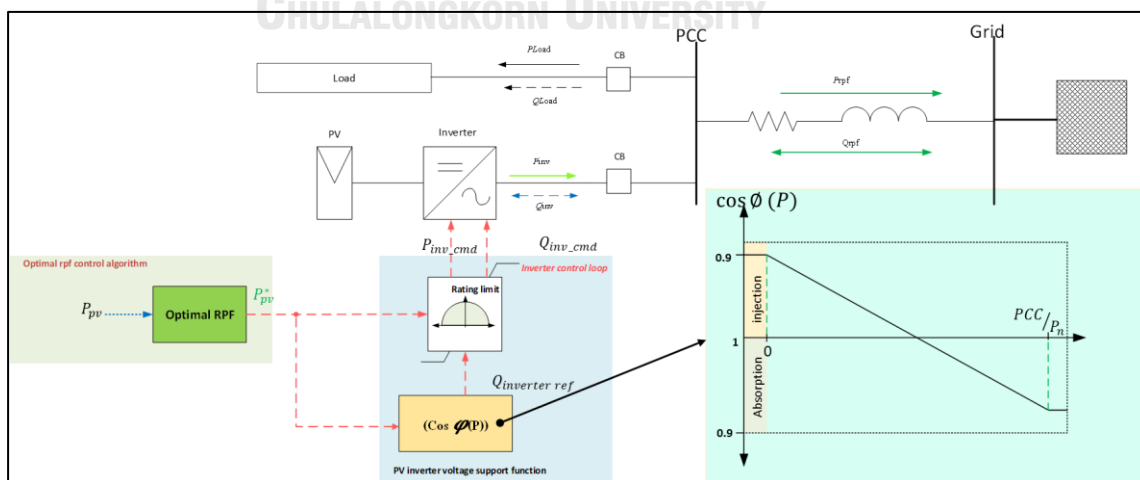
รูปที่ 60 ค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับโพรซูเมอร์ประเภทอุตสาหกรรมขนาดใหญ่



รูปที่ 61 ค่าเหมาะที่สุดสำหรับ โพรซูเมอร์ประเภทอาคารสำนักงาน

7.1.1 การปรับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อของอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี $\cos\phi(P)$

ฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดันสำหรับการศึกษานี้ ได้เลือกใช้วิธี $\cos\phi(P)$ มาประยุกต์และปรับใช้ให้เหมาะกับโพรซูเมอร์ กล่าวคือการปรับค่าตัวประกอบกำลังจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าจริงที่จุดต่อรวม (Point of Common Coupling ; PCC) ระหว่างโพรซูเมอร์ และ โครงข่ายไฟฟ้า โดยกำหนดให้สามารถปรับค่าได้จาก 0.9 นำหน้า ถึง 0.9 ส้าหลัง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด จะทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงโดยใช้แนวคิดที่เสนอในบทที่ 4 และ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟโดยใช้ฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน ภาพรวมของการควบคุมแสดงในรูปที่ 62



รูปที่ 62 ภาพรวมของการควบคุม

7.1.2 ดัชนีเพื่อการประเมินสมรรถนะของโครงข่าย

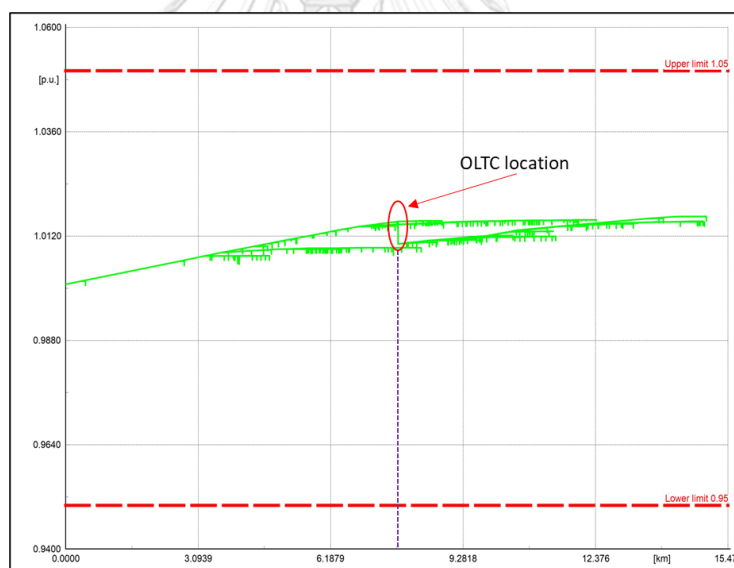
การประเมินผลกระทบที่เกิดจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดมีอยู่ 3 ด้านคือ

1. การวัดการกระจายตัวของค่าแรงดัน

เพื่อประเมินค่าแรงดันทุกตำแหน่งในทุกช่วงเวลาว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ และประเมินความผันผวนของแรงดันเมื่อมีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด

2. จำนวนการปรับแก้หม้อแปลง

สำหรับกรณีศึกษาบางกรณีจะทำการประเมินการใช้งานการปรับแก้ของหม้อแปลงแบบอัตโนมัติ (On Load Tap Changer ; OLTC) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการปรับจะทำหน้าที่เพื่อรักษาแรงดันที่จุดเชื่อมต่อปลายสายป้อนไม่ให้ต่ำกว่าเกณฑ์ หรือ หากมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจะทำหน้าที่รักษาแรงดันไม่ให้มีค่ามากกว่าเกณฑ์ ตำแหน่งติดตั้งของหม้อแปลงจะอยู่ที่บริเวณกลางสายป้อน ระยะจากต้นสายประมาณ 7 กิโลเมตร (แสดงในรูปที่ 63) คุณสมบัติการปรับแรงดันอยู่ที่ร้อยละ ± 5 ปรับอัตราส่วนของขดลวดได้ 20 ระดับ



รูปที่ 63 ค่าของแรงดันตลอดสายป้อน

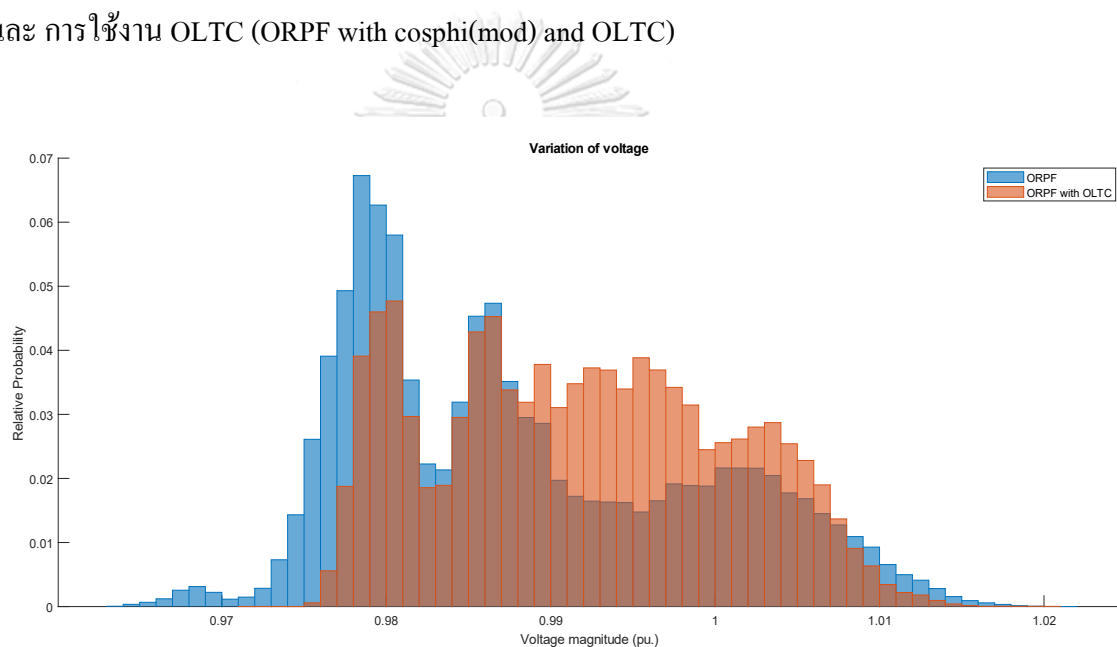
3. กำลังสูญเสียรวมของระบบจำหน่าย

ผลการศึกษาในบทที่ 5 ได้ชี้ให้เห็นถึงการลดลงของกำลังสูญเสียรวมเมื่อมีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนจากระบบผลิตของโรงชุมเมอร์ ซึ่งในการศึกษาคั้งนี้จะมีจุดประสงค์เพื่อดูผลกระทบของการใช้งานฟังก์ชันการรักษาแรงดันโดยการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อกำลังสูญเสียรวมในระบบจำหน่าย

7.2 ผลกระทบของกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดต่อระบบจำหน่าย

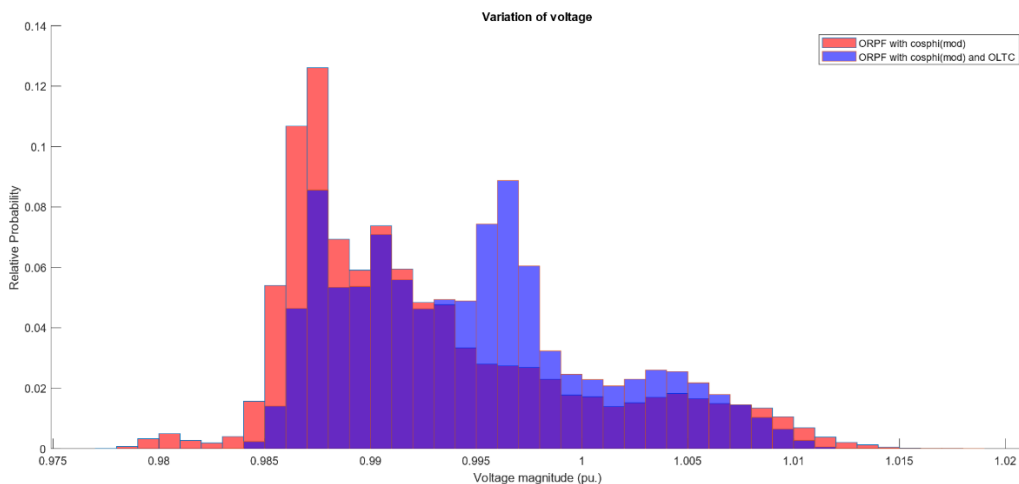
กรณีศึกษาสำหรับประเมินผลกระทบแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

1. ผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด (ORPF)
2. ผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด และ การใช้งาน OLTC (ORPF with OLTC)
3. ผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดพร้อมฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน (ORPF with cosphi(mod))
4. ผลกระทบจากกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดพร้อมฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน และ การใช้งาน OLTC (ORPF with cosphi(mod) and OLTC)



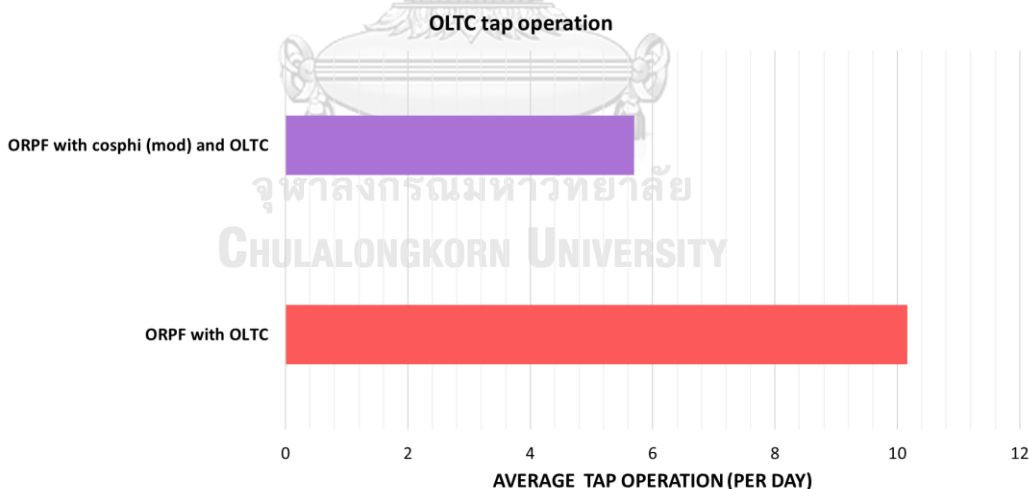
รูปที่ 64 เปรียบเทียบค่าของแรงดันกรณีที่ 1 กับ 2

ผลของค่าแรงดันจากกรณี ORPF พบว่าแรงดันอยู่ในช่วงประมาณ 0.96 ถึง 1.02 (p.u.) ซึ่งค่าของแรงดันจะเกาะตัวในช่วง 0.97 ถึง 0.98 สำหรับกรณี ORPF with OLTC พบว่าค่าของแรงดันมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 0.98 ถึง 1.01 ในรูปที่ 64 แสดงผลลัพธ์ดังกล่าวและแสดงให้เห็นว่า กรณี ORPF มีแนวโน้มที่จะเกิดเหตุการณ์แรงดันตก และ มีความเป็นไปได้น้อยที่จะเกิดแรงดันเกิน แต่หากใช้งานอุปกรณ์รักษาแรงดัน (กรณี ORPF with OLTC) จะทำให้ค่าของแรงดันมีการกระจายตัวและไม่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ค่าแรงดันจะไม่เป็นไปตามเกณฑ์กำหนด



รูปที่ 65 เปรียบเทียบค่าของแรงดันกรณีที่ 3 กับ 4

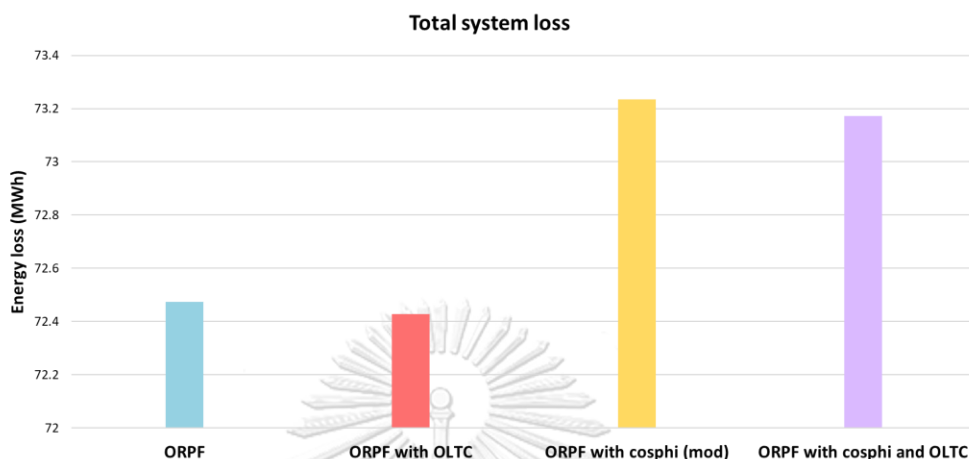
กรณี ORPF with cosphi(mod) ค่าของแรงดันอยู่ในช่วงประมาณ 0.985 ถึง 1.01 ซึ่งจะเกาะตัวกันในช่วง 0.985 ถึง 0.99 สำหรับกรณี ORPF with cosphi(mod) and OLTC ค่าแรงดันจะอยู่ในช่วงเดียวกัน แต่การเกาะตัวจะอยู่ในช่วง 0.985 ถึง 1 ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงในรูปที่ 65 หากเปรียบเทียบผลของค่าแรงดันของทั้ง 2 กรณีพบว่าค่าของแรงดันมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งจะต่างจากกรณี ORPF และ ORPF with OLTC ที่มีผลต่างกันอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 66 เปรียบเทียบจำนวนการปรับแท็ปโดยเฉลี่ยต่อวัน

การประเมินการจำนวนการปรับแท็ปหม้อแปลงจะพิจารณาเพียง 2 กรณีคือ ORPF with OLTC และ ORPF with cosphi (mod) and OLTC ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 66 การใช้งานฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดันของฟิวอินเวอร์เตอร์ นอกจากจะให้ผลของค่าแรงดันใกล้เคียงของการทำงานของ OLTC ในระบบแล้ว หากเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ใช้งานฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน การปรับแท็ปมี

ค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยในกรณี ORPF with OLTC มีค่าเฉลี่ยต่อวันอยู่ที่ 10 ครั้ง แต่หากใช้งานฟังก์ชันรักษาแรงดันด้วยจะเหลือเพียง 6 ครั้งต่อวัน



รูปที่ 67 เปรียบเทียบผลของกำลังสูญเสียรวมในระบบ

แม้ว่าฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดันจะให้ผลด้านค่าแรงดันที่ดีขึ้นกว่า และมีผลทำให้ลดการปรับแก้ของหม้อแปลงลดลงเมื่อเทียบกับกรณี ORPF แต่หากพิจารณากำลังสูญเสียรวมของระบบ พบว่าการรักษาแรงดันด้วยวิธี $\cos\phi(P)$ จะส่งผลให้มีค่ากำลังสูญเสียรวมเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 67 ทั้งนี้จากผลลัพธ์ของค่าแรงดันตามที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ การใช้งาน OLTC มีผลต่อการลดลงของกำลังสูญเสียเนื่องจากมีการรักษาแรงดันให้กระจายตัวสม่ำเสมอ

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

8.1 สรุปผลการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ การศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนระบบจำหน่ายทดสอบ การศึกษาการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุด และ การศึกษาผลกระทบกำลังไฟฟ้าไหลย้อนอย่างเหมาะสมที่สุดต่อระบบจำหน่ายพร้อมฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน การศึกษาในส่วนแรกทำการทดสอบบนระบบทดสอบพื้นที่อุตสาหกรรม และ ธุรกิจ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าไหลย้อนมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดัน และ ผลกระทบกำลังสูญเสียได้ข้อสรุปว่า หากมีการกระจายตัวของการติดตั้งจะทำให้กำลังสูญเสียลดลงโดยขนาดกำลังผลิตติดตั้งเท่ากับค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด

ผลศึกษาการจัดการพลังงานเพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าไหลย้อนให้เหมาะสมที่สุด พบว่าหากแก้ไขข้อกำหนดการเชื่อมต่อโดยอนุญาตให้มีกำลังไฟฟ้าไหลย้อน และ พิจารณาระบบจำหน่ายทำหน้าที่เป็นระบบกักเก็บพลังงานเสมือน จะส่งผลให้โพรซูเมอร์มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสุทธิลดลง พลังงานจากการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และ เพิ่มศักยภาพในการเป็นผู้ที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อสมรรถนะของระบบจัดการพลังงาน คือ อัตราค่าบริการฝากพลังงาน และ จีดจำกัดกำลังไฟฟ้าไหลย้อน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการมีโหนดที่ควบคุมได้ซึ่งมี 2 รูปแบบคือ แบบต่อเนื่อง และ แบบเปิด-ปิด ผลลัพธ์การควบคุมโหนดดังกล่าวพบว่าสมรรถนะจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อถูกจำกัดการปฏิสัมพันธ์กับโครงข่ายกล่าวคือกำหนดให้กำลังไฟฟ้าไหลย้อนถูกจำกัดไม่เกินร้อยละ 10 เทียบกับค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด และ ส่วนต่างอัตราค่าไฟฟ้ามี่ค่าร้อยละ 10

เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าไหลย้อนเหมาะสมที่สุดไปจำลองบนระบบทดสอบพื้นที่อุตสาหกรรม โดยทำการเปรียบเทียบการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่พีวีอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว กับ การใช้งานฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดันโดยคำนึงถึงการทำงานของ OLTC พบว่า การใช้งานฟังก์ชันการรักษาแรงดันช่วยให้ค่าของแรงดันมีความกระจายตัวน้อย และ ช่วงของค่าแรงดันอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด แต่หากเป็นกรณีควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียว ค่าของแรงดันมีแนวโน้มที่จะเกิดเหตุการณ์แรงดันตก และ แรงดันเกิน อีกทั้งการใช้งานฟังก์ชันดังกล่าวยังลดการปรับแก้ของ OLTC เหลือต่อวันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียวส่งผลให้มีกำลังสูญเสียรวมของระบบน้อยกว่าการใช้งานฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดันแต่ผลต่างกำลังสูญเสียมี่ค่าเพียงเล็กน้อย

8.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

1. แนวคิดการจัดการพลังงานควรพิจารณาเงื่อนไขหรือข้อจำกัดต่างๆของระบบไฟฟ้า เช่น ค่าของแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ
2. คำนึงถึงความไม่แน่นอนของค่าพยากรณ์ทั้งแสงอาทิตย์ และ การใช้ไฟฟ้า โดยอาจจะประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมอื่นๆ เช่น Stochastic optimization และ Model Predictive control
3. พิจารณาแบบจำลองขององค์ประกอบทางกายภาพที่ควบคุมให้ครอบคลุมถึงผลกระทบของค่าที่เหมาะสมที่สุด เช่น ควรพิจารณาแบบจำลองฟิวเจอร์เตอร์ที่แสดงถึงประสิทธิภาพ เพื่อให้เห็นถึงความต่างระหว่างค่าที่คำนวณได้ และ ค่าจริงที่เกิดขึ้น
4. พิจารณาการควบคุมระบบกักเก็บพลังงาน โดยประยุกต์จากแนวคิดแบบจำลองโพลด์ที่ควบคุมได้ตามที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์นี้
5. พิจารณาการใช้ฟังก์ชันการช่วยรักษาแรงดัน โดยใช้การควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง เพื่อให้เห็นผลกระทบด้านกำลังสูญเสียต่อการควบคุมแรงดัน ซึ่งจะครอบคลุมตามที่ข้อกำหนด และ มาตรฐานต่างๆได้นำเสนอไว้

บรรณานุกรม

1. Hasheminamin, M., et al., *Index-Based Assessment of Voltage Rise and Reverse Power Flow Phenomena in a Distribution Feeder Under High PV Penetration*. IEEE Journal of Photovoltaics, 2015. 5(4): p. 1158-1168.
2. Bizon, N., et al., *Fundamentals and Contemporary Issues of Reactive Power Control in AC Power Systems*. 2017.
3. Kraiczy, M., et al., *Do It Locally: Local Voltage Support by Distributed Generation – A Management Summary*. 2017.
4. Pecenak, Z.K., J. Kleissl, and V.R. Disfani. *Smart inverter impacts on california distribution feeders with increasing pv penetration: A case study*. in *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2017.
5. Ratchawang, K. and N. Hoonchareon. *Impact of Prosumers' PV reverse power flow on voltage rise in MV distribution systems*. in *2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. 2023.
6. PEA, *Provincial Electricity Authority's Regulation on the Power Network System Interconnection* 2016, PEA.
7. MEA, *Metropolitan Electricity Authority Authority's Regulation on the Power Network System Interconnection Code* 2015, MEA.
8. Masson, G., et al., *Snapshot of Global PV Markets 2021 Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach PVPS*. 2021.
9. Braun, M., G. Arnold, and H. Laukamp, *Plugging into the Zeitgeist*. IEEE Power and Energy Magazine, 2009. 7(3): p. 63-76.
10. BDEW, *Generating plants Connected to the Medium-Voltage Network*. 2008: Germany.
11. VDE, *Power Generation Systems Connected to the Low - Voltage Distribution Network*. 2011: Germany.
12. Association, N.E.M., *American National Standard For Electric Power Systems and Equipment— Voltage Ratings (60 Hertz)*. 2006, National Electrical Manufacturers Association: USA.

13. *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*. IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003), 2018: p. 1-138.
14. Stetz, T., et al., *High Penetration of PV in Local Distribution Grids - Subtask 2 Case Study Collection*. 2014.
15. Seal, B., *Common Functions for Smart Inverters*. 2016, EPRI.
16. (ENTSO-E), T.E.N.o.T.S.O.f.E., *A Power System for a Carbon Neutral Europe*. 2022, ENTSO-E.
17. Mišljenović, N., et al. *A Review of Energy Management Systems and Organizational Structures of Prosumers*. *Energies*, 2023. **16**, DOI: 10.3390/en16073179.
18. Nagpal, H., et al., *Optimal energy management in smart sustainable buildings – A chance-constrained model predictive control approach*. *Energy and Buildings*, 2021. **248**: p. 111163.
19. Giordano, F., et al., *Vehicle-to-Home Usage Scenarios for Self-Consumption Improvement of a Residential Prosumer With Photovoltaic Roof*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020. **56**(3): p. 2945-2956.
20. Palma-Behnke, R., et al., *A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013. **4**(2): p. 996-1006.
21. Jo, H.C., et al., *Optimal Scheduling for a Zero Net Energy Community Microgrid With Customer-Owned Energy Storage Systems*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021. **36**(3): p. 2273-2280.
22. Avramidis, I.I., F. Capitanescu, and G. Deconinck, *From Smart to Sustainable to Grid-Friendly: A Generic Planning Framework for Enabling the Transition Between Smart Home Archetypes*. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021. **12**(3): p. 1684-1694.
23. Yang, J., et al., *Prosumer-Driven Voltage Regulation via Coordinated Real and Reactive Power Control*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022. **13**(2): p. 1441-1452.
24. PEA. การศึกษาลักษณะการใช้ไฟฟ้า. [cited 2022; Available from: <http://peaoc.pea.co.th/loadprofile/>].
25. Morales-España, G., J.M. Latorre, and A. Ramos, *Tight and Compact MILP Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013.

28(4): p. 4897-4908.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กานตนาถ ราชฉวาง
วัน เดือน ปี เกิด	28 พฤษภาคม 2540
สถานที่เกิด	ลำพูน
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่อยู่ปัจจุบัน	53/1 ตำบลเวียงของ อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY