

วิธีการกำหนดขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริดโดยคำนึงถึงความเสี่ยงของกำลังการผลิตไฟฟ้า

A Method for Sizing and Siting of an Energy Storage System in Microgrid Concerning Generation Adequacy

กิตติคุปต์ คุญโท¹ และดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์^{1*}

Kittikhup Khuntho¹ and Dulpichet Rerkpreedapong^{1*}

Received: October 21, 2019; Revised: October 31, 2019; Accepted: November 7, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด โดยคำนึงถึงมูลค่าความเสียหายเมื่อโหลดถูกปลดออก เนื่องจากกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไม่เพียงพอ ค่าใช้จ่ายส่วนนี้ถูกนำมาพิจารณาพร้อมกับค่าใช้จ่ายรวมที่ได้จากวิธีการแบบเดิม ซึ่งประกอบด้วยต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของไมโครกริด ผลการวิจัยพบว่าขนาดของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอมีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ได้จากวิธีการคำนวณแบบเดิมสำหรับทุกตำแหน่งบัส เพราะขนาดที่ใหญ่ขึ้นช่วยลดมูลค่าความเสียหายเมื่อโหลดถูกปลดออก ขณะที่วิธีการแบบเดิมไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายส่วนนี้ จึงปรากฏขนาดที่เหมาะสมเล็กกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้พบว่าตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดเป็นอย่างมาก ในช่วงที่ระบบกักเก็บพลังงานมีสถานะประจุ หากตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ มาก จะทำให้ไมโครกริดมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียสูง และจะมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อระบบกักเก็บพลังงานนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายจำหน่ายไปเก็บสะสมในระบบกักเก็บพลังงานมากขึ้น ในทางกลับกันเมื่อระบบกักเก็บพลังงานมีสถานะคายประจุ หากตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ใกล้กับกลุ่มโหลดที่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจากกริดจะถูกส่งไปยังกลุ่มโหลดดังกล่าวลดลง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดมีค่าลดลง และยังช่วยลดปริมาณโหลดที่ถูกปลดออกอันเนื่องมาจากกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพออีกด้วย สุดท้ายนี้ประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอถูกประเมินโดยการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบเดิม ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอมีค่าต่ำกว่าค่าใช้จ่ายรวมที่ได้จากวิธีการแบบเดิม

คำสำคัญ : การหาขนาด; การหาตำแหน่ง; ระบบกักเก็บพลังงาน; ไมโครกริด; ความเชื่อถือได้; พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok

* Corresponding Author E - mail Address: dulpichet.r@ku.ac.th

Abstract

This paper presents a method for sizing and siting of an Energy Storage System (ESS) in microgrid concerning the cost of lost load due to generation inadequacy. This cost is considered together with the typical total cost of microgrid, usually including the investment cost of ESS and all operation costs of microgrid. From the study results, the suitable size of an ESS resulted from the proposed method is larger than that given by the conventional approach for any selected bus of microgrid because it helps to decrease the cost of lost load. On the other hand, existing methods commonly overlook the generation adequacy issue, and result in a smaller size than it should be. In addition, it has been found that the location of an ESS significantly affects distribution power losses in microgrid. During a charging period, the ESS located far from the energy sources tends to increase the energy losses of microgrid. This can be more severe when its size is larger because an increased amount of generated power will be fed to the ESS over long distribution lines. In contrast, when the ESS is placed close to major load areas distant from their energy sources, less amount of electrical power from the main grid will be transferred through the distribution lines during a discharging period. It results in a decrease in energy losses, and also reduces the amount of lost load due to generation inadequacy. Finally, the effectiveness of the presented method is assessed by a comparison of the total costs resulted from the proposed method against the conventional method. The results demonstrate that the total cost of microgrid resulted from this method is lower than that given by the traditional approach.

Keywords: Sizing; Placement; Energy Storage System; Microgrid; Reliability; Energy Loss

บทนำ

ระบบไฟฟ้ากำลังแบบเดิมดำเนินการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟผ่านโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน โดยมุ่งเน้นไปที่การรักษาสมดุลระหว่างกำลังผลิตไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าเป็นหลัก ซึ่งการไฟฟ้าเองได้มีการปรับปรุงและพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าเรื่อยมา เพื่อสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและให้บริการคุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้น ผลจากการเพิ่มขึ้นของความต้องการใช้ไฟฟ้านี้เองส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ และทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีค่าสูงขึ้นอีกด้วย โดยเฉพาะการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีระยะทางไกล [1]

อีกทั้งในปัจจุบันมีการนำเอาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน (Renewable Source) มาใช้งานกันมากขึ้น เนื่องจากการลดลงอย่างต่อเนื่องของเชื้อเพลิงฟอสซิล และการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับความไม่ต่อเนื่องในการผลิตไฟฟ้าเนื่องจากความไม่แน่นอนของสภาพแวดล้อมนั้น ๆ [2]

จากปัญหาข้างต้น ทำให้เกิดแนวคิดเกี่ยวกับไมโครกริด (Microgrid) ขึ้น ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่สามารถทำงานโดยเชื่อมต่ออยู่กับกริด หรือแยกตัวเป็นอิสระได้ [3] องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของไมโครกริด คือ ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System, ESS) เป็นระบบที่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อเก็บสะสมไว้ และสามารถเปลี่ยนกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าจ่ายคืนแก่ไมโครกริดได้ ถูกนำมาใช้งานเพื่อสร้างความยืดหยุ่นให้แก่ไมโครกริดโดยการรักษาสถิตของพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการเสริมความมั่นคงให้แก่ระบบและสนับสนุนไมโครกริดให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [4]

งานวิจัยที่ผ่านมา การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับระบบไฟฟ้ากำลังมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันออกไป แต่มีวัตถุประสงค์คล้ายกัน คือ การหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานเพื่อให้สมรรถนะด้านหนึ่งด้านใดของระบบมีค่าดีที่สุด เช่น งานวิจัย [5] นำเสนอการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมโดยพิจารณาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยเลือกขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายมีค่าต่ำที่สุด และยังคงรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม อนึ่งจากงานวิจัย [6] พบว่า เมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะช่วยปรับปรุงความเชื่อถือได้ของไมโครกริดให้ดีขึ้น แต่ต้นทุนและค่าใช้จ่ายของระบบกักเก็บพลังงานจะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน จึงเป็นเรื่องท้าทายที่จะกำหนดขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างสมรรถนะและต้นทุนของระบบ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานโดยพิจารณาสมรรถนะด้านต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ความเชื่อถือได้ รวมถึงต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานของไมโครกริด ทั้งนี้ได้แปลงปริมาณทั้งหมดข้างต้นให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน นั่นคือ ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด (บาท/ปี) และได้เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับวิธีการแบบเดิม [7] ที่พิจารณาค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดโดยมิได้รวมผลกระทบด้านความเชื่อถือได้เข้าไปด้วย ในการนี้วิธีการที่นำเสนอได้ประเมินผลกระทบด้านความเชื่อถือได้ในรูปของมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยและรุนแรงในไมโครกริด เพราะความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน จากผลการวิจัยพบว่าวิธีการที่นำเสนอทำให้ได้ระบบกักเก็บพลังงานที่มีขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมอย่างแท้จริง โดยค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากวิธีการแบบเดิม ทั้งนี้รายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ได้อธิบายไว้ในระเบียบวิธีวิจัยและผลการศึกษาในหัวข้อถัดไป

ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานถือเป็นสิ่งสำคัญสำหรับไมโครกริด เนื่องจากการเลือกขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสามารถส่งเสริมให้ไมโครกริดทำงานได้อย่างเกิดประโยชน์สูงสุด [4] ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบของระบบกักเก็บพลังงานที่มีต่อไมโครกริด

1.1 การประเมินความเชื่อถือได้ของไมโครกริด

งานวิจัยนี้ประเมินความเชื่อถือได้ของไมโครกริดจากตารางความน่าจะเป็นของการสูญเสียกำลังการผลิต (Capacity Outage Probability Table, COPT) ซึ่งเป็นตารางที่แสดงค่าความเป็นไปได้ของกำลังการผลิตจากหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมดในไมโครกริด โดยทั่วไปแต่ละหน่วยผลิตไฟฟ้าจะมีสถานะการทำงาน 2 สถานะ คือ สถานะเดินเครื่องและหยุดทำงาน ดังนั้น สำหรับไมโครกริดที่มีหน่วยผลิตไฟฟ้าทั้งหมด M หน่วย ทำให้ตารางความน่าจะเป็นของการสูญเสียกำลังการผลิตของไมโครกริดนั้น ๆ มีสถานะทั้งหมด 2^M สถานะ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญสำหรับสร้างตารางนี้ คือ ค่ากำลังการผลิต (Capacity) และค่าอัตราการขัดข้อง (Forced Outage Rate, FOR) ของแต่ละหน่วยผลิตไฟฟ้าของไมโครกริด

จากผลลัพธ์ที่ได้จากตาราง COPT สามารถนำไปวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ของไมโครกริด โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ดัชนีความเชื่อถือได้ 2 ชนิด คือ ดัชนีความเชื่อถือได้ในแง่ของจำนวนชั่วโมงและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไมโครกริดไม่สามารถจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟได้ใน 1 ปี ซึ่งเกิดจากความต้องการโหลดมีค่ามากกว่ากำลังผลิตในระบบ เรียกว่า ค่าคาดการณ์ที่จะสูญเสียโหลด (Loss of Load Expectation, $LOLE$) และพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ (Energy Not Supplied, ENS) มีหน่วยเป็นชั่วโมง/ปี และเมกะวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ [8] แสดงดังสมการที่ (1) - (2)

$$LOLE = \sum_{t=1}^{nT} \sum_{k=1}^{nK} p_{k,t}(O_k) \quad (1)$$

$$ENS = \sum_{t=1}^{nT} \sum_{k=1}^{nK} p_{k,t}(O_k) \cdot LS_{k,t} \cdot \Delta t \quad (2)$$

เมื่อ

- O_k คือ สถานะกำลังผลิต k ของตาราง COPT ซึ่งทำให้ไมโครกริดเกิดเหตุการณ์ไฟดับ (มีค่าเป็น 1 เมื่อกำลังผลิตมีค่าต่ำกว่าโหลด และเป็น 0 เมื่ออยู่ในสภาวะปกติ)
- $p_{k,t}$ คือ ความน่าจะเป็นของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t
- $LS_{k,t}$ คือ โหลดที่ถูกปลดออกเนื่องจากกำลังผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า สำหรับสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)
- Δt คือ เป็นค่าผลต่างช่วงเวลาที่ใช้ในการศึกษา ในกรณีนี้จะพิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 1 ชั่วโมง
- nK คือ จำนวนสถานะของตาราง COPT
- nT คือ ระยะเวลาทั้งหมด (ชั่วโมง)

การประเมินผลประโยชน์จากความเชื่อถือได้ที่เพิ่มขึ้นของไมโครกริดอันเนื่องมาจากการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน จำเป็นต้องพิจารณามูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟกรณีโหลดถูกปลดออกเนื่องจากกำลังการผลิตไม่เพียงพอทั้งก่อนและหลังการติดตั้ง และแปลงให้อยู่ในรูปของเงิน แล้วจึงนำไป

พิจารณาร่วมกับค่าใช้จ่ายในส่วนอื่น ๆ เพื่อหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน ตัวแปรตัวนี้ถูกเรียกว่า มูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ (*ECOST*) เป็นผลกระทบที่ไม่ได้เกิดขึ้นโดยตรงกับไมโครกริด แต่สะท้อนถึงความเสียหายทางด้านเศรษฐศาสตร์ของผู้ใช้ไฟในไมโครกริด มีหน่วยเป็นบาท/ปี โดยการคำนวณจำเป็นต้องทราบอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าดับ (*Interrupted Energy Rate, IER*) ของไมโครกริดเป็นดัชนีที่บ่งบอกว่า หนึ่งหน่วยพลังงานที่หายไปผู้ใช้ไฟมีมูลค่าความเสียหายเท่าไร มีหน่วยเป็นบาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง แสดงดังสมการที่ (3)

$$ECOST = ENS \cdot IER \quad (3)$$

1.2 สมการวัตถุประสงค์สำหรับหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน

การหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด ถูกกำหนดให้เป็นไปตามสมการวัตถุประสงค์ กล่าวคือ เพื่อให้ได้ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดต่ำที่สุด ซึ่งค่าใช้จ่ายรวมดังกล่าวประกอบด้วยต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงาน (*Total Investment Cost of ESS, TIC*) และค่าใช้จ่ายสำหรับการดำเนินงานทั้งหมดของไมโครกริด (*Total Operating Cost of Microgrid, TOC*) [7], [9] - [10] นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอได้เพิ่มมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ (*ECOST*) มาคำนวณรวมด้วย แสดงดังสมการที่ (4)

$$\text{Min Total cost} = TIC + TOC + ECOST \quad (4)$$

TIC คือ ค่าใช้จ่ายเนื่องจากต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงาน มีหน่วยเป็นบาท/ปี เป็นค่าใช้จ่ายจากการลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานแก่ไมโครกริด โดย *TIC* ขึ้นอยู่กับค่าพิกัดกำลัง (*Power Rating, $P_{ES,r}$*) มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ และพิกัดพลังงาน (*Energy Rating, $E_{ES,r}$*) มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์-ชั่วโมง แสดงดังสมการที่ (5)

$$TIC = \left(\frac{PIC + PCC + DC}{L} + OMC \right) P_{ES,r} + \left(\frac{EIC + BOPC}{L} \right) E_{ES,r} \quad (5)$$

เมื่อ

<i>PIC</i>	คือ	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นพิกัดกำลังไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์)
<i>PCC</i>	คือ	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์)
<i>DC</i>	คือ	ค่าใช้จ่ายในการกำจัด (บาท/เมกะวัตต์)
<i>OMC</i>	คือ	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา (บาท/เมกะวัตต์)
<i>EIC</i>	คือ	ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นพิกัดพลังงานไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
<i>BOPC</i>	คือ	ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
<i>L</i>	คือ	อายุการใช้งานของระบบกักเก็บพลังงาน (ปี)

ระบบกักเก็บพลังงานนอกจากในส่วนของอุปกรณ์สำหรับเก็บสะสมพลังงานแล้วนั้น
ยังต้องมีระบบแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Power Conversion Systems) ซึ่งเป็นอีกองค์ประกอบสำคัญสำหรับ
แปลงกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบกักเก็บพลังงาน

สำหรับค่าใช้จ่ายในการกำจัด (Disposal Cost, DC) เป็นค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการกำจัด
หรือปลดระบบกักเก็บพลังงานออกจากไมโครกริด เมื่อระบบกักเก็บพลังงานหมดอายุการใช้งานมีหน่วยเป็น
บาท/เมกะวัตต์ [10] - [11]

ค่าอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง (Balance of Plant Cost, $BOPC$) เป็นค่าใช้จ่าย
สำหรับอุปกรณ์และระบบสนับสนุนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อให้ระบบกักเก็บพลังงาน
สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันและสวิตช์เกียร์ [10], [12]
มีหน่วยเป็นบาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง

TOC คือ ค่าใช้จ่ายรวมที่ครอบคลุมการดำเนินงานทั้งหมดของไมโครกริด ไม่ว่าจะเป็น
ค่าเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า หรือการรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าจากกริด มีหน่วยเป็นบาท/ปี
คำนวณได้จากสมการที่ (6) - (8)

$$TOC = \sum_{t=1}^{nT} \sum_{k=1}^{nK} P_{k,t} \left(\sum_{PV=1}^{nPV} F_{PV} P_{PV,k,t} + \sum_{WT=1}^{nWT} F_{WT} P_{WT,k,t} + \sum_{g=1}^{nG} F_g P_{g,k,t} I_{g,k,t} + \rho_t P_{Grid,k,t} UY_{k,t} \right) \quad (6)$$

$$P_{g,\min} \cdot I_{g,k,t} \leq P_{g,k,t} \leq P_{g,\max} \cdot I_{g,k,t} \quad (7)$$

$$|P_{Grid,k,t}| \leq P_{Grid,\max} \quad (8)$$

เมื่อ

$P_{PV,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของสถานะ
กำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{WT,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลมของสถานะกำลังผลิต
 k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{g,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วง
เวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{Grid,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าจากกริดของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (มีค่าเป็นบวก
เมื่อไมโครกริดนำเข้าไฟฟ้าจากกริด กลับกันมีค่าเป็นลบเมื่อไมโครกริด
ส่งออกไฟฟ้าคืนกริด, เมกะวัตต์)

F_{PV} คือ ฟังก์ชันต้นทุนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (บาท/เมกะวัตต์)

F_{WT} คือ ฟังก์ชันต้นทุนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (บาท/เมกะวัตต์)

F_g คือ ฟังก์ชันต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g (บาท/เมกะวัตต์)

- $I_{g,k,t}$ คือ สถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (มีค่าเป็น 1 เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในสถานะเดินเครื่อง และมีค่าเป็น 0 เมื่อหยุดทำงาน)
- ρ_t คือ อัตราค่าไฟฟ้า (บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง) ในช่วงเวลา t
- $UY_{k,t}$ คือ สภาวะเหตุการณ์ที่คาดไม่ถึงของสายจำหน่ายที่เชื่อมต่อระหว่างไมโครกริดกับกริดของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (มีค่าเป็น 1 เมื่อสายจำหน่ายเป็นปกติ และมีค่าเป็น 0 เมื่อเกิดเหตุขัดข้อง)
- $P_{g,max}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g (เมกะวัตต์)
- $P_{g,min}$ คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าต่ำสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า g (เมกะวัตต์)
- $P_{Grid,max}$ คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ทนรับได้ของสายจำหน่ายที่เชื่อมระหว่างไมโครกริดกับกริด (เมกะวัตต์)

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานทดแทน 2 ชนิด ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง และมีความสามารถในการผลิตไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic) และกังหันลม (Wind Turbine) สำหรับกำลังไฟฟ้าขาออกของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และกังหันลม ณ ช่วงเวลา t สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) - (10) มีหน่วยเป็นเมกะวัตต์ [7], [13]

$$P_{PV,k,t} = P_{STC} \frac{G_{k,t}}{G_{STC}} (1 + c(T_{k,t} - T_{STC})) \quad (9)$$

$$P_{WT,k,t} = \begin{cases} 0 & v_{k,t} < v_{CI} \text{ or } v_{k,t} > v_{CO} \\ P_{WT,max} \frac{v_{k,t} - v_{CI}}{v_r - v_{CI}} & v_{CI} \leq v_{k,t} < v_r \\ P_{WT,max} & v_r \leq v_{k,t} \leq v_{CO} \end{cases} \quad (10)$$

เมื่อ

- P_{STC} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition, STC) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (เมกะวัตต์)
- $G_{k,t}$ คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (วัตต์/ตารางเมตร)
- G_{STC} คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่สภาวะทดสอบมาตรฐานมีค่า 1,000 วัตต์/ตารางเมตร
- $T_{k,t}$ คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (องศาเซลเซียส)
- T_{STC} คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะทดสอบมาตรฐานมีค่า 25 องศาเซลเซียส

c	คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังไฟฟ้า-อุณหภูมิมีค่าประมาณ 0.0047 วัตต์/องศาเซลเซียส
$P_{WT,max}$	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของกังหันลม (เมกะวัตต์)
$v_{k,t}$	คือ ความเร็วลมของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมตร/วินาที)
v_{CI}	คือ ความเร็วลมเริ่มทำงานของกังหันลม (เมตร/วินาที)
v_r	คือ พิกัดความเร็วลมของกังหันลม (เมตร/วินาที)
v_{CO}	คือ ความเร็วลมหยุดทำงานของกังหันลม (เมตร/วินาที)

การประยุกต์ใช้งานระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริดมีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการติดตั้ง [2] งานวิจัยนี้นำระบบกักเก็บพลังงานมาใช้งานรูปแบบการตัดโหลดค่ายอด (Peak Shaving) โดยจะมองระบบกักเก็บพลังงานเป็นโหลดเมื่อไมโครกริดมีกำลังผลิตรวมมากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า และมองระบบกักเก็บพลังงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อไมโครกริดมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง ซึ่งสมการสำหรับจำลองระบบกักเก็บพลังงาน เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการจ่ายกำลังไฟฟ้าและระดับพลังงานสะสมคงเหลือภายในระบบกักเก็บพลังงาน แสดงดังสมการที่ (11) - (13)

$$-P_{ES,r} \leq P_{ES,k,t} \leq k_0 \cdot P_{ES,r} \quad (11)$$

$$SOC_{k,t} = SOC_{k,t-1} - P_{ES,k,t} \cdot \Delta t \quad (12)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_{k,t} \leq SOC_{\max} \quad (13)$$

เมื่อ

$P_{ES,k,t}$	คือ กำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)
k_0	คือ ความลึกของการคายประจุ
$SOC_{k,t}$	คือ ระดับพลังงานสะสมคงเหลือของระบบกักเก็บพลังงานของสถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
$SOC_{\min}$	คือ ระดับพลังงานสะสมคงเหลือต่ำสุดที่ระบบกักเก็บพลังงานต้องรักษาไว้ (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)
$SOC_{\max}$	คือ ระดับพลังงานสะสมคงเหลือสูงสุดที่ระบบกักเก็บพลังงานรับได้ (เมกะวัตต์-ชั่วโมง)

กำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงาน ($P_{ES,k,t}$) มีค่าเป็นบวกเมื่อระบบกักเก็บพลังงานอยู่ในสถานะคายประจุ (Discharging Mode) ในทางกลับกันมีค่าเป็นลบเมื่ออยู่ในสถานะคายประจุ (Charging Mode) และมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ในสภาวะหยุดนิ่ง (Idle Mode)

1.3 การคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริด

งานวิจัยนี้ใช้การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) เพื่อหา กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Power Loss) ของไมโครกริด ซึ่งวิธีนี้ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่และมีความซับซ้อน [14] สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายจำหน่ายที่เชื่อมต่อระหว่างบัส a และบัส b ($P_{loss,ab}$) ได้ ดังสมการที่ (14)

$$P_{loss,ab,k,t} = P_{ab,k,t} + P_{ba,k,t} \quad (14)$$

เมื่อ

$P_{ab,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส a ไปยังบัส b ที่สถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

$P_{ba,k,t}$ คือ กำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส b ไปยังบัส a ที่สถานะกำลังผลิต k ในช่วงเวลา t (เมกะวัตต์)

ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่สถานะกำลังผลิต k ณ ช่วงเวลา t ($P_{loss,k,t}$) คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายจำหน่ายทั้งหมดของไมโครกริดมีหน่วยเป็นเมกะวัตต์แทนด้วยสมการที่ (15)

$$P_{loss,k,t} = \sum_{all\ ab} P_{loss,ab,k,t} \quad (15)$$

2. ขั้นตอนการหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน

- กระบวนการเริ่มต้นจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า โดยป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของไมโครกริด อินพุตของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ เช่น ความเข้มแสง ความเร็วลม และความต้องการใช้ไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 8,760 ชั่วโมง (1 ปี) ผ่านโปรแกรม MATLAB ทั้งกรณีก่อนและหลังการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งมีขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่แตกต่างกันในไมโครกริด

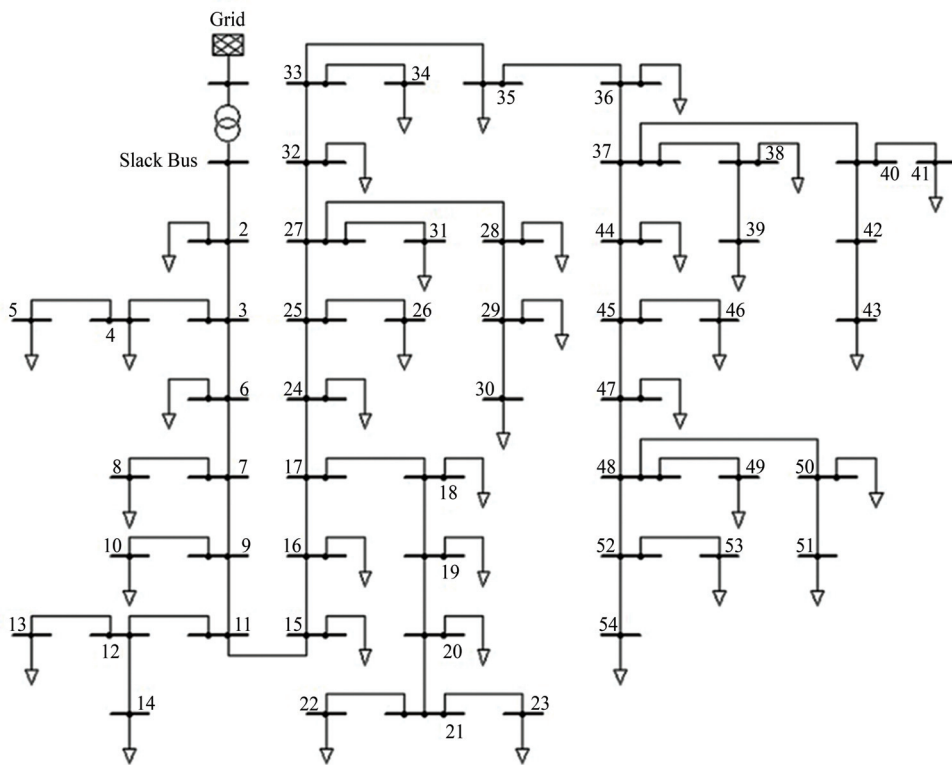
- ในการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงาน ให้เลือกติดตั้งที่บัสใดบัสหนึ่งในไมโครกริดก่อน ซึ่งขนาดของระบบกักเก็บพลังงานประกอบด้วย 2 ค่าพิกัด คือ พิกัดพลังงานและพิกัดกำลัง โดยเริ่มปรับค่าจากขนาด 1 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และ 1 เมกะวัตต์ ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนปรากฏขนาดที่เหมาะสมสำหรับตำแหน่งบัสนั้น ๆ โดยขนาดที่เหมาะสมนั้น คือ ค่าพิกัดที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดมีค่าต่ำที่สุด จากนั้นให้ทำกระบวนการนี้ซ้ำ โดยเลือกติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่บัสอื่นจนครบทุกบัสของไมโครกริด

- เมื่อได้ค่าขนาดที่เหมาะสมสำหรับทุกตำแหน่งบัสติดตั้งแล้วจึงนำค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกับกันเพื่อหาว่าขนาดที่เหมาะสม ณ ตำแหน่งบัสใด ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริดมีค่าต่ำที่สุด แล้วจึงเลือกขนาดและตำแหน่งบัสนั้นเป็นขนาดและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริด

ผลการศึกษา

ไมโครกริดที่นำมาใช้ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้เป็นระบบจำหน่ายแบบเรเดียล 54 บัส ดังรูปที่ 1 มีระบบผลิตไฟฟ้าภายในประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยค่าพารามิเตอร์สำคัญต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1 และ 2

ในการศึกษานี้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 1 เมกะวัตต์ แรงดันไฟฟ้าฐาน 22 กิโลโวลต์ สายจำหน่ายที่เชื่อมระหว่างไมโครกริดกับกริดสามารถรับกำลังไฟฟ้าได้ 6.47 เมกะวัตต์ และมีค่าอัตราการชดช้อง (FOR) เท่ากับ 0.0081527 กำหนดให้ผู้ใช้ไฟของไมโครกริดนี้มีค่า IER เท่ากับ 91,700 บาท/เมกะวัตต์-ชั่วโมง [11]



รูปที่ 1 โครงสร้างของไมโครกริดที่ใช้ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกักเก็บพลังงาน [9], [11]

<i>PIC</i> (ล้านบาท/ เมกะวัตต์)	<i>EIC</i> (ล้านบาท/ เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	<i>PCC</i> (ล้านบาท/ เมกะวัตต์)	<i>OMC</i> (ล้านบาท/ เมกะวัตต์/ปี)	<i>DC</i> (ล้านบาท/ เมกะวัตต์)	<i>BOPC</i> (ล้านบาท/ เมกะวัตต์-ชั่วโมง)	<i>L</i> (ปี)
10.69	11.03	5.87	0.82	0.05	0.98	30

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์แหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ ในโมโครกริด [8]

ประเภท	เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า 1	เครื่องกำเนิด ไฟฟ้า 2	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า พลังงานลม
ต้นทุนการผลิต (บาท/หน่วย)	2.08	2.23	-	-
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์)	3	1	6	1
กำลังไฟฟ้าต่ำสุด (เมกะวัตต์)	1	0.3	0	0
Ramp Up Rate (เมกะวัตต์)	3	1	-	-
Ramp Down Rate (เมกะวัตต์)	3	1	-	-
Minimum Up Time (ชั่วโมง)	1	1	-	-
Minimum Down Time (ชั่วโมง)	1	1	-	-
FOR	0.06	0.06	0.03	0.04
ตำแหน่งบัสติดตั้ง	3	6	14	44

ตารางที่ 3 ตัวอย่างขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานเมื่อติดตั้งที่บัสต่าง ๆ ของโมโครกริด

บัส	พิกัด กำลัง (เมกะวัตต์)	พิกัด พลังงาน (เมกะวัตต์- ชั่วโมง)	พลังงาน ไฟฟ้าสูญเสีย (เมกะวัตต์- ชั่วโมง)	LOLE (ชั่วโมง/ ปี)	ENS (เมกะวัตต์- ชั่วโมง)	ECOST (ล้านบาท/ ปี)	ค่าใช้จ่ายรวม วิธีเดิม (ล้านบาท/ ปี)	ค่าใช้จ่าย รวม (ล้านบาท/ ปี)
ไม่ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน			2189.63	39.47	58.84	5.40	146.25	151.64
กรณีพิจารณาความเชื่อถือได้ร่วมด้วย								
11	2.20	10.10	2124.13	21.02	26.77	2.46	146.53	148.99
25	2.00	9.90	2121.56	21.57	27.24	2.50	146.28	148.78
37	1.70	9.00	2222.79	22.34	27.47	2.52	145.82	148.33
44	1.70	9.00	2238.28	22.31	27.41	2.51	145.83	148.34
54	1.70	8.90	2365.02	22.61	27.67	2.54	145.93	148.47
การคำนวณแบบเดิม (กรณีไม่พิจารณาความเชื่อถือได้)								
11	0.70	3.70	2157.24	31.26	45.01	4.13	145.90	150.03
25	0.70	3.90	2143.85	30.98	43.68	4.01	145.76	149.77
37	0.90	5.00	2142.90	29.21	39.72	3.64	145.38	149.02
44	0.80	4.40	2141.24	29.97	40.45	3.71	145.40	149.11
54	0.80	4.40	2171.81	29.96	41.25	3.78	145.42	149.20

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อโมโครกริดไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน มีค่าคาดการณ์ที่จะสูญเสียโหลด 39.47 ชั่วโมง/ปี และมีปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ 58.84 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งคิดเป็นมูลค่าความเสียหายเท่ากับ 5,395,911.89 บาท/ปี พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นตลอดปี

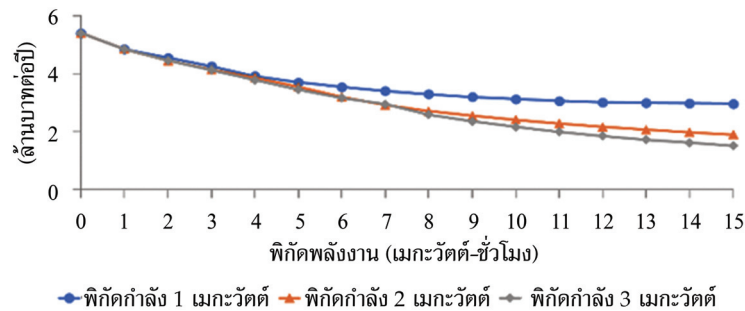
2,189.63 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และคิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 146,245,347.48 บาท/ปี ดังนั้น เมื่อนำมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟ ซึ่งสะท้อนถึงความไม่เพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า มารวมกับค่าใช้จ่ายเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจะได้ค่าใช้จ่ายรวมเพิ่มเป็น 151,641,259.37 บาท/ปี

เมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอเพื่อหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับไมโครกริดนี้ ได้ผลลัพธ์ดังนี้ คือ พิกัดกำลัง 1.7 เมกะวัตต์/พิกัดพลังงาน 9.0 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ติดตั้งที่บัส 37 ซึ่งทำให้ค่าคาดการณ์ที่จะสูญเสียโหลดลดลงเหลือเพียง 22.34 ชั่วโมง/ปี ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ลดลงเหลือ 27.47 เมกะวัตต์-ชั่วโมง คิดเป็นความเสียหายเท่ากับ 2,518,591.94 บาท/ปี พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็น 2,222.79 เมกะวัตต์-ชั่วโมง เมื่อรวมต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานแล้ว คิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 145,816,193.13 บาท/ปี ทั้งนี้เมื่อนำมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟมารวมด้วย ทำให้ได้ค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับ 148,334,785.07 บาท/ปี มีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 2.18

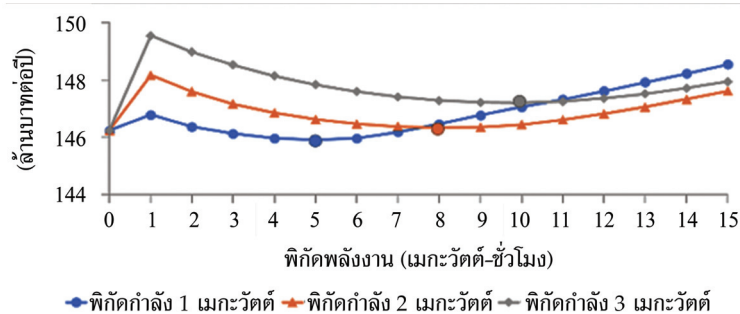
เพื่อให้เห็นถึงประโยชน์ที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอชัดเจนขึ้น จึงได้ทำการทดลองหาขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงาน โดยไม่พิจารณามูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นแนวทางที่งานวิจัยในอดีตใช้ปฏิบัติพบว่าขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับไมโครกริดในกรณีนี้ คือ พิกัดกำลัง 0.9 เมกะวัตต์/พิกัดพลังงาน 5.0 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ติดตั้งที่บัส 37 ซึ่งทำให้ค่าคาดการณ์ที่จะสูญเสียโหลดลดลงเหลือ 29.21 ชั่วโมง/ปี มีปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ 39.72 เมกะวัตต์-ชั่วโมง และมูลค่าความเสียหายคิดเป็น 3,642,063.65 บาท/ปี พลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงเล็กน้อยเหลือ 2,142.90 เมกะวัตต์-ชั่วโมง เมื่อรวมต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานแล้ว คิดเป็นค่าใช้จ่ายเท่ากับ 145,377,373.94 บาท/ปี และหากรวมกับมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟด้วย จะทำให้ค่าใช้จ่ายรวมใหม่มีค่าเท่ากับ 149,019,437.59 บาท/ปี มีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 1.73

จากผลลัพธ์ในตารางที่ 3 เห็นได้ว่า ขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอใหญ่กว่าขนาดที่ได้จากวิธีการแบบเดิม ไม่ว่าจะเป็นติดตั้งที่ตำแหน่งบัสใด นอกจากนั้นงานวิจัยยังได้ทดลองใช้ระบบกักเก็บพลังงานที่ขนาดต่าง ๆ กันกับไมโครกริดข้างต้น โดยได้คำนวณค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออก (*ECOST*) ดังรูปที่ 2(ก) ค่าใช้จ่ายรวม (แบบเดิม) โดยยังไม่ได้รวม *ECOST* ดังรูปที่ 2(ข) และค่าใช้จ่ายรวมที่ได้นำเสนอในวิธีการนี้ดังรูปที่ 2(ค) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของกราฟรูปที่ 2(ก) และ 2(ข)

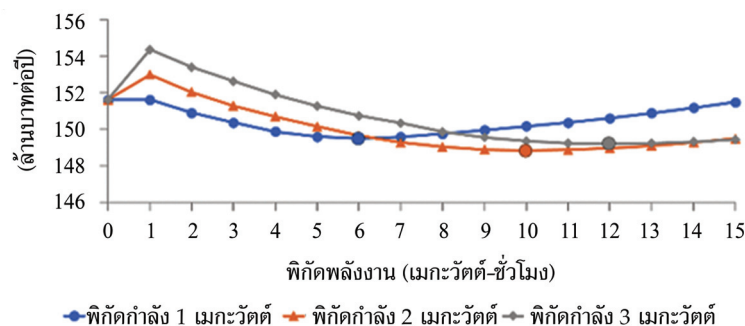
จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟดังกล่าว พบว่าเมื่อระบบกักเก็บพลังงานมีค่าพิกัดพลังงานที่สูงขึ้นจะช่วยลดค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังผลิตรวมของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีค่าไม่เพียงพอ (*ECOST*) ให้ต่ำลงตามไปด้วย ดังที่ปรากฏในรูปที่ 2(ก) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายของไมโครกริด (แบบเดิม) ดังรูปที่ 2(ข) พบว่า ค่าพิกัดที่เหมาะสมที่สุดไม่ใช่ค่าที่มากที่สุด แต่เป็นค่าที่ทำให้กราฟต่ำที่สุด ยกตัวอย่างเช่น กรณีพิกัดกำลัง 1 เมกะวัตต์ ควรเลือกใช้ค่าพิกัดพลังงาน 5 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ในการนี้เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด (แบบใหม่) ดังรูปที่ 2(ค) ค่าพิกัดพลังงานที่เหมาะสมที่สุดควรเป็น 6 เมกะวัตต์-ชั่วโมง ที่พิกัดกำลัง 1 เมกะวัตต์ ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีการเลือกขนาดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าพิกัดของระบบกักเก็บพลังงานที่สูงกว่าแบบเดิม ขณะที่ค่าใช้จ่ายรวมมีค่าต่ำลง



(ก) ค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออก



(ข) ค่าใช้จ่ายรวมจากการคำนวณแบบเดิม



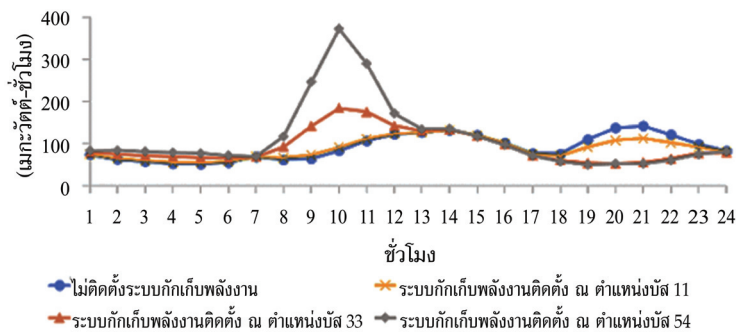
(ค) ค่าใช้จ่ายรวมโดยพิจารณาความเชื่อถือได้ร่วมด้วย

รูปที่ 2 ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ เมื่อระบบกักเก็บพลังงานมีค่าพิกัดต่าง ๆ กัน

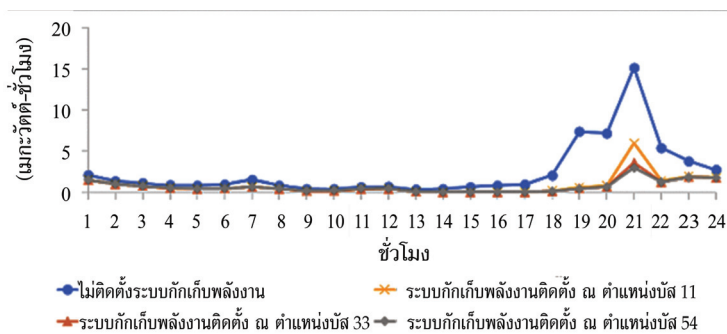
ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์อีกประการหนึ่งในงานวิจัยนี้ คือ ตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดเป็นอย่างมาก และยังส่งผลทางอ้อมต่อความเชื่อถือได้ของไมโครกริดอีกด้วยรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียและปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกที่เกิดขึ้นเมื่อทดลองติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานที่ตำแหน่งต่างกัน โดยแสดงค่าเป็นแบบรายชั่วโมงตลอดวัน ซึ่งสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ประเด็นตามสถานะการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน ดังนี้

- ขณะที่ไมโครกริดมีกำลังผลิตสูงกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งในกรณีศึกษานี้เป็นช่วงเวลากลางวันดังรูปที่ 3(ก) ระบบกักเก็บพลังงานจะอยู่ในสถานะประจุ และกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ จะไหลผ่านสายจำหน่ายไปเก็บสะสมไว้ในระบบกักเก็บพลังงาน ดังนั้นหากตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ กำลังไฟฟ้าส่วนนี้จะไหลไปเก็บสะสมในระบบกักเก็บพลังงานในระยะทางอันสั้น ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าต่ำ ในทางกลับกันเมื่อตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามากขึ้น ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

- เมื่อไมโครกริดมีกำลังผลิตต่ำกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลาค่ำสำหรับกรณีศึกษานี้ดังรูปที่ 3(ข) ระบบกักเก็บพลังงานจะอยู่ในสถานะคายประจุเพื่อช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่โหลด หากระบบกักเก็บพลังงานถูกติดตั้งใกล้กลุ่มโหลดในตำแหน่งที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จะช่วยลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไหลจากกริดไปสู่กลุ่มโหลดผ่านสายจำหน่ายที่มีระยะทางไกลได้ค่อนข้างมาก ซึ่งนอกจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลงแล้ว ยังช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากความไม่เพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย



(ก) ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

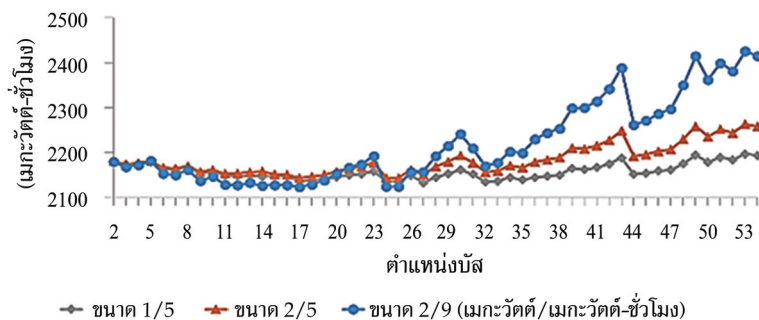


(ข) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้

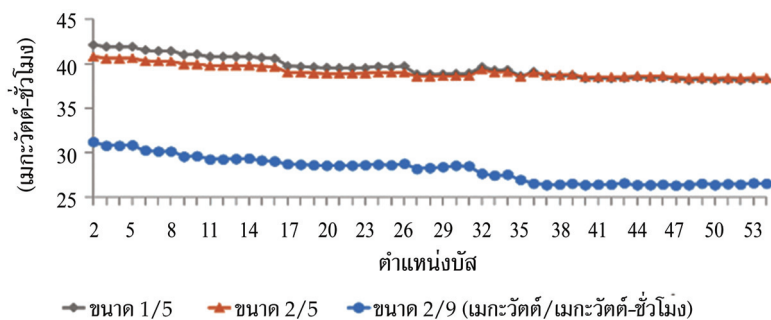
รูปที่ 3 ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ เมื่อระบบกักเก็บพลังงานติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ (แบบรายชั่วโมงตลอดวัน)

ต่อมาได้เปรียบเทียบระบบกักเก็บพลังงานที่มีพิกัดต่างกัน 3 ขนาด โดยทดลองติดตั้งที่บัสต่าง ๆ ของไมโครกริด และคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นตลอดปี และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถ

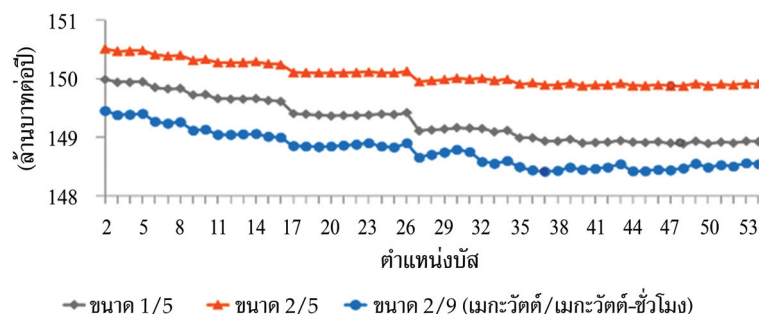
จ่ายได้ตลอดปี ซึ่งได้แสดงค่าไว้ดังรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ห่างออกไปจากกริด ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของกลุ่มโหลดขนาดใหญ่ในระบบด้วย โดยขณะที่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้กลับมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับระบบกักเก็บพลังงานควรเลือกตำแหน่งที่ให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำสุด ในการนี้ค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ในวิธีการที่นำเสนอ ประกอบด้วยค่าใช้จ่ายที่คำนวณได้จากหน่วยพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้น หน่วยพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้ ต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและอุปกรณ์รวม และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษา โดยคิดเฉลี่ยเป็นค่าใช้จ่ายรวม/ปี ดังแสดงในรูปที่ 4(ค)



(ก) ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย



(ข) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้



(ค) ค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด

รูปที่ 4 ผลกระทบทางด้านต่าง ๆ เมื่อระบบกักเก็บพลังงานติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ (โดยคิดสะสมตลอดปี)

สรุปผลและการอภิปราย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานในไมโครกริด โดยพิจารณาสมรรถนะด้านต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ความเชื่อถือได้ รวมถึงต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานของไมโครกริด จากนั้นแปลงปริมาณทั้งหมดข้างต้นให้อยู่ในหน่วยเงิน เพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยต่อปีในหน่วยบาท/ปี และเลือกขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานจากทางเลือกที่ให้ค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการแบบเดิมที่ไม่ได้รวมผลกระทบด้านความเชื่อถือได้เข้าไปด้วย ในการนี้วิธีการที่นำเสนอได้ประเมินผลกระทบด้านความเชื่อถือได้ในรูปของมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออกเมื่อกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นปัญหาที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยและรุนแรงในไมโครกริด เพราะความไม่แน่นอนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากพลังงานทดแทน

จากผลการทดลอง พบว่าขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอ มีพิกัดใหญ่กว่าขนาดที่ได้จากวิธีการแบบเดิม เพื่อช่วยลดมูลค่าความเสียหายเนื่องจากกรณีโหลดถูกปลดออก ขณะที่วิธีการแบบเดิมไม่ได้คำนึงถึงค่าใช้จ่ายส่วนนี้ จึงปรากฏขนาดที่เหมาะสมเล็กกว่าที่ควรจะเป็นโดยยืนยันได้จากค่าใช้จ่ายรวมที่ปรากฏมีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายรวมที่เกิดขึ้นในกรณีที่ใช้วิธีการที่นำเสนอ นอกจากนี้พบว่าตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานมีผลต่อค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียของไมโครกริดอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงที่ระบบกักเก็บพลังงานมีสถานะประจุ หากตำแหน่งติดตั้งอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่าง ๆ มาก จะทำให้ไมโครกริดมีค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียสูง และมีความรุนแรงขึ้นเมื่อระบบกักเก็บพลังงานนั้นมีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีกำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายจำหน่ายไปเก็บสะสมในระบบกักเก็บพลังงานมากขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อระบบกักเก็บพลังงานอยู่ในสถานะคายประจุ เพื่อสนับสนุนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าในไมโครกริดให้แก่โหลด หากตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานอยู่ใกล้กับกลุ่มโหลดที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จะช่วยลดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ไหลจากกริดไปสู่กลุ่มโหลดผ่านสายจำหน่ายที่มีระยะทางไกลได้ค่อนข้างมาก นอกจากพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลงแล้ว ยังช่วยลดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากความไม่เพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งส่งผลให้ไมโครกริดมีระดับความเชื่อถือได้ที่สูงขึ้น

ผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเลือกขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบกักเก็บพลังงานที่เหมาะสมนั้น จำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ให้ครอบคลุมทั้งในด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ประเมินผลกระทบเหล่านี้ในรูปของค่าใช้จ่ายรวมของไมโครกริด ดังนั้นการเลือกขนาดและตำแหน่งของระบบกักเก็บพลังงานที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมนี้มีค่าต่ำสุด จึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพและสามารถกำหนดขนาดพิกัดและตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานได้อย่างแท้จริง

References

- [1] Kajorndech, A. (2014). **Optimal Energy Storage System Design for Energy Management of Electric Power Distribution Systems**. M.E. Thesis, Dept. Electrical Eng., Kasetsart University

- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. (2014). **Development and Investment Guide to Renewable Energy Vol. 2, Solar Energy**. Bangkok
- [3] Kajorndech, A. and Rerkpreedapong, D. (2014). Energy Storage System Control Strategies for Power Distribution Systems. **KKU Engineering Journal**. Vol. 42, No. 1, pp. 9-19
- [4] Kerdphol, T., Tripathi, R.N., Hanamoto, T., Khairudin, Qudaih, Y., and Mitani, Y. (2015). ANN Based Optimized Battery Energy Storage System Size and Loss Analysis for Distributed Energy Storage Location in PV-Microgrid. In **Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA), 2015 IEEE Innovative**, Bangkok. pp. 1-6
- [5] Sok, V. and Tayjasanant, T. (2017). Determination of Optimal Siting and Sizing of Energy Storage System in PV-connected Distribution Systems Considering Minimum Energy Losses. In **2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**. Phuket, Thailand. pp. 451-454. DOI: 10.1109/ECTICon.2017.8096271
- [6] Dong, J., Gao, F., Guan, X., Zhai, Q., and Wu, J. (2016). Storage-Reserve Sizing with Qualified Reliability for Connected High Renewable Penetration Micro-Grid. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**. Vol. 7, Issue 2, pp. 732-743. DOI: 10.1109/TSTE.2015.2498599
- [7] Bahramirad, S., Reder, W., and Khodaei, A. (2012). Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in Microgrid. **IEEE Transactions on Smart Grid**. Vol. 3, Issue 4, pp. 2056-2062. DOI: 10.1109/TSG.2012.2217991
- [8] Zafir, S. R. M., Razali, N. M. M., and Hashim, T. J. T. (2016). Relationship Between Loss of Load Expectation and Reserve Margen for Optimal Generation Planning. **Jurnal Teknologi**. Vol. 78, Issue 5-9, pp. 27-33. DOI: 10.11113/jt.v78.8783
- [9] Adefarati, T., Bansal, R. C., and Junto, J. J. (2017). Reliability and Economic Evaluation of a Microgrid Power System. **Energy Procedia**. Vol. 142, pp. 43-48. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.008
- [10] Marchi, B., Pasetti, M., and Zaroni, S. (2016). Life Cycle Cost Analysis for BESS Optimal Sizing. In **2016 International Scientific Conference on Environmental and Climate Technologies (CONNECT 2016)**. At Riga, Latvia. pp. 127-134. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.04.034
- [11] Ross, M., Hidalgo, R., Abbey, C., and Joos, G. (2010). Analysis of Energy Storage Sizing and Technologies. In **2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference**. Halifax, NS, Canada. pp. 1-6. DOI: 10.1109/EPEC.2010.5697212
- [12] Sukchom, K. (2018). **Energy Storage**. Access (20 July 2019). Available (<http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A3996&LanguageCode=th&DocumentPartId=&Action=Launch>)
- [13] Tuffaha, T. and Almuahini, M. (2015). Reliability Assessment of a Microgrid Distribution System with PV and Storage. In **2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)**. pp. 195-199. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315206
- [14] Wang, X. F. (2008). **Load Flow Analysis**. Access (19 January 2019). Available (https://mycourses.ntua.gr/courses/ECE1220/document/Load_Flow_Analysis.pdf)