

สำนักงานคณะกรรมการ



สัญญาเลขที่ R2560C042

สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนา Algorithm โดยใช้ฟัซซี่ลอจิก เพื่อการบริหารจัดการกำลังไฟฟ้า
ของระบบสมาร์ตไมโครกริด เพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วย
เซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก

Algorithm development by using Fuzzy Loggic for electrical power
management in smart Microgrid to mitigate the connection of high
penetration PV system impact

คณะผู้วิจัย สังกัด

ผศ. ดร. ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร. สุขฤดี สุขใจ	มหาวิทยาลัยนเรศวร
นายคงฤทธิ์ แม่นศิริ	มหาวิทยาลัยนเรศวร

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

วันลงทะเบียน 1 ส.ค. 2562

เลขทะเบียน 1019931

เลขเรียกหนังสือ 0 TK 3105

พ. 232๙

๒๕๖๐

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ประจำปีงบประมาณ 2560

ชื่อโครงการ	การพัฒนา Algorithm โดยใช้ฟอสซิลอจิก เพื่อการบริหารจัดการกำลังไฟฟ้าของระบบสมาร์ทไมโครกริด เพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก
ชื่อผู้วิจัย	ผศ. ดร. ฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์วงศ์ ดร. สุขฤดี สุขใจ นายคงฤทธิ แม่นศิริ
ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก งบประมาณ	งบประมาณรายได้มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 220,000 บาท
ระยะเวลาดำเนินการวิจัย	1 ตุลาคม 2559 ถึง สิงหาคม 2561

บทคัดย่อ

การพัฒนา Algorithm โดยใช้ฟอสซิลอจิก เพื่อการบริหารจัดการกำลังไฟฟ้า ของระบบสมาร์ทไมโครกริดเพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก งานวิจัยพัฒนา Control Algorithm ที่มาควบคุม Grid Inverter ให้ทำงานในการรักษาระดับแรงดันของระบบจำหน่ายให้อยู่ในช่วงที่การไฟฟ้ากำหนด นอกจากนั้น ในกรณีที่คุณภาพไฟฟ้าอยู่ช่วงที่การไฟฟ้ายอมรับ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะจะทำการบริหารจัดการระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่) ในการ Charge และ Discharge เพื่อให้สอดคล้องกับโครงสร้างไฟฟ้าแบบ TOU เพื่อการลดค่าไฟฟ้า อีกทั้งยังมีการบริหารจัดการ Load ควบคุมด้วยระบบ BEMS เพื่อการใช้ไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากผลการวิจัยในการพัฒนา Control Algorithm ดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ผลการวิจัยในการบริหารจัดการฝั่ง Supply side ร่วมกับระบบสะสมพลังงาน คือ การบริหารจัดการเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าให้ทำงานในโหมด Grid Support Functions โดยการปรับ PF ให้เหมาะสมกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจากการที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จ่าย Active Power เข้าไปในระบบ โดย PF ที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าปรับจะอยู่ในช่วง 0.90 – 1 Leading และ Lagging และการ charge ไฟฟ้าลงในระบบสะสมพลังงานเพื่อเพิ่ม Load ให้กับระบบจำหน่าย และสร้าง Balance ระหว่าง Supply และ Demand จากผลการ Simulation โดย DigSILENT Power Factory พบว่า Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้ากรณีที่แรงดันไฟฟ้าสูงเกินมาตรฐานของการไฟฟ้าให้ลดระดับลงมาในช่วงที่คณะวิจัยกำหนด คือ 0.94 p.u. -1.06 p.u. ซึ่งดีกว่าช่วงที่การไฟฟ้ากำหนดคือ 0.90 p.u. – 1.10 p.u.

ผลการวิจัยในการบริหารจัดการฝั่ง Demand ร่วมกับระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่) โดยมีเป้าหมายเพื่อใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดค่าไฟฟ้าให้มากที่สุด ในงานวิจัยนี้เรียกว่า Economic operation ตามโครงสร้างค่าไฟฟ้าแบบ TOU ซึ่งจะประกอบด้วยค่าไฟฟ้าช่วง Peak และช่วง Off Peak ซึ่งค่าไฟฟ้าช่วง Peak จะมีค่าไฟฟ้าที่สูงกว่าช่วง Off peak ดังนั้น Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจะต้องลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าในช่วง Peak มากที่สุด หรือการทำ Load Clipping โดยการลดการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นซึ่งควบคุมด้วยระบบ BEMS พร้อมด้วยการบริหารจัดการระบบสะสมพลังงาน คือ Charge และ Discharge พลังงานไฟฟ้าในระบบสะสมพลังงานกล่าวคือ ในช่วง Peak Time จากผลการที่ Control Algorithm ทำการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ Smart Grid หรือ Microgrid ตาม Function ของ Economic Operation พบว่าจะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ถึง 17.58 % โดยที่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเลย

Titles	Algorithm development by using Fuzzy Logic for electrical power management in smart Microgrid to mitigate the connection of high penetration PV system impact
Researcher	Asist. Dr. Chatchai Sirisamphanwong Dr. Sukruedee Sukchai Mr. Kongrit Mansiri
Sponsor	University Income Budget Fiscal Year 2560
Budget	220,000 Bath
Period of time	1 October 2016 – August 2018

Abstract

Development of energy management procedures for Smart Grid systems to reduce the negative impact of massive PV systems interconnections. This research aims to develop the Control Algorithm that controls the grid inverter to work as grid support functions to maintain the voltage level of the distribution system into the acceptable range. The Smart grid system will manage the battery storage system to charge and discharge follow the TOU structure of electricity price. The results of the research on the development of the control algorithm can be summarized as follows.

The results of this research in the case of supply side and energy storage management, which enables grid inverter working for grid support functions. This function operates on adjustment the PF in range of 0.9 -1 leading and lagging depend on grid voltage levels. Not only PF adjustment but also operate on the battery power management, during this case, the system will charge electricity into the battery for balancing the supply and demand. The simulation results found that during the high amount of active power, which is fed to the distribution system, during this case, grid voltage is rising over than Thailand standard but control algorithm, which was developed, can decrease the voltage level into the desired range (0.94 p.u.-1.10 p.u.).

The research results in demand-side management along with energy storage (battery) systems, aiming at energy efficiency and reducing electricity bills. This study is called Economic operation based on the TOU structure that consists of Peak and Off-Peak time. During peak time, the electricity price is higher than Off-peak time. Therefore, the control algorithm has to manage electricity for reducing the electricity bill by clipping power consumption or load clipping by reducing unnecessary power consumption which is controlled by BEMS. As a result of the control algorithm controlling the devices in the Smart

Grid or Microgrid system, according to the function of Economic Operation, it is possible to save electricity up to 17.58% without Changed the behavior of electricity use.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ งบประมาณแผ่นดินประจำปี งบประมาณ 2560 และขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่วิจัยของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่องคำแนะนำ และข้อมูลสนับสนุนในการศึกษานี้ ทำให้การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย
สิงหาคม 2561



สารบัญ

บทคัดย่อ	6
Abstract	7
กิตติกรรมประกาศ	9
สารบัญ	10
สารบัญตาราง	11
สารบัญภาพ	12
สารบัญภาพ (ต่อ)	13
บทที่ 1 บทนำ	14
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	14
1.2 วัตถุประสงค์	17
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	17
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	18
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
2.1 โครงข่ายอัจฉริยะ (Smart Grid)	19
2.2 ผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก	23
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย	47
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย	47
3.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย	49
3.3 ระบบโครงข่ายอัจฉริยะของวิทยาลัยพลังงานทดแทน (SERT Smart grid)	50
3.4 การพัฒนา Control Algorithm	55
3.4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟuzzyลอจิก	55
บทที่ 4 ผลการวิจัย	63
4.1 การทดสอบเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย	63
4.2 การพัฒนา Control Algorithm	67
4.3 ผลการวิจัย	73
4.3.1 การพัฒนา Control Algorithm เพื่อการรักษาคุณภาพไฟฟ้าในระบบ ฯ	73
4.3.2 ผลการวิจัยทางด้าน Economic Operation	76

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5	79
สรุปผล และข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
ในการศึกษาวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
บรรณานุกรม	81
ภาคผนวก บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ความเสียหายที่เกิดจาก Harmonics	28
ตารางที่ 2 Disturbance voltage for EN 55022	32
ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
ตารางที่ 4 ส่วนประกอบในการ Simulation	62



สารบัญภาพ

รูปที่ 1	การขยายตัวของตลาดผลิตเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
รูปที่ 2	จำนวนโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และโซลาร์รูฟที่ติดตั้งในประเทศไทย.....	15
รูปที่ 3	Overvoltage ที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศออสเตรเลีย.....	16
รูปที่ 4	ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกรณีติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
รูปที่ 5	ระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่มีและไม่มีการเชื่อมต่อบนระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	24
รูปที่ 6	ระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อบนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
รูปที่ 7	รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม.....	25
รูปที่ 8	กรณีศึกษา Unbalance Voltage กรณีติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
รูปที่ 9	กรณีศึกษา Unbalance Voltage กรณีติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละ Feeder.....	27
รูปที่ 10	รูปคลื่น Sine wave ในกรณีที่มิใช่ไฟฟ้ากระแสตรงหลุดเข้าไปในระบบ.....	27
รูปที่ 11	รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่มี Harmonics.....	28
รูปที่ 12	การช่วย Supply load ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์.....	29
รูปที่ 13	ผลกระทบที่เกิดจาก Power Factor ในระบบจำหน่าย.....	30
รูปที่ 14	ผลกระทบที่เกิดจาก EMC.....	31
รูปที่ 15	ผลกระทบจาก Disturbance voltage on DC and DC side จากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า.....	31
รูปที่ 16	ระเบียบวิธีการวิจัยโครงการ.....	48
รูปที่ 17	องค์ประกอบของระบบทั้งหมดที่จะใช้ในการทำวิจัย.....	50
รูปที่ 18	ระบบโครงข่ายอัจฉริยะของวิทยาลัยพลังงานทดแทน.....	51
รูปที่ 19	ระบบ Campus Power ขนาด 350 kW.....	51
รูปที่ 20	ระบบแสดงผลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Real Time.....	52
รูปที่ 21	ระบบแสดงผลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 3D พร้อมการแสดงผลข้อมูลแบบ Real Time.....	52
รูปที่ 22	ระบบ PV Micro grid ขนาด 120 kW.....	53
รูปที่ 23	ระบบ PV grid connected system ขนาด 10 kW.....	54
รูปที่ 24	ระบบ PV roof connected system ขนาด 6 kW.....	54
รูปที่ 25	ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A.....	55
รูปที่ 26	โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี.....	56
รูปที่ 27	โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี.....	57
รูปที่ 28	การปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานแบบไม่เป็นเชิงเส้นของค่าอินพุต.....	58
รูปที่ 29	Modified 22 kV distribution System.....	62
รูปที่ 30	การควบคุมกำลังไฟฟ้า Reactive ในโหมด Leading และ Lagging.....	63
รูปที่ 31	ความสัมพันธ์ระหว่าง P, Q และ V_{L-L} ในโหมด ควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ.....	64
รูปที่ 32	การทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในโหมด AVR.....	64
รูปที่ 33	เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแสดงการควบคุมกำลังไฟฟ้า Power Control.....	65
รูปที่ 34	Low voltage fault ride through, LVRT.....	66
รูปที่ 35	ผลการทดสอบ Low voltage fault ride through, LVRT.....	66
รูปที่ 36	Under Voltage Protection.....	67
รูปที่ 37	Input and output parameters.....	68
รูปที่ 38	Control Algorithm ทั้งฝั่ง Demand และ Supply.....	69
รูปที่ 39	Membership Function PL-PV-Pb.....	70
รูปที่ 40	Membership Function SOC.....	70
รูปที่ 41	Membership Function of the Battery Discharge.....	71
รูปที่ 42	Membership Function of Load Clipping.....	71

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการทำ Discharge Mode (CM).....	72
รูปที่ 44 ตัวแปรที่มีผลต่อการทำ Load Clipping.....	72
รูปที่ 45 Charging and Discharging Mode สำหรับ Battery Inverter.....	72
รูปที่ 46 แรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินและแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำเกินจากการขาด Balance ระหว่าง Supply กับ Demand.....	73
รูปที่ 47 Voltage Profile	74
รูปที่ 48 Voltage Profile ของระบบจำหน่ายกรณีเชื่อมต่อกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 8 MW.....	74
รูปที่ 49 ผลของ Algorithm ในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า.....	75
รูปที่ 50 แสดงการ Charge และ Discharge ของระบบสะสมพลังงาน.....	76
รูปที่ 51 Load Shave Management ร่วมกับ Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้น.....	77
รูปที่ 52 ผลประหยัดจากการทำ Economic Operation.....	78



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จากปัญหาการขาดแคลนพลังงาน (Energy Crisis) และปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลังงานฟอสซิลโดยเฉพาะ ปรากฏการณ์โลกร้อน (Global warming) ที่ฆ่าชีวิตคนบนโลกเป็นจำนวนมากจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศ เช่น การเกิดภาวะที่รุนแรง อากาศหนาวหรือร้อนจนเกินไป ความแห้งแล้ง น้ำท่วม เป็นต้น ปรากฏการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้ เป็นผลจาก ก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas) จากการใช้พลังงานฟอสซิล ดังนั้นหลายประเทศในโลกจึงมีนโยบายที่จะลดการใช้พลังงานจากฟอสซิลลงและเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานสะอาดไม่ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าได้โดยตรง และในปัจจุบันมีการติดตั้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันประเทศไทยมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย (PV grid connected system) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) นั้นได้กำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไว้สูงถึง 2,000 MW โดยภาครัฐได้พยากรณ์ความต้องการพลังงานในอนาคตของประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2564 คาดว่าจะมีความ ต้องการ 99,838 กิโลตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (ktoe) จากปัจจุบัน 71,728 ktoe โดยแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 และแผนการพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2555-2564 ได้กำหนดให้มีส่วนการใช้พลังงานทดแทน เพิ่มขึ้นจาก 7,413 ktoe ในปี พ.ศ. 2555 เป็น 25,000 ktoe ในปี 2564 หรือคิดเป็น 25% ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมด ดังรูปที่ 1 [1]

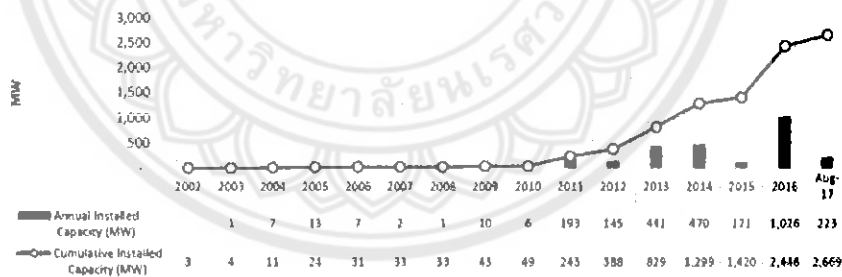
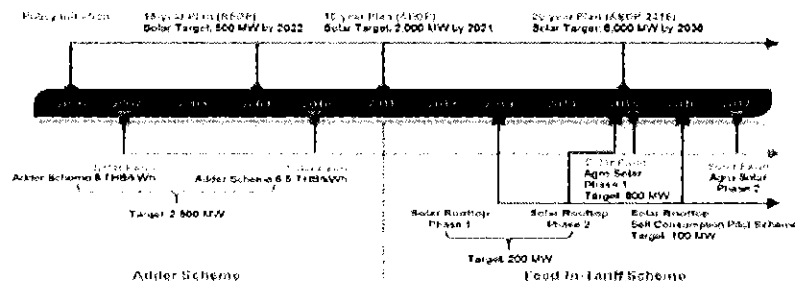


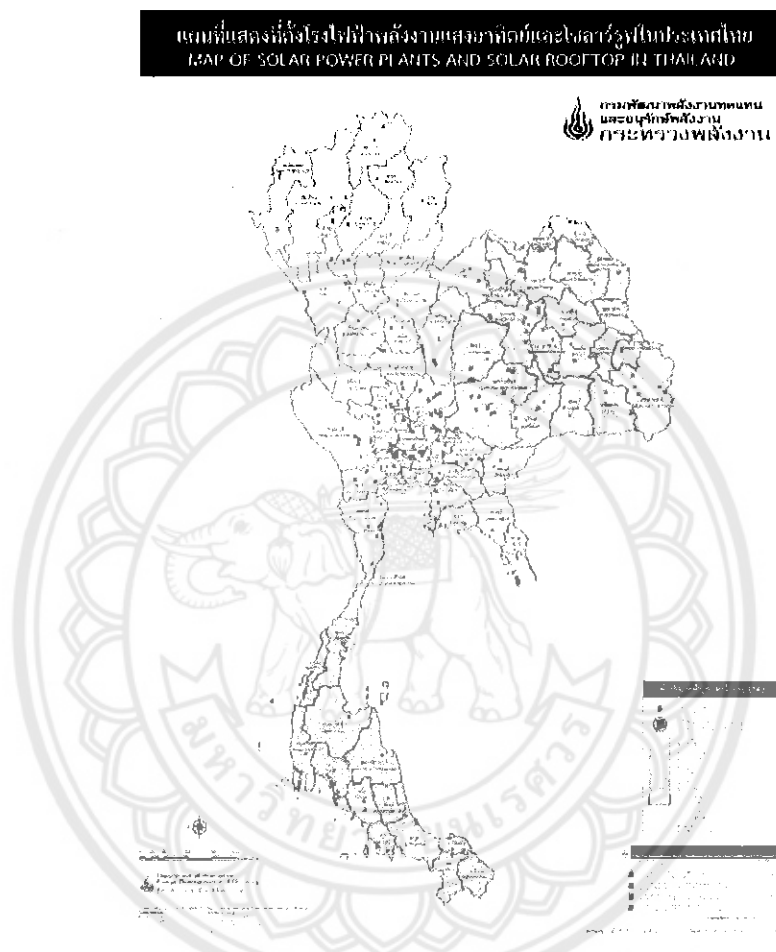
Figure 2. Thailand's Solar PV Policy Timeline



รูปที่ 1 การขยายตัวของตลาดผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

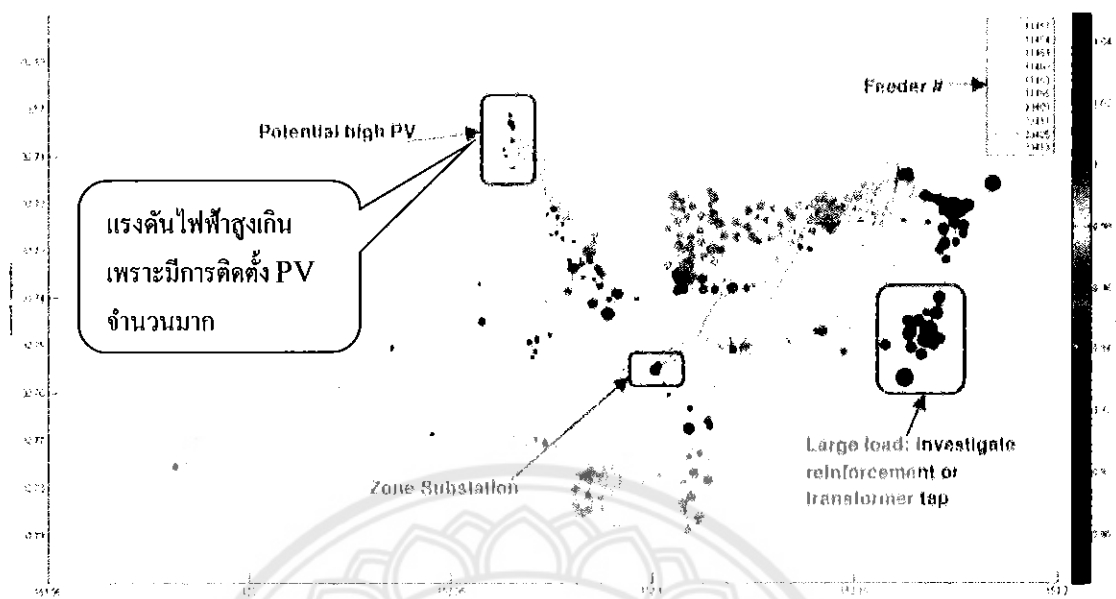
จากรูปที่ 1 แสดงเห็นจำนวนโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (PV farm) และโซลาร์รูฟ (PV rooftop) ที่ติดตั้งในประเทศไทย ซึ่งมีกำลังการผลิตรวม 787 เมกะวัตต์ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผล

จากรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน โดยมุ่งเน้นให้มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกระจายระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กให้กระจายไปทั่วประเทศไม่ให้กระจุกตัวเหมือนโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ แต่เนื่องจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคานั้นมีการกระจายตัวมาก และขนาดกำลังการผลิตแตกต่างกัน ก็จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่มีการกระจุกตัวของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ [2]



รูปที่ 2 จำนวนโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และโซลาร์รูฟท็อปที่ติดตั้งในประเทศไทย [3]

จากประสบการณ์ของหลายประเทศที่มีการส่งเสริมให้มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากก็จะประสบกับปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ นั่นเป็นเพราะว่าไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีเสถียรภาพ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์จึงมีความไม่แน่นอนในการผลิตไฟฟ้า จากตัวอย่างในประเทศออสเตรเลีย มีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (PV rooftop) ในระยะเวลาระหว่างหกปีอ่อนหลังมีการติดตั้งมากกว่า 1 ล้านหลังคาเรือน นั้นเพราะรัฐบาลมีนโยบายจูงใจ ในรูปแบบของ FIT ในราคาสูงถึง 3 เท่าของราคาค่าไฟฟ้าปกติ สำหรับบ้านที่อยู่อาศัย ในการเพิ่มขึ้นของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นก็ย่อมส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบสายส่งและระบบจำหน่าย เช่น การเพิ่มสูงขึ้นของระดับแรงดันไฟฟ้าในบริเวณที่มีปริมาณการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์สูงดังแสดงในรูป 3 นอกจากนี้ปัญหาเรื่องแรงดันไฟฟ้า ก็ยังพบปัญหาอื่น ๆ เช่น High Active Power Flow, Frequency Fluctuation เป็นต้น



รูปที่ 3 Overvoltage ที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศออสเตรเลีย[4]

จากปัญหาในควมไม่มีเสถียรภาพ ที่เกิดจากความไม่แน่นอนของแหล่งผลิต ความไม่ต่อเนื่องและ ไม่สม่ำเสมอจากการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ และจำนวนการติดตั้งที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจึงเป็น ปัญหาที่ต้องปรับปรุงแก้ไขต่อไป การที่จะเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนโดยเฉพาะระบบ เซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีโครงสร้างพิเศษที่ประสานการดำเนินการแบบสองทางคือ มีการติดต่อสื่อสาร กันระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าหรือ Supply และผู้ใช้ไฟฟ้าหรือ Demand เพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพและ มีความเสถียรภาพมากที่สุด ซึ่งแนวทางหนึ่งที่เป็นไปได้ในการปรับปรุงและแก้ไขปัญหในระบบไฟฟ้า ดังกล่าว คือ การพัฒนาระบบไฟฟ้าให้มีความชาญฉลาดหรือที่เรียกว่า ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid System) หลายประเทศทั่วโลก เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป ประเทศญี่ปุ่น ประเทศจีน และประเทศนิวซีแลนด์ เป็นต้น ได้ให้ความสนใจในการวิจัยและการพัฒนาระบบไฟฟ้าให้กลายเป็น ระบบ ไฟฟ้าที่มีความชาญฉลาด และใช้ทรัพยากรให้น้อยลง นั้นหมายถึงมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น มีความน่าเชื่อถือ ยิ่งยืน ปลอดภัย รวมถึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ประเทศไทยก็มีความตระหนักในเรื่องการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ทกริดของประเทศ หน่วยงาน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในทุกภาคส่วน ทั้งจากภาครัฐ คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายและ ภาคเอกชน ก็มีมุมมองการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ทกริดของแต่ละภาคส่วนนั้นย่อมเป็นไปตามภารกิจ ของแต่ละหน่วยงาน เพื่อให้เป็นแนวทางในการดำเนินการตามเป้าหมายเดียวกัน กระทรวงพลังงาน โดยสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานจึงได้จัดทำแผนแม่บทการพัฒนาระบบโครงข่ายสมาร์ทกริดของไทย พ.ศ. 2558-2579 เพื่อพัฒนาตัวเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับ Smart Grid แต่อีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากที่อยู่ระหว่าง Hardware กับ Software คือ รูปแบบและขั้นตอนการบริหารจัดการ (Algorithm) ในโครงข่าย Smart Grid ที่มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทย ตามภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม ยังไม่ถูกพูดถึง

อย่างเป็นรูปธรรม ดังนั้นคณะวิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาวิจัยและพัฒนา Algorithm ที่ใช้ในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะในประเทศไทยเพื่อให้โครงข่ายมีความชาญฉลาด มีความเสถียรภาพ มีประสิทธิภาพ และมีความยั่งยืน อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบในเชิงลบจากการผลิตไฟฟ้าด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีความไม่แน่นอนสูง สามารถเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทน เนื่องจากมีการบริหารจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพจากการพัฒนา Algorithm ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์

พัฒนารูปแบบขั้นตอนการควบคุม (Control Algorithm) ในการบริหารจัดการพลังงานของระบบผลิตไฟฟ้า (Supply Side) และความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้า (Demand side) ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) ให้มีความเสถียรภาพ มีประสิทธิภาพ และลดผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่ายที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีความหลากหลายของขนาดและกำลังการผลิตไฟฟ้าที่มีความกระจายตัวสูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและพัฒนารูปแบบขั้นตอนการควบคุม (Develop Control Algorithm) ในการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า Supply side management ร่วมกับพัฒนาขั้นตอนการควบคุมความต้องการพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการพลังงานจริงๆ และสามารถตอบสนองกับปริมาณพลังงานที่ระบบผลิตไฟฟ้าผลิตได้ หรือเรียกว่า Demand side management ในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) ซึ่งรายละเอียดของการบริหารจัดการ Supply side และ Demand side มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การศึกษาและพัฒนารูปแบบขั้นตอนในการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Supply Side Management)

ขอบเขตงานในหัวข้อนี้จะทำการศึกษารูปแบบขั้นตอนการควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่อย่างกระจายตัวและมีกำลังติดตั้งที่ไม่เท่ากันและความหลากหลายในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดสมมติฐานให้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายที่ติดตั้งอยู่กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต้องสามารถทำงานได้ตามมาตรฐานที่การไฟฟ้าส่วนภาคและการไฟฟ้านครหลวงปี 2556 (2013) กำหนด โดยจะเน้นศึกษาทั้งหมด 5 หัวข้อหลัก ประกอบด้วย

1. ผลจากการทำ Active Power Control
2. ผลจากการทำ Network Support (A variable reactive power depending on the Voltage Q(U)
3. ผลจากการทำ Active Power Control

ซึ่งทั้ง 3 หัวข้อจะต้องสามารถควบคุมจาก Central control ทั้งที่เป็น manual และ แบบ automatic เพื่อที่จะทำการรักษาคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย และช่วยให้เกิดการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพไม่ว่าจะเกิดกรณีใด ๆ ที่เป็นผลลบลต่อระบบจำหน่าย

การศึกษาและพัฒนาารูปแบบขั้นตอนการควบคุมความต้องการการใช้ไฟฟ้าในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Demand side management)

ขอบเขตงานในหัวข้อนี้จะทำการศึกษารูปแบบการควบคุมความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการการใช้งานจริง และต้องสามารถตอบสนองต่อสภาวะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย อีกทั้งจะต้องเป็นการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้าจากการบริหารจัดการพลังงาน เช่น การบริหารจัดการส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบจะต้องสอดคล้องกับค่าไฟฟ้าของช่วง Peak และ off Peak ในรูปแบบของ TOU ซึ่งการบริหารจัดการรูปแบบนี้ก็จะสอดคล้องกับการทำ Real time pricing ของค่าไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการใช้งานภาระทางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดการบริหารจัดการความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าต้องสามารถทำได้อย่างน้อยดังรายละเอียดต่อไปนี้

- Dynamic Network support by load shading
- Dynamic Network support by load shipping
- Dynamic Network support by load Peak decreasing
- Dynamic Network support by load Transfer
- การลดค่าใช้จ่ายทางด้านภาระทางไฟฟ้าด้วยการทำ Real time pricing

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ได้ Control Algorithm ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยและเป็นต้นแบบการบริหารจัดการพลังงานในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีความชาญฉลาด
- สามารถเพิ่มสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานสะอาดจากการที่มี Control Algorithm ที่เหมาะสมช่วยลดผลกระทบจากความไม่แน่นอนในการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานดังกล่าว
- เพิ่มความน่าเชื่อถือได้และคุณภาพไฟฟ้า (Power Reliability and Quality) ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะมีความสามารถที่เพียงพอต่อความต้องการ มีความต่อเนื่องของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และมีคุณภาพไฟฟ้าที่ได้มาตรฐานไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า
- ระบบไฟฟ้ามีความยั่งยืนมีประสิทธิภาพของการผลิตและการใช้ไฟฟ้า (Energy Sustainability and efficiency) ระบบไฟฟ้ามีความยั่งยืนและมีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพช่วยลด Peak Load และ ช่วยลดการสร้างโรงไฟฟ้าจากพลังงานฟอสซิล
- เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านระบบโครงข่ายอัจฉริยะและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศ และมีความเหมาะสมต่อการลงทุน
- ตอบสนองนโยบายภาครัฐในเรื่องของการพัฒนาการใช้แหล่งพลังงานใหม่จากแสงอาทิตย์ของประเทศ

บทที่ 2

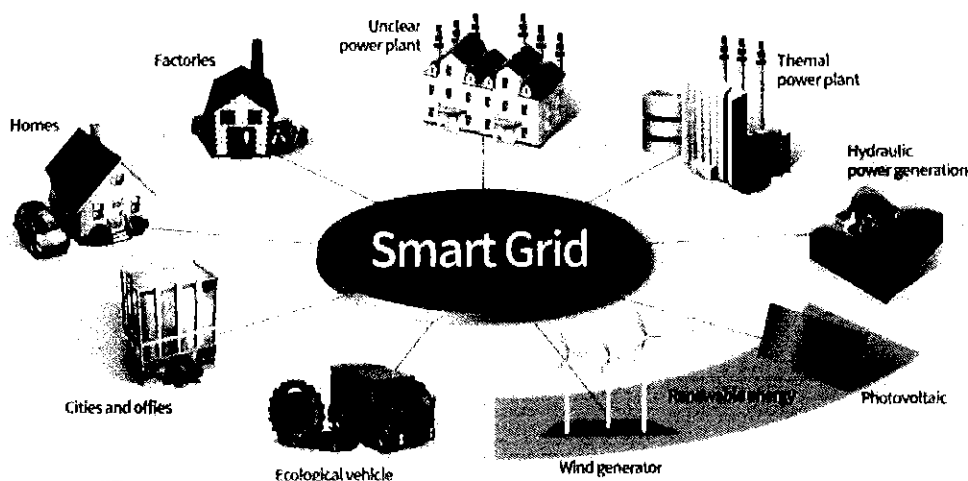
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงข่ายอัจฉริยะ (Smart Grid)

โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หรือ Smart Grid เป็นโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ และสื่อสารมาบริหารจัดการ ควบคุมการผลิต ส่ง และจ่ายพลังงานไฟฟ้า สามารถรองรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดที่กระจายอยู่ทั่วไป (Distributed Energy Resource : DER) และระบบบริหารการใช้สินทรัพย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด รวมทั้งให้บริการกับผู้เชื่อมต่อกับโครงข่ายผ่านมิเตอร์อัจฉริยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความมั่นคง ปลอดภัย เชื่อถือได้ มีคุณภาพไฟฟ้าได้มาตรฐานสากล [11]

แนวทางและรูปแบบการแก้ไขในปัจจุบันได้มีการนำระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้กระบวนการเกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสารมาบริหารจัดการ ควบคุมการผลิต ส่ง และจ่ายพลังงานไฟฟ้า สามารถรองรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกที่สะอาดที่กระจายอยู่ทั่วไป (Distributed Energy Resource : DER) และระบบบริหารการใช้สินทรัพย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด รวมทั้งให้บริการกับผู้เชื่อมต่อกับโครงข่ายผ่านมิเตอร์อัจฉริยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความมั่นคง ปลอดภัย เชื่อถือได้ มีคุณภาพไฟฟ้าได้มาตรฐานสากล ปัจจุบันมีหลายบริษัทที่จัดทำระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะนี้ขึ้นใช้งาน อาทิ บริษัท Grounded Power ได้สร้างอุปกรณ์สื่อสารขึ้นมาชนิดหนึ่ง เรียกว่า “Glance” อุปกรณ์ดังกล่าวที่จะคอยส่งสัญญาณให้กับผู้ใช้ รู้ว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้หรือไม่ โดยเป้าหมายหลักของบริษัทนี้ จะมุ่งเน้นในเรื่องของสิ่งแวดล้อมมากกว่าการลดค่าใช้จ่าย และเน้นในเรื่องของโครงข่ายสังคมออนไลน์ (Social Networking) ในการจัดให้มีการแนะนำหรือแบ่งปันเคล็ดลับการลดพลังงาน โดยมีการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าของเพื่อนบ้าน และจัดเสนอแนะการวางแผนการใช้ไฟฟ้าให้กับลูกค้า จึงทำให้ผู้คนเริ่มหันมาสนใจกันมากขึ้น มีการออนไลน์กันเพื่อเข้าไปให้คำแนะนำ แลกเปลี่ยนข้อมูลกัน มีการเปรียบเทียบกันกับเพื่อนบ้าน หรือมีการตั้งรางวัลให้สำหรับผู้ที่ลดพลังงานได้มากกว่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่า Social network ที่เกิดขึ้นสามารถผลักดันให้ผู้ใช้บริการไม่เพียงแค่มุ่งเป้าหมาย เพื่อลดพลังงานในส่วนของตัวเองเท่านั้น แต่ยังสามารถทำให้เกิดแรงจูงใจในการการลดพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อแข่งขันหรือเปรียบเทียบกับผู้อื่นได้ การพัฒนาแนวคิดระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะเกิดจากแรงขับเคลื่อนสำคัญ 3 ประการคือ

- เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ (Efficiency) โดยรวมของระบบการผลิต ส่งจ่าย และการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และสามารถสื่อสารแบบเวลาจริงและเป็นแบบอัตโนมัติ
- สามารถรองรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ต่างๆ เช่น แสงอาทิตย์ ลม ฯลฯ ที่ต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า (On-Grid) ซึ่งการบริหารจัดการระบบปกติทำได้ยาก มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากแหล่งกำเนิดพลังงานไม่คงที่
- สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยมีกลไกในการนำระบบกลับในสภาวะผิดปกติทางไฟฟ้า (Fault) กลับสู่สภาวะปกติได้เองโดยอัตโนมัติ (Self-Healing) เนื่องจากใช้ระบบคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงทำการควบคุม [5]



รูปที่ 1 รูปโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ [6]

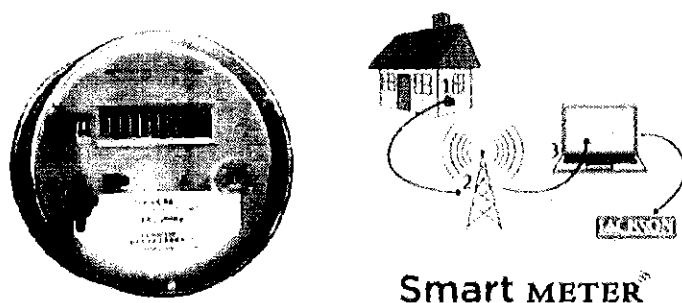
ส่วนประกอบของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ

โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะนี้ เกิดจากการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้า ระบบสารสนเทศ ระบบสื่อสาร เข้าไว้ด้วยกันเป็นโครงข่าย (Network) ซึ่งโครงข่ายดังกล่าวจะสนับสนุนการทำงานซึ่งกันและกันอย่างเป็นระบบ โดยอาศัยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสำคัญ 3 ด้าน อันได้แก่

ระบบอิเล็กทรอนิกส์ฝังตัว (Electronics Embedded Systems) ระบบนี้จะใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กแบบฝังตัว ติดอยู่ตามจุดต่างๆในโครงข่ายไฟฟ้า อาทิ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบดิจิทัล วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ปริมาณการใช้ไฟฟ้า หรือวัดความผิดปกติ (Fault) ในระบบไฟฟ้า

ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control System) ระบบนี้คือการนำเอาคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการประมวลผลสูงหลายๆ เครื่อง มาต่อเข้ารวมกันเป็นคอมพิวเตอร์โครงข่าย (Cluster Computer) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรวมเอาความสามารถในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์มาใช้ใน งานที่ต้องอาศัยความละเอียดในการคำนวณที่ซับซ้อนและความเร็วในการประมวลผลที่สูงมาก

ระบบสื่อสาร (Communication System) มีลักษณะคล้ายคลึงกับอินเทอร์เน็ต ซึ่งมีเราเตอร์ (Router) ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูล ตามภาระงาน ตามคุณภาพของบริการ และตามกำลัง จากระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบฝังตัว กลับไปสู่ระบบควบคุมอัตโนมัติ



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ [7]

ประโยชน์ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ

ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ ทำให้ผู้ใช้บริการไฟฟ้ารู้ถึงสถานะการใช้ไฟฟ้าตามเวลาจริง ซึ่งจะทำให้สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจนว่าตนเองใช้ไฟฟ้าไปมากน้อยเพียงใด ในช่วงเวลาใด และจะต้องจ่ายค่าไฟเท่าใด จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เมื่อผู้บริโภคสามารถตรวจสอบค่าไฟฟ้าได้ตามเวลาจริง จะสามารถช่วยลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าลงได้ถึงร้อยละ 10-15 และยังมีแนวโน้มที่จะปรับเปลี่ยนนิสัยไปใช้ไฟฟ้า ไปเป็นช่วงที่มีการใช้ไฟรวม (Peak Load) น้อยกว่าปกติ ซึ่งจะมีการคิดค่าไฟสูงกว่าช่วงเวลาดังกล่าว นอกจากนี้ผู้ใช้ไฟฟ้ายังสามารถรู้ค่าไฟฟ้าสะสมที่เกิดขึ้นจากตัวมิเตอร์ได้โดยการเข้ามาดูทางอินเทอร์เน็ต

สำหรับผู้ใช้บริการไฟฟ้า จะสามารถบริหารจัดการภาระกำลังไฟฟ้า ที่จ่ายให้โหลดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถทราบค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าตามเวลาจริง ทำให้มีความสูญเสียน้อย สามารถลดต้นทุนในการสำรองไฟฟ้า และลดปัญหาไฟดับในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก

ผู้ใช้บริการไฟฟ้ายังสามารถทำการซื้อ ขายไฟฟ้ากับคู่สัญญา ซึ่งอาจจะเป็นผู้ใช้ไฟและผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กได้ โดยสามารถทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และถูกต้องเข้ากับโครงข่าย (On-Grid) ได้ตามเวลาจริง

ผู้ใช้บริการไฟฟ้าสามารถทราบตำแหน่งที่มีความผิดปกติทางไฟฟ้า (Fault) ได้ในทันทีที่เกิดเหตุ และสามารถส่งพนักงานออกไปทำการซ่อมได้ในเวลาอันสั้น ในกรณีผู้ใช้ไฟฟ้าค้างชำระค่าไฟฟ้าเกินกำหนด ผู้ให้บริการไฟฟ้ายังสามารถสั่งระงับการจ่ายไฟฟ้าจากระยะไกลได้โดยไม่ต้องเดินทางไปตรวจสอบ เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมโครงข่ายไฟฟ้า และลดการสูญเสียรายได้จากการจ่ายไฟฟ้าอีกด้วย

สำหรับผู้ใช้บริการไฟฟ้าในอนาคต ยังอาจปรับเปลี่ยนระบบการเรียกเก็บค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า จากเดิมซึ่งต้องให้พนักงานไปเดินจดค่ามิเตอร์ และส่งใบเรียกเก็บค่าไฟฟ้าเป็นรายเดือน ไปใช้ระบบตัดจ่ายจากบัญชี หรือใช้ระบบจ่ายล่วงหน้า (Pre-Paid) คล้ายการเติมเงินของโทรศัพท์ก็ได้ เนื่องจากค่าใช้ไฟฟ้าในแต่ละวันถูกป้อนกลับเข้าสู่คอมพิวเตอร์หลักของผู้ให้บริการไฟฟ้าตามเวลาจริง สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าหรือตัวแทนจำหน่ายไฟฟ้าก็สามารถใช้ประโยชน์จากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะนี้เช่นกัน คือ

สามารถลดต้นทุนในการสำรองกำลังไฟฟ้า โดยสามารถชะลอการลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ๆ เนื่องจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสามารถบริหารจัดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาได้ทันต่อสถานะความต้องการใช้ไฟฟ้า สามารถลดปัญหาไฟฟาดก หรือขาดหายบางช่วงเวลา นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาทางสังคม จากการต่อต้านการก่อสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ๆ ได้อีกด้วย

สามารถผสมผสานแหล่งกำเนิดพลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม เข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ชีวมวล ฯลฯ ได้ เนื่องจากระบบมีความชาญฉลาดในการตัดต่อแหล่งพลังงานทดแทนต่างๆ เข้ากับระบบส่งกำลังไฟฟ้าเดิม ตามสถานะการใช้งานจริง

สามารถควบคุมคุณภาพทางไฟฟ้า เช่น ค่าเพาเวอร์ แฟกเตอร์ ฮาร์มอนิกส์ ในระบบส่งจ่าย ให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและยอมรับได้

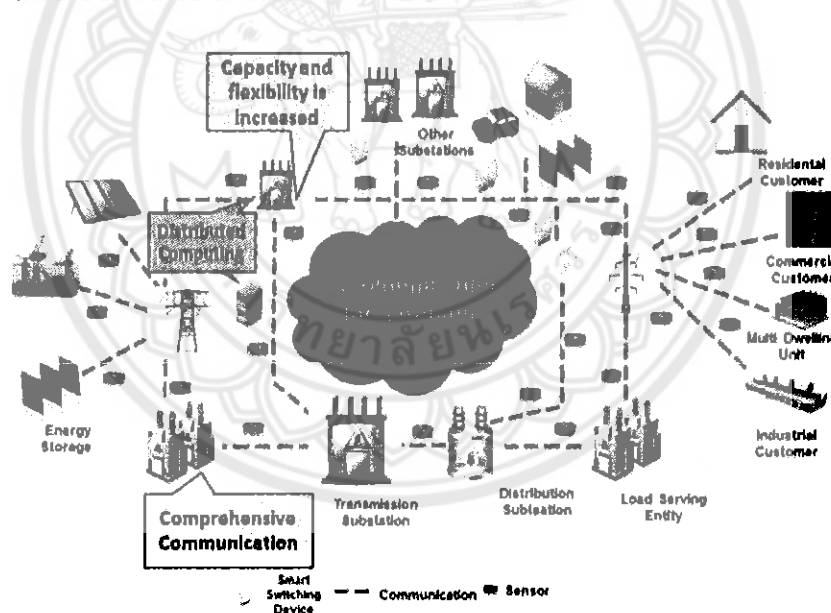
สามารถลดต้นทุนการว่าจ้าง พนักงานประจำที่ต้องออกไปบันทึกมิเตอร์ เนื่องจากสามารถอ่านค่าการใช้ไฟฟ้าผ่านระบบสื่อสารจากส่วนควบคุมกลาง

สามารถลดต้นทุนจากการส่งพนักงานซ่อมระบบ ไปสำรวจสถานะผิดปกติทางไฟฟ้า เนื่องจากระบบสามารถรายงานตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบจ่ายไฟได้อย่างแม่นยำ

สามารถวางแผนบริหารจัดการระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่าง รวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำ และสามารถจำกัดวงของพื้นที่ได้จึงลดความสูญเสียจากสถานะความเสี่ยงต่างๆ ที่ไม่คาดหมายได้ เช่น เมื่อเกิดการก่อวินาศกรรม หรือแผ่นดินไหว ระบบจะทำการตัดกระแสไฟฟ้าเฉพาะในบริเวณที่เกิดปัญหาแคบๆ โดยไม่ต้องทำการตัดไฟฟ้าทั้งเขต หรือทั้งชุมชน เพื่อแก้ไขปัญหา ซึ่งระบบแบบเดิมทำได้อย่างล่าช้า

ดังนั้น ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) จะเป็นเทคโนโลยีใหม่ ที่จะมาเปลี่ยนรูปแบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้มีความทันสมัยมากขึ้น รวมไปถึงการปรับพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าตามผลการวิเคราะห์และประมวลผลของ ซอฟต์แวร์ ทำให้ผู้ใช้บริการเห็นถึงประโยชน์ที่ได้รับและสามารถตระหนักใน ความสำคัญของการลดพลังงาน และใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ปัจจุบันหน่วยงานที่ให้บริการไฟฟ้าทั่วโลก ได้วางแผนที่จะปรับไปใช้มิเตอร์ไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Meter) และระบบสื่อสารสัญญาณต่างๆ ติดตามตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อส่งข้อมูลต่างๆกลับไปยังผู้ให้บริการไฟฟ้ามิเตอร์ไฟฟ้ารุ่นใหม่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการอ่านค่าจากมิเตอร์ ที่แต่เดิมต้องใช้พนักงาน ไปเดินอ่านค่าการใช้ของแต่ละเดือนทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้มาก ทั้งยังสามารถทราบค่าต่างๆแบบ เวลาจริง (Real Time) อีกด้วย นอกจากนี้ระบบสายส่งไฟฟ้าสมัยใหม่ยังมีการทำงานเป็นระบบโทรคมนาคม ไปพร้อมกันด้วยคือ มีการส่งสัญญาณข้อมูลดิจิทัลออกมาในสายส่งพร้อมกับกำลังไฟฟ้า เรียกระบบนี้ว่า ระบบสื่อสารในสายสาธารณะ (Public Line Communication System : PLC) ทำให้ในอนาคต เราสามารถรับภาพโทรทัศน์ หรือเสียงวิทยุโดยไม่จำเป็นต้องใช้สายอากาศ และสามารถใช้อินเตอร์เน็ตโดยไม่ จำเป็นต้องใช้สายโทรศัพท์หรือใช้ระบบไร้สาย อีกต่อไป นอกจากนี้ยังสามารถใช้สายไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วในบ้าน ควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านได้ถึง 5 ประเภท พร้อมๆ กัน อาทิ ควบคุมเครื่องปรับอากาศ เครื่องทำน้ำอุ่น เครื่องซักผ้า เครื่องอบผ้า เครื่องล้างจาน



รูปที่ 3 ระบบสื่อสารของระบบ Smart Grid [8]

สำหรับประเทศไทยหากจะเลือกเดินหน้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะหรือ (Smart Grid) ควรจะต้องคำนึงถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอย่างเหมาะสม ต้องส่งผลให้เกิดความมั่นคงด้านพลังงาน ต้องสามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานของประเทศ ด้วยการพัฒนาของประเทศไทยควรมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาพลังงานสะอาดและการสร้างเครือข่ายระบบไฟฟ้าที่มีความน่าเชื่อถือเป็นหลัก เนื่องจากการพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าจากเดิมไปสู่ความเป็นโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะนั้น จะต้องใช้เงินลงทุนจำนวนมาก และต้องวางแผนพัฒนาบุคลากรในระดับปฏิบัติการและให้ความรู้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า ให้ฉลาดคิด ฉลาดใช้ ให้ได้เสียก่อนจึงจะคุ้มค่ากับการลงทุน

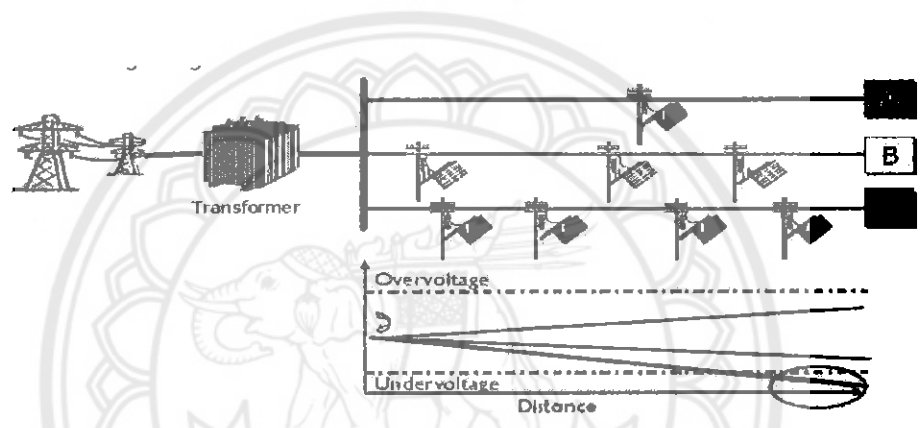
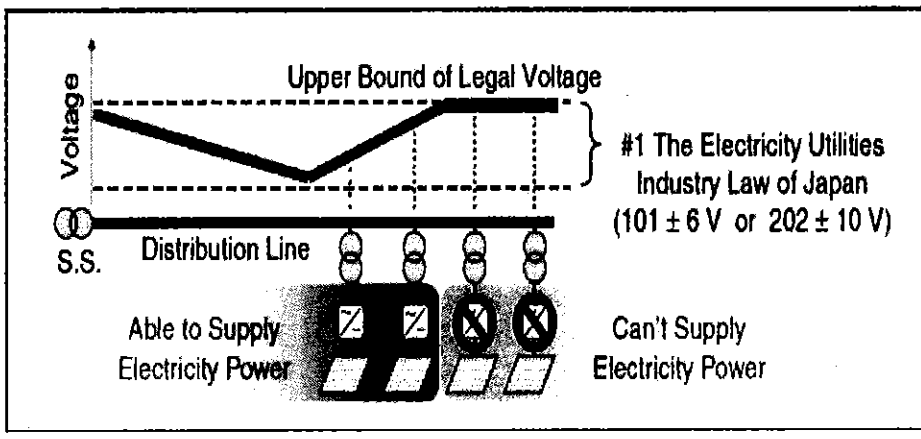
2.2 ผลกระทบที่เกิดจากการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก

จากการศึกษางานวิจัยในต่างประเทศพบว่า ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากในระบบสายส่งของการไฟฟ้าจะมีผลทำให้ตัวแปรทางด้านไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ความถี่ไฟฟ้า (Frequency) ฮาร์โมนิก (Harmonics) กระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไฟในสายส่ง (DC injection) เป็นต้น โดยรายละเอียดของตัวแปรทางไฟฟ้าที่มีผลต่อบรรยากาศส่งไฟฟ้ากรณีมีการเชื่อมต่อเข้าเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเข้ากับระบบสายส่ง

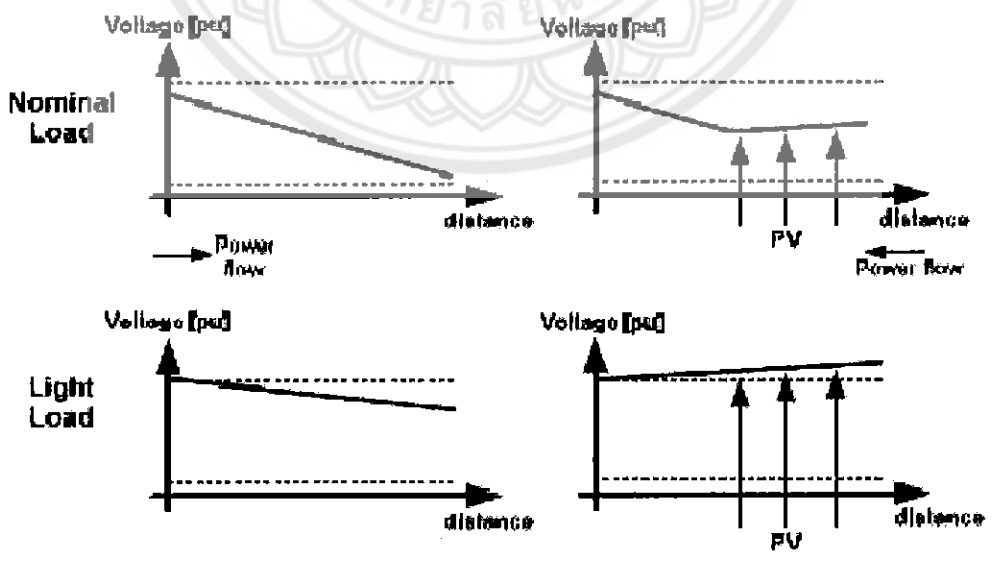
ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายหรือระบบสายส่ง [9]

ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมากกับระบบจำหน่ายจะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งในกรณีทั่วไปที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะส่งให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายมีแรงดันที่สูงขึ้น เพราะเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสายส่งส่วนใหญ่จะเป็นชนิด Current source จะผลักกระแสไฟฟ้าออกให้มากที่สุด กำลังไฟฟ้าที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าผลิตออกมาส่วนใหญ่จะเป็น Active Power ถึงแม้ว่าในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสูงขึ้น จะมีระดับมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณภาระทางไฟฟ้า (Load) ที่อยู่บริเวณใกล้กับตำแหน่งติดตั้ง กล่าวคือ ถ้าปริมาณภาระทางไฟฟ้าในบริเวณที่ติดตั้งมีสูงกว่ากำลังการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาก ก็จะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายต่ำลง (Voltage Drop) แต่ในทางกลับกันถ้ากำลังการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณสูงกว่าภาระทางไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าวก็จะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสูงขึ้น ในบางกรณีถ้าปริมาณกำลังการติดตั้งของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สูงกว่าปริมาณภาระทางไฟฟ้ามาก ก็จะส่งผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสูงมากอาจเกิดความเสียหายต่อภาระทางไฟฟ้าได้ แต่เครื่องแปลงกระแสที่ได้มาตรฐานก็จะมีระบบป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย เช่น ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายต่ำมาก เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายก็จะหยุดการทำงานและตัดตัวเองออกจากระบบจำหน่ายภายในระยะเวลาที่กำหนดเรียกว่า Low voltage disconnect แต่ในกรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสูงเกิน Grid Inverter ก็จะหยุดการทำงานและตัดตัวเองออกจากระบบจำหน่าย เรียกว่า High voltage disconnect เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดกับภาระทางไฟฟ้า (Load) และ อุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบจำหน่าย

กล่าวโดยสรุปคือ ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถส่งผลกระทบโดยตรงต่อระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4



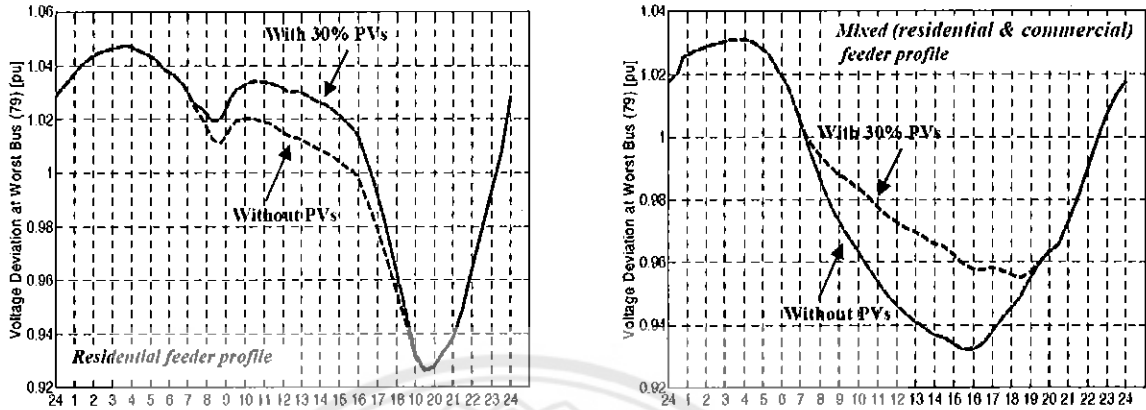
รูปที่ 4 ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกรณีติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ [9]



รูปที่ 5 ระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่มีและไม่มี การเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

จากผลงานวิจัยเห็นได้ชัดเจนว่ากรณีที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายจะส่งผลโดยตรงต่อระดับแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 6 สำนักหอสมุด

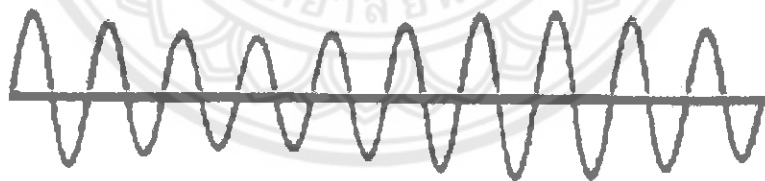
- 1 ส.ค. 2562



รูปที่ 6 ระดับแรงดันไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

แรงดันไฟฟ้ากระพือม (Voltage Fluctuation) [10,11,12]

ในการแปลงกระแสไฟฟ้ากระแสตรงจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย อาจจะทำให้เกิดแรงดันบริเวณจุดเชื่อมต่อของระบบจำหน่ายเกิดแรงดันกระพือมได้ แรงดันกระพือมชั่วขณะแบบไม่ต่อเนื่อง หรืออาจจะเรียกได้ว่า Flicker ผลของการเกิด Flicker จะส่งผลให้หลอดไฟกระพริบ ซึ่งลักษณะรูปคลื่น Sine wave ของ Flicker ดังแสดงในรูปที่ 7

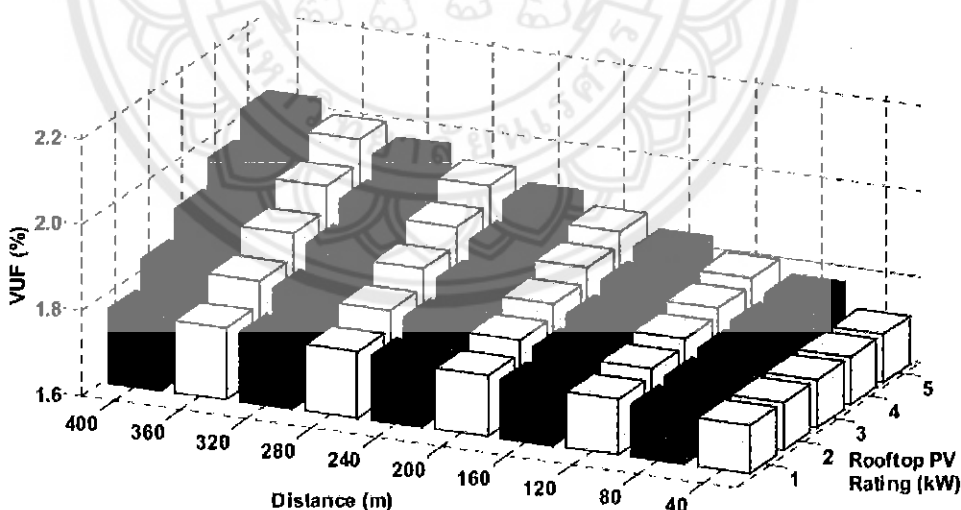


รูปที่ 7 รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้ากระพือม

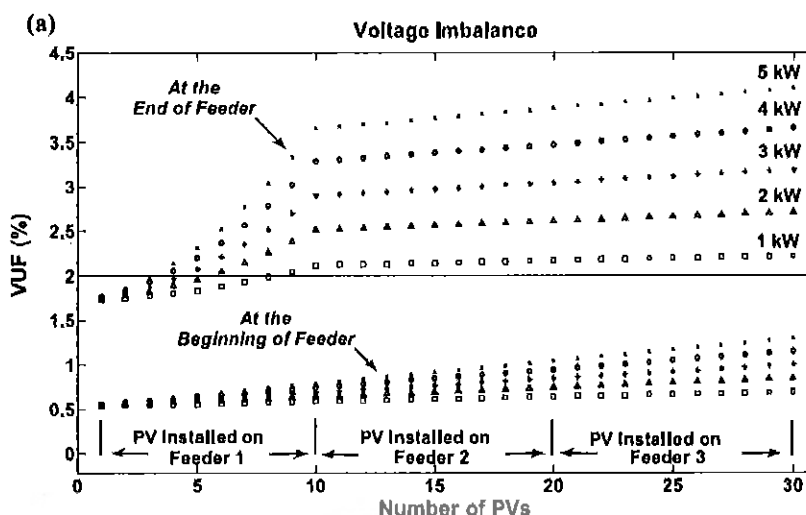
มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าในการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับการภาระทางไฟฟ้าและเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเอง ในงานวิจัยที่ขอยกตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วย มาตรฐาน IEC 61727 ข้อกำหนดในการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA Regulation) และ ข้อกำหนดการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง (MEA Regulation)

ความไม่สมดุลของระดับแรงดันไฟฟ้า (Unbalance Voltage) [9]

ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อมีการเชื่อมต่องานเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับ Feeder หรือ Bus bar ใดของระบบจำหน่ายจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของ feeder หรือ Bus bar นั้นมีแรงดันสูงขึ้น ปัญหาที่จะเกิดขึ้นก็คือ ปริมาณการติดตั้งของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีปริมาณไม่เท่ากันหรือใกล้เคียงกันในแต่ละ Feeder ก็ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ามีความไม่เท่ากันเกิด Unbalance Voltage ขึ้นในระบบจำหน่าย ในกรณีที่เครื่องแปลงกระแสเป็นชนิด 3 เฟส ก็จะสามารถลดค่า Unbalance Voltage ในแต่ละ Line ของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าได้ แต่หากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายเป็นชนิด 1 เฟส (Single Phase Inverter) ก็ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของระดับแรงดันไฟฟ้าในแต่ละ Line ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า หากเชื่อมต่อเข้า Line ใดรายหนึ่งจากระบบจำหน่ายส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าใน Line นั้นมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นก็จะแตกต่างจาก Line ที่ไม่มีการเชื่อมต่องานเซลล์แสงอาทิตย์เกิด Unbalance Voltage ขึ้น ผลของการเกิด Unbalance Voltage ก็ส่งผลต่อการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เป็นชนิด 3 เฟส อาจส่งผลให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด และส่งผลต่อความร้อนในระบบจำหน่ายส่งให้ความร้อนในระบบจำหน่ายสูงขึ้น อีกทั้งก็จะเกิดการสูญเสียในระบบจำหน่ายมากขึ้นเพราะหากเกิด Unbalance Voltage ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลใน Neutron มากขึ้น จากที่กล่าวมาในการยกยระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่องานเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณในการเชื่อมต่อของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แล้วยังขึ้นอยู่กับระยะทางในการเชื่อมต่องานเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย



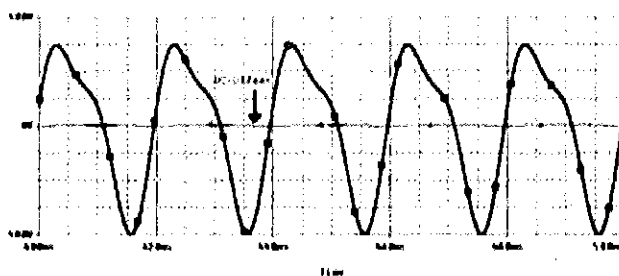
รูปที่ 8 กรณีศึกษา Unbalance Voltage กรณีติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ [9]



รูปที่ 9 กรณีสึกษา Unbalance Voltage กรณีติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละ Feeder [9]

การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Injection)

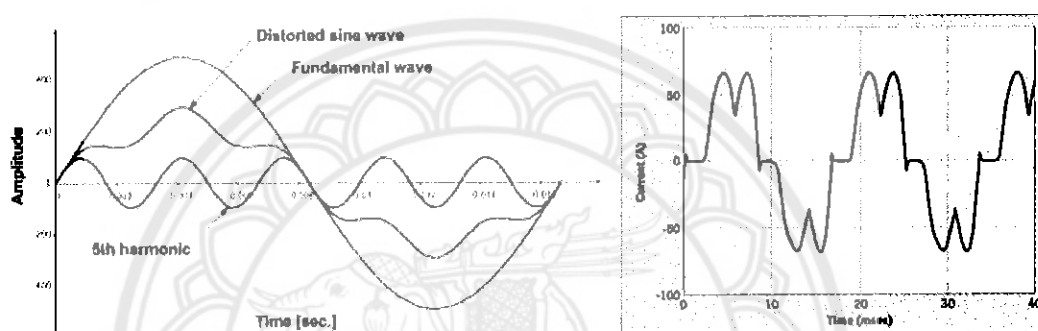
ปัจจุบันเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสายส่งได้พัฒนาเทคโนโลยีที่สูงมากขึ้น จากที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าต้องมีหม้อแปลง (Transformer Grid Inverter) แต่ในปัจจุบันส่วนใหญ่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสายส่งจะไม่มีหม้อแปลงติดอยู่ด้วย (Transformer less Grid inverter) จากทั้งสองกรณีที่กำลังกล่าวมาข้างต้นก็มีความแตกต่างกัน คือ ในกรณีที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแบบที่มีหม้อแปลงไฟฟ้าก็จะไม่มีปัญหาจากการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหลุดเข้าไปในระบบ เพราะหม้อแปลงทำหน้าที่แปลงไฟฟ้จาก DC เป็น AC ได้เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ แต่ในปัจจุบันเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายจะเป็นแบบไม่มีหม้อแปลง (Transformer less) ใช้หลักการ High frequency switching ในการเปลี่ยนรูปไฟฟ้จาก DC เป็น AC ซึ่งควบคุมด้วย Computer Soft ware ซึ่งจะไม่ใช้การแปลงไฟฟ้จาก DC เป็น AC ด้วยหม้อแปลง จึงส่งผลให้มีกระแสไฟฟ้กระแสตรงหลุดเข้าไปในระบบจำหน่ายได้ ผลกระทบที่เกิดจากการมีกระแสไฟฟ้กระแสตรงเข้าไปในระบบจำหน่าย จะส่งผลให้เกิดความร้อนในระบบที่สูงขึ้นและเพิ่มค่ากำลังไฟฟ้สูญเสียของหม้อแปลง และอาจทำให้เกิดการมุกร้อนของแท่งกราวด์ในระบบได้ ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานในการหลุดเข้าไปของกระแสไฟฟ้กระแสตรง เช่น มาตรฐาน IEC 61727 และ PEA , MEA regulation ได้กำหนดให้การจ่ายไฟฟ้กระแสตรงเข้าไปในระบบจำหน่ายได้ไม่เกินร้อยละ 0.5 ของกระแสพิคัดของอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 10 รูปคลื่น Sine wave ในกรณีที่มิไฟฟ้กระแสตรงหลุดเข้าไปในระบบ [9]

ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ (Harmonics) [9]

ในการเชื่อมต่อนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบจำหน่ายโดยผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่เป็นแบบ transformer less โดยอาศัยหลักการ High frequency switching ก็อาจจะส่งผลให้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถปลดปล่อย ความถี่ของ พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ทั้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า Harmonics current และ Harmonics voltage ซึ่งผลจาก Harmonics จะทำให้รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับผิดเพี้ยนไปจากเดิม ผลจากการที่รูปคลื่นไฟฟ้า Sine wave เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจะส่งผลเครื่องใช้ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าต่าง ๆ ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำงานผิดพลาด และอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เหล่านั้นได้ ตัวอย่างรูปคลื่น Sine wave ที่มี Harmonics แสดงดังรูปที่ 11



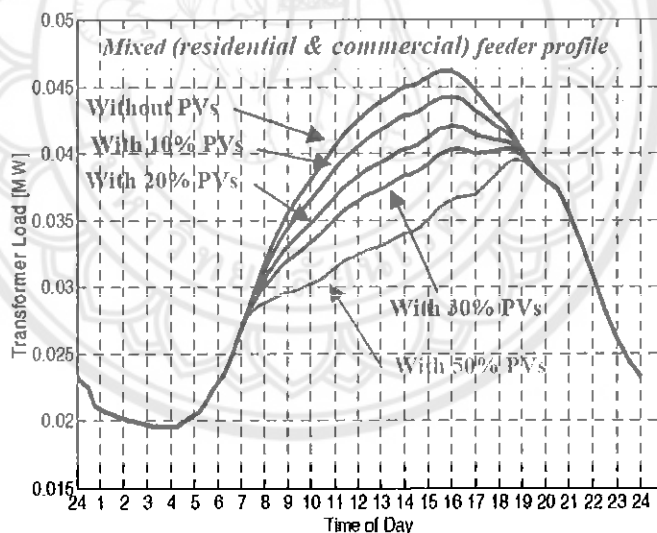
รูปที่ 11 รูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับที่มี Harmonics

ตารางที่ 1 ความเสียหายที่เกิดจาก Harmonics [9]

อุปกรณ์	ผลกระทบ
1. หม้อแปลง	<ul style="list-style-type: none"> ● ความร้อนเนื่องจากความสูญเสียเพิ่มขึ้นอันเกิดจาก Skin Effect ● ความสูญเสียเนื่องจาก Eddy Current และคลื่นแม่เหล็กกระเจายเพิ่มขึ้น
2. เซอร์คิตเบรกเกอร์และฟิวส์	<ul style="list-style-type: none"> ● ลดการตัดต่อแรง
3. สายเคเบิล	<ul style="list-style-type: none"> ● ความร้อนเนื่องจากความสูญเสียเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก Skin Effect และ Proximity Effect. ● กระแสไฟฟ้าในสายกลาง (Neutral) เพิ่มขึ้น
4. รีเลย์ป้องกัน	<ul style="list-style-type: none"> ● ทำงานผิดพลาด
5. หลอดไฟฟ้า	<ul style="list-style-type: none"> ● อายุการทำงานสั้นลง
6. มอเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> ● ความสูญเสียเนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้น ● อายุการทำงานสั้นลง
7. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	<ul style="list-style-type: none"> ● ทำงานผิดพลาด

ความไม่แน่นอนของการผลิตกำลังไฟฟ้า (Output power fluctuation)

ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายก็จะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนของ Power Flow ในระบบจำหน่าย เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคือ ในกรณีที่มีค่ารังสีอาทิตย์สูงระบบเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงเช่นกัน อีกในหนึ่งกรณีที่มีค่ารังสีอาทิตย์น้อยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยลงตามกัน ซึ่งในกรณีนี้ก็จะรวมถึงในกรณีที่มีเมฆผ่านระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะส่งผลโดยตรงให้กำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง จากที่กล่าวมาเบื้องต้น กำลังไฟฟ้าที่ถูส่งเข้าไปในระบบจึงเกิดความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศบริเวณที่ติดตั้งระบบดังกล่าว ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายในกรณีที่ไม่มีความแน่นอนในการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะส่งผลกระทบต่อ การ Swing ของกำลังไฟฟ้าในระบบสายส่ง อาจเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ในกรณีที่มีโหลดคงที่แต่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์สูง ก็จะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นกัน แต่ในทางกลับกันกรณีที่มีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้น้อยก็จะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายต่ำลง หรือในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อย ๆ ก็อาจจะส่งผลต่อ Voltage Flickers แต่ถึงอย่างไรในการเชื่อมต่อบรรณผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะส่งให้สามารถลดกำลังไฟฟ้าในช่วง Peak load ได้ ดังแสดงในรูปที่ 12

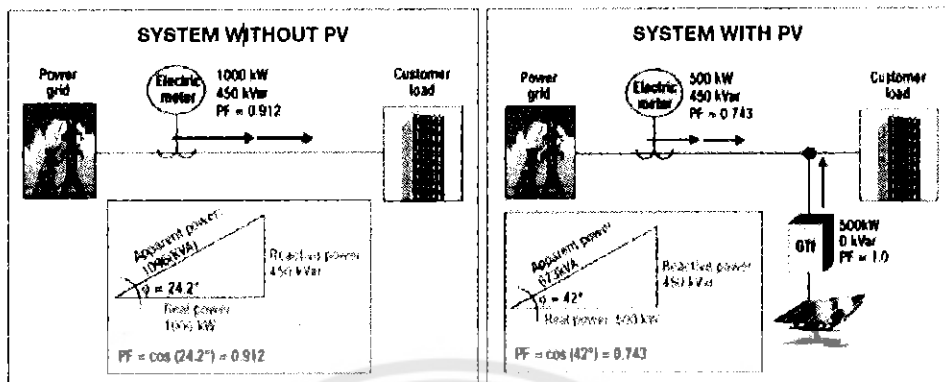


รูปที่ 12 การช่วย Supply load ของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ [9]

ผลกระทบที่อาจจะเกิดกับหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจำหน่าย (Effect on distribution transformer)

ในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่จะถูกตั้งค่าที่ Power Factor (PF) สูง ๆ หรือเข้าใกล้ 1 มากที่สุด เพื่อที่จะให้ระบบ ผลิต Active power มากที่สุดเท่าที่ระบบจะทำได้โดยไม่คำนึงถึง Reactive power ในกรณีที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ Power Factor สูง ๆ จะส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจำหน่ายด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ในกรณีที่ Reactive Load

มีปริมาณสูงขึ้นในระบบจำหน่ายก็จะส่งผลให้ PF ในระบบจำหน่ายต่ำลง ก็อาจจะมีผลให้หม้อแปลงไฟฟ้าของระบบจำหน่ายทำงานผิดพลาดได้ ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายกรณีที่มีการเชื่อมต่อ PV system แสดงดังรูปที่ 13

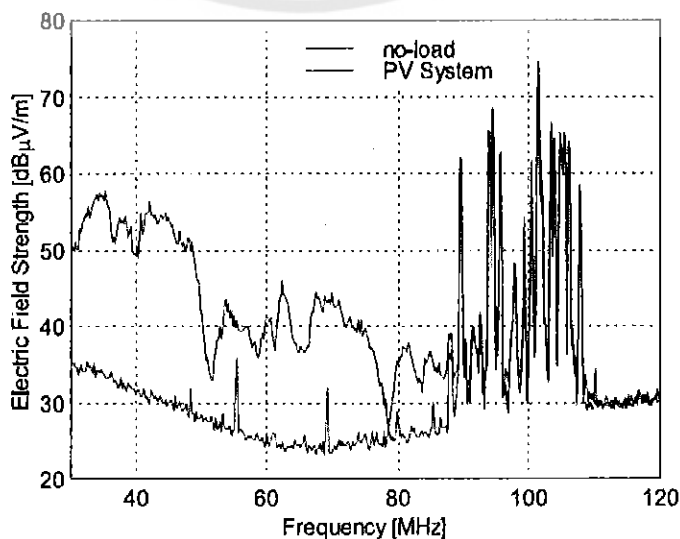


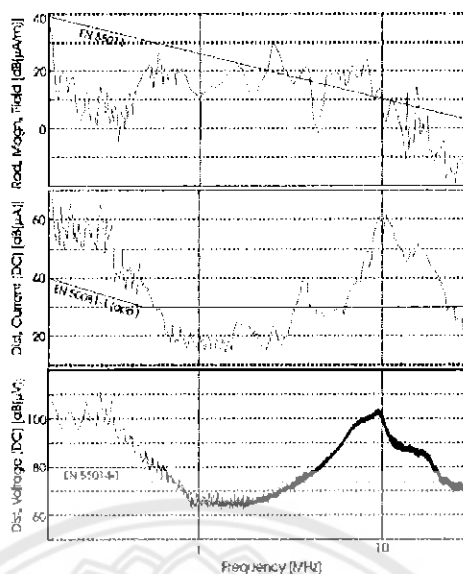
รูปที่ 13 ผลกระทบที่เกิดจาก Power Factor ในระบบจำหน่าย [9]

จากรูปเห็นได้ชัดเจนว่าในกรณีที่มีการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ จะส่งผลโดยตรงต่อค่า Power Factor ของระบบจำหน่าย ดังนั้นในการที่จะเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเข้ากับระบบจำหน่ายเครื่องแปลงกระแสจะต้องผ่านมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ในเรื่องของ PF โดยจะต้องสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ +0.9 จนถึง -0.9 เป็นต้น

ผลกระทบของ Electromagnetic compatibility (EMC) [9]

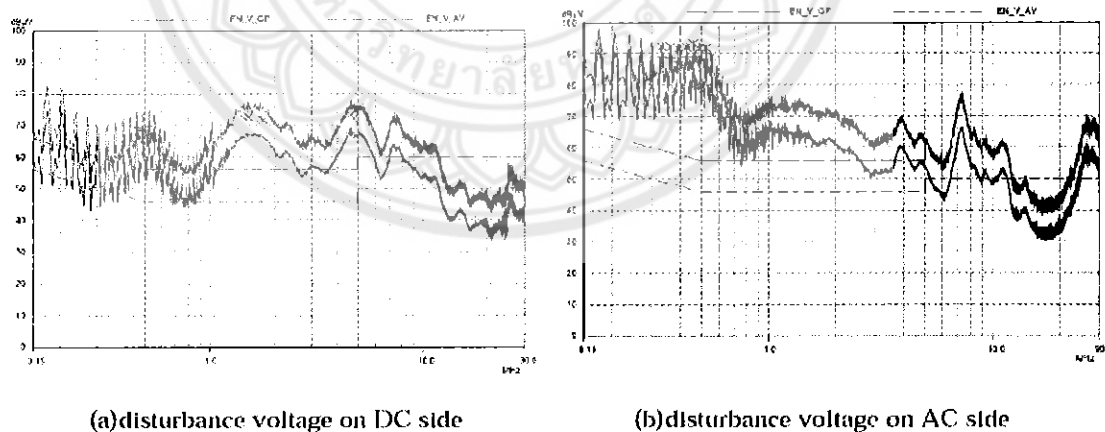
ในการเปลี่ยนรูปไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยเครื่องแปลงกระแสแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย (Grid Inverter) ในปัจจุบันอาศัยหลักการ High frequency switching ก็จะมีส่งผลให้เกิดผลกระทบของ Electromagnetic เช่น การแพร่กระจายของความถี่ (Emissions at radio-frequency) ออกจากตัวเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าอาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) กับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์ได้





รูปที่ 14 ผลกระทบที่เกิดจาก EMC [9]

มาตรฐานหรือข้อกำหนดในการเชื่อมต่อเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA regulation) และ ของการไฟฟ้านครหลวง (MEA regulation) ยังไม่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับมาตรฐานการยินยอมให้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าปลดปล่อย EMC ออกมาเท่าใด จากการตรวจวัดของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งาน Inverter บางตัวยังมีค่าการปลดปล่อย EMC สูงกว่ามาตรฐาน จากการศึกษาผลกระทบจากการปลดปล่อย EMC ของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายที่ติดตั้ง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทนพบว่า เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ามีการปลดปล่อย EMC เกินมาตรฐานดังนี้



รูปที่ 15 ผลกระทบจาก Disturbance voltage on DC and DC side จากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

Disturbance ของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายยังมีผลของ EMC ในระบบสายไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ยังมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งค่ามาตรฐานที่ใช้อ้างอิงค่า EMC จากอ้างอิงจาก มาตรฐาน EN 55022 และ EN 61000-6-3 ดังแสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 Disturbance voltage for EN 55022

Frequency (MHz)	Limits, dB(μ V)	
	Quasi-peak	Average
0.15 – 0.50	79	66
0.5 - 30	73	60

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pertti Jarventausta Sami Repo, Antti Rautiainen และ Jarmo Partanen [10] ได้นำเสนอ smart grid ในส่วนของระบบจำหน่าย การจัดการของระบบจำหน่าย และมีเตอร์อัจฉริยะ (AMR) โดยใช้การจัดการเน็ตเวิร์ค การตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้า การประยุกต์ใช้ power electronics ในระบบจำหน่าย รถไฟฟ้าในส่วนของระบบ smart grid และความถี่ของการควบคุมโหลด ซึ่งคณะผู้วิจัยได้พัฒนามิเตอร์อัจฉริยะ (AMR) ที่ใช้ในการอ่านปริมาณการใช้พลังงาน แนวโน้มปริมาณการใช้พลังงาน ฟังก์ชันพัฒนาขึ้นจากระบบจำหน่ายทั่วไป และประยุกต์ใช้ power electronics ในระบบจำหน่าย มิเตอร์อัจฉริยะ (AMR) เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น เพื่อให้สามารถทำงานได้สองทาง ระหว่างฐานข้อมูล ระบบจำหน่าย ระบบส่ง ผู้บริการและผู้ผลิตไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้ระบบ smart grid เข้ามาช่วยบริหารจัดการและพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้บริโภค และการผลิตไฟฟ้าของผู้ให้บริการ

Luca Ardito, Giuseppe Procaccianti, Giuseppe Menga and Maurizio Morisio [11] ได้ทำการศึกษาระบบโครงข่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในปัจจุบันที่มีการใช้พลังงานทางเลือก ความต้องการใช้ไฟฟ้าและนโยบายการประหยัดพลังงาน นอกจากนี้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารมีความน่าเชื่อถือและสามารถนำมาสนับสนุนแนวคิดใหม่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ) ในงานนี้มีการวิเคราะห์การใช้งานโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะในทางเทคนิค การจัดการ ความปลอดภัย และการเพิ่มประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังให้ภาพรวมของการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะส่วนใหญ่ของสหภาพยุโรป และได้ทำการสำรวจโครงการโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ นำเสนอการจัดการด้านเทคโนโลยี และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม

Rosario Miceli [12] ได้ทำการศึกษาแนวคิดการจัดการพลังงานและการวิวัฒนาการของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ จากการจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะต้องมีวิวัฒนาการและการพัฒนาที่เกี่ยวข้องหลายด้าน ประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาและวิจัยมีดังนี้คือ ด้านเทคนิค: เกณฑ์ใหม่สำหรับการวางแผนระบบไฟฟ้า การออกแบบ การควบคุมและการบริหารจัดการ ด้านเทคโนโลยี: วิวัฒนาการของชิ้นส่วนอุปกรณ์และระบบ (ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์) ด้านเศรษฐกิจและนโยบายการกำกับดูแล: ตลาดเสรีบทบาทและความรับผิดชอบของผู้เกี่ยวข้อง และด้านสังคมนโยบายด้านพลังงานที่ยั่งยืน การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรโดยมีการจัดหาความหลากหลายของพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและการให้บริการและลดค่าใช้จ่ายสำหรับผู้ใช้

สมพล โคศรี และ บุญยัง ปลั่งกลาง [13] ได้นำเสนอระบบควบคุมและจัดการพลังงานสมาร์ทกริดสำหรับระบบไฟฟ้าแบบแยกเดี่ยวจากพลังงานทดแทน โดยระบบที่ใช้เป็นแบบผสมผสานประกอบด้วย

เครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบเตอรี และชุดพลังงานไฟฟ้าสำรองที่สามารถจ่ายพลังงานที่เหลือจากการจ่ายโหลดได้พลังงานที่กักเก็บจะถูกนำมาใช้ในเวลากลางคืนระบบจะจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดบ้านที่อยู่อาศัยตลอดเวลาเมื่อพลังงานแบบเตอรีต่ำลงได้ขนาดตามพิกัดที่ปรับตั้งไว้ชุดพลังงานไฟฟ้าสำรองจะถูกต่อเข้ากับระบบโดยอัตโนมัติและจ่ายพลังงานให้กับระบบและประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานที่เหลือจนเต็มจึงตดการทำงานออกกระบบ จากการออกแบบระบบด้วยการคำนวณจากพื้นฐานพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าและการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Homer ในเบื้องต้นโดยเลือกพิกัดแสงอาทิตย์ที่ตติงเฉลิมพระเกียรติ80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย ในการจำลองเหตุการณ์มีการเก็บค่าข้อมูลจริงเพื่อนำมาความคุมเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์และมีการควบคุมการชดุดต่อชุดพลังงานไฟฟ้าสำรอง หลังจากการคำนวณและจำลองเหตุการณ์ระบบเพื่อหาความสมดุได้เร็วเสร็จ จึงได้ตติตั้งตามการออกแบบระบบประกอบด้วย ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ใช้สำหรับวัดรังสีแสงอาทิตย์เป็นข้อมูลพื้นฐานเครื่องมีวัดอุณหภูมิแบบเตอรี (Battery Sensor) ขนาดเครื่องจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1.8 kWp แบบเตอรีพิกัดขนาด 18 kW Bi-directional Inverter ขนาด 2.2 kW ขนาดของภาระทางไฟฟ้าสูงสุดที่ 1 kW และระบบวัดบันทึกแสดงผลที่ออกแบบเป็นพิเศษแบบ Real-time สามารถที่จะบันทึกค่าต่างๆและประเมินผลและสั่งการทำงานขั้นต้นได้ จากผลการทดสอบจริงและจากการ Simulation พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่การทำงานของแบบเตอรีในการ Simulation พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกันแต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่การทำงานของแบบเตอรีในการ Simulation สถานะของแบบเตอรีอยู่ที่ 100% โดยในการทดสอบจริงสถานะของแบบเตอรีอยู่ที่ 40% จากกราฟพฤติกรรมการใช้พลังงานของระบบจะเห็นว่าการใช้พลังงานตลอดทั้งวัน เริ่มจากเวลา 0.00-03.00 น.จะเป็นช่วงที่แบบเตอรีมีการจ่ายโหลดที่ 600 W เมื่อเวลา 03.30-07.00 น.จะเห็นว่าการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการจ่ายโหลดและชาร์ตแบบเตอรีจึงทำให้กราฟสูงขึ้นเกือบ2เท่าของโหลดประมาณ 1900 W และเครื่องกำเนิดจะทำงานอีกครั้งเมื่อเวลา 19.30-23.30 น.เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มิโหลดสูงสุดที่ 1 kW ทำให้แบบเตอรีจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ไม่เพียงพอและในเวลากลางวันตั้งแต่ 07.00-18.00 น.จะเป็นช่วงการทำงานของ PV ที่จะจ่ายโหลดและชาร์ตแบบเตอรีและบางครั้งของปีเมื่อแสงน้อยอาจจะมีการช่วยจ่ายโหลดของแบบเตอรีจากผลการจำลองระบบผสมผสานจะเห็นว่ามีารโหลดได้อย่างต่อเนื่อง

ปรเมษฐ์ จิตเจนการ และสุรินทร์ คำฝอย [14] ได้นำเสนอเครื่องประจุแบบเตอรีสำหรับพาหะนำพลังงานไฟฟ้าสำรองรับการใช้งานระบบสำรองพลังงานในโครงข่ายอัจฉริยะ โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและพาหะพลังงานไฟฟ้าจะเป็นกุญแจสำคัญในการเปลี่ยนแปลงระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยอุปกรณ์สำคัญที่จะช่วยในการเปลี่ยนแปลงนี้คือเครื่องอัดประจุแบบเตอรีสำหรับพาหะสำหรับพลังงานไฟฟ้าซึ่งต้องมีคุณสมบัติในการอัดประจุได้รวดเร็วและความสามารถในการส่งผ่านพลังงานได้ใน2ทิศทางโดยวงจรเครื่องอัดประจุแบบเตอรีที่นำเสนอจะประกอบไปด้วยมูลของสวิตซ์ซึ่งมี 6 สวิตซ์ และมีการแยกกราวนทางไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า โดยโมดูลนี้จะทำหน้าที่เป็นฟลูบริตจคอนเวอร์เตอร์และซีดี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์โดยในการอัดประจุแบบเตอรีจะใช้เทคนิคการอัดประจุแบบเตอรีด้วยกระแสไฟฟ้าคงที่และแรงดันไฟฟ้าคงที่ และในการจ่ายกลับเครื่องอัดประจุสามารถดึงพลังงานจากแบบเตอรีจ่ายกลับสู่ภาระทางไฟฟ้าแบบอิสระด้วยแรงงานไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ที่มีความถี่เท่ากับ 50 เฮิร์ต โดยโปรแกรม PSIM 9.0.3 ได้ถูกมาใช้ในการจำลองทำงานของเครื่องอัดประจุต้นแบบและได้พัฒนาเครื่องอัดประจุต้นแบบขนาด1กิโลวัตต์ เพื่อทำการทดสอบ จากผลการทดสอบเครื่องอัดประจุแบบเตอรีแสดงให้เห็นว่า ในการอัดประจุแบบเตอรีเครื่องอัด

ประจุแบตเตอรี่ต้นแบบสามารถอัดประจุด้วยกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด และในการทำงานแบบจ่ายกลับจะพบว่าค่าความผิดพลาดของแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลลัพธ์ของการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องอัดประจุที่นำเสนอสามารถสนับสนุนการใช้งานร่วมกับพาหนะพลังงานไฟฟ้าและเทคโนโลยีโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ

Manuela Sechilariu, Baochao Wang และ Fabrice Locment [15] ได้ทำการออกแบบ และ การใช้งานอาคารผสมผสานแบบ Microgrid (Building-Integrated Micro Grid; BIMG) เป็นการผสมผสานระหว่างระบบ BIPV กับระบบโครงข่ายอัจฉริยะ (Smart grid) ด้วยวิธีการประยุกต์ระบบ BIPV ระบบสะสมพลังงานและระบบ Smart grid มาเชื่อมต่อโยงกัน ซึ่งกระบวนการ power balancing โดยใช้ ระบบ Smart grid เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ในการลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของระบบจำหน่าย เพื่อหลีกเลี่ยงช่วงที่ระบบจำหน่ายมีปัญหา และใช้ไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ซึ่งนำกระบวนการจัดการพลังงานมาใช้ในการทำงานระบบกระบวนการ โดยพิจารณาจากช่วงเวลาของระบบจำหน่าย ข้อจำกัดของระบบจำหน่าย ระบบสะสมพลังงาน เครื่องใช้ไฟฟ้าและระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากการศึกษา พบว่าจากจำลองตัวอย่างในการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการ power balancing เชื่อมโยงกับ ความต้องการพลังงานไฟฟ้า และสถานะที่ระบบจำหน่ายมีปัญหา การประยุกต์ใช้กระบวนการจัดการพลังงานสามารถทำได้ง่ายและสามารถผสมผสานได้ดีเหมาะสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายขนาดเล็ก และคณะผู้จะมีกรขยายผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยการทำนายความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องใช้ไฟฟ้าล่วงหน้าต่อไป

LI Bao-shu และ GE Yu-min [16] ได้ทำการศึกษามลกระทบของคุณภาพไฟฟ้าที่ส่งผลต่อโหลด โดยทำการปรับปรุงโหลด ให้เป็น smart load แล้วปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าโดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เทคโนโลยี ดิจิตอลเทคโนโลยีและข้อมูล ในขณะที่เดียวกันจะมุ่งเน้นพฤติกรรมของโหลด เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้เหมาะสมกับพฤติกรรมของโหลด จากการศึกษาคณะผู้วิจัยได้ใช้ระบบ smart grid เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการปรับปรุงฮามอนิกส์ แรงดัน และสัญญาณรบกวนต่างๆ ซึ่งส่งผลทำให้คุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น และทำให้โหลดมีประสิทธิภาพดีขึ้นตามไปด้วย

Toshiyulu Yamaguchi, Masanao Kawakami, Keiichi Kitano, Shigeyasu Nakagawa, Tetsuro Tokoro, Takumi Nakano, Kiyoteru Hayama and Hidemori Ohyama [17] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตออกมาได้ โดยจะศึกษาค่ารังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีผลต่อประสิทธิภาพของพลังงานสำหรับระบบที่ติดตั้งในทิศเหนือกับทิศใต้เป็นเวลา 1 ปีของระบบที่ขนาด 40 kW ซึ่งทิศเหนือและทิศใต้มีค่ารังสีดวงอาทิตย์โดยเฉลี่ย 3.14 kWh/m²·day และ 4.59 kWh/m²·day ตามลำดับ และอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศเหนือจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทิศใต้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตั้งแต่ 92.7 % และ 68.3 % ตามลำดับ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมายังโลกโดยเฉลี่ยใน 1 เดือน จากมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 95.4 % จนถึง 32.1 % และค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมายังโลกโดยเฉลี่ยใน 1 ปี เท่ากับ 65.1 % จากการศึกษาจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตออกมาได้ต่อเดือนที่ตั้งติดในทิศเหนือต่ออัตราส่วนของพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตออกมาได้ต่อเดือนที่ตั้งติดในทิศใต้มีอัตราส่วนตั้งแต่ 96.4 % จนถึง 32.8 % และอัตราส่วนต่อปีเท่ากับ 66.4 %

ตารางที่ 3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้เขียน	หัวข้อ	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้รับ
Pertti Jarventausta and et al.	Smart grid power system control in distributed generation environment	นำเสนอ smart grid ในส่วนของระบบจำหน่าย การจัดการของระบบจำหน่าย และมีเตอร์อัจฉริยะ (AMR) โดยใช้การจัดการเน็ตเวิร์ค การตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้า การประยุกต์ใช้ power electronics ในระบบจำหน่าย รถไฟฟ้าในส่วนของระบบ smart grid และความถี่ของการควบคุมโหลด	คณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบอัตโนมัติรีเลย์อัตโนมัติ (AMR) ที่ใช้ในการอ่านปริมาณการใช้พลังงาน แนวโน้มปริมาณการใช้พลังงาน ฟังก์ชันพัฒนาขึ้นจากระบบจำหน่ายทั่วไป และประยุกต์ใช้ power electronics ในระบบจำหน่าย ระบบอัตโนมัติรีเลย์อัตโนมัติ (AMR) เป็นอุปกรณ์ที่พัฒนามา เพื่อให้สามารถทำงานได้สองทาง ระหว่างฐานข้อมูล ระบบจำหน่าย ระบบส่ง ผู้บริการและผู้ผลิตไฟฟ้า ซึ่งสามารถใช้ระบบ smart grid เข้ามาช่วยบริหารจัดการและพฤติกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้บริโภค และการผลิตไฟฟ้าของผู้ให้บริการ
Luca Ardito and et al.	Smart Grid Technologies in Europe	ทำการศึกษาระบบโครงข่ายไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในปัจจุบันที่มีการใช้พลังงานทางเลือก ความต้องการใช้ไฟฟ้าและนโยบายการประหยัดพลังงาน	การวิเคราะห์การใช้งานโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะในทางเทคนิค การจัดการ ความปลอดภัย และการเพิ่มประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังให้ภาพรวมของการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะส่วนใหญ่ของสหภาพยุโรป และได้ทำการสำรวจโครงการโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ นำเสนอการจัดการด้านเทคโนโลยี และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม
Rosario Miceli	Energy Management and Smart Grids	ศึกษาแนวคิดการจัดการพลังงานและการวิวัฒนาการของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ จากการศึกษาจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะต้องมีวิวัฒนาการและการพัฒนาที่เกี่ยวข้องหลายด้าน	ด้านเทคนิค: เทคโนโลยีใหม่สำหรับการวางแผนระบบไฟฟ้า การออกแบบ การควบคุมและการบริหารจัดการ ด้านเทคโนโลยี: วิวัฒนาการของชิ้นส่วนอุปกรณ์และระบบ (ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์) ด้านเศรษฐกิจและนโยบายการกำกับดูแล: ตลาดเสรี บทบาทและความรับผิดชอบของผู้เกี่ยวข้อง และด้านสังคมนโยบายด้านพลังงานที่ยั่งยืน การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรโดยมีการจัดหาความหลากหลายของพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและการให้บริการและลดค่าใช้จ่ายสำหรับผู้ใช้

ผู้เขียน	หัวข้อ	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้รับ
สมพล โคศรี และ บุญยัง ปลั่งกลาง	ระบบควบคุมและจัด การพลังงานสมาร์ทกริด สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบ แยกเดี่ยวจากพลังงานทดแทน	นำเสนอระบบควบคุมและจัด การพลังงานสมาร์ทกริดสำหรับ ระบบไฟฟ้าแบบแยกเดี่ยวจาก พลังงานทดแทน	การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำการ จ่ายโหลดและชาร์ตแบตเตอรี่จึงทำให้กราฟ สูงขึ้นเกือบ2เท่าของโหลดประมาณ1900 W และเครื่องกำเนิดจะทำงานอีกครั้งเมื่อเวลา 19.30-23.30 น. เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ มีโหลดสูงสุดที่ 1 kW ทำให้แบตเตอรี่จ่าย กำลังไฟฟ้าได้ไม่เพียงพอและในเวลา กลางวันตั้งแต่ 07.00-18.00 น.จะเป็นช่วง การทำงานของ PV ที่จ่ายโหลดและชาร์ต แบตเตอรี่และบางครั้งของปีเมื่อแสงน้อย อาจจะมีการช่วยจ่ายโหลดของแบตเตอรี่ จากผลการจำลองระบบผสมผสานจะเห็นว่า มีการโหลดได้อย่างต่อเนื่อง
ประเมษฐ์ จิตเจณ การ และคณะ	เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ สำหรับพาหนะพลังงานไฟฟ้า รองรับการใช้งานระบบสำรอง พลังงานในโครงข่ายอัจฉริยะ	นำเสนอเครื่องประจุแบตเตอรี่สำ หรับพาหนะนำพลังงานไฟฟ้า รองรับการใช้งานระบบสำรอง พลังงานในโครงข่ายอัจฉริยะ โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและ พาหนะพลังงานไฟฟ้า	ผลการทดสอบเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ แสดงให้เห็นว่า ในการอัดประจุแบตเตอรี่ เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ต้นแบบสามารถอัด ประจุด้วยกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ กำหนด และในการทำงานแบบจ่ายกลับจะ พบว่าค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าจะ อยู่ประมาณ4 เฮอร์เซ็นต์ ซึ่งผลลัพธ์ของการ ทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องอัดประจุที่ นำเสนอสามารถสนับสนุนการใช้งานร่วมกับ พาหนะพลังงานไฟฟ้าและเทคโนโลยี โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ

ผู้เขียน	หัวข้อ	ตัวแปรที่ทำการศึกษา	ผลที่ได้รับ
ณัฐวุฒิ ชาว สะอาด และคณะ	การศึกษาพลังงานไฟฟ้าที่แผง เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้รายปี ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง	ทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่า พลังงานไฟฟ้าที่แผงเซลล์ แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้เป็น รายปี	พลังงานไฟฟ้าที่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si p-Si และ HIT สามารถผลิตได้ ในปี 2548 มีค่าเท่ากับ 885 739 และ 798 kWh/kWp ในปี 2549 มีค่าเท่ากับ 1,891 1,676 และ 1,779 kWh/kWp ในปี 2550 มีค่าเท่ากับ 1,761 1,604 และ 1,703 kWh/kWp และในปี 2551 มีค่าเท่ากับ 1,670 1,496 และ 1,583 kWh/kWp ตามลำดับ
Ewan D. Dunlop	LIFETIME PERFORMANCE OF CRYSTALLINE SILICON PV MODULES.	ประสิทธิภาพของเทคโนโลยี ซิลิกอน	ผลกระทบของการลดลงของประสิทธิภาพ ของพลังงานขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซิลิกอน
Toshiyulu Yamaguchi and et al.	Data analysis on performance of PV system installed in south and north directions	ประสิทธิภาพของพลังงานที่แผง เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิต ออกมาได้ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิของแผงเซลล์ แสงอาทิตย์	อัตราส่วนของพลังงานที่แผงเซลล์ แสงอาทิตย์สามารถผลิตออกมาได้ต่อเดือน ที่ตั้งติดตั้งในทิศเหนือต่ออัตราส่วนของ พลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิต ออกมาได้ต่อเดือนที่ตั้งติดตั้งในทิศใต้ มี อัตราส่วนตั้งแต่ 96.4 % จนถึง 32.8 % และอัตราส่วนต่อปีเท่ากับ 66.4 %
Manuela Sechilariu, and et al.	Building-integrated microgrid: Advanced local energy management for forthcoming smart power grid communication	ทำการออกแบบ และการใช้งาน อาคารผสมผสานแบบ microgrid (Building- Integrated Micro Grid; BIMG)	การทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการ power balancing เชื่อมโยงกับ ความ ต้องการพลังงานไฟฟ้า และสภาวะที่ระบบ จำหน่ายมีปัญหา การประยุกต์ใช้ กระบวนการจัดการพลังงานสามารถทำได้ ง่ายและสามารถผสมผสานได้ดีเหมาะสำหรับ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแบบเชื่อมต่อ เข้ากับระบบจำหน่ายขนาดเล็ก และคณะผู้จะมี การขยายผลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ พลังงานไฟฟ้าโดยการหันมายกความต้องการ พลังงานไฟฟ้าจากเครื่องใช้ไฟฟ้าล่วงหน้า ต่อไป
LI Bao-shu and GE Yu-min	Improving Power Quality by Smart Load	ทำการศึกษผลกระทบของ คุณภาพไฟฟ้าที่ส่งผลต่อโหลด	คณะผู้วิจัยได้ใช้ระบบ smart grid เป็น เครื่องมือที่ใช้ในการปรับปรุงฮาร์มอนิกส์ แรงดัน และสัญญาณรบกวนต่างๆ ซึ่งส่งผล ทำให้คุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น และทำให้โหลดมี ประสิทธิภาพดีขึ้นตามไปด้วย

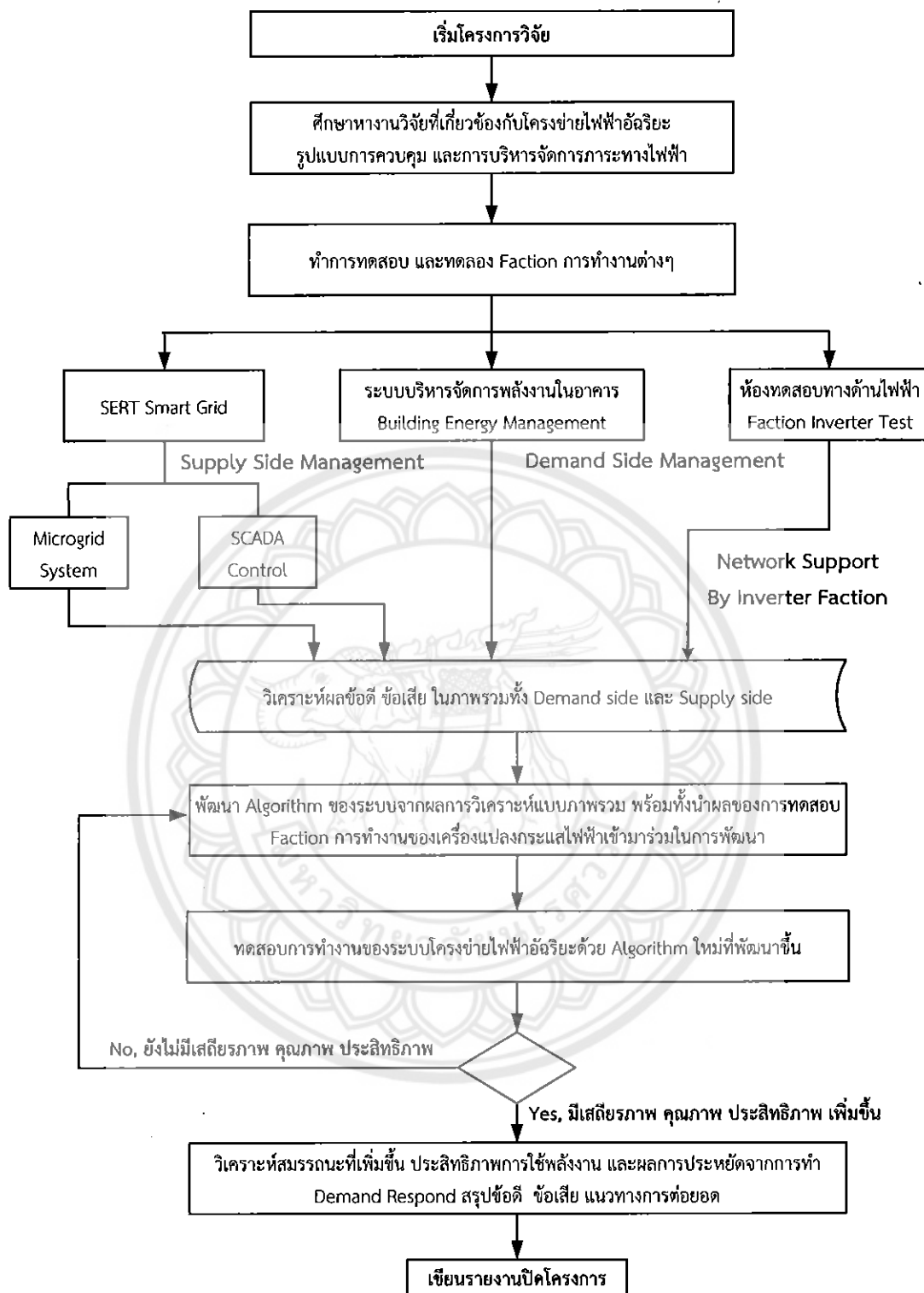
บทที่ 3
ระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ระเบียบวิธีการวิจัยของโครงการวิจัย ฯ นี้ มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบโครงข่ายอัจฉริยะ (Smart Grid) และระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา Algorithm ในการบริหารจัดการ Supply และ Demand
- เมื่อทำการศึกษาเอกสารงานวิจัยต่างๆเรียบร้อยแล้ว ทำการเก็บข้อมูลของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทางด้านปริมาณการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 4 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ 1 ระบบ PV campus power ขนาด 350 kW ระบบที่ 2 ระบบ PV Micro grid ขนาด 120 kW ระบบที่ 3 ระบบ PV grid connected system ขนาด 10 kW และระบบที่ 3 ระบบ PV roof connected system ขนาด 6 kW
- ทำการเก็บข้อมูลระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System) ในการทำ Energy Management และการทำ Demand Response เพื่อ Support และตอบสนองต่อระบบจำหน่าย (Distribution System)
- ทดสอบ Faction การทำงานของ Inverter เพื่อ Support Network ในกรณีต่าง ประกอบด้วย
- แรงดันไฟฟ้าสูงเกินกรณีมี Active Power จาก ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ feed เข้าสู่ Distribution Network
- แรงดันไฟฟ้าต่ำเกินในกรณีที่อยู่บริเวณที่มีภาระทางไฟฟ้าสูงเกิน (High Load Factor)
- พัฒนา Algorithm ในการบริหารจัดการพลังงาน Supply และ Demand ในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 13.1.2 หัวข้อ 13.1.3 หัวข้อ 13.1.4
- ทดสอบ Algorithm ที่พัฒนาขึ้นในระบบ Smart Grid
- วิเคราะห์ผลภาพรวม สมรรถนะของระบบ ประสิทธิภาพระบบ ที่ดีขึ้นจากการ Develop New Algorithm
- จัดทำรายงานโครงการวิจัย

ระเบียบวิธีการวิจัยของโครงการ การพัฒนาขั้นตอนการบริหารจัดการพลังงานของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะเพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ด้วยแสงอาทิตย์จำนวนมาก สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 ระเบียบวิธีการวิจัยโครงการ

3.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษาและพัฒนาในรูปแบบขั้นตอนการควบคุม(Develop control algorithm) ในการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกว่า Supply side management ร่วมกับพัฒนาขั้นตอนการควบคุมความต้องการพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการพลังงานจริงๆ และสามารถตอบสนองกับปริมาณพลังงานที่ระบบผลิตไฟฟ้าผลิตได้ หรือเรียกว่า Demand side management ในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) ซึ่งรายละเอียดของการบริหารจัดการ Supply side และ Demand side มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 การศึกษาและพัฒนาในรูปแบบขั้นตอนในการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Supply side management)

ขอบเขตงานในหัวข้อนี้จะทำการศึกษารูปแบบขั้นตอนการควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่อย่างกระจายตัวและมีกำลังติดตั้งที่ไม่เท่ากันและมีความหลากหลายในเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดสมมติฐานให้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายที่ติดตั้งอยู่กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต้องสามารถทำงานได้ตามมาตรฐานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงปี 2556 (2013) กำหนด โดยจะเน้นศึกษาทั้งหมด 5 หัวข้อหลัก ประกอบด้วย

1. ผลจากการทำ Dynamic Network Support (Fault Ride Through)
2. ผลจากการทำ Active Power Control
3. ผลจากการทำ Network Support (A variable reactive power depending on the voltage Q (U)
4. ผลจากการทำ Fix displacement Power Factor ($\cos \phi$)
5. ผลจากการทำ Active Power Control

ซึ่งทั้ง 5 หัวข้อจะต้องสามารถควบคุมจาก Central control ทั้งที่เป็น manual และ แบบ automatic เพื่อที่จะทำการรักษาคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย และช่วยให้เกิดการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพไม่ว่าจะเกิดกรณีใด ๆ ที่เป็นผลลบต่อระบบจำหน่าย

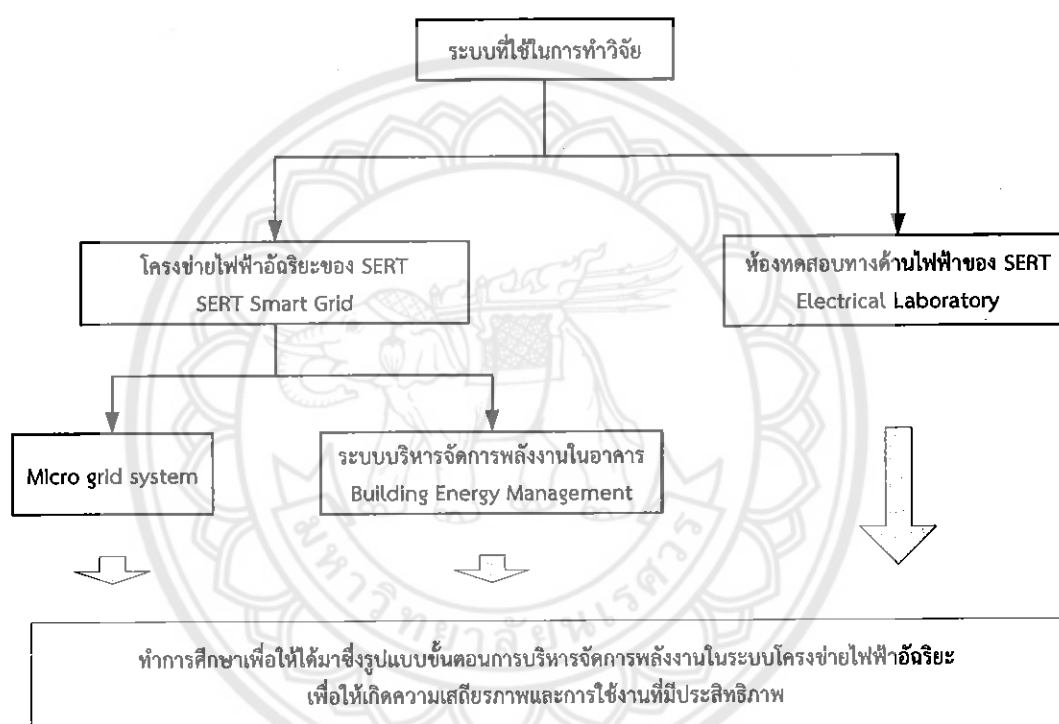
3.2.2 การศึกษาและพัฒนาในรูปแบบขั้นตอนการควบคุมความต้องการการใช้ไฟฟ้าในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Demand side management)

ขอบเขตงานในหัวข้อนี้จะทำการศึกษารูปแบบการควบคุมความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการการใช้งานจริง และต้องสามารถตอบสนองต่อสถานะต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบจำหน่ายเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย อีกทั้งจะต้องเป็นการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานไฟฟ้าจากการบริหารจัดการพลังงาน เช่น การบริหารจัดการส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบจะต้องสอดคล้องกับค่าไฟฟ้าของช่วง Peak และ off Peak ในรูปแบบของ TOU ซึ่งการบริหารจัดการรูปแบบนี้จะสอดคล้องกับการทำ Real time pricing ของค่าไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการใช้งานภาระทางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดการบริหารจัดการความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าต้องสามารถทำได้อย่างน้อยดังรายละเอียดต่อไปนี้

- Dynamic Network support by load shading
- Dynamic Network support by load shipping
- Dynamic Network support by load Peak decreasing
- Dynamic Network support by load Transfer

ซึ่งในการบริหารจัดการความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นต้องใช้ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management System, BEMS) ร่วมกับระบบควบคุมกลางคือ ระบบ SCADA ในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของวิทยาลัยพลังงานทดแทน (SERT Smart Grid)

ในการศึกษารูปแบบขั้นตอนการควบคุมการบริหารจัดการพลังงานทั้งระบบผลิตไฟฟ้า (Supply Side Management) และ ความต้องการพลังงานไฟฟ้า (Demand side management) จำเป็นต้องใช้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (SERT Smart Grid) และ ระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (BEMS) เพื่อที่จะใช้ในการทดสอบระบบการทำงานในสภาวะการใช้งานจริง และต้องใช้ห้องทดสอบทางด้านไฟฟ้าเพื่อใช้ในการจำลองสภาวะการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ Fraction การทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย

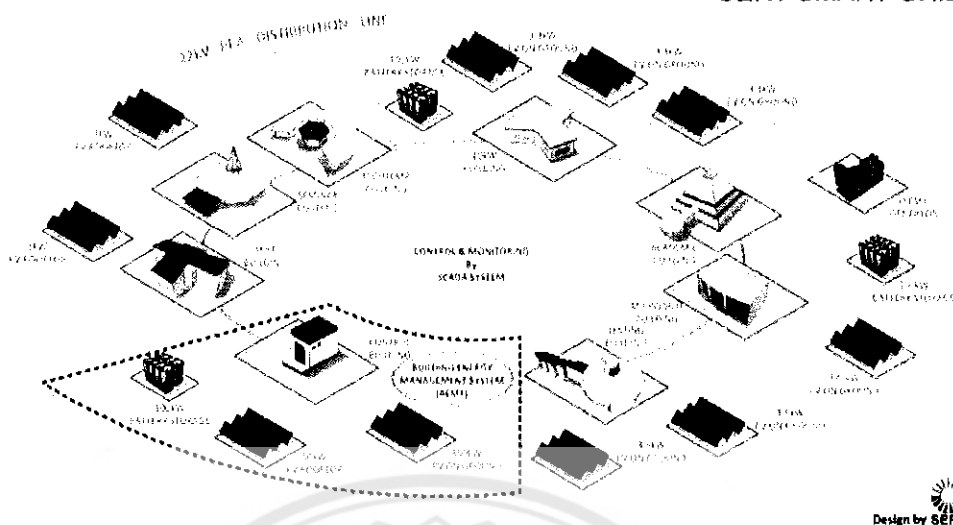


รูปที่ 17 องค์ประกอบของระบบทั้งหมดที่จะใช้ในการทำวิจัย

3.3 ระบบโครงข่ายอัจฉริยะของวิทยาลัยพลังงานทดแทน (SERT Smart grid)

เป็นระบบสาธิตที่ติดตั้งภายในสวนพลังงานของวิทยาลัยฯ ซึ่งทำการเชื่อมต่อกับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบเซลล์แสงอาทิตย์หลายระบบประกอบกันเป็นโครงข่าย และมีระบบควบคุมกลาง SCADA System เป็นตัวควบคุมฝั่ง Supply Side ทำงานร่วมระบบ BEM (Building Energy management) ที่คอยควบคุมและบริหารจัดการฝั่ง Demand Side ซึ่งระบบระบบโครงข่ายอัจฉริยะของวิทยาลัยพลังงานทดแทนแสดงดังรูปที่ 18

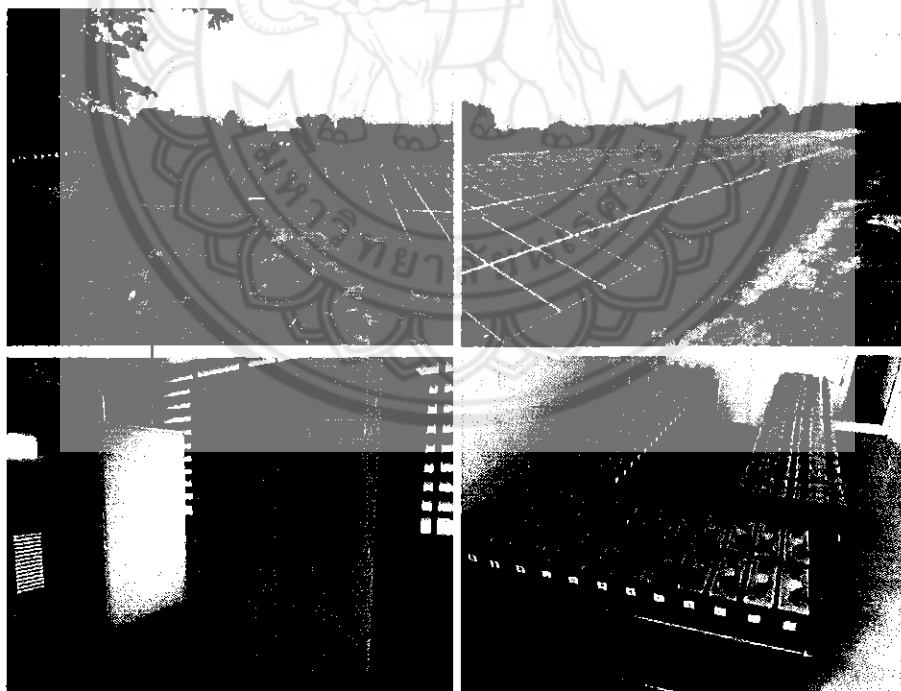
SERT SMART GRID



รูปที่ 18 ระบบโครงข่ายอัจฉริยะของวิทยาลัยพลังงานทดแทน

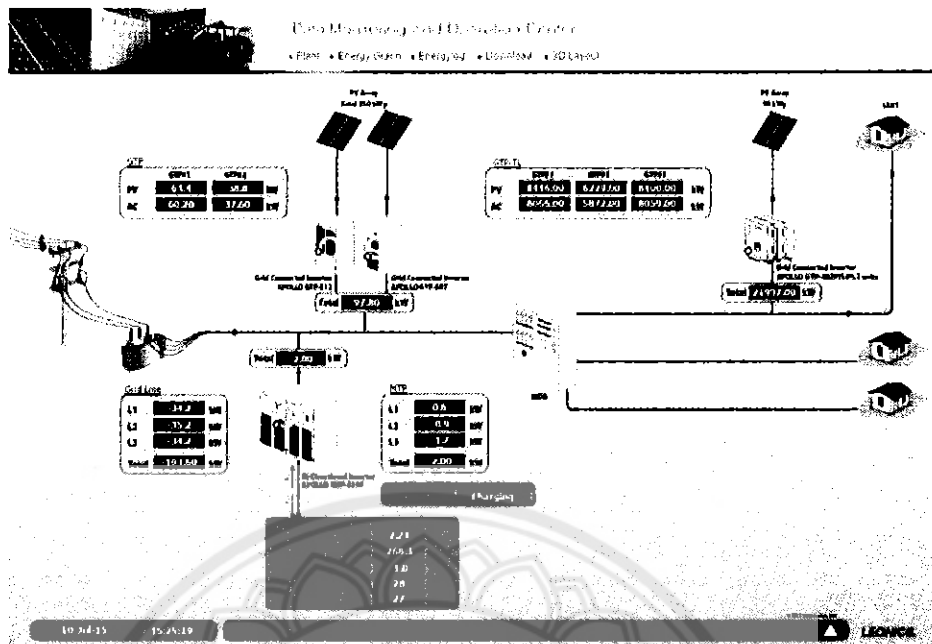
ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ Campus Power

เป็นโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 350 kW และมีแบตเตอรี่ขนาด 100 kWh เชื่อมต่อในโครงข่าย Smart Grid ของวิทยาลัยพลังงานทดแทนดังรูปที่ 19

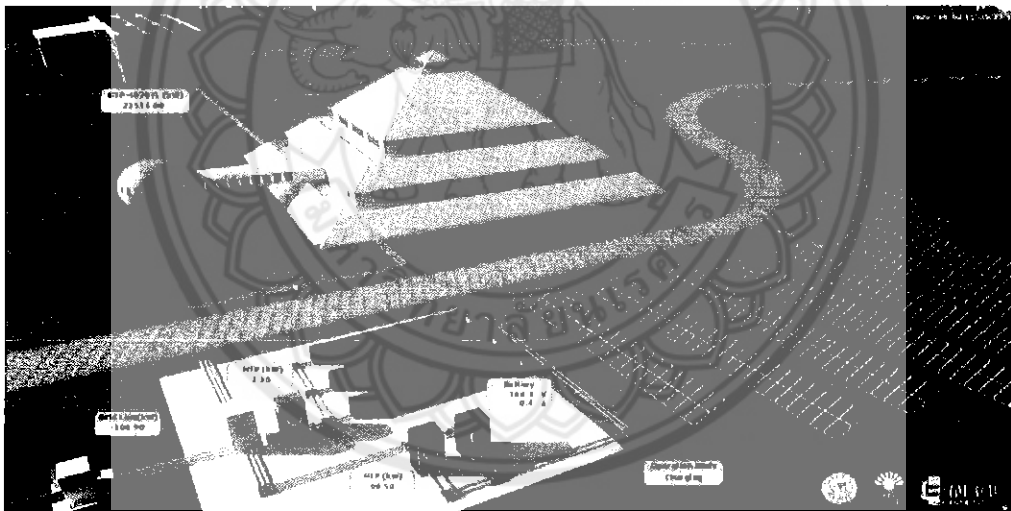


รูปที่ 19 ระบบ Campus Power ขนาด 350 kW

ระบบควบคุมและแสดงผลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินขนาด 350 kW และ แบบติดตั้งบนหลังคาขนาด 50 kW แสดงดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ระบบแสดงผลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Real Time

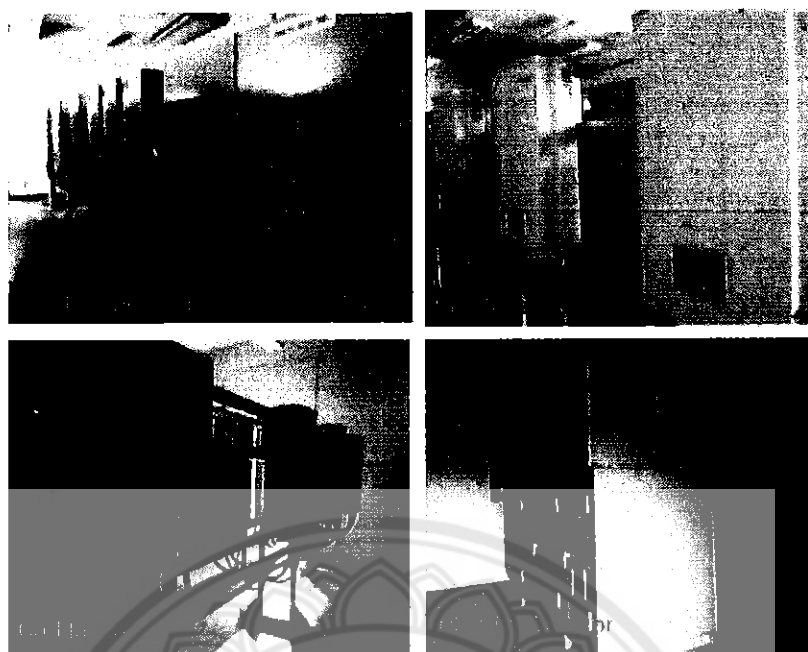


รูปที่ 21 ระบบแสดงผลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 3D พร้อมการแสดงผลข้อมูลแบบ Real Time

ระบบ PV Micro grid ขนาด 120 kW

- ระบบ PV grid connected system ขนาด 120 kW (Poly crystalline silicon) มีแบตเตอรี่เป็นระบบสะสมพลังงาน

ระบบ PV Micro Grid เป็นระบบสาธิตภายในสวนพลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน ซึ่งมี ส่วนประกอบหลักประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Poly crystalline silicon ขนาด 120 kW ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่ขนาดแบตเตอรี่ 300 kWh เพื่อให้สามารถรองรับการทำงานของระบบได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ นอกจากนี้ยังมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยน้ำมันดีเซลขนาด 100 kW ซึ่งส่วนประกอบของระบบ PV micro grid



รูปที่ 22 ระบบ PV Micro grid ขนาด 120 kW

ระบบ PV grid connected system ขนาด 10 kW

- ระบบ PV grid connected system ขนาด 3.67 kW (Amorphous single layer) มีแบตเตอรี่เป็นระบบสะสมพลังงาน
- ระบบ PV grid connected system ขนาด 3.66 kW (Poly crystalline silicon) แบบมีแบตเตอรี่ แบบมีแบตเตอรี่เป็นระบบสะสมพลังงาน
- ระบบ PV grid connected system ขนาด 2.88 kW (Hybrid crystalline silicon) แบบมีแบตเตอรี่ แบบมีแบตเตอรี่เป็นระบบสะสมพลังงาน
- ระบบ PV grid connected system ขนาด 1.2 kW (Micro crystalline)
- ระบบ PV grid connected system ขนาด 1.4 kW (CIS)

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย (PV grid connected system) ขนาด 10 kW เป็นระบบ PV grid connected system ขนาด 10 kW มีส่วนประกอบหลักประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด 5 เทคโนโลยี โดยจะแยกระบบออก 2 แบบมีรายละเอียดดังนี้

แบบที่ 1 ระบบ PV grid connected system แบบมีแบตเตอรี่เป็นระบบสะสมพลังงาน ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกผสม (Poly crystalline silicon; p-Si) ขนาดประมาณ 3.67 kW แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส (Amorphous silicon; a-Si) ขนาดประมาณ 3.66 kW และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผสมผลึก (Hybrid crystalline silicon; HIT) ขนาดประมาณ 2.88 kW มีแบตเตอรี่ความจุขนาด 100 kWh เป็นระบบสะสมพลังงาน

แบบที่ 2 ระบบ PV grid connected system แบบไม่มีแบตเตอรี่เป็นระบบสะสมพลังงาน ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครซิลิกอน (Amorphous silicon/Micro crystalline

silicon (a-Si/ μ C) ขนาดประมาณ 1.2 kW และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคอปเปอร์อินเดียมไดอาเซนไนต์ ((Copper Indium Diselenide; CIS)) ขนาดประมาณ 1.4 kW ดังแสดงในรูปที่ 23

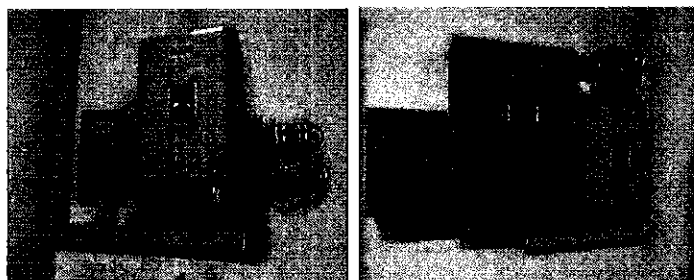


รูปที่ 23 ระบบ PV grid connected system ขนาด 10 kW

ระบบ PV roof connected system ขนาด 6 kW

- ระบบ PV grid connected system ขนาด 3 kW (Amorphous double layer)
- ระบบ PV grid connected system ขนาด 3 kW (Amorphous triple layer)

ระบบ PV grid connected system แบบไม่มีแบตเตอรี่เป็นระบบสะสมพลังงาน ติดตั้งบนหลังคาของอาคาร ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟิซ (Amorphous silicon; a-Si) แบบอะมอร์ฟิซ 2 ชั้น (Double layer) ขนาดประมาณ 3 kW และแบบอะมอร์ฟิซ 3 ชั้น (Triple layer) ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 ระบบ PV roof connected system ขนาด 6 kW

3.4 การพัฒนา Control Algorithm

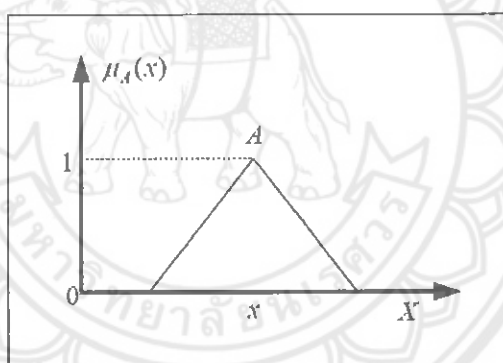
ในการพัฒนา Control Algorithm โดยใช้ Fuzzy Logic Method มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Fuzzy Logic Method [18]

การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic controller) เกิดขึ้นจากแนวความคิดของ Lotfi A. Zadeh เมื่อปี ค.ศ. 1965 เป็นวิธีการควบคุมแบบชาญฉลาดที่อาศัยข้อมูลความรู้และประสบการณ์การทำงานของมนุษย์เป็นพื้นฐานในการควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำของระบบ เหมาะสำหรับระบบที่มีความซับซ้อน หรือ คลุมเครือ มีความไม่เป็นเชิงเส้น และหลายอินพุตได้เป็นอย่างดี ซึ่งในหัวข้อนี้ได้นำเสนอทฤษฎีฟัซซีเซต ตัวแปรแบบฟัซซีและตัวแปรทางภาษา โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก กฎของฟัซซี การอนุมานแบบฟัซซีลอจิก และการดีฟัซซีฟิเคชัน

ทฤษฎีฟัซซีเซต

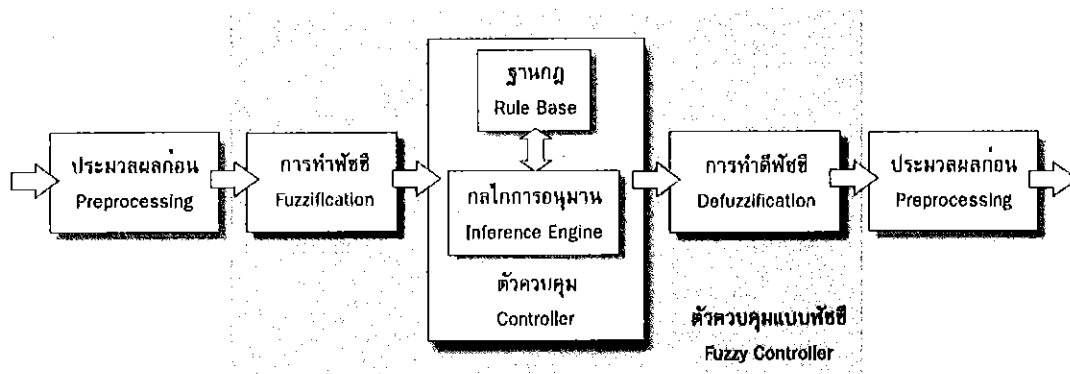
ฟัซซีเซต คือ กลุ่มของสิ่งของหรือวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงของสมาชิกในเซตอย่างค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ μ แทนค่าความเป็นสมาชิกภาพของเซตใด ๆ ที่อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์ ในช่วง 0 ถึง 1 ดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 ฟังก์ชันแสดงความความเป็นสมาชิกภาพของฟัซซีเซต A

3.4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

โครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ชุดปฏิบัติการฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification unit) ฐานความรู้ (knowledge base) ลอจิกเพื่อการตัดสินใจ (Decision making logic) และชุดปฏิบัติการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification unit) ซึ่งพิจารณาได้

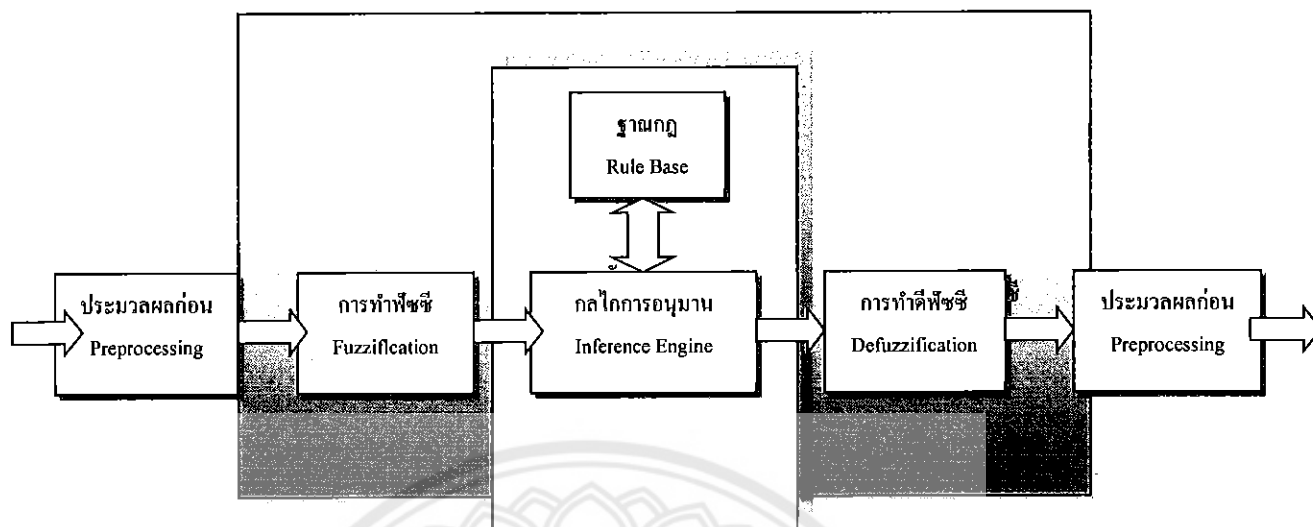


รูปที่ 26 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี

ฟัซซีลอจิกมีคุณลักษณะเด่นหลายๆ อย่าง ทำให้มีการนำเอาฟัซซีลอจิกมาประยุกต์ใช้อย่างมากมายและอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะงานทางด้านระบบควบคุม ข้อดีของฟัซซีลอจิกสรุปคร่าวๆ ได้ดังนี้

- ฟัซซีลอจิกเป็นระบบที่มีเสถียรภาพสูง ไม่จำเป็นต้องใช้งานกับระบบที่มีอินพุตที่มีค่าแน่นอนหรือปราศจากสัญญาณรบกวน กล่าวคือระบบสามารถรองรับอินพุต ที่มีความคลุมเครือได้อย่างหลากหลาย
- ฟัซซีลอจิกประมวลผลด้วยการใช้กฎที่กำหนดหรือนิยามด้วยผู้ใช้ (หรือผู้สร้างระบบ ซึ่งก็คือผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง) ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกในการปรับแต่งระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- ฟัซซีลอจิกไม่มีข้อจำกัดของจำนวนอินพุตหรือเอาต์พุต ทำให้การออกแบบระบบสามารถทำได้หลากหลาย สามารถใช้ตัวตรวจจับที่ไม่มีความแม่นยำมากนักและมีราคาถูกได้พร้อมๆ กันหลายๆ ตัวเพื่อประสิทธิภาพของระบบในขณะที่ยุ่งยากและราคาโดยรวมของระบบไม่เพิ่มขึ้น
- ฟัซซีลอจิกมีโครงสร้างที่สามารถแบ่งแยกเป็นหน่วยประมวลผลย่อยๆ ได้ ทำให้ได้ระบบที่มีการกระจายการทำงาน ง่ายต่อการดูแลและปรับปรุงแก้ไข
- ฟัซซีลอจิกสามารถใช้กับงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ได้ ทำให้ลดภาระการคำนวณหาแบบจำลองระบบทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

การออกแบบสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี เพื่อใช้เป็นตัวควบคุมเชิงเส้น การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีมีข้อดีตรงที่ไม่จำเป็นต้องทำการคำนวณเหมือนกับเช่นวิธีราก-โพลส์ วิธีผล



รูปที่ 27 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี

ตอบสนองความถี่ (frequency response) หรือวิธีวางตำแหน่งโพล (pole placement) กฎที่ใช้ในตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถไม่เป็นเชิงเส้นได้ รายละเอียดต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงองค์ประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมแบบฟัซซีตามแนวทางสำหรับออกแบบในเชิงวิศวกรรมรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซีองค์ประกอบในการประมวลผลก่อนและหลัง เป็นการปรับสภาพอินพุตที่จะใช้กับตัวควบคุมแบบฟัซซีให้มีความเหมาะสมรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบสรุปได้ดังต่อไปนี้

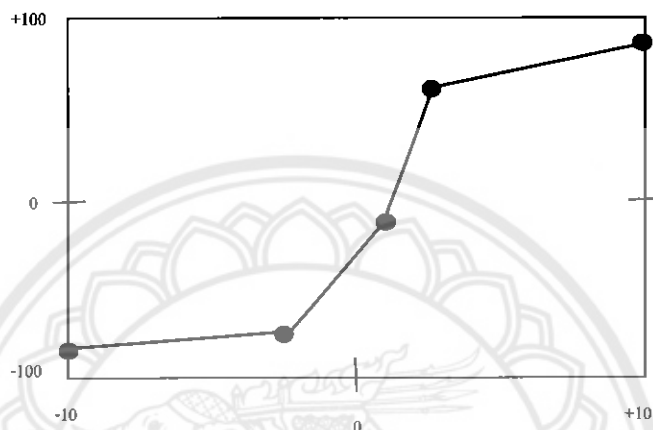
• การประมวลผลก่อน (Preprocessing) เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการเตรียมอินพุตจากโลกจริง ให้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับตัวควบคุมในโลกของฟัซซี (ไม่รวมขั้นตอนการทำให้เป็นฟัซซี) โดยปกติแล้วอินพุตของระบบจะเป็นค่าเชิงตัวเลขที่วัดหรือออกมาจากเครื่องมือต่างๆ และไม่ได้มีค่าในรูปภาษา จึงจำเป็นต้องมีการประมวลผลก่อน เพื่อปรับค่าอินพุตเหล่านี้ให้มีความเหมาะสม ตัวอย่างของการประมวลผลก่อนเช่น

- แปลงค่าจากสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล
- ปิดค่าตัวเลขให้อยู่รูปที่ระบบรองรับ (เช่นปิดเป็นจำนวนเต็ม)
- ปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization) ในย่านเฉพาะที่ต้องการ
- กรองหรือกำจัดสัญญาณรบกวน
- คำนวณหาค่าอนุพันธ์หรือปริพันธ์ (ใช้เป็นอินพุตเพิ่มเติม)

รายละเอียดของขั้นตอนการประมวลผลก่อนข้างต้น มีผลต่อประสิทธิภาพหรือการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีโดยตรง ค่าสัญญาณดิจิทัลที่ละเอียดย่อมทำให้ตัวควบคุมทำงานได้อย่างราบเรียบกว่าค่าที่หยาบ การปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานอาจส่งผลต่อการกำหนดตัวแปรในระบบฟัซซี ('small' 'medium' และ 'large') ได้ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2 อินพุตแต่ละช่วงจะถูกปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของอินพุต (แสดงด้วยจุดกลม) ส่วนค่าอื่นๆ ที่ได้จากการประมวลผลก่อน ไม่ว่าจะเป็นค่าอนุพันธ์ (derivation) หรืออินทิเกรต (integration) ทำให้จำนวนอินพุตของตัวควบคุมเพิ่มมากขึ้นแน่นอนว่าจำนวนกฎที่ต้องออกแบบสำหรับตัวควบคุมจะเพิ่มมากขึ้นด้วย

- **การทำฟัซซี (Fuzzification)** ค่าอินพุตที่ได้จากการประมวลผลก่อนจะถูกแปลงให้เป็นค่าความสมาชิกจากฟังก์ชันสมาชิกต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมผลลัพธ์ของอินพุตนั้น ตามเงื่อนไข (ตัวแปรภาษา) ที่ถูกออกแบบไว้

- **ฐานกฎ (Rule base)** กฎในระบบฟัซซีถือเป็นหัวใจในการดำเนินการควบคุม กฎดังกล่าวสามารถมาจากเงื่อนไขที่หลากหลาย รวมไปถึงสามารถให้ผลลัพธ์ที่มากกว่า 1 ผลลัพธ์ได้ ตัวควบคุมที่มีอินพุตและเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งจะเรียกว่า MIMO (Multi-Input Multi-Output) ในขณะที่ตัวควบคุมที่มีเพียงหนึ่งอินพุตและเอาต์พุตจะเรียกว่า SISO (Single-Input Single-Output) โดยปกติแล้ว ระบบที่เป็น SISO จะทำการควบคุม



รูปที่ 28 การปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานแบบไม่เป็นเชิงเส้นของค่าอินพุต

สัญญาณค่าความผิดพลาดเพียงอย่างเดียว ในบางกรณีอาจจะมีการใช้ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือค่าสะสมของค่าความผิดพลาดร่วมด้วย แต่จะยังคงเรียกว่าเป็นอินพุตเดี่ยว เนื่องจากทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือค่าสะสมดังกล่าวนั้นมาจากอินพุตค่าความผิดพลาดเพียงอย่างเดียว แนวคิดของการใช้ฐานกฎในฟัซซีลอจิกทำให้ระบบที่ได้มีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงของมนุษย์ หรือกล่าวได้ว่าเป็นผู้เชี่ยวชาญนั่นเอง

- **กลไกการอนุมาน (Inference engine)** กฎต่างๆ ที่กำหนดไว้จะถูกอนุมานเป็นผลลัพธ์ในการตัดสินใจของระบบ เมื่อระบบตัดสินใจได้แล้ว การดำเนินการที่สอดคล้องกับการตัดสินใจนั้นก็ดำเนินการต่อไป ยกตัวอย่างเช่นระบบตรวจจับได้ว่าอุณหภูมิจากตัวตรวจจับที่ 1 กำลัง 'ร้อนขึ้น' อย่าง 'รวดเร็ว' ระบบจะทำการพิจารณาค่าอินพุตพร้อมกับตรวจสอบกับกฎการทำงาน ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวแล้วทำการอนุมานหรือตัดสินใจว่าจะทำการเปิดเครื่องทำความเย็น 'แรงที่สุด' เป็นต้น ผลลัพธ์การตัดสินใจที่ได้อาจยังคงอยู่ในเทอมของค่าเชิงภาษา ที่ซึ่งจะถูกแปลงเป็นค่าที่ใช้งานจริงด้วยขั้นตอนต่อไปนี้

- **การทำดีฟัซซี (Defuzzification)** ผลลัพธ์เชิงภาษาที่ได้จากกลไกการอนุมานจะอยู่ในรูปเช่น เปิดเครื่องทำความเย็น 'แรงที่สุด' หรือลดเครื่องทำความร้อน 'ลงพอประมาณ' ฯลฯ ผลลัพธ์ดังกล่าวจะถูกแปลงให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับการทำงานจริงของระบบ เช่นเปิดเครื่องทำความเย็นเพิ่มขึ้น 25% เป็นต้น

- **การประมวลผลตาม (Post processing)** เอาต์พุตที่ได้จากระบบอาจจะต้องถูกปรับให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการทำให้เป็นบรรทัดฐาน (normalization) 1 ในย่านที่ใช้งานได้จริง เช่นแปลงค่า 0-100% เป็นแรงดันขนาด -5 ถึง +5 โวลต์สำหรับควบคุมให้เครื่องทำความเย็นเปิดปิดตามปริมาณที่ต้องการ

ซึ่งรายละเอียดตามหัวข้อต่าง ๆ แสดงดังต่อไปนี้

1. การทำฟัซซี (Fuzzification)

การทำฟัซซีคือการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตค่าตัวแปรเชิงภาษาของตัวแปรในระบบ ในขั้นตอนแรกของการอนุมานฟัซซีจะต้องทำการหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของเซตดังกล่าวของตัวแปรอินพุต ที่ซึ่งค่าของตัวแปรอินพุตที่เข้ามาสู่ในระบบ จะอยู่ในรูปของค่าเชิงตัวเลขหลังจากนั้นแล้วค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตค่านั้นๆ จะสามารถหาได้จากฟังก์ชันสมาชิก

2. การประเมินค่ากฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation)

หลังจากคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งหมดได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินค่าของตัวแปรที่ได้ในกฎของฟัซซี การประเมินค่ากฎดังกล่าวจะเป็นส่วน IF จุดประสงค์เพื่อทำการประเมินว่าเงื่อนไขจากอินพุตนั้นจะทำให้กฎใดต้องกระทำในส่วน THEN ต่อไป ซึ่งอาจจะมีกฎในเงื่อนไขดังกล่าวมากกว่าหนึ่งกฎพร้อมๆกัน เนื่องมาจากระบบมีอินพุตมากกว่าหนึ่ง (นั่นคือค่าความผิดพลาดและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด) เงื่อนไขของแต่ละอินพุตจะถูกประเมินค่าด้วยตัวกระทำของฟัซซีเซต เช่น AND หรือ OR เพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าตัวเลขที่สามารถนำไปประเมินค่าส่วน THEN ที่ซึ่งภายหลังจะถูกนำไปประเมินเพื่อหาค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตในขั้นตอนต่อไป พิจารณาตัวกระทำ OR จากทฤษฎีเซตจะได้ว่า

$$\mu_{(A \cup B)}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (1)$$

อย่างไรก็ดี ตัวกระทำ OR สามารถนิยามได้หลายอย่าง ยกตัวอย่างเช่นการกระทำ OR ใน MATLAB® Fuzz Logic Toolbox จะมีทั้งการใช้ฟังก์ชัน max ข้างต้นและฟังก์ชันทางสถิติเรียกว่า probor หรือผลรวมเชิงพีชคณิต (algebraic sum) ดังนี้

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{probor}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2)$$

$$= \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (3)$$

เช่นเดียวกันกับตัวกระทำ AND ซึ่งใน MATLAB® Fuzz Logic Toolbox มีทั้งการใช้ฟังก์ชัน min และฟังก์ชันผลคูณ prod ดังนี้

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4)$$

หรือ

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{prod}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5)$$

$$= \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (6)$$

ในบากรณี การใช้ฟังก์ชันของตัวกระทำของเซตที่แตกต่างกัน อาจให้ผลเชิงตัวเลขที่แตกต่างกันได้หลังจากประเมินค่าของแต่ละเงื่อนไขและรวมเงื่อนไขในกรณีที่มีมากกว่า 1 เงื่อนไขในส่วนของ IF แล้วผลที่ได้จะถูกนำไปประเมินผลว่ากฎข้อใดที่ถูกพิจารณาในส่วน THEN ต่อไป พิจารณาตัวอย่างระบบควบคุมอุณหภูมิซึ่งมีกฎของพีซีซีทั้งหมด 9 ข้อ เงื่อนไขของอินพุตตัวที่หนึ่งได้แก่ Error = -0.67°C ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ N และ Z ที่ไม่เท่ากับศูนย์ เงื่อนไขดังกล่าวมีค่ามากกว่าศูนย์และอยู่ในส่วน IF ของกฎข้อ 1 2 4 5 7 และ 8 ในขณะที่เงื่อนไขของอินพุตตัวที่สองได้แก่ Error Rate = $+1.67^{\circ}\text{C/นาท}$ ซึ่งให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ Z และ P ที่ไม่เท่ากับศูนย์และอยู่ในส่วน IF ของกฎข้อที่ 4 5 6 7 8 และ 9 เมื่อทำการ AND (ใช้ฟังก์ชัน min) เงื่อนไขทั้งสองแล้วจะได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ก็คือเงื่อนไขในข้อ 4 5 7 และ 8 โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1 IF (Error = N) AND (ErrorRate = N) THEN Output = C
IF (0.36 AND 0.00) = 0.00 THEN Output = C
- 2 IF (Error = Z) AND (ErrorRate = N) THEN Output = H
IF (0.62 AND 0.00) = 0.00 THEN Output = H
- 3 IF (Error = P) AND (ErrorRate = N) THEN Output = H
IF (0.00 AND 0.00) = 0.35 THEN Output = H
- 4 IF (Error = N) AND (ErrorRate = Z) THEN Output = C
IF (0.36 AND 0.35) = 0.35 THEN Output = C
- 5 IF (Error = Z) AND (ErrorRate = Z) THEN Output = NC
IF (0.62 AND 0.35) = 0.35 THEN Output = NC
- 6 IF (Error = P) AND (ErrorRate = Z) THEN Output = H
IF (0.00 AND 0.35) = 0.00 THEN Output = H
- 7 IF (Error = N) AND (ErrorRate = P) THEN Output = C
IF (0.36 AND 0.64) = 0.36 THEN Output = C
- 8 IF (Error = Z) AND (ErrorRate = P) THEN Output = C
IF (0.62 AND 0.64) = 0.62 THEN Output = C
- 9 IF (Error = P) AND (ErrorRate = P) THEN Output = H
IF (0.00 AND 0.64) = 0.00 THEN Output = H

จากข้อ Error = -0.67°C และ Error Rate = 1.67°C/นาท มีผลให้ส่วน THEN ซึ่งก็คือตัวแปรเอาต์พุตของกฎข้อ 4 5 7 และ 8 ถูกประเมินค่าในขั้นตอนต่อไป ค่าระดับความเป็นสมาชิกจากเงื่อนไขอินพุตในส่วน IF จะเป็นตัวบอกตัวแปรเอาต์พุตจะมีรูปร่างของระดับความเป็นสมาชิกอย่างไร โดยฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจะถูกตัดยอด (clipped) หรือถูกปรับขนาด (scaled) ตามผลระดับความเป็นสมาชิกของส่วนเงื่อนไขอินพุต IF นั้นเอง ถึงแม้ว่าการตัดยอดฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุตจะทำให้เกิดการสูญเสียข้อมูลบางส่วน แต่วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่เร็วและง่ายต่อการคำนวณ รวมไปถึงการนำไปใช้ประมวลผลในขั้นตอนต่อไปอีกด้วย

3. การรวมกฎ (Aggregation)

หลังจากกฎต่างๆ ถูกประเมินค่าแล้ว กฎที่มีผลไม่เท่ากับศูนย์จะถูกรวมเข้าด้วยกันโดยการรวมผลลัพธ์ของฟังก์ชันสมาชิกที่ผ่านการประเมินค่า (ถูกตัดยอดหรือปรับขนาด) ทั้งหมดเข้าด้วยกันเป็นเซตเดียวสำหรับแต่ละตัวแปรเอาต์พุต การรวมกฎจะใช้ตัวกระทำยูเนียน แสดงการรวมกฎดังกล่าวจากระบบควบคุมอนุมุมที่มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ -0.67°C และอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเท่ากับ $+1.67^{\circ}\text{C}$ ในขั้นตอนต่อไปจะนำผลการรวมกฎนี้ไปแปลงเป็นค่าตัวเลขเดี่ยวเพื่อนำเอาไปใช้ในการประมวลผลต่อไป

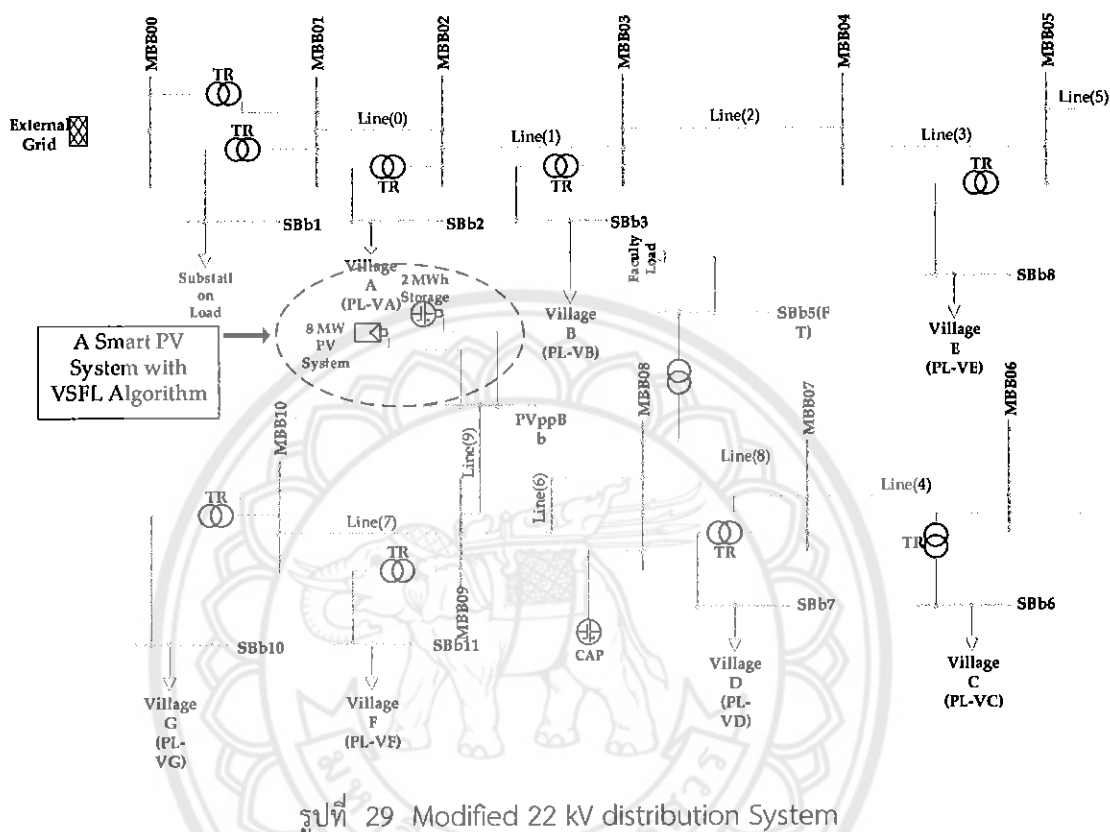
4. การทำดีฟัซซี (Defuzzification)

จากขั้นตอนแรกมาจนถึงขั้นตอนนี้ค่าต่างๆ ในระบบเป็นค่าฟัซซี ไม่ว่าจะเป็นอินพุต กฎต่างๆ หรือเอาต์พุต แต่ว่าสำหรับทุกระบบ ค่าของเอาต์พุตจะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปที่สามารถใช้งานได้จริงเช่นค่าสัญญาณแรงดัน ค่าสัญญาณควบคุม ฯลฯ ซึ่งค่าเหล่านี้ไม่สามารถเป็นค่าฟัซซีได้ เพราะค่าฟัซซีจะเป็นที่เข้าใจภายในระบบฟัซซีเท่านั้น ดังนั้นค่าสุดท้ายจากเอาต์พุตของระบบจะต้องเป็นค่าชัดเจน (crisp value) การทำดีฟัซซีคือขั้นตอนในการแปลงค่าจากผลการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าชัดเจน วิธีการทำดีฟัซซีนั้นมีหลายแบบ วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือวิธีหาจุดศูนย์กลางถ่วง (centroid หรือ center of gravity, COG) ค่า COG ของฟัซซีเซต A ในช่วง $[a,b]$ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\text{COG} = \frac{\int_a^b \mu_A(x) x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (7)$$

3.5 การจำลองระบบจำหน่ายเพื่อการ Simulation

เพื่อให้การวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ระบบ 22 kV ถูกปรับเพื่อใช้ในการ Simulation การทำงานของ Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งส่วนประกอบและโครงสร้างของระบบ 22 kV ที่จะใช้ในการ Simulation ดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 29 Modified 22 kV distribution System

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบในการ Simulation

Components	Connection at Busbars	Ranges	Peak Load (MW)
Total Load (MW)	-	-	6 MW
Substation load	MBB01	At substation	0.08 MW
Village A (MW)	MBB02	From MBB01 to MBB02 (1.5 km)	0.5 MW
Village B (MW)	MBB03	From MBB02 to MBB03 (2.5 km)	0.5 MW
Free busbar	MBB04	From MBB03 to MBB04 (4.0 km)	0.5 MW
Village E (MW)	MBB05	From MBB04 to MBB05 (4.0 km)	0.4 MW
Village C (MW)	MBB06	From MBB05 to MBB06 (3.0 km)	0.5 MW
Village D (MW)	MBB07	From MBB06 to MBB07 (5.0 km)	0.8 MW
Factory Load, PL(FT) (MW)	MBB08	From MBB07 to MBB08 (1.0 km)	1.9 MW
Village F (MW)	MBB09	From MBB08 to MBB09 (6.0 km)	0.5 MW
Village G (MW)	MBB10	From MBB09 to MBB10 (1.0 km)	0.5 MW

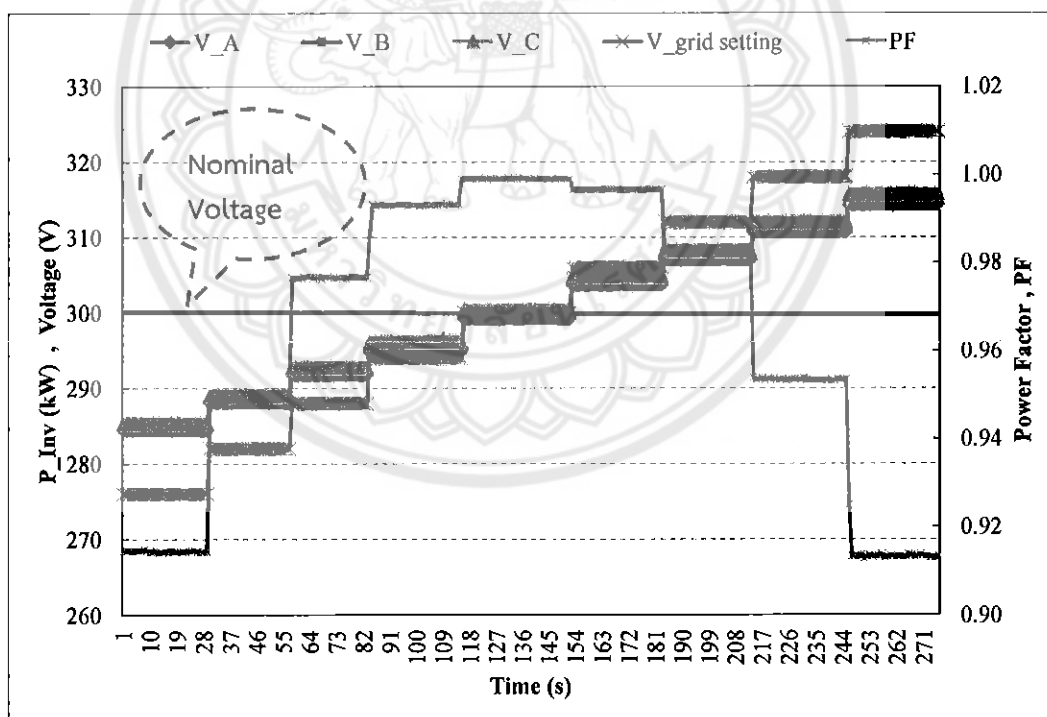
บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนประกอบด้วย 1. การทดสอบเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสายส่ง 2. การพัฒนา Control Algorithm 3. ผลการทดสอบ Control Algorithm ด้วยการ Simulation 4. ผลการทดสอบ Control Algorithm ในการทำ Economic Operation

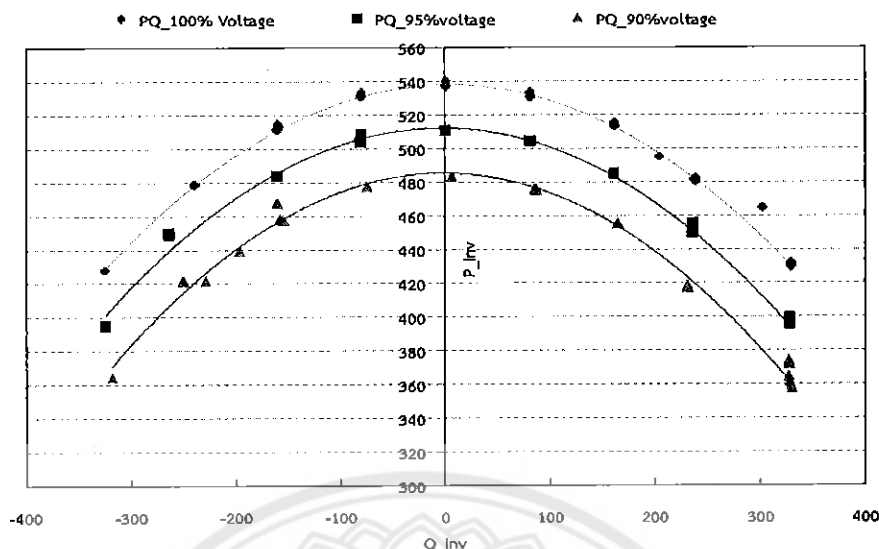
4.1 การทดสอบเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่าย

การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power control) และ AVR

การควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power Control) และ AVR mode ก็เป็นอีกข้อกำหนดหนึ่งที่จะช่วยรักษาคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย กล่าวคือ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ต้องการให้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าที่ Power Factor เข้าใกล้ 1 ดังนั้นในกรณีบริเวณที่มีเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเชื่อมต่อ มีภาระทางไฟฟ้าที่ต้องใช้กำลังไฟฟ้าที่เป็น Reactive แต่ในกรณีนี้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าไม่ช่วยปล่อย Reactive ออกมา ก็จะส่งผลให้ Reactive ในระบบต่ำลง ห้องปฏิบัติการที่วิทยาลัย ฯ ได้พัฒนาขึ้นสามารถที่จะทดสอบในข้อกำหนดนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 30



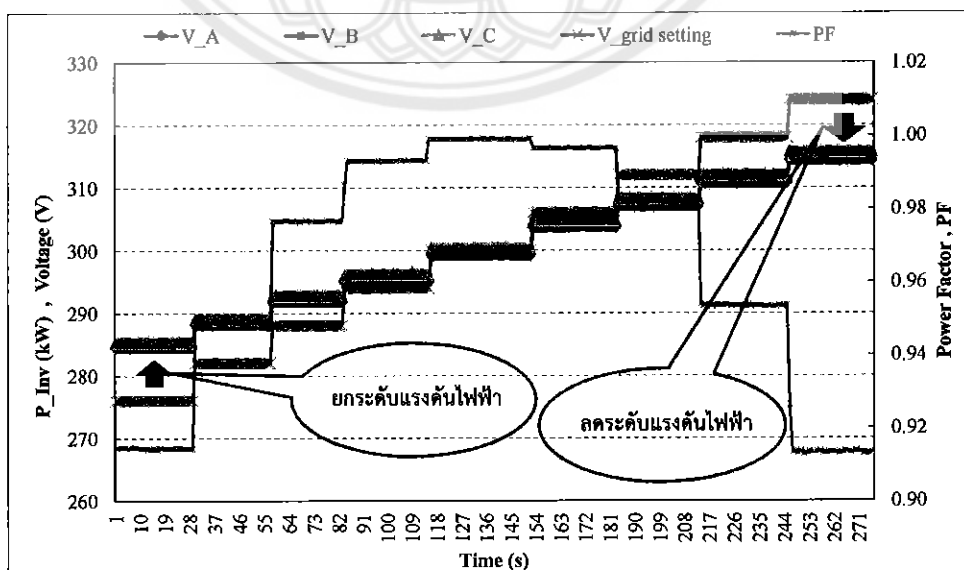
รูปที่ 30 การควบคุมกำลังไฟฟ้า Reactive ในโหมด Leading และ Lagging



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง P, Q และ V_{LL} ในโหมด ควบคุมกำลังไฟรีแอกทีฟ

การทดสอบเพื่อยืนยันว่าระบบผลิตไฟฟ้าสามารถควบคุมการจ่ายไฟฟ้าในโหมดควบคุมแรงดันคิงที่ (A variable reactive power depending on voltage, QU)

การทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในโหมดนี้จะช่วยรักษาระดับแรงดันของระบบจำหน่ายให้คงที่ หรือให้ระดับแรงดันอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน กล่าวคือ ในระบบจำหน่ายหรือระบบสายส่งที่มีระดับแรงดันต่ำหรือระดับแรงดันที่สูงเกิน เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ปลายสายอาจจะมีแรงดันต่ำกว่ามาตรฐาน เป็นต้น ดังนั้นเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าต้องช่วยยกระดับแรงดันของสายส่งขึ้นด้วย เพื่อให้คุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งในห้องปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะทดสอบในหัวข้อ AVR ได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 32

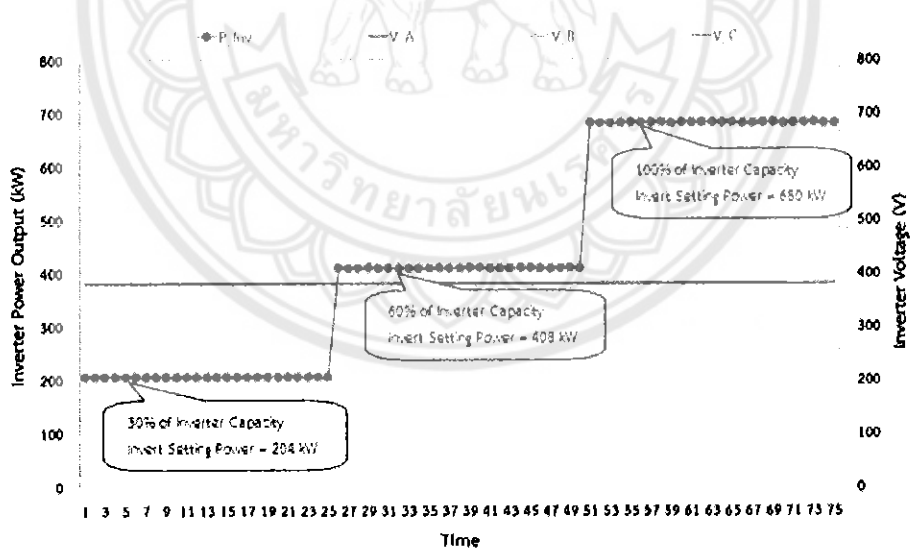


รูปที่ 32 การทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในโหมด AVR

จากรูปแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าทำงานในโหมด การควบคุมการจ่ายไฟฟ้า ในโหมดควบคุมแรงดันคงที่ (AVR) จะสามารถยกระดับแรงดัน และดึงแรงดันให้ลดลง ในจุดที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ได้ จากรูปเห็นได้ชัดเจนว่าในกรณีระดับแรงดันของระบบจำหน่ายลดลงประมาณ 10 % (จาก 380 V ลดลงเหลือ 350 V) สังเกตได้จาก V_grid setting จากเครื่อง Grid Simulator พบว่าระดับแรงดันของระบบจำหน่ายจะถูกยกขึ้นไปที่ระดับแรงดันประมาณ 365 V สังเกตจาก V_A , V_B และ V_C ซึ่งเป็นระดับแรงดันของระบบจำหน่าย ในกรณีกลับกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายสูงขึ้นประมาณ 10 % ที่ระดับแรงดัน 410 V (V_{Grid} setting) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะสามารถช่วยลดระดับแรงดันของระบบจำหน่ายจาก 410 V ให้เหลือเพียงแค่ 400 V (V_A , V_B และ V_C) จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายสามารถช่วยยกระดับแรงดัน และ ลดระดับแรงดัน ของระบบจำหน่ายให้อยู่ภายใต้สภาวะมาตรฐานได้

การควบคุมกำลังไฟฟ้า (Active Power Control)

การควบคุมกำลังไฟฟ้า (Active Power Control) ก็เป็นอีกโหมดการทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อช่วยรักษาคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่าย กล่าวคือในกรณีที่ระบบจำหน่ายรับ Active Power จากแหล่งผลิตไฟฟ้ามากเกินไป ก็จะส่งผลให้ระดับแรงดันของระบบจำหน่ายมีค่าสูงเพิ่มขึ้น ดังนั้นในกรณีที่ฉุกเฉินก็จำเป็นต้องลดกำลังการผลิตไฟฟ้าซึ่งเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสามารถที่จะควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ดังแสดงในรูปที่ 33

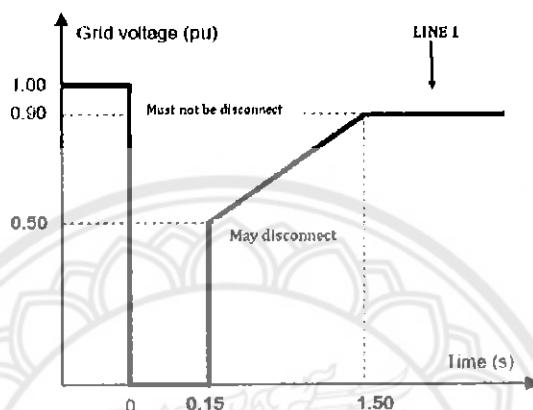


รูปที่ 33 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแสดงการควบคุมกำลังไฟฟ้า Power Control

เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ากำลังแสดงการควบคุมกำลังไฟฟ้าในระดับ 30 % 60 % และ 100 % ของพิกัดเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

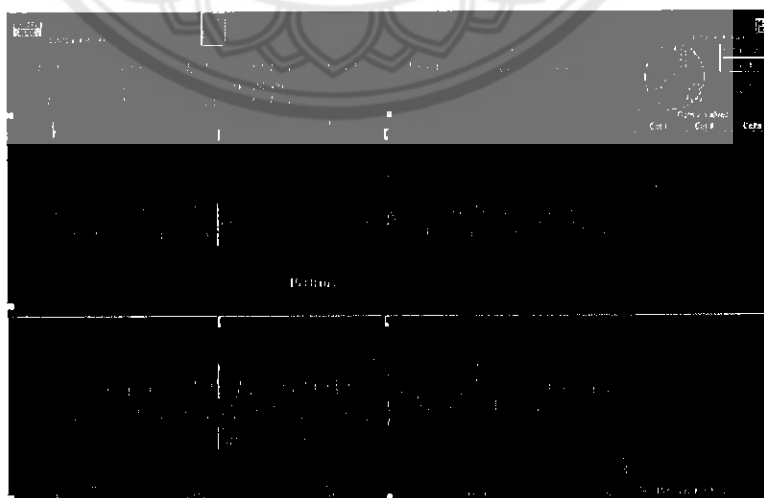
ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันต่ำชั่วคราว (Low Voltage Fault Ride Through, LVRT)

ความสามารถในการทนต่อสภาวะแรงดันต่ำ (LVRT) ก็เป็นโหมดการทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าอีกโหมดหนึ่งที่จะช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบจำหน่าย กล่าวคือเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ายังสามารถทำงานได้ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายต่ำชั่วคราวเพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบจำหน่าย ซึ่งการทำงานของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะต้องทำตามเงื่อนไขที่แสดงในรูปที่ 34



รูปที่ 34 Low voltage fault ride through, LVRT

จากเงื่อนไขดังกล่าวห้องปฏิบัติการที่วิทยาลัย ฯ พัฒนาขึ้นสามารถที่จะทำการทดสอบ Low Voltage Fault Ride Through, LVRT ได้ โดยการโปรแกรมการทำงานของเครื่อง Grid Simulator ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 35

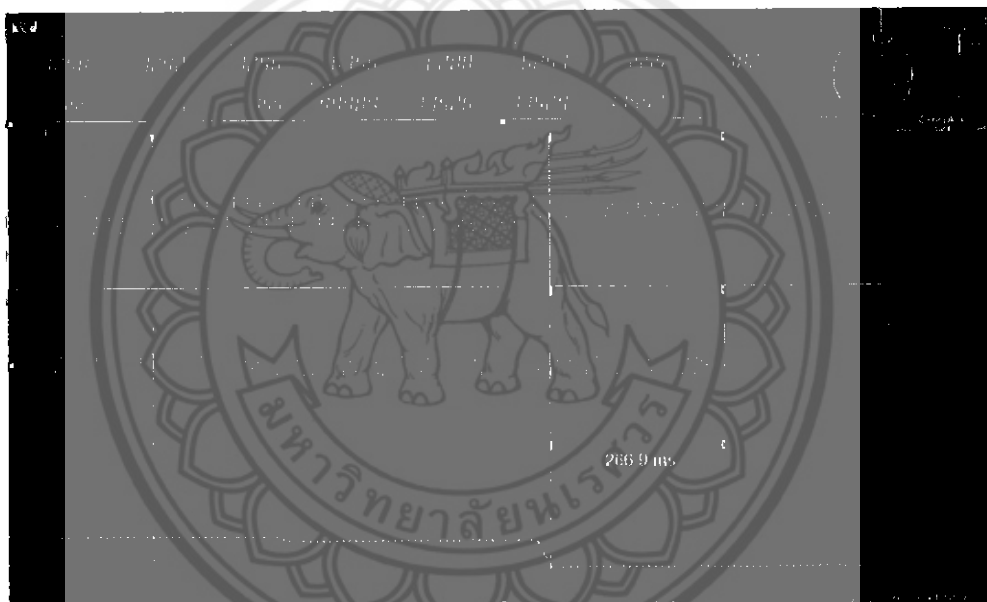


รูปที่ 35 ผลการทดสอบ Low voltage fault ride through, LVRT

จากการทดสอบเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าพบว่า ในกรณีที่แรงดันของระบบจำหน่ายต่ำลงประมาณ 95 % เป็นระยะเวลา 153.8 ms เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้ายังสามารถที่จะจ่ายไฟให้กับภาระทางไฟฟ้าได้ และในกรณีที่ไฟฟ้าของระบบจำหน่ายกลับเป็นปกติ เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าก็สามารถที่จะทำงานปกติได้เลย

การป้องกันแรงดันต่ำและแรงดันเกิน (Under/Over voltage protection)

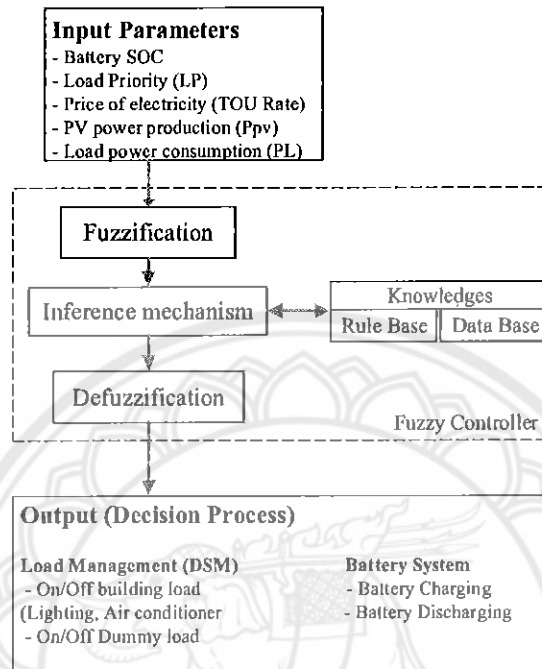
ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายต่ำหรือสูงเกินเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าต้องสามารถหยุดการทำงานไม่ผลิตไฟฟ้าจ่ายกลับเข้าไปให้ระบบจำหน่าย เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบจำหน่าย และป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับภาระทางไฟฟ้าและเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเอง ดังนั้น การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงได้กำหนดระยะเวลาในการ Trip ของ Response Abnormal Voltage ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพสายส่งของแต่ละหน่วยงาน ห้องปฏิบัติการที่วิทยาลัยพัฒนาขึ้นก็สามารถที่จะทำการศึกษาในโหมด Under/Over Voltage Protection ได้ ดังแสดงในรูปที่ 36



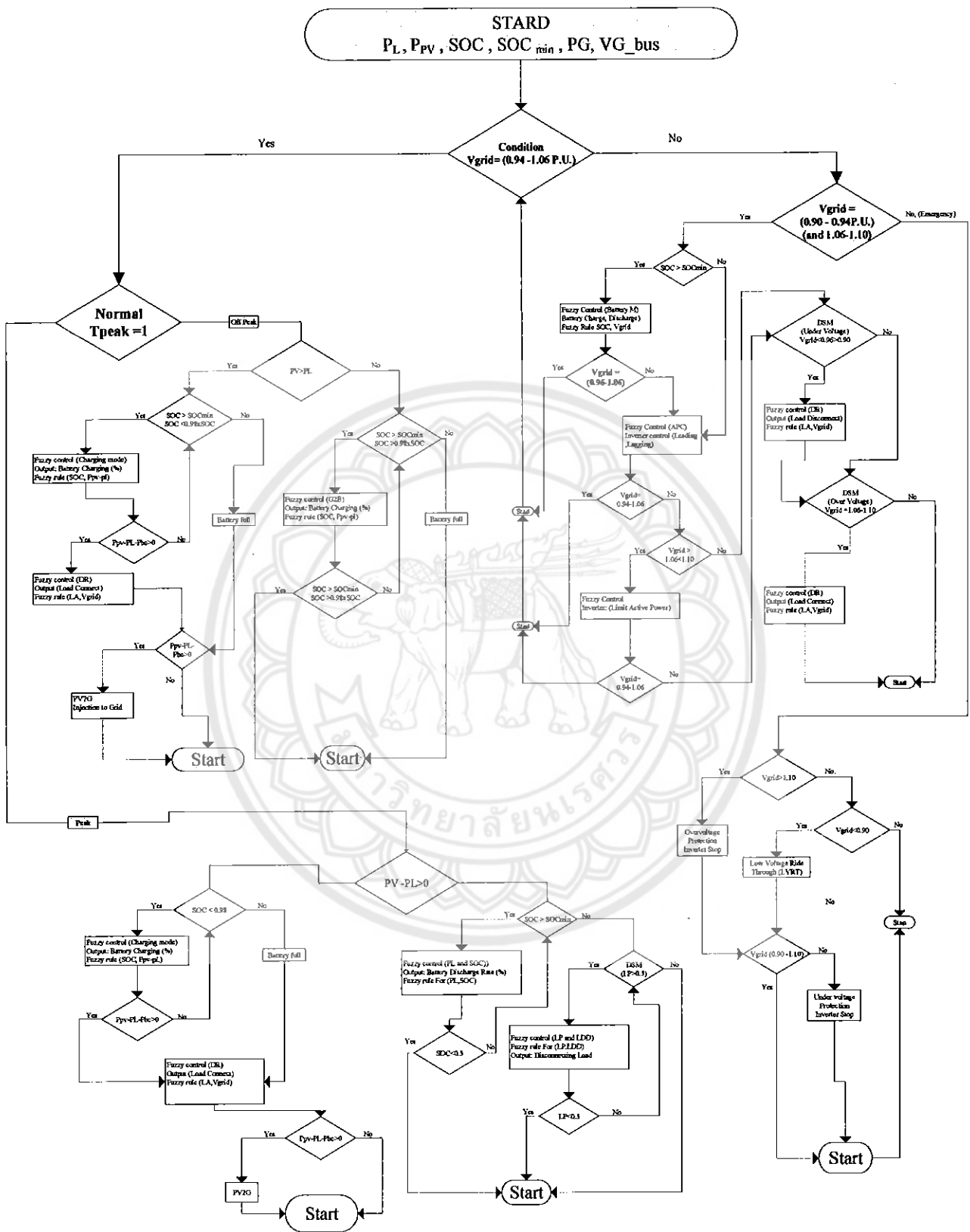
รูปที่ 36 Under Voltage Protection

4.2 การพัฒนา Control Algorithm

การพัฒนา Control Algorithm เป็นการพัฒนาควบคุมกำลังไฟฟ้าของระบบ SERT Smart Grid ซึ่ง Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นต้องครอบคลุม Demand และ Supply โดยใช้ Fuzzy Logic Method การควบคุมฝั่ง Demand มีวัตถุประสงค์เพื่อ บริหารจัดการการใช้พลังงานงานไฟฟ้าฝั่งผู้ใช้ไฟฟ้าร่วมกับระบบสะสมพลังงาน ส่วนฝั่งผลิตไฟฟ้า เป็นการควบคุมการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในการรักษาคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย (รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย) พารามิเตอร์ที่ Inputs ในระบบ Fuzzy Logics แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 37 Input and output parameters

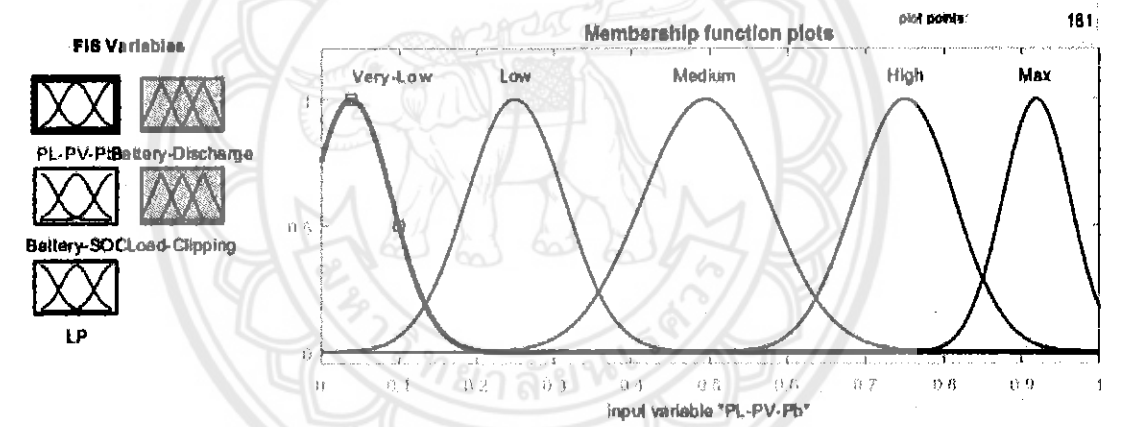


รูปที่ 38 Control Algorithm ที่ฝัง Demand และ Supply

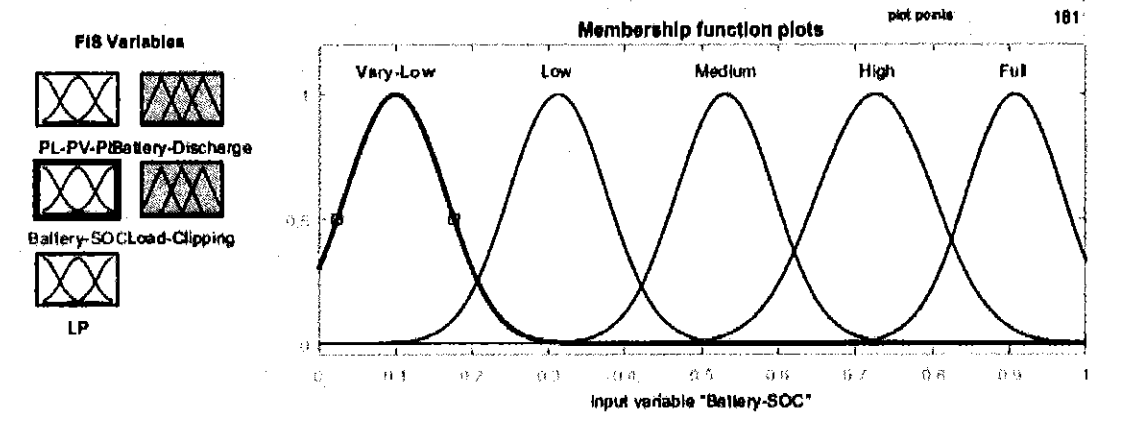
Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจะเริ่มจากอ่านค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องและจะเริ่มจากพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่ ช่วงของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้ Control Algorithm อยู่ในช่วง (0.94-1.06 p.u.) และถ้าแรงดันไฟฟ้าอยู่นอกช่วงนี้ Control Algorithm จะควบคุมให้ระบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากลับเข้ามาอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ตามที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเป้าหมายหลักในการทำหน้าที่ของ Control Algorithm นี้โดยการบริหารจัดการเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าให้ทำงานในโหมด Grid support mode ส่วนในกรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ต้องการแล้ว Control Algorithm จะทำหน้าที่บริหารจัดการภาระทางไฟฟ้า (Load) โดยการสั่งการให้ระบบ BEMS ทำงานควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าให้สอดคล้องกับค่าไฟฟ้าแบบ TOU นอกจากนี้ Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจะยังควบคุมการ Charge และ Discharge ของแบตเตอรี่เพื่อเป็นการประหยัดค่าไฟให้สอดคล้องกับโครงสร้างค่าไฟฟ้าแบบ TOU

Membership Function

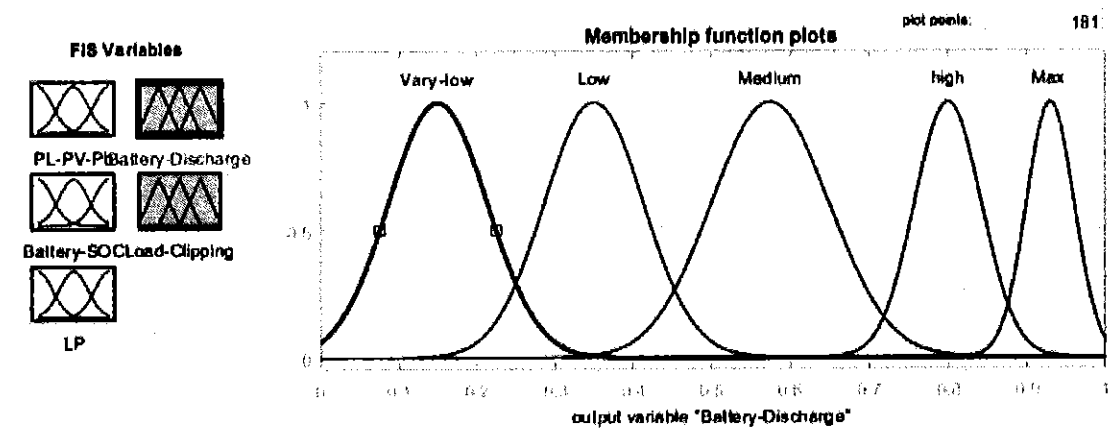
Membership function ของตัวแปร Input และ Output ในการพัฒนา Control Algorithm ประกอบด้วย



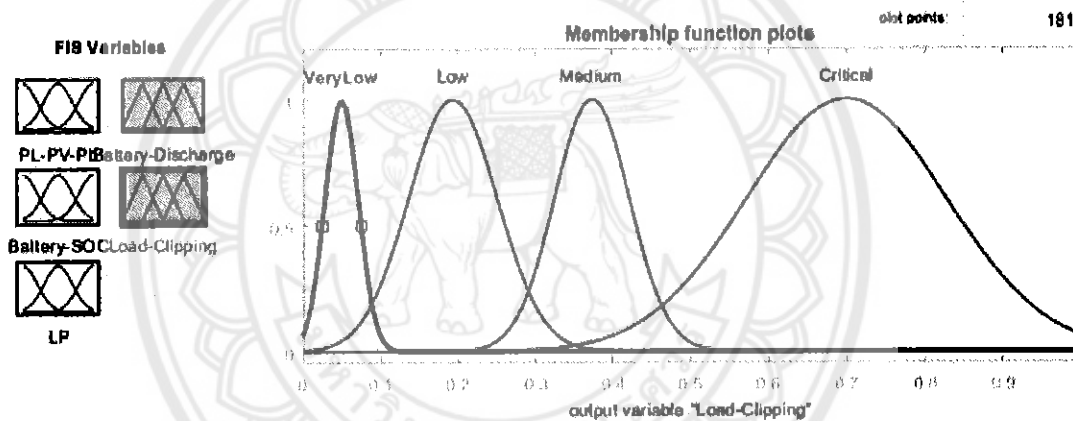
รูปที่ 39 Membership Function PL-PV-Pb



รูปที่ 40 Membership Function SOC



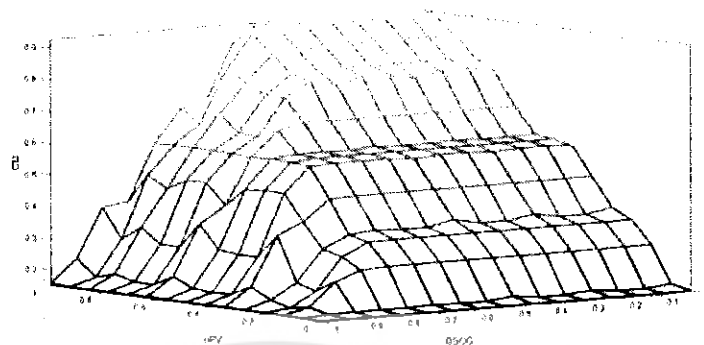
รูปที่ 41 Membership Function of the Battery Discharge



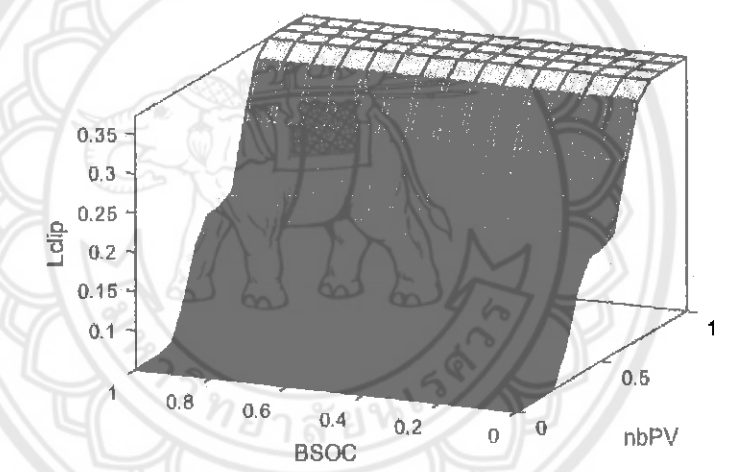
รูปที่ 42 Membership Function of Load Clipping

Defuzzification

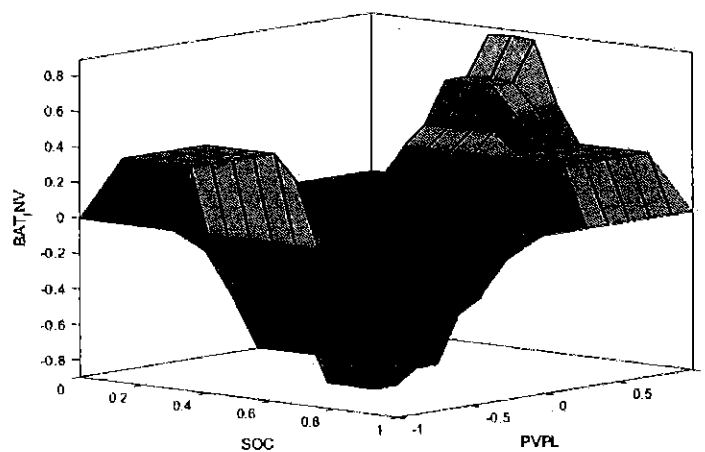
การทำ Defuzzification หรือการหา Output ของระบบ Fuzzy ซึ่งในการทำ Fuzzy Defuzzification ทำด้วยวิธีการ Centriod Method ซึ่งผลของตัวอย่างการแสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการทำ Discharge Mode (CM)



รูปที่ 44 ตัวแปรที่มีผลต่อการทำ Load Clipping



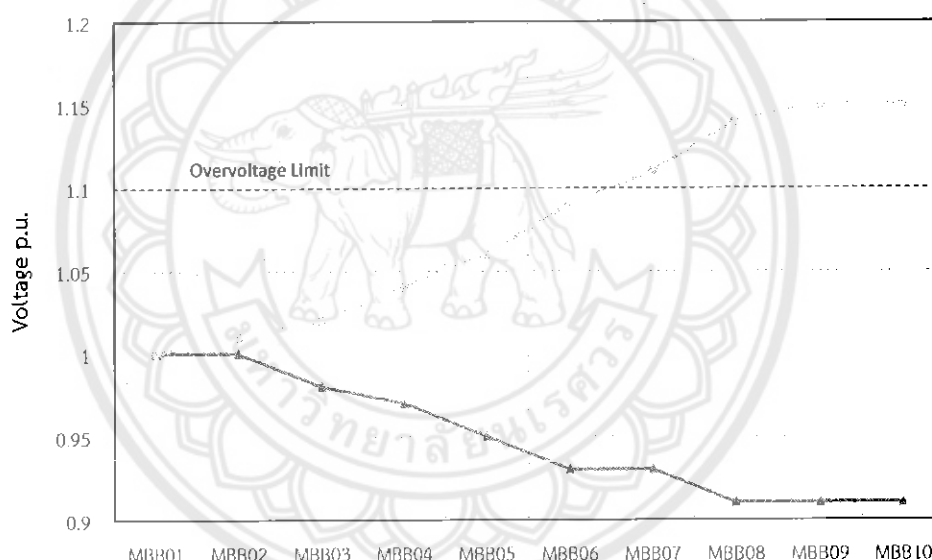
รูปที่ 45 Charging and Discharging Mode สำหรับ Battery Inverter

4.3 ผลการวิจัย

ผลการวิจัยจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ประกอบด้วย 1. ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรักษาคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 2. การบริหารจัดการเพื่อให้ระบบทำงานคุ้มค่าที่สุด ซึ่งรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

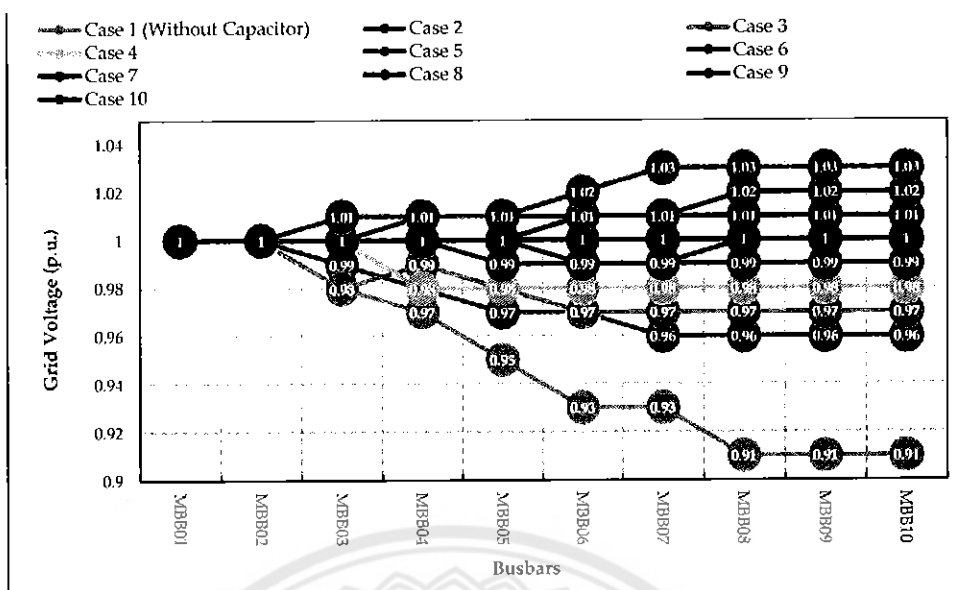
4.3.1 การพัฒนา Control Algorithm เพื่อการรักษาคุณภาพไฟฟ้าในระบบ ฯ

ในการศึกษาในหัวข้อนี้ได้ทำการ Modified ระบบจำหน่ายระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV จำนวน 1 Feeder ซึ่ง ผลจากการ Simulation ในกรณีที่ไม่มีระบบสะสมพลังงานกับ Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจะพบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายจะสูงเกินในกรณีที่มี Reactive Power จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ส่งเข้าไปในระบบจำหน่าย ในช่วงที่ภาระทางไฟฟ้าน้อย แรงดันไฟฟ้าจะสูงเกินค่า Limit ของการไฟฟ้าที่ตั้งไว้ที่ระดับแรงดัน 1.1 p.u. ซึ่งจากการ Simulation ด้วยโปรแกรม Digsilent พบว่าที่ระดับแรงดันของ MBB07 – MBB10 แรงดันไฟฟ้าจะสูงเกินค่ามาตรฐาน โดยค่าแรงดันจะค่อยเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าใกล้ Point of Common Coupling (PCC) ดังแสดงในรูปที่ 46



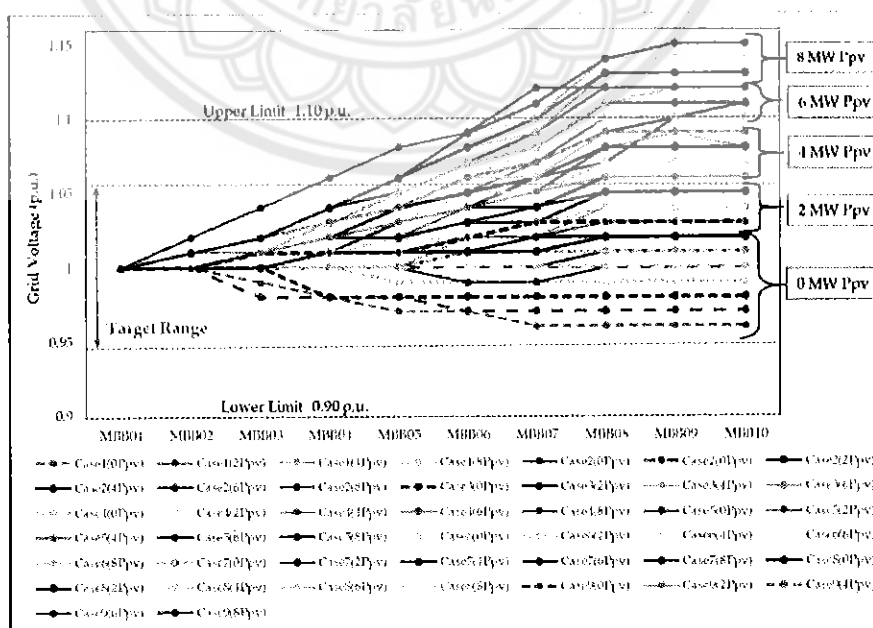
รูปที่ 46 แรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินและแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำเกินจากการขาด Balance ระหว่าง Supply กับ Demand

เพื่อให้เห็นผลกระทบจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่ายกรณีระบบมีปริมาณความต้องการไฟฟ้าที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ในกรณีที่ระบบจำหน่ายไม่มีกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์และหรือระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีปริมาณกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์มากเกินไปเมื่อเทียบกับภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการ จากกรณีศึกษาที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ไม่มีกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับปริมาณภาระทางไฟฟ้าในระบบจำหน่าย ผลการ simulation ระบบจำหน่ายที่ไม่มีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แต่มีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้า ตั้งแต่ Case 1 จนถึง Case 9 แสดงดังรูปที่ 47



รูปที่ 47 Voltage Profile

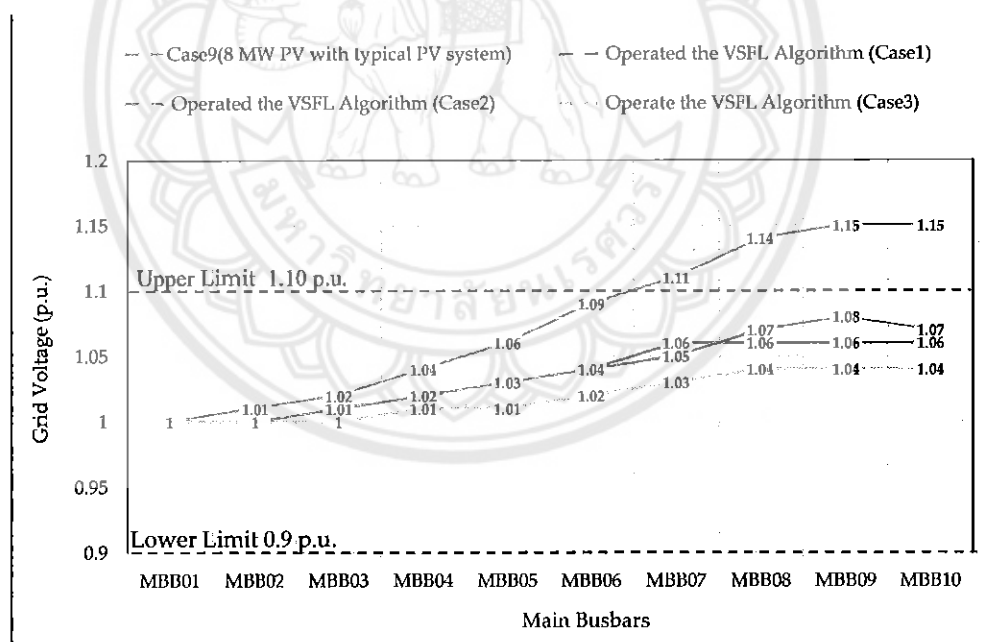
Case 1 เป็นระบบจำหน่ายที่ไม่ได้ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าด้วย คาปาซิเตอร์ จะพบว่า Voltage Profile มีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.91 p.u. ซึ่งใกล้กับ Under Voltage limit ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ 0.90 p.u. จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้มีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยการติดตั้ง Capacitor จึงส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าหรือ Voltage Profile มีค่าอยู่ในช่วง 0.96 p.u. – 1.03 p.u. ซึ่งดีขึ้นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่ในกรณีที่มีการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายเข้าไปในระบบ ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการ Simulation ด้วยระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 8 MW โดยจะทำการ Simulation ตั้งแต่ 2 MW, 4 MW, 6 MW และ 8 MW ดังแสดงในรูปที่ 48



รูปที่ 48 Voltage Profile ของระบบจำหน่ายกรณีเชื่อมต่อกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 8 MW

ในกรณีที่โรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าจ่ายให้กับระบบจำหน่ายจะส่งผลโดยตรงต่อ Voltage Profile ที่สูงขึ้น ในกรณี Case9(8PV) จะเห็นว่า ในกรณีที่ภาระทางไฟฟ้าน้อยแต่กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์สูงถึง 8 MW แรงดันไฟฟ้าที่ PCC สูงกว่า ค่า Over Voltage ของการไฟฟ้ากำหนด ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.14 p.u. ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ประเทศไทยกำหนด 1.1 p.u. กรณีนี้จะไม่เป็นผลดีต่อผู้ใช้ไฟฟ้าใน Feeder ดังกล่าว

จากรูปที่ 48 ถ้าในกรณีที่ Feeder นั้นมีระบบเซลล์แสงอาทิตย์หรือโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่เชื่อมต่ออยู่ จะมีปัญหาเรื่องคุณภาพไฟฟ้าเพราะว่าการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าได้จำนวนมาก หรือจำนวนน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ ดังนั้นการขึ้นลงของของระดับแรงดันจึงจะแปรผันตามความเข้มรังสีอาทิตย์ในกรณีที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใหญ่กว่าภาระทางไฟฟ้า จากปัญหาดังกล่าวคณะวิจัยได้พัฒนา Control Algorithm สำหรับป้องกันปัญหาดังกล่าว โดย Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นในโครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายในการรักษาคุณภาพไฟฟ้าเป็นอันดับแรก และลำดับต่อมาจะช่วยบริหารจัดการให้ SERT Smart Grid มีผลประหยัดสูงสุดทั้งการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และการบริหารจัดการตามโครงสร้างค่าไฟฟ้าแบบ TOU สำหรับผลการทดสอบ Control Algorithm ในการรักษาคุณภาพคือ Control Algorithm จะควบคุมอุปกรณ์ทางด้านพลังงานที่ประกอบอยู่ในระบบ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าในการปรับ PF และ แบตเตอรี่ในการ Charge และ Discharge สำหรับระบบแบตเตอรี่ ซึ่งผลของการทำตาม Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 49

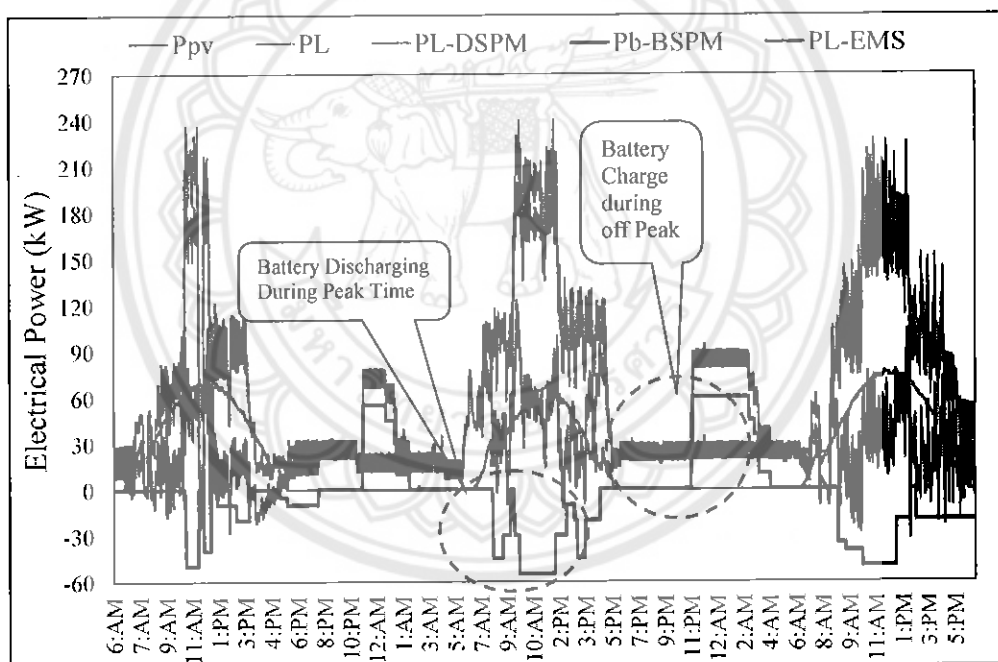


รูปที่ 49 ผลของ Algorithm ในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

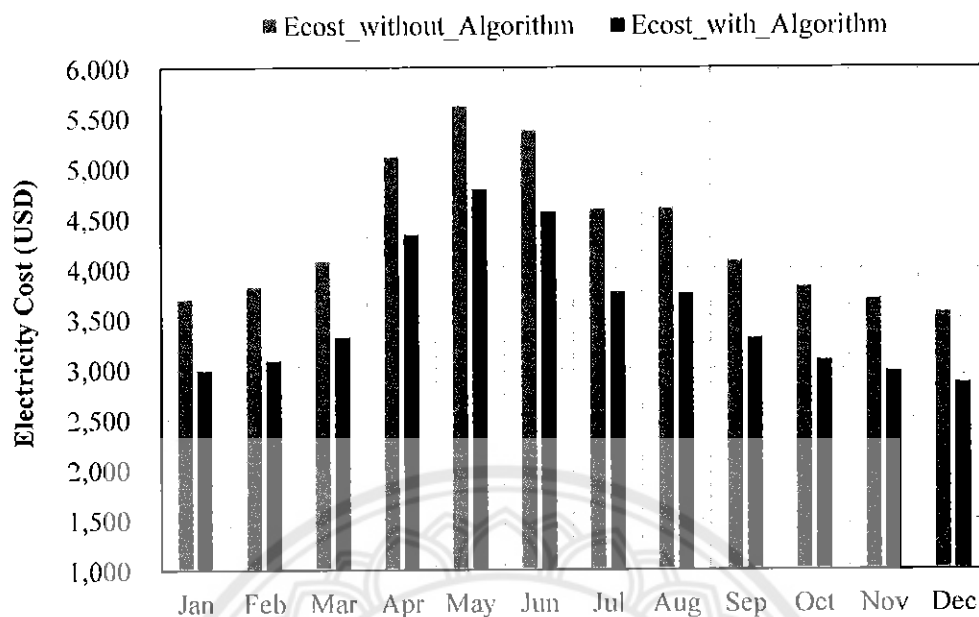
จากรูปที่ 49 เห็นได้ชัดเจน กรณี Case 1 กรณี Case 2 และ Case 3 จะเห็นชัดเจนว่าระดับแรงดันอยู่ในช่วงที่การไฟฟ้ากำหนดนั้นเกิดจากการบริหารจัดการจาก Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจากการบริหารจัดการ Reactive Power Control ของระบบ Inverter โดยการปรับ PF Leading หรือ Lagging ที่เหมาะสมกับระดับแรงดันนั้น อีกทั้งเพิ่มปริมาณการใช้ไฟฟ้าด้วยการ Charge เก็บไว้ในระบบ Battery ในช่วงที่ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณสูง

4.3.2 ผลการวิจัยทางด้าน Economic Operation

Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นในการบริหารจัดการอุปกรณ์ประกอบร่วมต่าง ๆ สำหรับระบบ Microgrid เช่น เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบสะสมพลังงาน หรือแม้แต่การบริหารจัดการภาระทางไฟฟ้า เพื่อปรับ Load Shave Management ให้สอดคล้องกับโครงสร้างค่าไฟประเทศไทย ซึ่งมีโครงสร้างค่าไฟแบบ TOU ซึ่งค่าไฟจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลา Peak และ Off Peak ในปัจจุบันค่าไฟฟ้าช่วง Peak มีค่าไฟฟ้าประมาณ 4.6 บาทต่อหน่วย ในช่วงเวลา Off-Peak ค่าไฟฟ้าประมาณ 2.6 บาทต่อหน่วย จากค่าไฟดังกล่าว ถ้าเราใช้ไฟฟ้าในช่วงค่าไฟถูกได้ก็จะทำให้เสียค่าไฟฟ้าน้อยลง แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ต้องการที่จะเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าตามปกติ แต่แนวทางในการทำ Load Shifting โดยการใช้วิธีการ Charge และ Discharge ในระบบแบตเตอรี่แทน กล่าวคือ จะทำการ Charge ไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ในเวลากลางคืนช่วง Off Peak หรือในเวลากลางคืน และจ่ายไฟฟ้าออกจากระบบแบตเตอรี่ในเวลากลางวันในช่วง Peak time Process นี้จะทำให้ในแต่ละหน่วยพลังงานจะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าจากหนึ่งหน่วยพลังงานประมาณเกือบ 50 % และพลังงานสูญเสียในระบบสะสมพลังงานทั้ง แบตเตอรี่ และ แบตเตอรี่อินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 50



รูปที่ 50 แสดงการ Charge และ Discharge ของระบบสะสมพลังงาน



รูปที่ 52 ผลประหยัดจากการทำ Economic Operation

Ecost_Without_Algorithm คือ ปริมาณค่าไฟฟ้าของวิทยาลัย ฯ กรณีที่ไม่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยระบบแบตเตอรี่มีหน้าที่เป็น UPS Mode อย่างเดียว ในกรณีกลับกัน Ecost_with_Algorithm เป็นปริมาณค่าไฟฟ้าที่มีการประยุกต์ใช้ Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้น เห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณค่าไฟฟ้ารายเดือนของวิทยาลัย ฯ ลดลงประมาณ 17.58 % คิดเป็นเงินทั้งสิ้น 320,000 บาท ใน 17.58 % คิดเป็นผลประหยัดจากการบริหารจัดการระบบสะสมพลังงาน 11.81 % และผลประหยัดจากการบริหารจัดการภาระทางไฟฟ้า เช่น Peak Clipping และ Load Filling คิดเป็น 5.78 % ดังแสดงในรูปที่ 52

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้นำเสนอผลการศึกษาและการพัฒนา Algorithm โดยใช้ฟิวส์ลอคจิก เพื่อการบริหารจัดการกำลังไฟฟ้า ของระบบสมาร์ตไมโครกริดเพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก รายละเอียดดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาวิจัย การพัฒนา Algorithm โดยใช้ฟิวส์ลอคจิก เพื่อการบริหารจัดการกำลังไฟฟ้า ของระบบสมาร์ตไมโครกริดเพื่อลดผลกระทบจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก กล่าวคือ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากเชื่อมต่อเข้ามาในระบบจำหน่าย จะพบปัญหาในเรื่องของคุณภาพไฟฟ้าโดยเฉพาะแรงดันไฟฟ้าที่สูงเกินที่การไฟฟ้ากำหนด ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการที่มี Active Power จำนวนมากจ่ายเข้าไปในระบบจำหน่าย ดังนั้นในงานวิจัยจึงพัฒนา Control Algorithm ที่มาควบคุม Grid Inverter ให้ทำงานในการรักษาระดับแรงดันของระบบจำหน่ายให้อยู่ในช่วงที่การไฟฟ้ากำหนด นอกจากนั้น ในกรณีที่คุณภาพไฟฟ้าอยู่ช่วงที่การไฟฟ้ายอมรับ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ จะทำการบริหารจัดการระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่) ในการ Charge และ Discharge เพื่อให้สอดคล้องกับโครงสร้างไฟฟ้าแบบ TOU เพื่อการลดค่าไฟฟ้า อีกทั้งยังมีการบริหารจัดการ Load ควบคุมด้วยระบบ BEMS เพื่อการใช้ไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากผลการวิจัยในการพัฒนา Control Algorithm ดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ผลการวิจัยในการบริหารจัดการฝั่ง Supply side ร่วมกับระบบสะสมพลังงาน คือ การบริหารจัดการเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าให้ทำงานในโหมด Grid Support Functions โดยการปรับ PF ให้เหมาะสมกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจากการที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จ่าย Active Power เข้าไปในระบบ โดย PF ที่เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าปรับจะอยู่ในช่วง 0.90 – 1 Leading และ Lagging และการ charge ไฟฟ้าลงในระบบสะสมพลังงานเพื่อเพิ่ม Load ให้กับระบบจำหน่าย และสร้าง Balance ระหว่าง Supply และ Demand จากผลการ Simulation โดย DigSILENT Power Factory พบว่า Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้ากรณีที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงเกินมาตรฐานของการไฟฟ้าให้ลดระดับลงมาในช่วงที่คณะวิจัยกำหนด คือ 0.94 p.u. -1.06 p.u. ซึ่งดีกว่าช่วงที่การไฟฟ้ากำหนดคือ 0.90 p.u. – 1.10 p.u.

ผลการวิจัยในการบริหารจัดการฝั่ง Demand ร่วมกับระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่) โดยมีเป้าหมายเพื่อใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดค่าไฟฟ้าให้มากที่สุด ในงานวิจัยนี้เรียกว่า Economic operation ตามโครงสร้างค่าไฟฟ้าแบบ TOU ซึ่งจะประกอบด้วยค่าไฟฟ้าช่วง Peak และช่วง Off Peak ซึ่งค่าไฟฟ้าช่วง Peak จะมีค่าไฟฟ้าที่สูงกว่าช่วง Off peak ดังนั้น Control Algorithm ที่พัฒนาขึ้นจะต้องลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าในช่วง Peak มากที่สุด หรือการทำ Load Clipping โดยการลดการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นซึ่งควบคุมด้วยระบบ BEMS พร้อมด้วยการบริหารจัดการระบบสะสมพลังงาน คือ Charge และ Discharge พลังงานไฟฟ้าในระบบสะสมพลังงานกล่าวคือ ในช่วง Peak Time จากผลการที่ Control Algorithm ทำการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ Smart Grid หรือ Microgrid ตาม Function ของ Economic Operation พบว่าจะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ถึง 17.58 % โดยที่ไม่ได้เปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าเลย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดลองใช้ control Algorithm ในระบบจำหน่ายในระบบ Feeder 22 kV เพื่อเป็นการยืนยันผลการ Simulation

2. ควรมีการศึกษาปัจจัยแวดล้อมเชิงลึกที่ส่งผลต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย และการศึกษาผลของ Control Algorithm ตามโครงสร้างค่าไฟฟ้าแบบอื่น เช่น Real Time Pricing , Critical Peak Pricing เป็นต้น



บรรณานุกรม

- [1] REN21. Renewables 2017: Global status report. ISBN 978-3-9818107-6-9.
- [2] กระทรวงพลังงาน. (2559). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2558-2579)
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน. ภูมิสารสนเทศสถิติพลังงานทดแทน. แผนที่แสดงที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และโซลาร์รูฟในประเทศไทย 2556. สืบค้นเมื่อกรกฎาคม 2560. จาก http://www.dede.go.th/dede/images/stories/file/filemap_re/2556/solar13.png.
- [4] Who pays for solar energy. (2014). PV Rooftop in Australia. Energy supply association of Australia. www.esaa.com.au.
- [5] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2553. โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2560. จาก <http://www.ee.eng.chula.ac.th/smartgrids/index.php/smart-grids/80--smart-grids/smart-grid-doc/72>
- [6] พิพิธภัณฑเทคโนโลยีสารสนเทศ. (2561). สืบค้นเมื่อวันที่ 5 เมษายน 2561. จาก http://122.155.197.218/index.php?option=com_k2&view=item&id=6074:smart-grid&Itemid=268
- [7] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (smart grid).
- [8] Vehbi C. and etc. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards . สืบค้นเมื่อวันที่ 5 เมษายน 2561. จาก [https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/18406/Gungor_Smart\(2011\).pdf?sequence=](https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/18406/Gungor_Smart(2011).pdf?sequence=1)
- [9] วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร. (2558). การศึกษาผลกระทบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่ติดตั้งบนหลังคา กรณีปริมาณติดตั้งสะสมรวมในระดับเมกะวัตต์. กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน.
- [10] Pertti Jarventausta, Sami Repo, Antti Rautiainen and Jarmo Partanen. (2010). Smart grid power system control in distributed generation environment. Annual Reviews in Control 34. p.277–286.
- [11] Luca Ardito, Giuseppe Procaccianti, Giuseppe Menga and Maurizio Morisio (2013). Smart Grid Technologies in Europe. Energies, Volume 6, p. 251-281.
- [12] Rosario Miceli (2013). Energy Management and Smart Grids. Energies, Volume 6, p.2262-2290.
- [13] สมพล โคศรี และบุญยั้ง ปลั่งกลาง, “ระบบควบคุมและจัดการพลังงานสมาร์ตกริดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบแยกเดี่ยวจากพลังงานทดแทน,” (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553).

- [14] ประเมษฐ์ จิตเจนการ ประภาช ไพรสวรรณาและสุรินทร์ คำฝอย, “เครื่องอัดประจุแบตเตอรี่สำหรับพาหนะพลังงานไฟฟ้ารองรับการใช้งานระบบสำรองพลังงานในโครงข่ายอัจฉริยะ,” (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555).
- [15] Manuela Sechilariu, Baochao Wang and Fabrice Locment. (2013). Building-integrated microgrid: Advanced local energy management for forthcoming smart power grid communication. *Energy and Buildings* 59. p.236–243.
- [16] LI Bao-shu and GE Yu-min. (2012). Improving Power Quality by Smart Load. *Energy Procedia* 17. p.813–817.
- [17] Toshihisa Funabashi, Ryuichi Yokoyama. Microgrid Field Test Experiences in Japan.
- [18] บทที่ 18 ฟัซซีลอจิก. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 เมษายน 2561. จาก [https://www.academia.edu/7750667/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5_18_%E0%B8%9F%E0%B8%B1_%E0%B8%8B%E0%B8%8B%E0%B8%B5_%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%88%E0%B8%B4_%E0%B8%81_Fuzzy_Logic_\(Ae_Suwaphan, Upload\)](https://www.academia.edu/7750667/%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5_18_%E0%B8%9F%E0%B8%B1_%E0%B8%8B%E0%B8%8B%E0%B8%B5_%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%88%E0%B8%B4_%E0%B8%81_Fuzzy_Logic_(Ae_Suwaphan, Upload))





ภาคผนวก บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องโครงการโครงการ ฯ

Received March 19, 2018, accepted May 8, 2018, date of publication May 21, 2018, date of current version June 29, 2018.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2018.2838581

Fuzzy Control Algorithm for Battery Storage and Demand Side Power Management for Economic Operation of the Smart Grid System at Naresuan University, Thailand

KONGRIT MANSIRI[®], (Fellow, IEEE), SUKRUEDEE SUKCHAI,
AND CHATCHAI SIRISAMPHANWONG, (Member, IEEE)

School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand

Corresponding author: Chatchai Sirisamphanwong (chatchaisi@nu.ac.th)

ABSTRACT This paper presents a fuzzy logic-based algorithm developed for battery storage power management (BSPM) and demand side power management (DSPM) for the School of Renewable Energy Technology (SERT)-Smart Grid (SSG) at Naresuan University in Phitsanulok, Thailand. This algorithm enables lower cost operation of the SSG by utilizing the time of use electricity-pricing concept and thus is called the Fuzzy Low-cost Operation (FLO) algorithm. After applying the FLO algorithm to the SSG, the BSPM can strategically handle fluctuating PV production by intelligently alternating between absorbing power during high solar irradiation periods and discharging power to the load during peak consumption times. The FLO algorithm also empowers the SSG's DSPM to decrease the peak load by using SERT's building energy management system to disconnect noncritical load as desired, for example lighting, air conditioners, and dummy heater load (used for research testing purposes). Research results show that the FLO algorithm successfully decreased SERT's annual electricity bill by 17.58%, equivalent to a grand total of \$ 9148 in annual savings. Of 17.58% in savings, 5.78% came from modifications to the BSPM and 11.81% came from modifications to the DSPM. The average monthly savings correspond to \$762 (\$250 from BSPM and \$512 from the DSPM), significant savings that without the FLO algorithm would not be available.

INDEX TERMS Fuzzy logic control, smart grid system, battery power management, demand response, demand side management, TOU electricity price.

I. INTRODUCTION

Today increasing air pollution, global warming concerns, looming exhaustion of fossil fuels and their increasing cost have made it imperative to look to renewable energy Sources as a future energy solution [1]–[4]. Solar energy in particular has high potential in Thailand. Increased renewable energy systems connected to low voltage distribution system have some negative impacts such as decreased power quality (voltage variations, frequency variations, harmonics distortion, etc.) [5]–[13]. The ideal solution to these problems is to use a smart grid system in order to support the expansion of electricity generation from renewable energy systems [14]–[16]. Smart Grid Technology can reduce transmission losses and lead to large reductions in GHG emissions. Thailand's Smart Grid Master Plan (for 2015-2036) was developed under the Energy Policy and

Planning Office (EPPO) of the Ministry of Energy [17]. Pilot smart grid projects, both hardware and software, are being planned to develop and demonstrate feasibility. The School of Renewable Energy Technology (SERT) at Naresuan University knows that in the near future a smart grid will be vital for Thailand and so has developed the SERT-Smart Grid (SSG) to advance this research and to facilitate the soon to arrive smart grid in Thailand. Demand side power management (DSPM) has been one of the main focuses for studying and developing the SSG. The concept of demand response was implemented throughout all the buildings of SERT. Load, lighting and air-conditioning can be controlled by the building energy management system (BEMS).

The term of demand response (DR) refers to a change in load usage by the user from their normal load consumption pattern in response to changes in incentive payments,

the price of electricity or available power quality in the distribution system [18]–[21]. Within DR, price based programs are a set of tools used intentionally modify electricity prices in response to various situations. Current examples are time of use pricing (TOU), critical peak pricing (CPP), dynamic real time pricing (RTP), and day-ahead pricing (DAP) [22]–[24]. When the price of electricity is high, these price base programs can be used to encourage the end user to reduce their electricity consumption [25], [26]. Incentive based programs are another type tool within the DR concept, which allows utility administrators to switch noncritical load on and off when demand is too high and could compromise system power quality and system reliability [18]–[21].

Battery Storage Systems (BSS) are an essential part of any Smart Grid because BSS support grid network stability by establish and maintain a balance between fluctuating power generated from the RE system and load demand that is using that power. BSS benefits the grid operator by assisting in grid network operations such as peak shaving, load shifting, load levelling, frequency regulation and voltage stability control [27], [28]. BSS also benefits the customer by enabling them to manage their own energy demand; with BSS customers can store electricity at their own site, either electricity from the grid, or electricity from their own on-site RE generation system and then discharge it later when needed. This can increase the use of demand-site generated electricity and thereby reduce the amount of additional electricity needed from the grid [29], [30].

The purpose of this research is to develop an algorithm for controlling battery storage and demand side power management in the SERT-Smart Grid (SSG) and in this way save electricity cost. This control algorithm has been developed by applying fuzzy logic to BSPM and DSPM, providing more economical operation of the SSG by using time of use pricing. This Fuzzy Logic Operation (FLO) Algorithm has already been tested and is currently deployed in actual operation throughout the SSG, smoothly and efficiently managing both BSPM and DSPM. The FLO Algorithm is a boon for both grid users and administrators, not only reducing electricity costs but also increasing stability and reliability of the whole grid network, because electricity demand on the grid during peak time is reduced providing the balance between supply and demand.

II. SERT-SMART GRID

The School of Renewable Energy Technology (SERT) at Naresuan University established a 120 kW Microgrid system in 2005. This system was built for school consumption, demonstration and research purposes. As SERT expanded, additional RE components were installed: a battery energy storage system and a monitoring & control system. These transformed SERT's Microgrid into the SERT Smart Grid (SSG). SSG's infrastructure, shown in Figure 1, comprises 350 kW of ground mounted PV arrays, 50 kW PV of rooftop systems, 500 kWh of battery storage capacity in

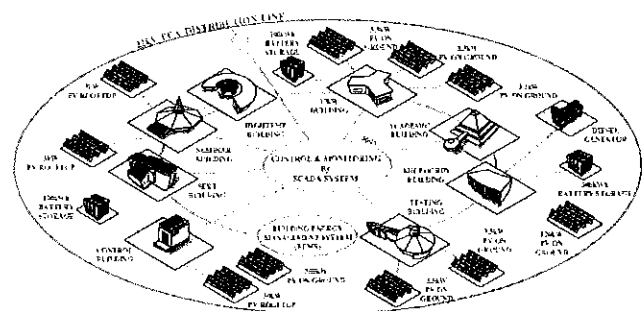


FIGURE 1. The SERT smart grid (SSG).

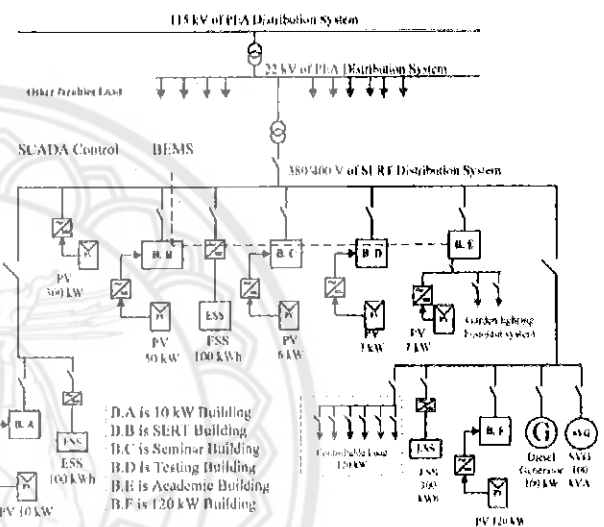


FIGURE 2. Schematic diagram of the SERT smart grid (SSG).

3 units and 600 kW capacity of grid inverters in 22 units, all managed through a SCADA system. The newly installed BEMS manages energy efficiently in all the buildings of SERT. The SSG system functions seamlessly in both grid connected and island modes to ensure uninterrupted power supply to the campus. Demand and supply balancing is carried out using a SCADA system and BEMS.

The control and monitoring system of SSG consists of two parts; the first is the SCADA system, which controls the grid inverter and the battery inverter. Among its many functions, SCADA manages alternation between grid connected mode and island mode. SCADA not only controls the electric power but also continually monitors and records numerous electrical parameters concerning system performance, power quality, load power and meteorology, delivered in one minute intervals. The second control and monitoring component of SSG is BEMS, which can manage lighting and air conditioning loads remotely from any internet connected device. Time scheduling can be set for certain loads to turn them on or off. These sorts of modernizing components and automated operations can significantly improve performance, reduce losses and reduce the cost of operating the SERT Smart Grid.

III. DEVELOPMENT OF THE FLO ALGORITHM

After collecting extensive data on the SSG, and analyzing both the advantages and disadvantages of the original system, an algorithm operating with fuzzy logic (FL), the FLO Algorithm, was developed to greatly increase control of the BSS and load for maximum economic operation. Fuzzy logic method (FLm), a flexible and powerful tool with much potential for electrical power systems, is similar to human beings' feelings and a decision-making processes. Fuzzy logic control is a range to point or range-to-range control. The output of FLm is derived from Fuzzifications of both input and output using the associated membership functions [31]–[33]. A crisp input will be converted to a membership function based on its value. In this way, the output of FLm is based on the various membership functions, each of which can be thought of as a range of inputs. FL techniques have been widely applied throughout many aspects of modern life. Implementing fuzzy logic in a real application involves three essential steps: 1. Fuzzification, to convert crisp values to fuzzy data using membership functions (MF), 2. Inference process, to process MF within sets of rules or laws to develop the fuzzy output and 3. Defuzzification, to determine the correct output. Fuzzy logic controller of the FLO Algorithm is shown in Figure 3. The FLO Algorithm consists of BSPM and DSPM, which were developed by fuzzy logic, It performed well in electrical power application like SSG. The advantages of the FLO Algorithm was achieved; maximum of RE energy source, load leveling, load balancing and cost efficient.

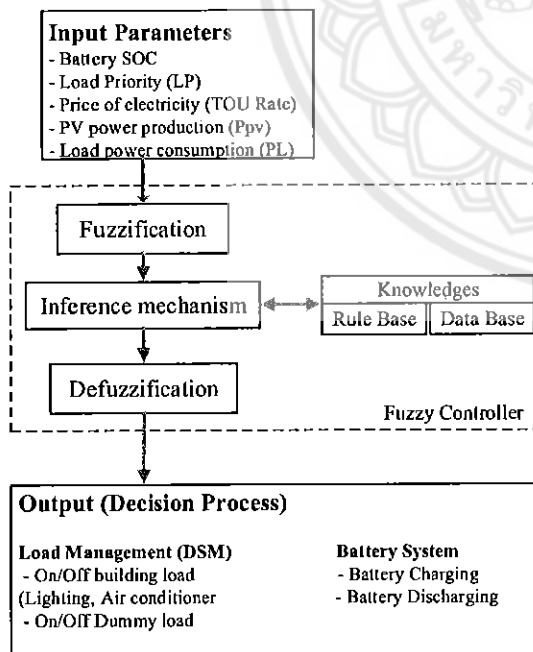


FIGURE 3. Fuzzy logic controller of the FLO algorithm.

The input and output parameters of fuzzy logic controller are showed in Figure 3. The FLO Algorithm, which was developed for SSG is illustrated in Figure 4.

The purpose of the FLO Algorithm is for economic operation of the SSG, reducing the price of electricity consumption by using variable TOU pricing. It means that the pricing is according to peak and off peak time. In Thailand, the electricity price is \$0.122 per kWh during peak times and \$0.079 per kWh during the off peak times. The control strategies empowers to manage a DSPM and BSPM following the peak and off peak times.

During peak times, if PV production is higher than PL and the state of charge (SOC) of the battery is lower than 0.98. The SSG system designed to charge the battery by using FLm (Charging mode). Inputs parameters concerning the charging mode are, SOC of the Battery, PV power production (Ppv) and load power (PL). If Ppv is still higher than PL plus Pb (Power of battery) then SSG system will look for load filling (Turn on load for using electricity from PV system) by FLm. The parameters of this process consist of Ppv-PL and load priority (LP) that is a capacity of load which is able to turn on in percentage. After this process, if Ppv is still higher than PL + Pb then SSG order to inject electrical power to grid (PVtG). The advantage of the FLO Algorithm during the peak time when Ppv higher than PL is to maximize the use of electricity from the PV system.

During the peak times, if $Ppv < PL$ and the $SOC > SOC_{min}$ (0.35) then the SSG designed to discharge the battery system by using FLm to decrease the peak load and to decrease energy demand during the peak period. Input parameters in this process consist of Ppv-PL and the SOC of the batteries. The battery will discharge until SOC is equal to 0.35 then the process will stop. On the other hand, if the $SOC \leq SOC_{min}$ (0.35) then the process is directed to decrease the load power by using the load crippling process. Describable, input parameters in this process consist of load priority (LP) which is the capacity of load power that can be turned them off for decreasing the peak load. The advantage of this process is to decrease the peak load and energy demand during peak time by BSPM and DSPM.

During off peak time, $PV-P > 0$ and $SOC < 0.98$ then SSG will operate as the charging mode by FLm. Input parameters in this process consist of Ppv-PL and SOC of the battery. If $PV-PL-P_{batt} > 0$ then the SSG will look for a load filling process. The load filling was designed by using FLm. Then if $PV-PL-P_{batt} > 0$ the electricity will be fed to the grid (PVtG). The advantage of this process is to maximize the use of electricity from the PV system.

During off peak time, $PV-PL < 0$ and $SOC < 0.98$ then SSG will operate as the charging mode by FL method. Input parameters in this process consist of Ppv-PL and SOC of battery. This process will fully charge battery ($SOC = 1$ by theory). The electricity in charging process comes from the main grid (GtB) because during off-peak period, electricity cost is cheaper than peak time. The advantage of this algorithm is the battery will permanently be full capacity waiting for the next coming peak time.

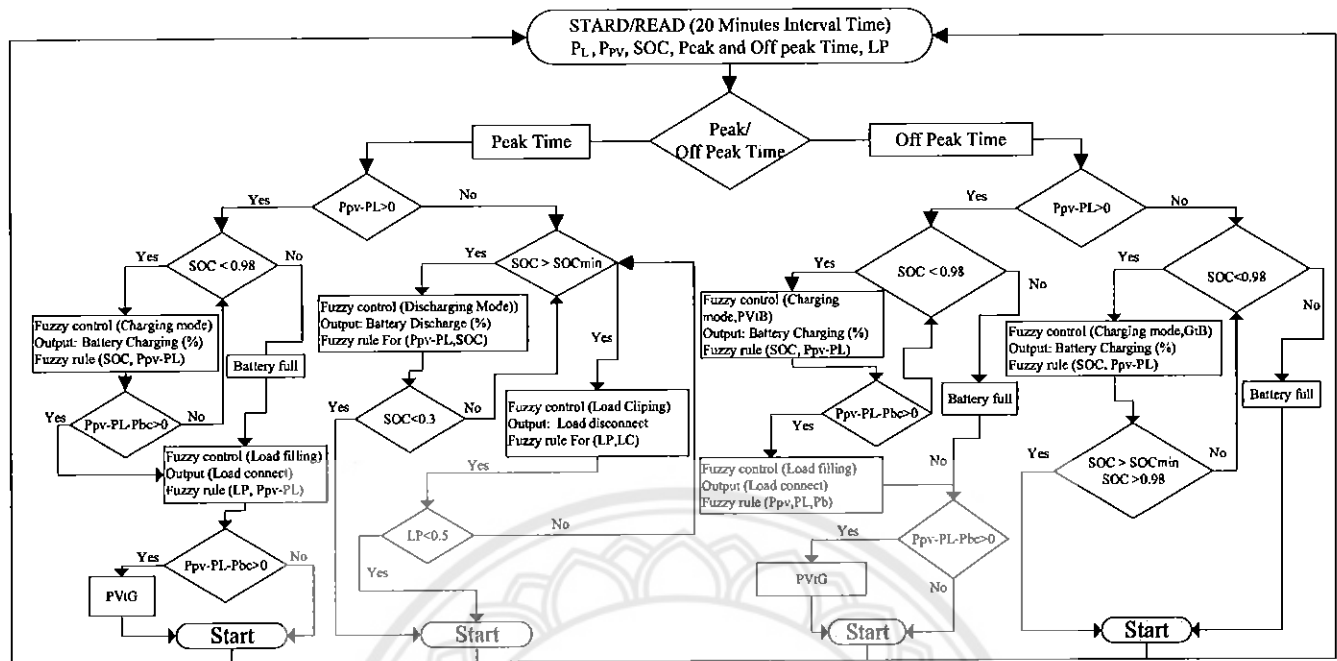


FIGURE 4. Fuzzy logic operation algorithm (Flo Algorithm).

A. MODEL OF CONCERNED PARAMETERS

This research mainly focuses on battery and load management. The model of both parameters can be described as follows.

1) BATTERY

The battery state of charge (SOC) is very important for battery management during charging mode or discharging mode. SOC is estimated based on the amount of power charge or power discharge that has been extracted from the battery [34], [35]. The SOC value can be simply calculated as follows.

$$SOC = \alpha SOC_c + (1 - \alpha) SOC_v \tag{1}$$

Where, SOC_c is the Coulomb-counting based on SOC and SOC_v which is the voltage-based SOC. Term $\alpha (\in [0, 1])$ is the weight factor. SOC_c is calculated based on the amount of charge and discharge. SOC_c can be estimated as follows.

$$SOC_c(t) = SOC_c(0) - \frac{1}{Q} \int_0^t I(t) dt \tag{2}$$

Where, Q is a constant that relates to the current with charges (I). SOC_v is an estimation based on the open-circuit voltage (OCV) of the battery. It is defined as the voltage between the anode and cathode of the battery when there is no external load connected and no external current between the terminals. The relationship between OCV and SOC is given as below.

$$OCV(t) = \alpha SOC(t) + b \tag{3}$$

Where a is a slope of SOC decreasing and increasing during charge and discharge modes. b is a constant determined by the test measurement.

2) LOAD MANAGEMENT

In the SSG, the energy storage system (ESS) can work as a load during charging mode. On the other hand, ESS can work as a generator during discharging mode. Therefore, it is able to perform a peak shifting to reduce the peak load consumption during the peak time. It results in improving the economic operation of the SSG by load shave management. Load shave management refers to the reduction of large fluctuations in energy demand. During the peak time, total power production ability of RE system (DG_{RES}) in SSG is $P_{DG,peak}$ [36]

$$P_{DG,peak} = \sum_{i \in M_{peak}} P_{DG_i} \tag{4}$$

When, M_{peak} is the set of all DG_s that operate during the peak period. The desired load level (P_{level}) is designed as economic load shave management for ESS in SSG operation during peak and off peak times. The energy consumption during the peak time for the next day is required as follows.

$$E_{peak} = \int_{T_{a,peak}}^{T_{b,peak}} (P_D(t) - P_{level}) dt \tag{5}$$

The total energy demand for ESS during peak time is the load shaved by P_{level} .

$$(SOC_{res} - SOC_{min}) \times E_{rq} = E_{peak} \tag{6}$$

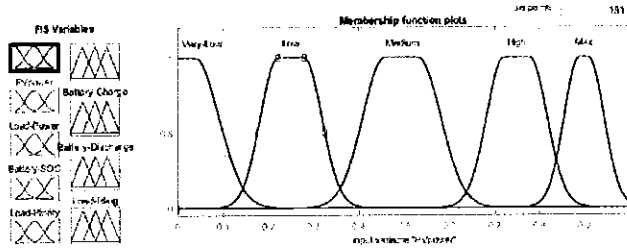


FIGURE 5. Membership functions of PV power production.

All parameters were converted into membership functions by Fuzzification process and then go for others process of fuzzy logic method as describe below.

B. FUZZIFICATION

Fuzzification is the process to convert crisp values to fuzzy data using membership functions (MF). Input parameters concerned economics operation of SSG consists of Vgrid, SOC, Ppv, PL, and LP as showed in Figure 3. All parameters were converted in to the membership function as listed below.

Figure 5 illustrates the membership functions (MF) of PV power production (Ppv) which was classified into ranges of MF; very low, low, medium, high and max based on power production in percentage of capacity at any instance of time.

TABLE 1. Ranges of membership functions of Ppv.

MF (Ppv)	Vary-Low	Low	Medium	High	Max
Ranges	0-0.2	0.1-0.4	0.3-0.7	0.6-0.9	0.8-1
Ppv(kW)	0-24	12-48	36-84	72-108	96-120

The range of Ppv’s MF was in between 0 to 1, 1 is mean 100 % of PV power production (120 kW).

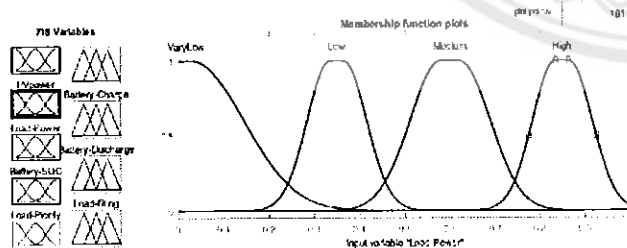


FIGURE 6. Membership functions of load power consumption.

Figure 6 shown the load power demand (PL) consumption which was divided into ranges of MF; very lower, low, high and very high base on load demand in percent of capacity at any instance of time. The maximum power demand in this research was 240 kW.

The range of PL’s MF was in between 0 to 1, 1 is mean 100 % of load power demand (240 kW).

Figure 7 shows the battery state of charge (SOC). It is divided into ranges of MF; very low, low, medium, high and

TABLE 2. Ranges of membership functions of PL.

MF (PL)	Vary-Low	Low	Medium	High
Range	0-0.3	0.2-0.5	0.4-0.8	0.7-1.0
Load (kW)	0-72	48-110	96-192	168-240

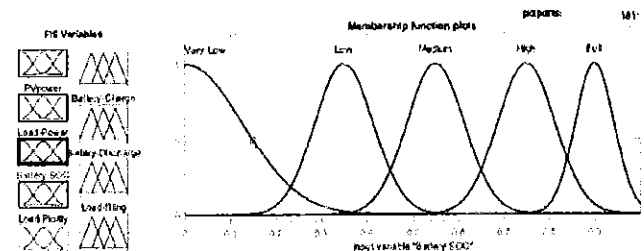


FIGURE 7. Membership functions of battery SOC.

TABLE 3. Ranges of membership functions of SOC.

MF (SOC)	Vary-Low	Low	Medium	High	Full
Range	0-0.3	0.2-0.5	0.4-0.7	0.6-0.9	0.8-1
SOC	0-0.3	0.2-0.5	0.4-0.7	0.6-0.9	0.8-1

TABLE 4. Ranges of membership functions of LP.

MF (LP)	Vary-Low	Low available	Medium available	Critical
Range	0-0.2	0.1-0.4	0.3-0.55	0.5-1.0
Load Power (kW)	0-32	24-96	72-132	120-240

full that based on the available charge capacity in percentage at any instance of time.

The range of SOC’s MF was in between 0 to 1, 1 is mean 100 % of battery full capacity (SOC equal 1).

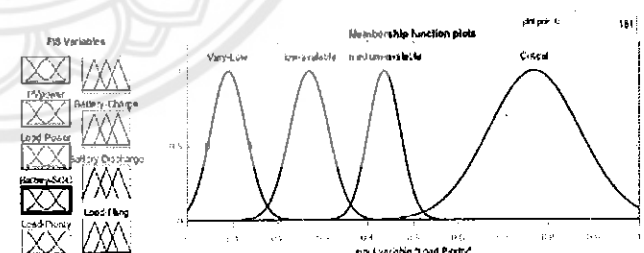


FIGURE 8. Membership functions of load priority (LP).

Figure 8 illustrates the load priority, it is the capacity of load, which is able to disconnect in emergency cases or as an economic operation. LP was classified into ranges of MF; very low, low available, medium available, Critical. The critical loads is the load demand, which was unable to disconnect because this load was the base loads about 50 % of SSG total load.

The range of LP’s MF was in between 0 to 1, 0.5-1 is unable to disconnect.

TOU electricity prices in this research was referenced from Provincial Electricity Authority (PEA), Thailand. Electricity

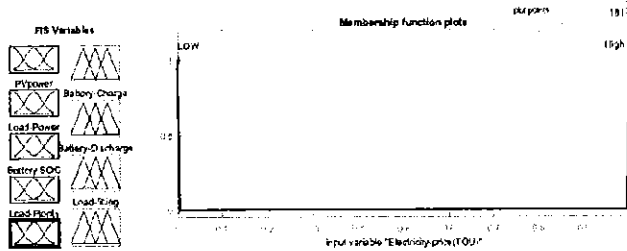


FIGURE 9. Membership functions of electricity prices.

TABLE 5. Electricity price at TOU rate.

Distribution Voltage	Electricity Price (USD)	
	Peak Time (high)	Off Peak Time (Low)
22 kV	\$0.122	\$0.079
The peak time is at 9.00 A.m. – 22.00 P.m		
The off peak time is on Saturday ,Sunday and others official holidays		
1 USD (U.S. Dollar) = 33 THB (Thai Baht)		

prices were divided into two rates, high value during peak time and low value during off peak time as show in the Table 5 [37].

C. FUZZY INFERENCE

The Fuzzy Inference Process is the combination of membership functions with the knowledge, rule base and control rules to refine the fuzzy output. The fuzzy control rule is considered as the knowledge of experienced persons in any field of application. A fuzzy IF-THEN rule membership described linguistic variants and fuzzy sets to investigate a fuzzy output or conclusion. Fuzzy inference of the FLO Algorithm consisted of battery charging and discharging modes and load filling and clipping modes during peak/off peak time as show in Figure 4. An example of Fuzzy inference of the FLO Algorithm is battery-discharging process as show in Table 6.

TABLE 6. Fuzzy inference of discharging process.

Inputs/Outputs Parameters	MFs	Rule base No.																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Input parameters PL-Ppv	Very Low	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Low	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Medium	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	High	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Input parameter Battery SOC	Very Low	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Low	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Medium	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	High	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Output Battery Discharging	Very Low	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Low	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Medium	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	High	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Max	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

D. DEFUZZIFICATION

The defuzzification process converses the fuzzy output to a crisp output, number or digital output to the control objective of any related field of application. After the inference

process, the output is still has linguistic variants, it needs to be converted to the crisp variable outputs, which is easy to understand for controlling the equipment. This research used the centroid method as show in equation 7.

$$D_{output}^{crisp} = \frac{\int \mu_p(x).xdx}{\int \mu_p(x)dx} \tag{7}$$

When, D_{output}^{crisp} is the decision output of BSPM and DSPM and $\mu_p(x)$ is the degree of output membership function.

The outputs by Defuzzification of the FLO Algorithm for the SSG were simulated with the academic version of MATLAB. The outputs of the FLO Algorithm can be separated into two parts, first is BSPM, which consisted of battery charging and discharging mode and second is DSPM, which consisted of load filling (load connect) and load clipping(load disconnect). The examples of outputs of the FLO Algorithm were followed, Figure 10 is a battery discharging mode, Figure 11 is a battery charging mode and Figure 12 is a load filling mode.

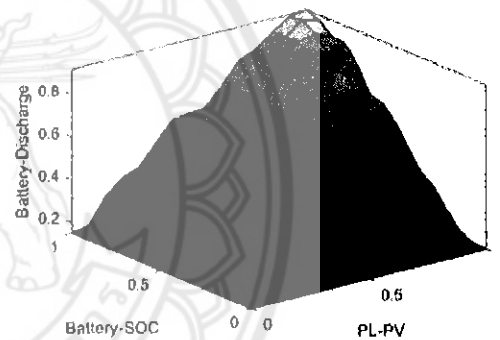


FIGURE 10. Output of the FLO Algorithm for battery discharging mode.

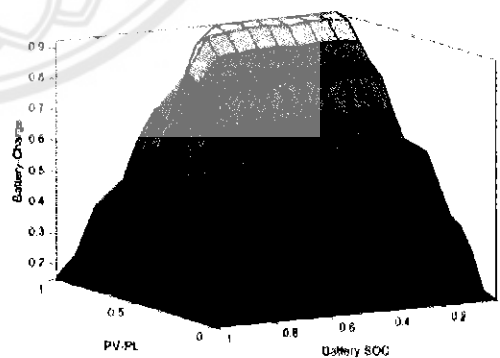


FIGURE 11. Output of the FLO Algorithm for battery charging mode.

IV. RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

As previously mentioned, the prime mission of the FLO Algorithm is to decrease power purchase from the main grid during peak times and also to maximize use of electricity that can be sourced from PV systems (as opposed to electricity purchased from the main grid). Tests of the FLO

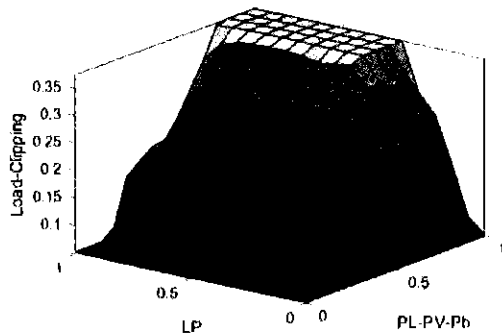


FIGURE 12. Output of the FLO Algorithm for load clipping.

Algorithm went well, and its performance and output were successful. The results of the experiment illustrate how load shaving, peak load clipping and load filling are controlled and managed in a balance between two main entities in the SSG. The first entity is the BSPM, which discharges electrical power during peak times in order to decrease the amount of electricity that must be purchased at the high price. Conversely, electricity is charging the batteries during off peak times when the price is low. Power is also sent to charge the battery when PV power production is in excess of what is being used. The second entity is the DSPM, which disconnects noncritical loads (for example certain lighting, air conditioning and heating) during peak time. The operation results of the SSG equipped with the FLO Algorithm are shown in Figure 13.

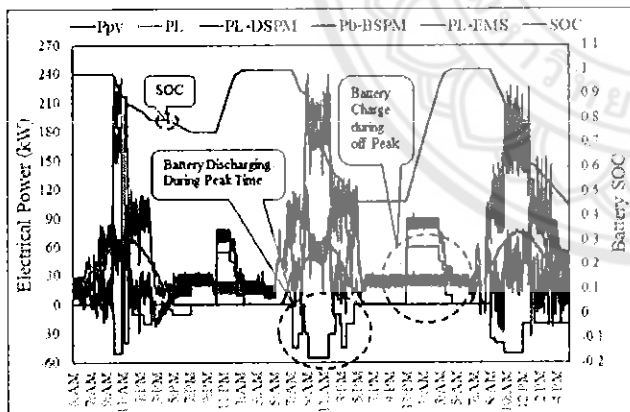


FIGURE 13. Operation of the SSG when equipped with the FLO Algorithm (PL-DSPM is load power that is managed by DSPM, Pb-BSPM is battery power that is managed by BSPM and PL-EMS is load power is fully managed by the FLO algorithm).

Figure 13 shows that during peak times, load (i.e. power consumption) is decreased by the DSPM. This process decreased the load by 11.81 %. This was calculated from the difference between PL and PL-DSPM. During battery discharge, energy demand can be decreased by about 18.98 %. During peak time, 30.79 % of electrical energy demand was decreased by the DSPM and the BSPM. During off peak time, the FLO Algorithm directs the SSG to charge the battery

when the battery SOC is lower than 0.98. This is when the batteries are charged from the main grid, because the price of electricity is lower than during peak time. The battery always needs to be charged to full capacity prior to the next coming day. In Figure 13, when the BSPM line (purple) dips below zero (on the left vertical axis), that means the battery is discharging, and when the BSPM line is above zero, the battery is charging. During this process, the normal and unavoidable energy loss was 6.82 % from the charging and discharging processes, these losses depend on the efficiency of power conversion units in the system.

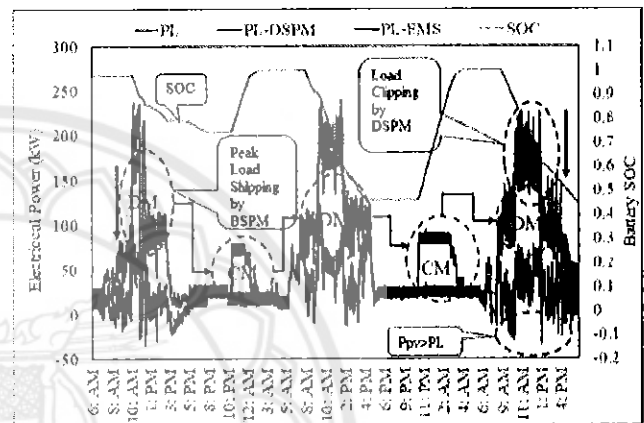


FIGURE 14. SSG's response to the BSPM and DSPM to decrease the load demand at peak time. (DM = discharge mode, CM = charge mode).

Figure 14, shows that the SSG responded correctly according to the vision of the applied the FLO algorithm, changing the load profile as planned. The load demand decreases during the peak time in response to the DSPM and BSPM ($P-BSM = PL - Ppv - PL-EMS$). The SOC of battery storage (seen in Figure 14) decreases during discharge mode (DM) and increases during charging mode (CM). During off peak time, electricity prices are lower than during peak time, so if the SOC is not full ($SOC > 0.98$), the FLO Algorithm directs it to charge until SOC reaches full capacity.

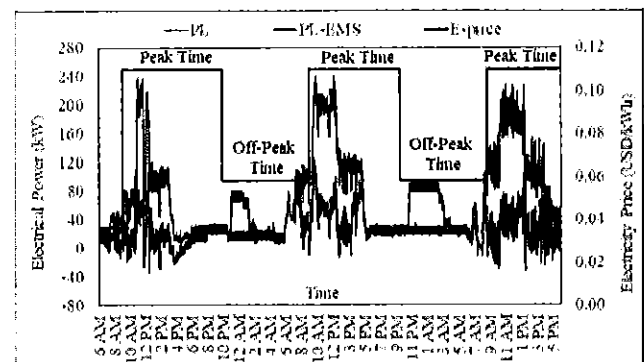


FIGURE 15. SSG's load profile before (orange) and after (blue) application of the FLO algorithm. (E-price is electricity prices).

Figure 15, shows how the power load without energy management (orange, PL) is high during peak time,

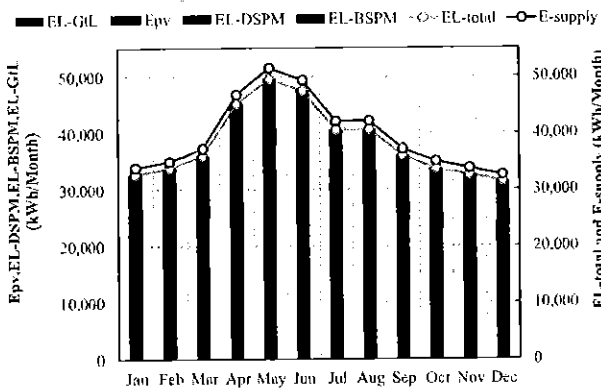


FIGURE 16. Percentage for energy consumption in the SSG (EL-GtL is load demand that is supplied from main grid, EL-total is the total energy consumption, E-supply is total energy supply to the load include loss from battery charging/discharging processes).

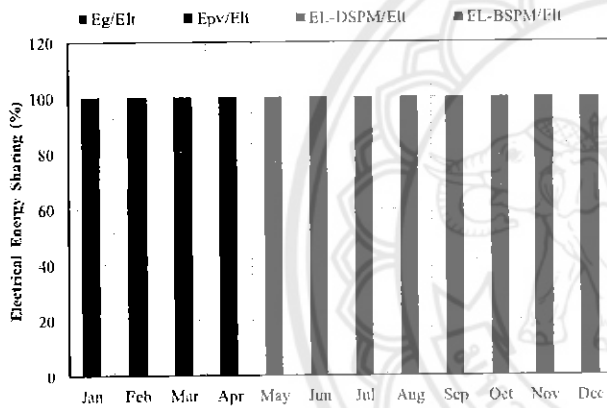


FIGURE 17. Electricity costs saved by the DSPM and BSPM with the FLO Algorithm (Eg/Elt is the percentage of electricity from main grid per total energy consumption, Epv/Elt is the percentage of electricity from PV system per total energy consumption, EL-DSPM/Elt is the energy demand that is managed by DSPM per total energy consumption, EL-BSPM/Elt is the energy demand that is managed by BSPM per total energy consumption).

corresponding to the University's normal pattern of electricity use. The staff and students have classes and other activities from 8.00 a.m. – 16.30 p.m. The BSPM following the FLO Algorithm (blue PL-EMS) applies load shifting so that the battery discharged electricity to load demand during peak times for decreased electricity purchase from main grid. During this period, if PV output is higher than load consumption, electricity is charged to battery system, i.e. during the off peak periods. The set start time of the charging mode is 11:00 PM, because very few people are working at that time, corresponding to very low load demand. In contrast, during peak times the battery was discharging in response to energy demand.

The annual operation results of the SSG with the FLO Algorithm found that, average total energy consumption (EL-total) of the SSG was 38,295 kWh/month, this among

of electricity consumption was supplied from PV system about 13,866 kWh/month. The electricity demand during peak time was significantly decreased by DSPM and BSPM about 4,191 kWh/month and 7,071 kWh/month, respectively. The BSPM manages the SSG to charge the battery during off peak time when battery state of charge is not full on the other hand battery is discharge to electricity demand during peak time for decreased electricity purchase from main grid. The electrical energy sharing in percentage compare to the total electricity consumption, which was supplied about 36.98 %, 11.06 % and 18.90 % by 120 kW PV system, DSPM and BSPM, respectively.

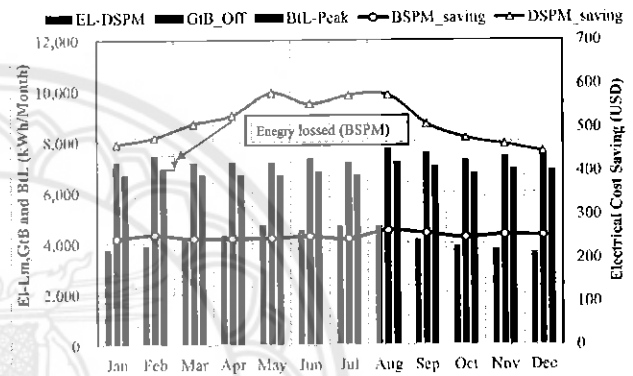


FIGURE 18. Electrical energy and cost saving by applied the FLO Algorithm (GtB_off is electricity is charged to battery from main grid during off peak time, BL-peak is electricity is discharged from battery to load demand during peak time, BSPM_saving is total amount of money saving by BSPM, DSPM_saving is total amount of money saving by DSPM).

Figure 18 indicated that during the off peak time, especially at nighttime, the FLO Algorithm commands to charge the battery permanently full capacity by purchasing electricity from the main grid. Charge and discharge electricity processes of battery storage system to minimize purchased electricity from main grid, the electrical energy loss was 6.82 %. This energy loss be influenced by the efficiency of power conversion system (PCS) which was installed in SSG. Although, during this process energy loss was occurred but it is worth to follow this process because the process significantly enable to save money. Forasmuch, the TOU electricity prices is so different about 34.74 %, it is calculated by prices of electricity during peak time (\$0.122/kWh) and off peak time (\$0.079/kWh). Thus, the SSG with the FLO Algorithm designed to charges the batteries during off peak times at a lower price of electricity on the others hand discharged electricity from battery to load demand during peak times for decreasing purchased electricity from the main grid.

This process, BSPM pretty save money about \$3006/year or 5.78 % when compared to total electricity bill (52,021/year). 5.78 % of saving is rather small amount but this value is direct proportion to the capacity of battery storage and load. During BSPM process enables to save money about 29.94 % (Analyzed by charge battery with low price during off-peak time on the other hand discharge

electricity with high price during peak time). DSPM reduced the electrical energy demand by disconnected noncritical load (certain lighting, air conditioning and heating) during peak time. This process (DSPM) can significantly save money about \$6,144 per year or 11.81 % when compared to total electricity bill. Figure 19 indicated that after applied the FLO Algorithm into the SSG, the monthly electricity cost was significantly decreased. The total annual electricity cost was saved \$9,148 or 17.58 % when compared to total annual electricity bill.

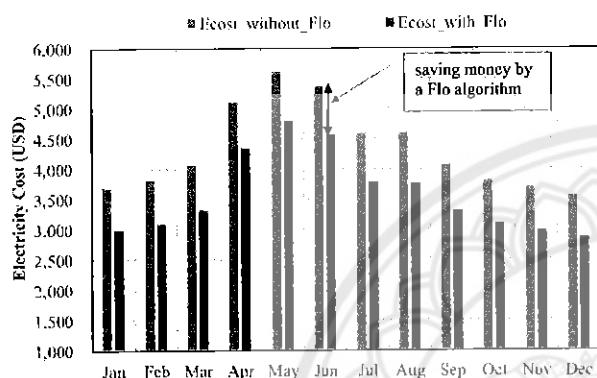


FIGURE 19. Monthly electricity cost compared between with and without the FLO Algorithm applied to the SSG (Ecost_without_Flo is electricity cost of the SSG without the FLO algorithm, Ecost_with_Flo is electricity cost of the SSG with the FLO algorithm).

V. CONCLUSION

The School of Renewable Energy Technology (SERT) anticipates the importance of a national Smart Grid in Thailand and so developed the SERT Smart Grid (SSG) as a research vehicle to prepare for the future. The FLO Algorithm skillfully manages power load and battery storage systems to optimize operations in response to peak and off peak electricity prices for the most economical outcome. A smart and advance algorithm enables to decrease the negative impacts of power fluctuation from RE systems and allows them to make quick and correct decisions. An importance of applying the FLO Algorithm in SSG significantly reduced cost of electricity by two entities, demand side power management (DSPM) and battery storage power management (BSPM) following Time of Use (TOU) pricing. DSPM can monthly reduce cost of electricity about 11.81 % and BSPM, charge and discharge strategy of battery storage system can pointedly reduce 5.78 % compared to total electricity bill and 29.94 % during BSPM process. For the process of BSPM, unavoidable energy loss during charging and discharging processes was 6.68 %. In conclusion, the FLO Algorithm, encompassing both the BSPM and DSPM, can significantly reduce the SSG's electricity costs, about 17.58 % or \$9,148 per year. The amount of money saved is directly proportional to the difference between the peak rate and off-peak rate (which the FLO Algorithm strategically leverages by intelligently managing

the BSPM and DSPM) as well as the battery storage capacity and load volume. Today as avenues are sought to decrease consumption of fossil fuels, A Smart Grid empowered with an innovative, intelligent algorithm is a robust solution for the near future.

ACKNOWLEDGMENT

This research is a part of algorithm development for energy management in smart grid to mitigate the connection of high penetration PV system impact, which was supported by Naresuan University. Finally, the authors place there thankful for School of Renewable Energy Technology (SERT) staffs for supporting the technical data and their support during laboratory work.

REFERENCES

- [1] P. Pinson, L. Mitridati, C. Ordoudis, and J. Østergaard, "Towards fully renewable energy systems: Experience and trends in Denmark," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 26–35, 2017.
- [2] S. K. Jha, J. Bilalovic, A. Jha, N. Patel, and H. Zhang, "Renewable energy: Present research and future scope of artificial intelligence," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 297–317, Sep. 2017.
- [3] M. M. Haque and P. Wilfs, "A review of high PV penetration in LV distribution network: Present status impacts and mitigation measures," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1195–1208, Sep. 2016.
- [4] Y. Hua, M. Oliphant, and E. J. Hu, "Development of renewable energy in Australia and China: A comparison of policies and status," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1044–1051, Jan. 2016.
- [5] A. O'Connell and A. Keane, "Volt-var curves for photovoltaic inverters in distribution systems," *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 11, no. 3, pp. 730–739, 2016.
- [6] H. Ghoddami and A. Yazdani, "A mitigation strategy for temporary over-voltages caused by grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 20, pp. 413–420, Jun. 2015.
- [7] S. Hashemi and J. Østergaard, "Methods and strategies for overvoltage prevention in low voltage distribution systems with PV," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 2, pp. 205–214, 2016.
- [8] S. Pukhrem, M. Basu, M. F. Conlon, and K. Sunderland, "Enhanced network voltage management techniques under the proliferation of rooftop solar PV installation in low-voltage distribution network," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 5, no. 2, pp. 681–694, Jun. 2017.
- [9] M. Armendariz, D. Brodén, N. Honeth, and L. Nordström, "A method to identify exposed nodes in low voltage distribution grids with high PV penetration," in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting*, Denver, CO, USA, Jul. 2015, pp. 1–5.
- [10] A. Ballanti and L. F. Ochoa, "On the integrated PV hosting capacity of MV and LV distribution networks," in *Proc. IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Latin Amer. (ISGT LATAM)*, Montevideo, Uruguay, Oct. 2015, pp. 366–370.
- [11] M. Mosadeghy, "Impact of PV penetration level on the capacity value of South Australian wind farms," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1135–1142, Jan. 2016.
- [12] M. Patsalides, V. Efthymiou, A. Stavrou, and G. E. Georghiou, "A generic transient PV system model for power quality studies," *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 526–542, Apr. 2016.
- [13] S. Simoes, M. Zeyringer, D. Mayr, T. Huld, W. Nijs, and J. Schmidt, "Impact of different levels of geographical disaggregation of wind and PV electricity generation in large energy system models: A case study for Austria," *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 183–198, May 2017.
- [14] H. Abdi, S. D. Beigvand, and M. La Scala, "A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, pp. 742–766, May 2017.
- [15] H. I. Amy Lee, H. H. Chen, and J. Chen, "Building smart grid to power the next century in Taiwan," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 126–135, Feb. 2016.

- [16] M. S. Hossain, N. A. Madloul, N. A. Rahim, J. Selvaraj, A. K. Pandey, and A. F. Khan, "Role of smart grid in renewable energy: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1168–1184, Jul. 2016.
- [17] N. Hoonchareon, "Thailand smart grid policy plan and roadmaps," Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, Tech. Rep., 2013.
- [18] P. Faria, J. Spinola, and Z. Yala, "Aggregation and remuneration of electricity consumers and producers for the definition of demand-response programs," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 12, no. 3, pp. 952–961, Jun. 2016.
- [19] A. Dadkhah and B. Vahidi, "On the network economic, technical and reliability characteristics improvement through demand-response implementation considering consumers' behavior," *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, vol. 12, pp. 431–440, Sep. 2018.
- [20] L. Panwar, S. K. Reddy, A. Verma, and B. K. Panigrahi, "Dynamic incentive framework for demand response in distribution system using moving time horizon control," *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, vol. 11, no. 17, pp. 4338–4347, 2017.
- [21] S. L. Arun and M. P. Selvan, "Dynamic demand response in smart buildings using an intelligent residential load management system," *IET Gener., Transmiss. Distrib.*, vol. 11, no. 17, pp. 4348–4357, 2017.
- [22] L. Xia, J. de Hoog, T. Alpcan, M. Brazil, D. A. Thomas, and I. Mareels, "Local measurements and virtual pricing signals for residential demand side management," *Sustain. Energy, Grid Netw.*, vol. 4, pp. 62–71, Dec. 2015.
- [23] D. Jang, J. Eom, M. J. Park, and J. J. Rho, "Variability of electricity load patterns and its effect on demand response: A critical peak pricing experiment on Korean commercial and industrial customers," *Energy Policy*, vol. 88, pp. 11–26, Jan. 2016.
- [24] N. I. Nwulu and X. Xia, "Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 16–28, Feb. 2017.
- [25] X. Wang, N. H. El-Farra, and A. Palazoglu, "Optimal scheduling of demand responsive industrial production with hybrid renewable energy systems," *Renew. Energy*, vol. 100, pp. 53–64, Jan. 2017.
- [26] M. H. Alham, M. Elshahed, D. K. Ibrahim, and E. E. D. A. El Zahab, "A dynamic economic emission dispatch considering wind power uncertainty incorporating energy storage system and demand side management," *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 800–811, Oct. 2016.
- [27] S. Barcellona, L. Piegari, V. Musolino, and C. Ballif, "Economic viability for residential battery storage systems in grid-connected PV plants," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 2, pp. 135–142, 2018.
- [28] Z. Cabrane, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, "Battery and supercapacitor for photovoltaic energy storage: A fuzzy logic management," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 8, pp. 1157–1165, 2017.
- [29] S. A. Abdelrazek and S. Kamalasadnan, "Integrated PV capacity firming and energy time shift battery energy storage management using energy-oriented optimization," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 3, pp. 2607–2617, May 2016.
- [30] Y. Li and Y. Han, "A module-integrated distributed battery energy storage and management system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 8260–8270, Dec. 2016.
- [31] D. Arcos-Aviles, J. Pascual, L. Marroyo, P. Sanchis, and F. Guinjoan, "Fuzzy logic-based energy management system design for residential grid-connected microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid.*, vol. 9, no. 2, pp. 530–540, Mar. 2018.
- [32] F. S. Tidjani, A. Hamadi, A. Chandra, P. Pillay, and A. Ndtoungou, "Optimization of standalone microgrid considering active damping technique and smart power management using fuzzy logic supervisor," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 475–484, Jan. 2017.
- [33] L. Suganthi, S. Iniyan, and A. A. Samuel, "Applications of fuzzy logic in renewable energy systems—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 585–607, Aug. 2015.
- [34] J. V. Barreras et al., "An advanced HIL simulation battery model for battery management system testing," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 6, pp. 5086–5099, Nov. 2016.
- [35] B. Xiao, Y. Shi, and L. He, "A universal state-of-charge algorithm for batteries," in *Proc. 47th ACM/IEEE Des. Automat. Conf. (DAC)*, 2010, pp. 687–692.
- [36] D. W. Gao, *Energy Storage For Sustainable Microgrid*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2015.
- [37] Energy Ministry of Thailand. *Electricity Prices*. [Online]. Available: <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html>



KONGRIT MANSIRI received the B.Sc. degree in physics from Loei Rajabhat University, Thailand, in 2004, and the M.Sc. degree in renewable energy from Naresuan University, Thailand, in 2009. He is currently pursuing the Ph.D. degree in renewable energy. He is currently a Researcher with the School of Renewable Energy Technology, Naresuan University. His current research interests include photovoltaic system, smart grid system, wind energy, and hydrogen technology.



SUKRUEDEE SUKCHAI received the B.Sc. degree in physics from Srinakarinwirot University, Thailand, the M.Sc. degree in energy technology from the King Mongkut's University of Technology, Thailand, and the Ph.D. degree in renewable energy from Naresuan University, Thailand, in 1988, 2002, and 2006, respectively. Since 2014, she has been with Naresuan University, where she is currently the Director of the School of Renewable Energy Technology. She has authored various articles in academic journals and international conferences. Her current research interests include smart grid system, renewable energy technology, and energy management system.



CHATCHAI SIRISAMPHANWONG received the B.Sc. degree in physics-energy, the M.Sc. degree in renewable energy, and the Ph.D. degree in renewable energy from Naresuan University, Thailand, in 2000, 2004, and 2013, respectively. Since 2004, he has been with Naresuan University, where he is currently the Deputy Director of administrative affairs with the School of Renewable Energy Technology. He has authored various articles in academic journals and international conferences. His current research interests include photovoltaic system, smart grid system, wind energy, and hydrogen technology.

Article

Fuzzy Control for Smart PV-Battery System Management to Stabilize Grid Voltage of 22 kV Distribution System in Thailand

Kongrit Mansiri , Sukruedee Sukchai and Chatchai Sirisamphanwong *

School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand;
kang_mansiri@hotmail.com (K.M.); sukruedeen@nu.ac.th (S.S.)

* Correspondence: chatchaisi@nu.ac.th; Tel.: +66-(0)-5596-3182

Received: 15 May 2018; Accepted: 26 June 2018; Published: 2 July 2018



Abstract: This paper presents a fuzzy logic based algorithm developed to bring smart functionality to an ordinary PV-battery system in order to maintain the grid voltage stability of the 22 kV distribution system in Thailand. This research focuses on minimizing grid voltage fluctuations by converting a typical PV system into a smart PV-battery system (SPVs-BSS). A SPVs-BSS will be able to control the electrical power from a PV system to maintain the grid voltage in case of unexpected events or emergencies. Grid support functions such as a variable reactive power control and active power control will be discussed, leading to strategies for charging and discharging the battery system in response to the status of grid voltage. Fuzzy Logic was used to develop this control algorithm, which is named the Voltage Stability Fuzzy Logic Algorithm (VSFL Algorithm). The methodology of this research consists of three parts. First, testing the grid inverter operated on grid support functions. Second, the VSFL algorithm was developed to manage both the grid inverter and the battery system. Third, a SPVs-BSS equipped with the VSFL algorithm was simulated by using Digsilent PowerFactory software. Results showed that the SPVs-BSS equipped with the VSFL Algorithm successfully maintained grid voltage in target range.

Keywords: smart PV system; fuzzy logic; inverter power management; battery power management

1. Introduction

Nowadays the use of renewable energy in Thailand has grown significantly due to electrical demand and electrical market competition. Solar energy has great potential in Thailand. Photovoltaic (PV) power generation in Thailand is growing at a rapid rate, in part because in 2007 the government created an incentive in the form of an Adder (8 baht/kWh) for PV power plants. That Adder was followed by a Feed-In Tariff (6.5 baht/kWh) [1]. The government is providing incentives not only large scale solar power plants but also for small scale PV rooftop systems of 1–10 kW capacity, which are spreading all over Thailand. In 2018, the total capacity of PV systems in Thailand is greater than 3 GW [2] as shown in Figure 1. PV systems can generally be divided into two groups: ground installations and rooftop units. The systems are connected to the grid at distribution level (22 kV or Lower) or transmission level (115 kV) [3]. Normally traditional distribution networks are designed with one-way power flow from a point of high voltage (or medium voltage) to a point of low voltage but in the new concept of modernized distribution networks (Smart Grids), the voltage at the end of the load can be greater than the feeder supply voltage [4–9].

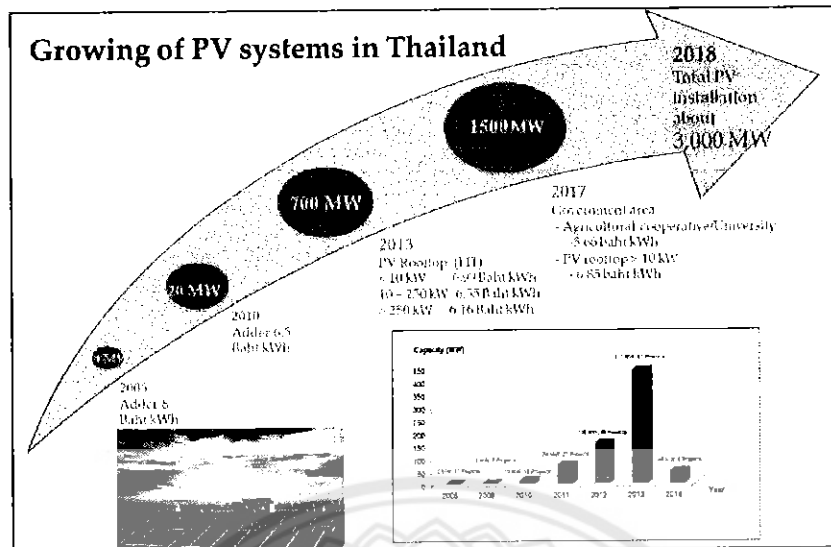


Figure 1. PV system installation in Thailand.

This characteristic of the feeder is due to the impact of grid connected PV systems. The increasing number of PV systems connected to Low Voltage Distribution Systems (LVDS) has some negative impacts on LVDS such as lower power quality (Voltage variations, frequency variations, harmonics distortion, etc.) and less power control (Power factor, Power fluctuation) [10–16]. If the PV generation is greater than the local demand at the point of common coupling (PCC), the excess power from PV inverters may produce reverse power flow in the feeder, which would have a negative impact on the LVDS. Grid voltage rise is the major problem when electricity is fed back to the grid by PV systems. According to the interconnection code of PEA, the acceptable range of voltage in the distribution is $\pm 10\%$ of nominal voltage [17]. 80% of PV systems are connected to the LVDS. Voltage rise is major problem of this extensive integration of PV systems. Many countries have experienced problems from having a high share of PV systems integrated to LVDS. The problem has occurred notably in those countries, which promoted electricity production from renewable sources and then enhanced their installation capacity to Giga-Watt level for examples, Germany, Australia, Italy, Spain Switzerland, Belgium, China and Japan [18–24]. Without proper, prompt solutions for these problems, electricity production from renewable sources will not succeed. In light of that problem, the current study seeks to mitigate voltage fluctuation caused by high PV system penetration by converting a typical PV system into a smart PV system. The concept of a smart PV system in this research refers to a battery storage system being integrated with a PV system and improvement of the inverter's ability to maintain grid voltage stability [25,26]. Having a control algorithm also important for a smart PV system and therefore this research will develop a control algorithm using Fuzzy Logic. Fuzzy logic is an effort to represent the human reasoning methods. It can control a complicated system that would be hard or problematic to control by any others method. Fuzzy control algorithm is popularly used to apply throughout many aspects for modern electrical system. The purpose of the algorithm development in this research is to maintain the distribution voltage into the desired range (0.96 p.u.–1.06 p.u.). The typical 22 kV distribution system integrated with a typical 8 MW PV power plant in the northeast of Thailand also has the problem on voltage rise when a high amount of active power production from the PV system fed to the distribution system. This case will be studied in order to find the robust solution for maintaining the distribution voltage into the target range by controlling two entities, the battery power management and inverter power management. The operation of a smart PV system equipped with a control algorithm will be studied for distribution voltage stability. A smart PV system empowered with a proper algorithm is a solution to reach the Thailand target of 6000 MW PV capacity installation in 2036.

2. Research Methodology

The research methodology in this research can be divided into three steps. First, the grid inverter was tested in electrical laboratory at the School of Renewable Energy Technology (SERT) at Naresuan University. The grid inverter is tested for its grid support functions (active and reactive power control), while the BESS is tested for its charge/discharge impacts. The results of these tests show that both components have the ability to affect grid voltage stability in the various expected ways and have the potential to be used and managed in combination to maintain overall grid voltage stability. Next an algorithm, called the VSFL Algorithm, is developed to manage these various capabilities of the grid inverter and battery storage system of a smart PV system in combination, using fuzzy logic. Finally, the VSFL Algorithm is tested by using Digsilent PowerFactory software (research license of Naresuan University, School of Renewable Energy Technology, Thailand) to run two simulations. The first test simulates a typical PV system connected to a 22 kV distribution system and the second test simulates a smart PV system operating with the VSFL Algorithm, also connected to a 22 kV distribution system.

The aim of running the two simulations is to confirm whether the algorithm, by managing the added a BESS, will indeed be able to maintain grid voltage stability. All these steps of the research methodology are shown in Figure 2.

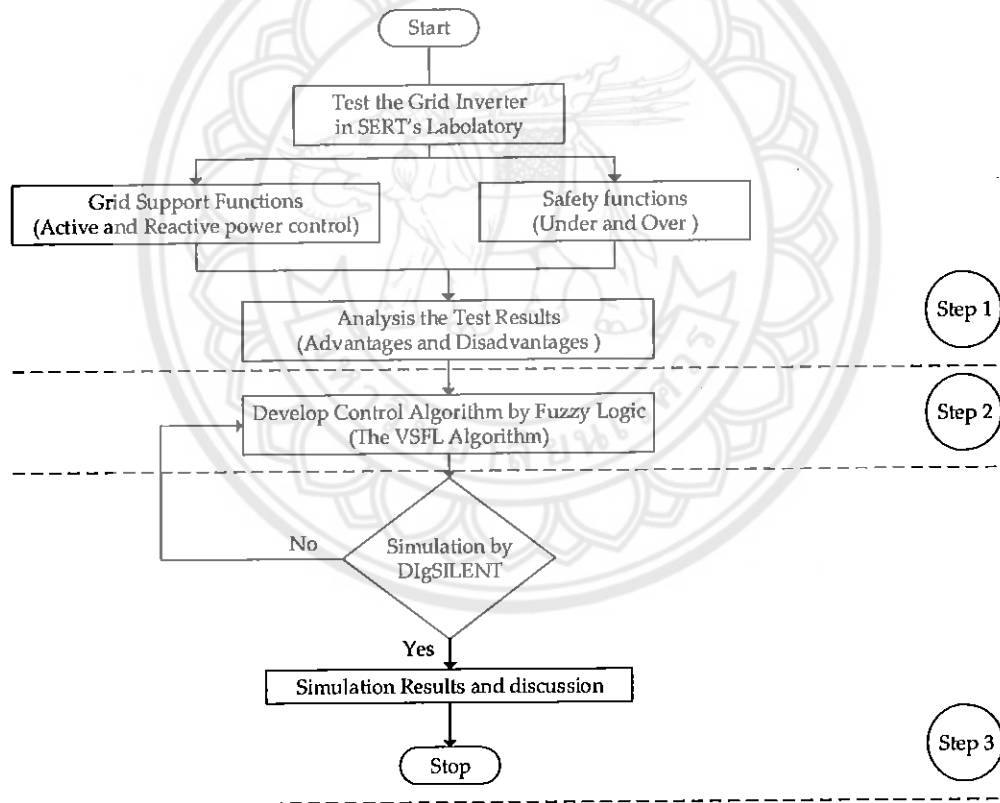


Figure 2. Research methodology.

3. Test the Grid Inverter for Grid Support Functions

Grid inverter capability was tested in electrical laboratory on grid support functions and safety function to understand the process of maintaining the distribution voltage into the acceptable range. The main components of SERT's electrical laboratory consisted of, regenerative grid simulator, battery storage, RLC electronic load and measurement system as shown in Figure 3.

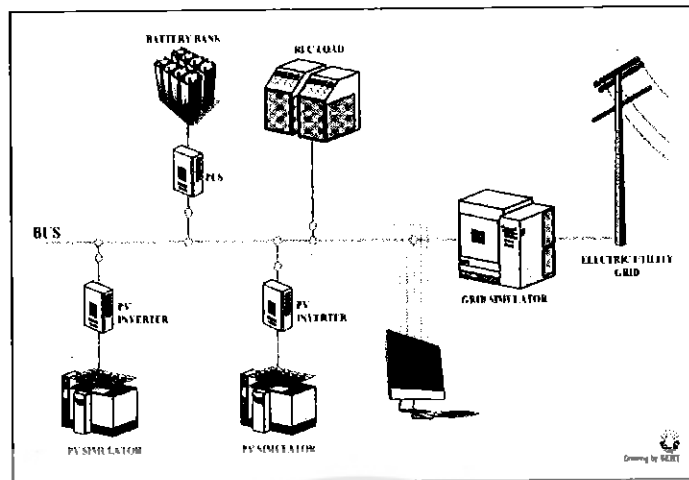


Figure 3. SERT Electrical Laboratory.

The electrical laboratory can simulate the parameters in order to simulate real grid environments and conditions. The regenerative grid simulator can create a need for rigorous regulation testing to standard such IEEE 1547, IEC 610003-15 and IEC 62116. The grid simulator allows users to vary relevant parameters such as phase angle, voltage amplitude, voltage drops in either single or three phase modes. Moreover, unbalanced three phase conditions can easily be simulated. The function of grid support of inverter will be tested and simulated in this laboratory.

Voltage Rise Caused by PV System

As described in the introduction, main problem of high penetration PV system integrated within the distribution system is voltage rise, it may over than over limit of the country requirement. For clearly understand a simplified two-bus system integrated with a PV system is presented in Figure 4.

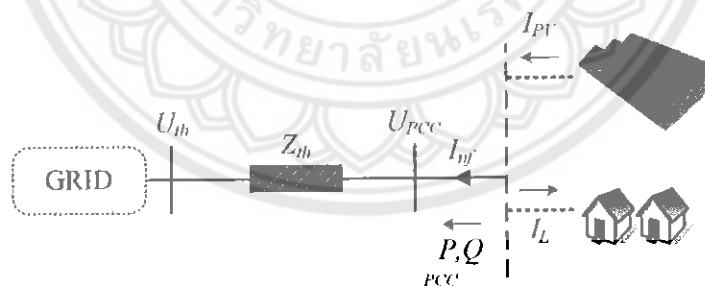


Figure 4. Thevenin equivalent of a typical PV system integrated to distribution system.

Consideration, Z_{th} and U_{th} are the Thevenin impedance and the Thevenin Voltage. Where, I_{nf} and S_{nf} are the net feed current and net apparent power, respectively. I_{PV} is the PV feed in current and I_L is the load current. P is real power and Q is reactive power. U_{PCC} is the voltage at point of common coupling (PCC). The net feed-in current (I_{nf}) can be calculated as Equation (1) [27].

$$I_{nf} = I_{PV} - I_L = \left(\frac{S_{nf}}{U_{PCC}} \right) \tag{1}$$

$$I_{nf} = \left(\frac{P - jQ}{U_{th}} \right) \tag{2}$$

The voltage at PCC can be calculated as Equation (3).

$$\underline{U}_{PCC} = U_{th} + \underline{Z}_{th} \times I_{nf} \quad (3)$$

Suppose that $Z_{th} = R_{th} + jx_{th}$ the U_{PCC} can be written as Equation (4). Where, R_{th} is resistance and X_{th} is reactance.

$$\underline{U}_{PCC} = (U_{th} + \frac{P \times R_{th} + Q \times X_{th}}{U_{th}} + j \frac{P \times X_{th} - Q \times R_{th}}{U_{th}}) \quad (4)$$

$$= U_{Re} + jU_{Im} \quad (5)$$

where U_{Re} and U_{Im} are the real and imaginary parts of U_{PCC} , respectively. The voltage magnitude can be calculated as Equation (6).

$$U_{PCC} = \sqrt{U_{Re}^2 + U_{Im}^2} \quad (6)$$

Therefore, the approximate voltage magnitude at PCC can be simplified as the Equation (7) [27].

$$U_{PCC} \cong U_{th} + \frac{P \times R_{th} + Q \times X_{th}}{U_{th}} \quad (7)$$

4. Test Results of Grid Inverter

Grid support functions of grid inverter in this research was mainly focused on reactive and active power control depending on grid voltage as follow.

4.1. Reactive Power Control

Reactive power control is a commonly chosen tool for maintaining the distribution voltage within an acceptable range. When the distribution voltage is in a dangerous range (i.e., above or below the acceptable range of $0.9 V_n$ – $1.10 V_n$), the grid inverter and battery inverter have the ability to activate reactive power (either lagging or leading) to manipulate the grid voltage. Activating lagging reactive power will lower critically high grid voltage and activating leading reactive power will raise critically low grid voltage [28,29]. The ability to control reactive power for the purpose of stabilizing voltage is an important resource and tool for network operators. Consequently, Thailand's Provincial Electricity Authority's (PEA) Power Network System Interconnection Code of 2016 (PEA grid code 2016) requires all PV systems to be able to supply not only active power but also reactive power to the distribution system. Specifically, the PEA grid code 2016 mandates the reactive power capabilities of PV system inverters depending on their electrical capacity. Inverters with a capacity of 500 kW or higher are required to be able to adjust their power factor (PF) between 0.90 lagging and 0.90 leading, while inverters with a capacity lower than 500 kW are required to be able to adjust their PF between 0.95 lagging and 0.95 leading. Given the PEA grid code 2016, the reactive power capabilities of grid inverters should be a dependable resource to network operators for maintaining the grid voltage within the acceptable range. For this reason, ability of grid inverter and battery pcs were tested in SERT's electrical laboratory according to reactive power control. The test results of the grid inverter and battery pcs on grid support function, reactive power control for maintaining the grid voltage are described below. The test results of reactive power control of grid inverter and battery PCS can be seen in Figure 5.

Figure 6 shows the operation of grid inverter on grid support function, when grid voltage was higher than normal voltage so bus voltage can be decreased by absorbing the reactive power. On the other hand, grid inverter and battery pcs provides the reactive power support in case of grid voltage is lower than the normal voltage (1 p.u. of V_n is 350 V) so the grid voltage can be increased. According to the Beginning of the test (Figure 6), grid voltage setting at the grid simulator was lower than V_n at $0.90 V_n$, during this situation the grid inverter operated at the PF 0.90 lagging to inject reactive power

for supporting and increasing the grid voltage to 0.95 Vn. At the middle of the test, the setting voltage same as nominal grid voltage, the grid inverter operated at the PF 1. At the end of the test, the grid voltage setting is higher than normal voltage at 1.09 Vn, this situation the inverter operates at PF 0.90 leading to absorb the reactive power. The behavior of the grid inverter during the test was the reactive power control depend on the grid voltage or a variable reactive power depending on the voltage Q (U) in PEA grid code 2016.

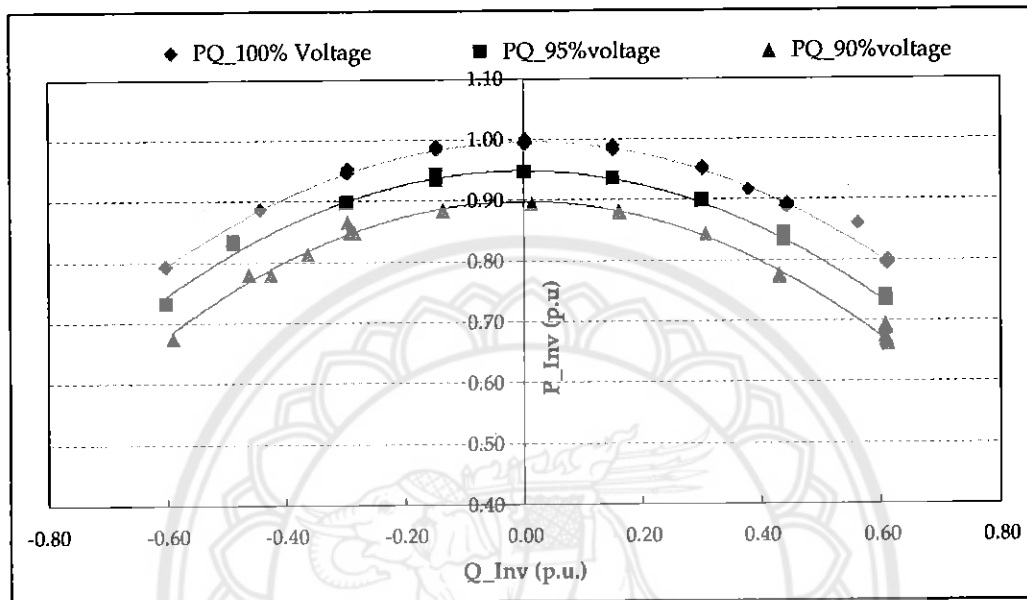


Figure 5. Relationship between active power (P) and reactive power (Q) of grid inverter operation.

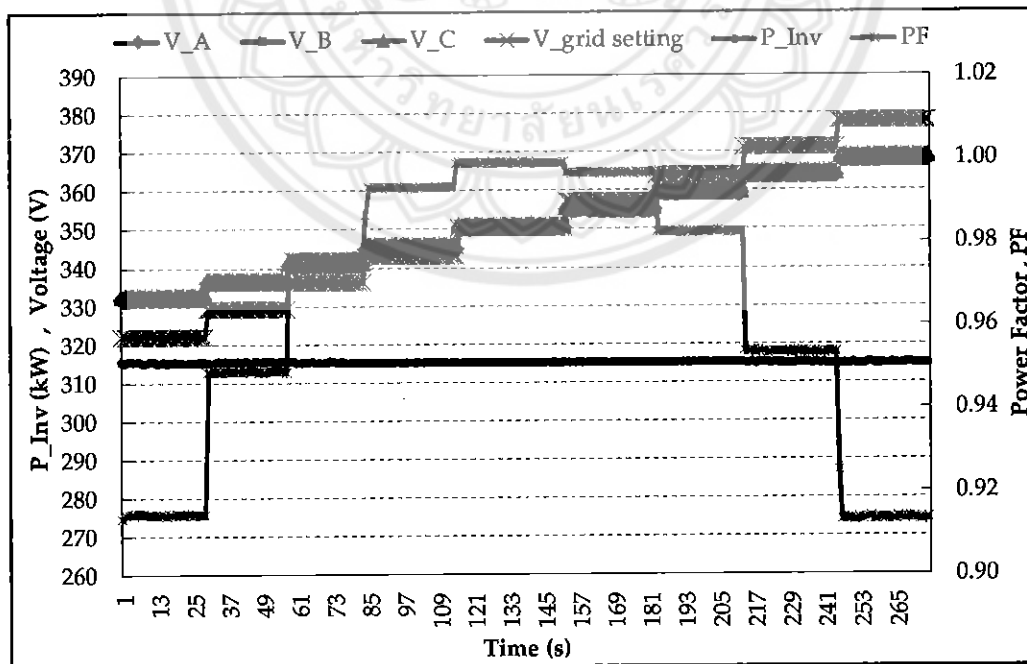


Figure 6. To maintain the grid voltage by reactive power control of grid inverter. (V_A is grid voltage phase A, V_B is grid voltage phase B, V_C is grid voltage phase C, V_grid setting is voltage setting by grid simulator, P_Inv is power output of grid inverter and PF is power factor of inverter).

4.2. Active Power Control

Active power control depending on the grid voltage in this research, aims to control the power output of the grid inverter and battery PCS for maintaining grid voltage at the acceptable range of PEA requirements. The active power control is necessary for the grid operator in case of emergency such as grid voltage is higher than upper limit because of over active power fed to the grid. This case the grid inverter can automatically decrease the active power for keeping the grid voltage stability. According to PEA grid code 2016, the grid inverter requires to limit the active power from 1 p.u. to 0 p.u. with responsible time less than one minute per steps.

5. Algorithm Development

According to the problem of voltage rise due to over active power, which is produced from the PV system as mention in the introduction. After testing of grid connected inverter and analyzing advantages and disadvantages of both components, an algorithm operating with fuzzy logic, the VSFL Algorithm, was developed to greatly increase control of the grid inverter and battery storage system for grid voltage stability. Fuzzy Logic method (FLM), a flexible and powerful tool with much potential for electrical power systems, is similar to human beings' feelings and decision making processes. Fuzzy Logic control is a range to point or range-to-range control. Fuzzy Logic techniques is applied throughout many purposes [30–32]. Fuzzy logic implementations involve three essential steps: the first is Fuzzification, this process to convert crisp values to fuzzy data using membership functions (MF), second is Inference process, to process MF within sets of rules or laws to develop the fuzzy output and third is Defuzzification [33], to determine the correct output. The output of FLM is derived from Fuzzifications of both input and output using the associated membership functions. The steps of algorithm are follows, Fuzzifications, Inference process and Defuzzification as shown in Figure 7.

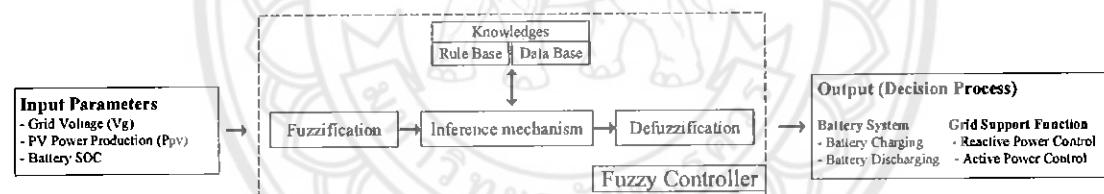


Figure 7. Fuzzy controller for the VSFL Algorithm.

The VSFL Algorithm is mainly focusing on maintaining the grid voltage of 22 kV distribution system into the target range (1.06 p.u.–0.96 p.u. of voltage). In the present situation, the distribution voltage is not in the desired range 0.96 p.u. (21.12 kV) to 1.06 p.u. (23.32 kV) when high amount of active power is fed to the distribution system or high load power consumption occur. A smart PV-battery system equipped with the VSFC Algorithm will operate for maintaining the grid voltage into the target range or close to the normal voltage (22 kV, 1.0 p.u.) as follow two steps, the first is battery power management and second is grid inverter power management. The VSFL Algorithm enables to maintain the grid voltage as shown in Figure 8.

The control sequence of the VSFL Algorithm starts with battery power management, later on the electrical power from a smart PV system will be managed by the grid inverter, in case of voltage is not in target range as follow.

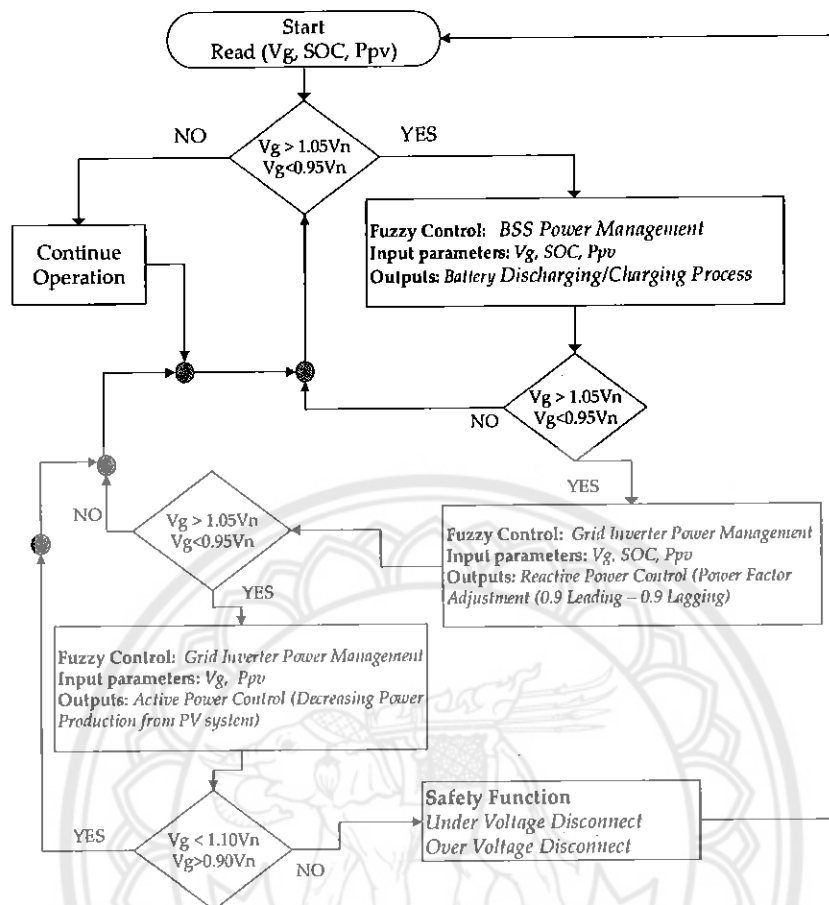


Figure 8. The VSFL Algorithm for grid voltage stability.

5.1. Battery Storage System Energy Management

BSSEM is very important for a grid modernization to provide many of pragmatisms such as load leveling, peak shaving, peak shifting and frequency and voltage stability control. BSSEM in this research mainly focused on grid voltage stability in 22 kV distribution system. In case of grid voltage at PCC is out of target ranges (0.96 p.u.–1.06 p.u. for this research), a smart PV system ordered the battery storage system (BSS) to maintain the grid voltage into acceptable ranges by charge and discharge electrical power of BSS. When the grid voltage is over, a smart PV system enabled BSS to absorb an electrical power by charging to the BSS. The objective function of this process to decrease the active power in the distribution system result to decrease the distribution voltage. The VSFC Algorithm enables to control the BSS in a smart PV system by charging and discharging strategies.

5.2. Grid Inverter Power Management

In case of the grid voltage value is out of the target range (0.96 p.u.–1.06 p.u. for this research) and battery storage system is not able to operate when battery already full capacity or battery already reach the minimum SOC. If the grid voltage value still out of the target range, the grid inverter of a smart PV system will operate on grid support functions, reactive power control and active power control to maintain the grid voltage stability of distribution system. Generally, if the grid voltage is over than over limit of target range, grid inverter is able to absorb the reactive power in the distribution system, purpose to decrease the grid voltage. On the other hand, in case of under voltage, the grid inverter will operate to inject the reactive power to the grid, purpose to increase the grid voltage in

distribution system. In the worst case, even the grid inverter operates on reactive power control but the grid voltage value is still out of range.

5.3. Fuzzifications of Input and Output Parameters

Fuzzification process is to convert crisp values to fuzzy data, each input and output parameters are converted to membership function (MF) as follow.

Figure 9a illustrates the membership function of PV power production (Ppv) which is classified into ranges of MF; low, medium and high based on power production in percentage of capacity at any instance of time as described in Table 1.

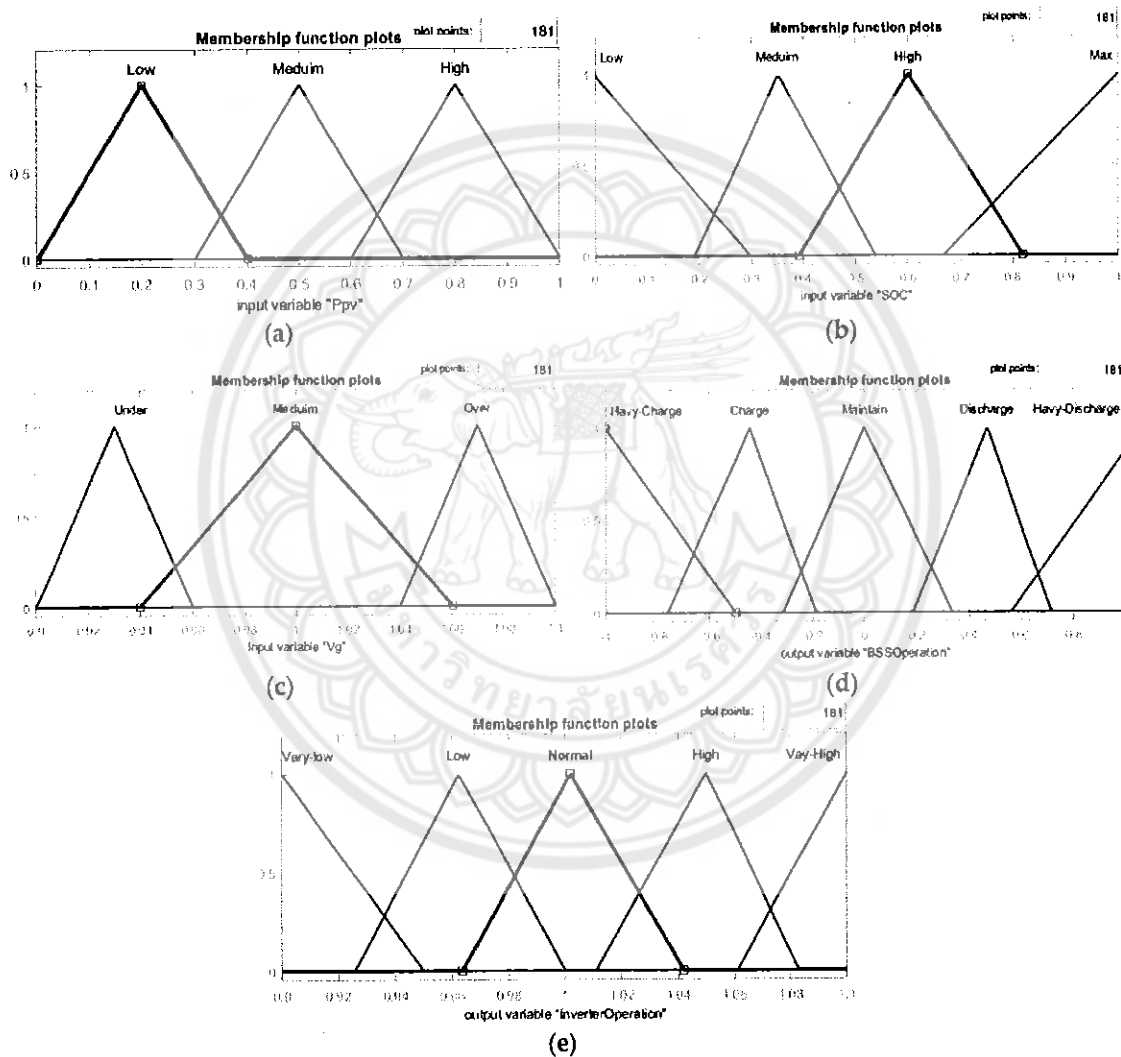


Figure 9. Membership function of inputs and outputs parameters. (a) is the membership function of PV power production; (b) is the membership function of Battery state of charge; (c) is the membership function of grid voltage at point of common coupling; (d) is membership function of battery storage system operation; (e) is membership function of grid inverter operation.

Table 1. Range and degree of membership function of PV power output.

MF (Ppv)	Low	Medium	High
MF degree	0–0.4	0.3–0.7	0.6–1
PV power (Ppv, MW)	0–3.2	2.4–5.6	4.8–8

Figure 9b illustrates the membership function of battery state of charge (SOC) which is classified into ranges of MF; low, medium, high and max based on energy contain in the battery in percentage at any instance of time as described in Table 2.

Table 2. Range and degree of membership function of battery state of charge.

MF (SOC)	Low	Medium	High	Max
MF degree	0–0.3	0.2–0.55	0.4–0.8	0.68–1
Battery state of charge (SOC)	0–0.3	0.2–0.55	0.4–0.8	0.68–1

Figure 9c illustrates the membership function of distribution voltage (Vg) at the point of common coupling (PCC) which is classified in to ranges of MF, under, medium and over in power units (p.u.) at any instance of time as described in Table 3.

Table 3. Range and degree of membership function of distribution voltage at PCC.

MF(Vg)	Under	Medium	Over
MF degree	0.9–0.96	0.94–1.06	1.04–1.1
Voltage at PCC (Vg, p.u.)	0.9–0.96	0.94–1.06	1.04–1.1
Voltage at PCC (Vg, kV)	19.8–21.2	20.68–23.32	22.88–24.2

Figure 9d illustrates the membership function of battery power management, which is classified into ranges of MF; heavy-charge, charge, maintain, discharge and heavy-discharge at any instance of time as described in Table 4.

Table 4. Range and degree of membership function of battery power management.

MF (BSS Operation)	Heavy-Charge	Charge	Maintain	Discharge	Heavy-Discharge
MF degree	(−1)–(−0.5)	(−0.8)–(−0.2)	(−0.3)–0.3	0.2–0.7	0.6–1
− is charge (MW)	3–1.5	2.4–0.6	0.3		
+ is discharge (MW)				0.6–2.1	1.8–3

Figure 9e illustrates the membership function grid inverter power management which is classified into ranges of MF; very-low, low, normal, high and vary-high at any instance of time as described in Table 5.

Table 5. Range and degree of membership function of inverter power management.

MF (BSS Operation)	Very-Low	Low	Normal	High	Very-High
MF degree	0.9–0.95	0.92–1	0.96–1.04	1.01–1.08	1.06–1.1
Leading PF	0.9–0.95	0.92–1	1	0.99–0.92	0.96–0.9
Lagging PF					

5.4. Fuzzy Inference

The fuzzy inference is the process that combination of membership functions with the rule base, knowledge and control rules for refining the fuzzy output. The control rules of fuzzy inference were

considered as the knowledge of expert persons. A IF-THEN rule is applied to described linguistic variants and fuzzy sets to meditate a fuzzy output. The VSFL Algorithm fuzzy inference consisted of battery power management and grid inverter power management as shown in Tables 6 and 7.

Table 6. Fuzzy inference of inverter power management for grid voltage stability.

Inputs/Outputs Parameters	MFs	Rule Bases No.								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Input parameter PV power (Ppv)	Low Medium High									
Input parameter Grid voltage (Vg)	Under Medium Over									
Grid Inverter Power Management	Vary Low Low Normal High Vary High									

Table 7. Fuzzy inference of battery power management for grid voltage stability.

Inputs/Outputs Parameters	MFs	Rule Bases No.											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Input parameter Grid voltage	Under Medium Over												
Input parameter Battery SOC	Low Medium High Max												
Battery Storage Power Management	Heavy-Charge Charge Maintain Discharge Heavy-Discharge												

5.5. Defuzzification

The Defuzzification process converts fuzzy output to a crisp output. The crisp output can be number or digital output, which is used to enable for controlling the equipment. This research used the Centroid Method as showed in Equation (8).

$$D_{output}^{crisp} = \frac{\int \mu_C(Z).zdz}{\int \mu_C(z)dz} \tag{8}$$

When D_{output}^{crisp} is the decision output for batter power management and inverter power management. $\mu_C(Z)$ is the degree of output membership function. Z is the output variable of membership function.

The outputs by Defuzzification process of the VSFL Algorithm can be separated into two entities; the first is battery power management and second is inverter power management as shown in Figure 10.

for the simulation. The detail of main components within the 22 kV distribution test system which is important for the simulation as shown in Table 8.

Table 8. Main components within 22 kV distribution test system.

Components	Connection at Busbars	Ranges	Peak Load (MW)
Total Load (MW)	-	-	6 MW
Substation load	MBB01	At substation	0.08 MW
Village A (MW)	MBB02	From MBB01 to MBB02 (1.5 km)	0.5 MW
Village B (MW)	MBB03	From MBB02 to MBB03 (2.5 km)	0.5 MW
Free busbar	MBB04	From MBB03 to MBB04 (4.0 km)	0.5 MW
Village E (MW)	MBB05	From MBB04 to MBB05 (4.0 km)	0.4 MW
Village C (MW)	MBB06	From MBB05 to MBB06 (3.0 km)	0.5 MW
Village D (MW)	MBB07	From MBB06 to MBB07 (5.0 km)	0.8 MW
Factory Load, PL(FT) (MW)	MBB08	From MBB07 to MBB08 (1.0 km)	1.9 MW
Village F (MW)	MBB09	From MBB08 to MBB09 (6.0 km)	0.5 MW
Village G (MW)	MBB10	From MBB09 to MBB10 (1.0 km)	0.5 MW

MBB stand for main busbar (for example, MBB01 is a main busbar number 01).

The different between typical PV system and a smart PV system in this research is that a smart PV system consists of battery storage system (3 MW peak power and 2 MW h of energy capacity) equipped with the VSFL Algorithm as shown in Figure 12.

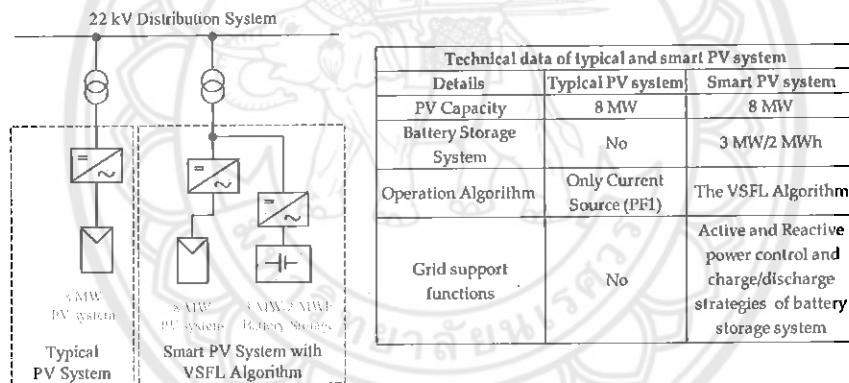


Figure 12. The difference of a typical PV system and a smart PV system.

Case Studies of the Simulation

The case studies were divided into nine cases (case 1 to case 9). The difference of each case is that, the load capacity is vary from maximum at case 1 (6 MW) to minimum at case 9 (1.2 MW) in the distribution system as shown in Table 9.

Table 9. Cases studies of the simulation.

Feeder Components	Connection with No. of Busbars	Case Studies								
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
Total Load (MW)	-	6	5.4	4.8	4.2	3.6	3	2.4	1.8	1.2
Factory Load, PL(FT) (MW)	MBB08	1.9	1.71	1.52	1.33	1.14	0.95	0.76	0.57	0.38
Village A (MW)	MBB02	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Village B (MW)	MBB03	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Village C (MW)	MBB06	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Village D (MW)	MBB07	0.8	0.72	0.64	0.56	0.48	0.4	0.32	0.24	0.16
Village E (MW)	MBB05	0.4	0.36	0.32	0.28	0.24	0.2	0.16	0.12	0.08
Village F (MW)	MBB09	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Village G (MW)	MBB10	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Substation Load (SubPL)	MBB01	0.4	0.36	0.32	0.28	0.24	0.2	0.16	0.12	0.08

7. Results and Discussion

Here are the results for the two test simulations that were run, the first simulating a typical PV system connected to a 22 kV distribution and the second simulating a smart PV system operating with the VSFL Algorithm, also connected to a 22 kV distribution system.

7.1. Simulation of a Typical PV System Connected to a 22 kV Distribution

Generally, the voltage in the profile of a distribution system decreases the further the voltage source is from the location of the load. This voltage drop occurs in the distribution system because the electric current travels through passive elements (such as wires, conductors, the load itself, etc.) that create resistance, dragging on the voltage and decreasing it. Figure 13 shows voltage profiles for ten cases resulting from the first simulation (i.e., typical PV, no VSFL Algorithm). All these profiles in Figure 13 are for the distribution system running without PV power production, and the 10 cases represent variations in load from minimum (case 10) to maximum (case 2).

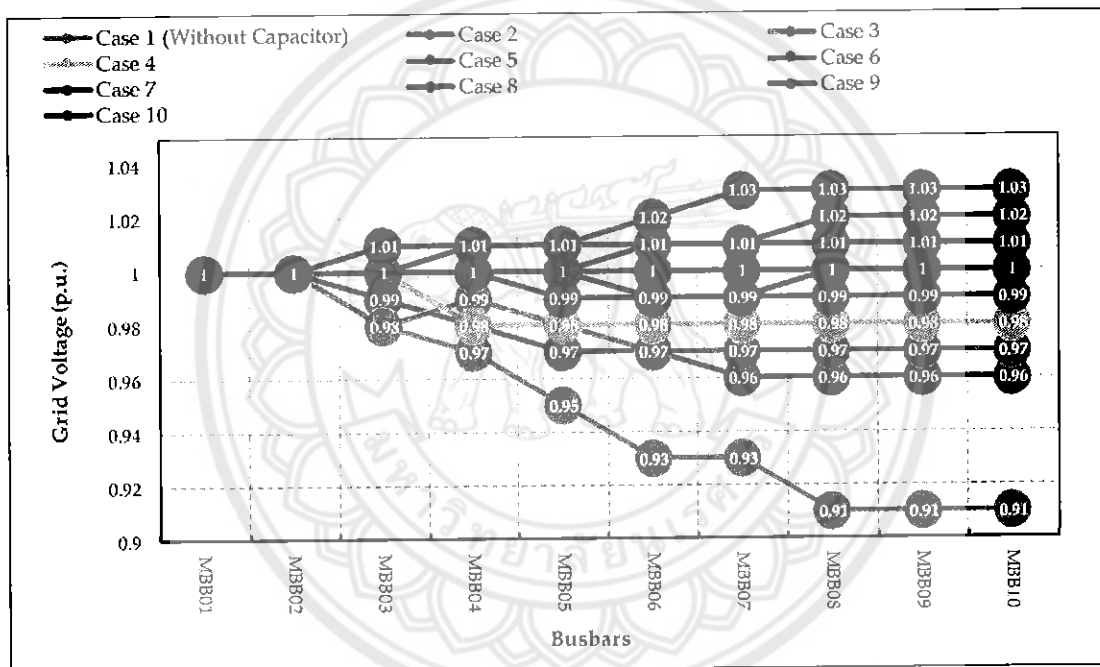


Figure 13. Voltage profile of the distribution system without PV power production.

Figure 13 shows the voltage profile in the typical distribution system. One can clearly see that in Case 1 the voltage dropped in proportion to increasing distance from the substation to each more distant busbar, with the lowest voltage seen at the final busbar (MBB10). The voltage at the MBB10 is 0.91 p.u. Strictly speaking, this value is acceptable; however, it barely meets the minimum requirement of the Thailand grid code. To improve the overall voltage profile, a capacitor was installed at busbar number 8 (MBB08). After installing the capacitor, the voltage profile improves to arrive in the target range (0.96 p.u. to 1.06 p.u.) The resulting values with capacitor range from 0.96 p.u. to 1.03 p.u., depending on the load capacity. This improved the voltage profile can be seen in case 3 to case 10 in Figure 13.

Next, operation of this same 22 kV distribution system was simulated except with a typical PV system (8 MW PV system connected to busbar number 9). The resulting voltage profile is shown in Figure 14.

case study for under voltage due to maximum electricity power consumption (6 MW) in the 22 kV distribution test system. Distribution voltage at the MBB06 to MBB10 was at very low voltage (0.91 p.u. of voltage at the MBB08 to MBB10). The grid voltage was out of the target range so a smart PV system equipped with the VSFL Algorithm operated to increase the grid voltage into the target range. To increase the distribution voltage into the target range, the VSFL Algorithm ordered a battery storage system to discharge electricity into the load within the distribution system. After operated the system resulted to distribution voltage from the MBB02 to MBB10 was increasing into the desired range. A smart PV system operated with the VSFL Algorithm can significantly enable to maintenance of the distribution voltage as presented in Figure 16.

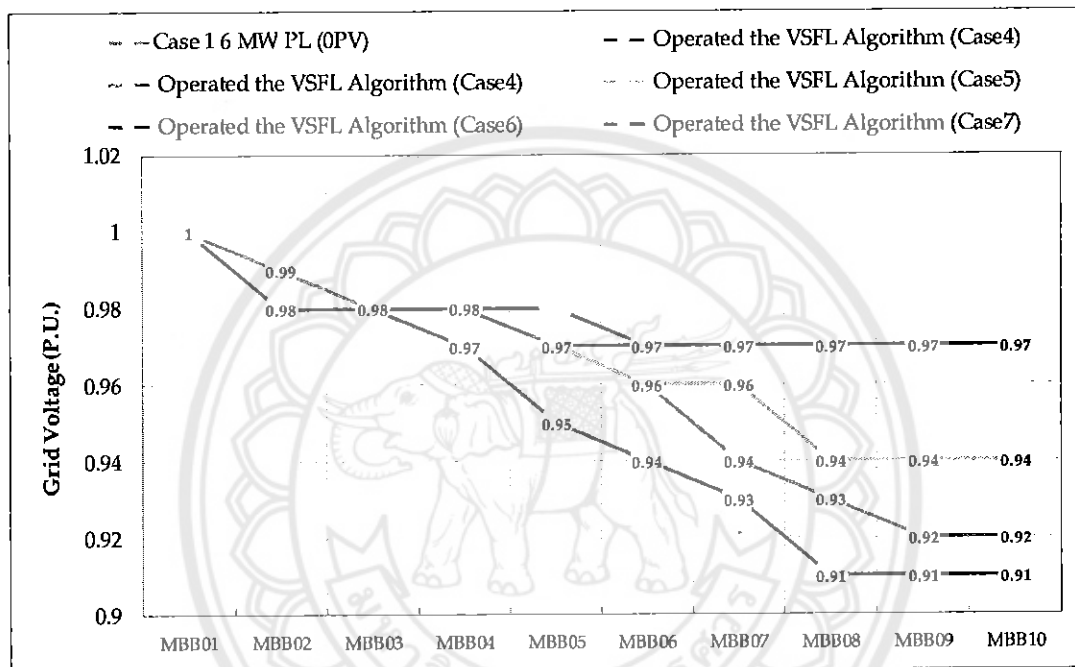


Figure 16. Distribution voltage profile when operation smart PV system with the VSFL Algorithm. **Operated VSFL Algorithm (case4)** is a smart PV system operation as 0 MW electricity power discharge from BSS when SOC is 0.3, no PV power production and 6 MW load power; **Operated VSFL Algorithm (case5)** is a smart PV system operate as 0.2 MW electricity power discharge from BSS when SOC is 0.4, no PV power production and 6 MW load power; **Operated VSFL Algorithm (case6)** is a smart PV system operate as 1.3 MW electricity power discharge from BSS when SOC is 0.5, no PV power production and 6 MW load power; **Operated VSFL Algorithm (case7)** is a smart PV system operation as 2.4 MW electricity power discharge from BSS when SOC is 0.5, no PV power production and 6 MW load power; **Operated VSFL Algorithm (case8)** is a smart PV system operation as 2.8 MW electricity power discharge from BSS when SOC is 0.5, no PV power production and 6 MW load power.

8. Conclusions

This paper discussed a concept of improving the typical PV system to a smart PV system for maintaining grid voltage stability. The concept of a smart PV system is that the battery storage system was assumed to integrate with a typical PV system and increase the grid inverter ability, increasing more capability for maintaining the distribution voltage into the target range (0.96 p.u. to 1.06 p.u. of voltage). This research started from test the grid inverter in an electrical laboratory on grid support functions, active and reactive power control depending on the grid voltage. The results of the test showed that the inverter management enabled to maintenance of the grid voltage stability. After analyzed the test results, the control algorithm was developed for a smart PV system by using the fuzzy logic method so called the VSFL Algorithm. To verify the operation of a smart PV system

operated with the VSFL Algorithm so the existing 22 kV distribution system was connected with an 8 MW typical PV system in the northeast of Thailand, it was modified for voltage profile simulation by Digsilent PowerFactory. Finally, the results of this research indicated that a smart PV system equipped with the VSFL Algorithm enabled to maintain of the distribution voltage into the target range by managing the battery storage system and grid inverter power management. Especially, in the case of over voltage due to a high amount of active power from the PV system fed to the grid, the VSFL Algorithm can significantly maintain the grid voltage into the target range. To improve the typical PV systems by adapting to a smart PV system is a solution to solve the problem of voltage fluctuation, which is effected by high penetration PV system.

Author Contributions: K.M. performed the simulation. K.M., S.S. and C.S. all participated in analysis of the results and writing of the paper.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: This research is a part of algorithm development for energy management in smart grid to mitigate the connection of high penetration PV system impact, which was supported by Naresuan University. Finally, the authors place there thankful for School of Renewable Energy Technology (SERT) staffs for supporting the technical data and their support during laboratory work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Scholar Report-Scott Macdonald. *Solar Photovoltaic Energy in Thailand: An Assessment of Government Support Mechanisms*; LSE Asia Research Centre (ARC): London, UK, 2012.
2. Working Group of Ministry of Energy. *Renewable Energy Outlook of Thailand*; International Renewable Energy Agency (IRENA): Abu Dhabi, United Arab Emirates; Ministry of Energy Thailand: Bangkok, Thailand, 2017.
3. Weck, S.; D'hulst, R.; Driesen, J. Locational pricing to mitigate voltage problems caused by high PV penetration. *Energies* **2015**, *8*, 4607–4628. [CrossRef]
4. Yang, Y.; Zhang, W.; Jiang, J.; Huang, M.; Niu, L. Optimal scheduling of a battery energy storage system with electric vehicles' auxiliary for a distribution network with renewable energy integration. *Energies* **2015**, *8*, 10718–10735. [CrossRef]
5. Gunasekaran, M.; Mohamed Ismail, H.; Chokkalingam, B.; Mihet-Popa, L.; Padmanaban, S. Energy management strategy for rural communities' DC Micro Grid power system structure with maximum penetration of renewable energy sources. *Appl. Sci.* **2018**, *8*, 585. [CrossRef]
6. Mosadeghy, M.; Yan, R.; Saha, T.K. Impact of PV penetration level on the capacity value of South Australian wind farms. *Renew. Energy* **2016**, *85*, 1135–1142. [CrossRef]
7. Haque, M.M.; Wolfs, P. A review of high PV penetration in LV distribution network: Present status impacts and mitigation measures. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *62*, 1195–1208. [CrossRef]
8. Simoes, S.; Zeyringer, M.; Mayr, D.; Huld, T.; Nijs, W.; Schmidt, J. Impact of different levels of geographical disaggregation of wind and PV electricity generation in large energy system models: A case study for Austria. *Renew. Energy* **2017**, *105*, 183–198. [CrossRef]
9. Xenias, D.; Axon, C.J.; Whitmarsh, L.; Connor, P.M.; Balta-Ozkan, N.; Spence, A. UK smart grid development: An expert assessment of the benefits, pitfalls and functions. *Renew. Energy* **2015**, *81*, 89–102. [CrossRef]
10. Pukhrem, S.; Basu, M.; Conlon, M.F.; Sunderland, K. Enhanced network voltage management techniques under the proliferation of rooftop solar PV installation in Low-Voltage Distribution Network. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* **2017**, *5*, 681–694. [CrossRef]
11. O'Connell, A.; Keane, A. Volt–var curves for photovoltaic inverters in distribution systems. *IET Gener. Transm. Distrib.* **2016**, *11*, 730–739. [CrossRef]
12. Ghoddami, H.; Yazdani, A. A mitigation strategy for temporary over voltages caused by grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Trans. Energy Convers.* **2015**, *30*, 413–420. [CrossRef]
13. Ballanti, A.; Ochoa, L.F. On the integrated PV hosting capacity of MV and LV distribution networks. In Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), Montevideo, Uruguay, 5–7 October 2015; pp. 366–370. [CrossRef]

14. Armendariz, M.; Brodén, D.; Honeth, N.; Nordström, L. A method to identify exposed nodes in low voltage distribution grids with High PV penetration. In Proceedings of the IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 26–30 July 2015; pp. 1–5. [CrossRef]
15. Patsalides, M.; Efthymiou, V.; Stavrou, A.; Georghiou, G.E. A generic transient PV system model for power quality studies. *Renew. Energy* **2016**, *89*, 526–542. [CrossRef]
16. Working group of PEA. *Provincial Electricity Authority's Regulation on the Power Network System Interconnection Code B.E. 2559*; Provincial Electricity Authority of Thailand: Ladyao, Jatujak Bangkok, 2016.
17. Hossain, M.S.; Madlool, N.A.; Rahim, N.A.; Selvaraj, J.; Pandey, A.K.; Khan, A.F. Role of smart grid in renewable energy: An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *60*, 1168–1184. [CrossRef]
18. Zafar, R.; Mahmood, A.; Razzaq, S.; Ali, W.; Naeem, U.; Shehzad, K. Prosumer based energy management and sharing in smart grid. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *82*, 1675–1684. [CrossRef]
19. Williams, T.; Wang, D.; Crawford, C.; Djilali, N. Integrating renewable energy using a smart distribution system: Potential of self-regulating demand response. *Renew. Energy* **2013**, *52*, 46–56. [CrossRef]
20. Jha, S.K.; Bilalovic, J.; Jha, A.; Patel, N.; Zhang, H. Renewable energy: Present research and future scope of artificial intelligence. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *77*, 297–317. [CrossRef]
21. Hua, Y.; Oliphant, M.; Hu, E.J. Development of renewable energy in Australia and China: A comparison of policies and status. *Renew. Energy* **2014**, *85*, 1044–1051. [CrossRef]
22. Brundliger, L. *High Penetration of PV in Local Distribution Grid: Case-Study Collection*; Report IEA PVPS: Ursen, Switzerland, 2014; ISBN 978-3-906042-23-7.
23. Karimi, M.; Mokhlis, H.; Naidu, K.; Uddin, S.; Bakar, A.H.A. Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network-A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *53*, 594–605. [CrossRef]
24. Zhou, N.; Liu, N.; Zhang, J.; Lei, J. Multi-objective optimal sizing for battery storage of PV-based microgrid with demand response. *Energies* **2016**, *9*, 591. [CrossRef]
25. Hussain, A.; Bui, V.H.; Kim, H.M. Fuzzy logic-based operation of battery energy storage systems (BESSs) for enhancing the resiliency of hybrid microgrids. *Energies* **2016**, *10*, 271. [CrossRef]
26. Watson, J.D.; Watson, N.R.; Santos-Martin, D.; Wood, A.R.; Lemon, S.; Miller, A.J. Impact of solar photovoltaics on the low-voltage distribution network in New Zealand. *IET Gener. Transm. Distrib.* **2016**, *10*, 1–9. [CrossRef]
27. Hashemi, S.; Stergaard, J. Methods and strategies for overvoltage prevention in low voltage distribution systems with PV. *IET Renew. Power Gener.* **2016**, *11*, 205–214. [CrossRef]
28. Li, Y.; Ishikawa, M. An efficient reactive power control method for power network systems with solar photovoltaic generators using sparse optimization. *Energies* **2017**, *10*, 696. [CrossRef]
29. Moger, T.; Dhadbanjan, T. Fuzzy logic approach for reactive power coordination in grid connected wind farms to improve steady state voltage stability. *IET Renew. Power Gener.* **2017**, *11*, 351–361. [CrossRef]
30. Suganthi, L.; Iniyan, S.; Samuel, A.A. Applications of fuzzy logic in renewable energy systems—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *48*, 585–607. [CrossRef]
31. Sukumar, S.; Marsadek, M.; Ramasamy, A.; Mokhlis, H.; Mekhilef, S. A fuzzy-based PI controller for power management of a grid-connected PV-SOFC hybrid system. *Energies* **2017**, *10*, 1720. [CrossRef]
32. Ciabattini, L.; Ferracuti, F.; Grisostomi, M.; Ippoliti, G.; Longhi, S. Fuzzy logic based economic analysis of photovoltaic energy management. *Neurocomputing* **2015**, *170*, 296–305. [CrossRef]
33. Arcos-Aviles, D.; Pascual, J.; Marroyo, L.; Sanchis, P.; Guinjoan, F. Fuzzy logic-based energy management system design for residential grid-connected microgrids. *IEEE Trans. Smart Grid* **2018**, *9*, 530–540. [CrossRef]

