

การปรับกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันด้วยวิธีเคมีน
สำหรับระบบจำหน่าย 22 เครวี ที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัว
(Tuning of the reactive power voltage control by K-means cluster analysis
for distributed PV inverters on 22 kV Distribution Feeder)

พงศธร เรืองจันทร์¹, สุดติศา ยะเรื่อนงาม², สิริภา จุลกาญจน์³, แนนบุญ หุนเจริญ⁴

^{1,2}กองวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค pongathornruangchan@gmail.com

³สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย siripha.j@chula.ac.th

⁴ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย naebboon.h@chula.ac.th

บทคัดย่อ

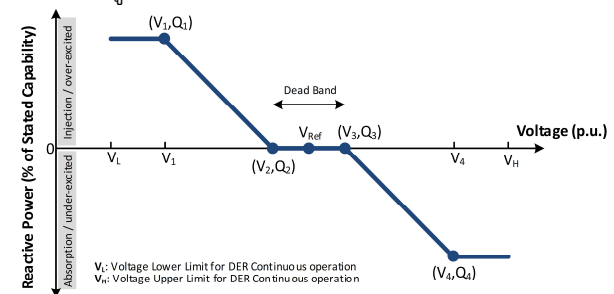
บทความนี้นำเสนอการปรับกราฟคุณลักษณะระหว่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันด้วยวิธีเคมีน เพื่อใช้คุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ เมื่อระบบไฟฟ้ามีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัวถูกติดตั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 103 ราย โดยติดตั้งเป็น 2 เท่าของความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดสูงสุด ซึ่งทำการศึกษาจากระบบไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าอุบลราชธานี 2 วงจรที่ 7 ผลการปรับกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันพบว่ามีการฟิตที่เหมาะสมกับระบบนี้ทั้งหมด 5 เส้น โดยเมื่อนำกราฟคุณลักษณะที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 พบว่าสามารถคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้ สามารถลดปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อวันของระบบได้ถึง 10.96% - 44.57% และ 3.16% - 13.13% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณหน่วยไฟฟ้าสูญเสียได้ถึง 5.59% ต่อวัน

คำสำคัญ: การจำแนกกลุ่มด้วยวิธีเคมีน กราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดัน ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัว

1. บทนำ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย จะส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าวมีปริมาณมากกว่าความต้องการกำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาเรื่องแรงดันเกินที่จุดเชื่อมต่อตาม [1] และ [2] การแก้ปัญหาเกี่ยวกับผลกระทบด้านแรงดันที่จุดเชื่อมต่อด้วยการใช้ความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U) เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยม อีกทั้งยังมีข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid code) ในหลาย ๆ ประเทศ

แสดงตัวอย่างของกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดัน Q(U) ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 Voltage-Reactive power characteristic

วิธีการกำหนดจุดต่าง ๆ บน Q(U) สามารถทำได้ 2 แนวทาง ได้แก่ การกำหนดค่าแรงดัน โดยทั่วไปจะกำหนดตามมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่สภาวะปกติเป็นค่า V_1 และ V_4 แล้วเลือกช่วงของแรงดัน V_2 และ V_3 สำหรับช่วง Deadband ตามความเหมาะสมตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของแต่ละประเทศ [3], [4], และ [5] หรือจะทดลองปรับช่วงของแรงดัน V_2 และ V_3 ตาม [6] สำหรับการนำ Q(U) ไปใช้งานจริงตาม [7] และ [8] สามารถกำหนดกราฟ Q(U) ในลักษณะ 2 ช่วงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ กล่าวคือ กำหนดให้มี Q(U) จำนวน 1 เส้น สำหรับการทำงานแบบจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และกำหนดให้มี Q(U) อีก 1 เส้น สำหรับการทำงานแบบรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ การกำหนดค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟบางงานวิจัยเช่น [3] และ [5] จะกำหนดโดยการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมหรืองานวิจัย [7] และ [8] ใช้วิธีการปรับค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตั้งแต่ 20%-100% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ในหน่วย kVA สำหรับงานวิจัย [4] จะพิจารณาจากการเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์ไว้ที่ 5% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ในหน่วย kVA และงานวิจัย [6] จะกำหนดให้อินเวอร์เตอร์สามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ 35% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ในหน่วย kVA

สำหรับประเทศไทยมีแนวโน้มที่ผู้ใช้ไฟฟ้าจะติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัวใช้งานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม

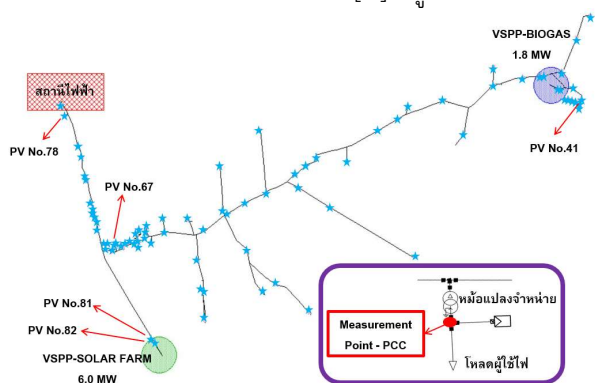
ประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่าย พ.ศ.2559 [9] ได้กำหนดความสามารถในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยวิธี Q(U) สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าที่มีคอนเวอร์เตอร์แต่ยังไม่มีวิธีการกำหนดจุดต่าง ๆ บน Q(U) เนื่องจากความไม่พร้อมของระบบสื่อสารระหว่างศูนย์สั่งการระบบไฟฟ้ากับผู้ผลิตไฟฟ้า ดังนั้น บทความนี้จะนำเสนอการปรับกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันด้วยวิธีเคมึนเพื่อช่วยหากราฟคุณลักษณะระหว่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันในเบื้องต้น กรณีที่ระบบสื่อสารยังไม่พร้อม โดยค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจะถูกคำนวณจากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสม โดย Q(U) ที่นำเสนอจะถูกนำไปจำลองการใช้งานเพื่อเปรียบเทียบกับกราฟคุณลักษณะที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 [10] พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบ

หัวข้อที่ 2 นำเสนอแบบจำลองระบบไฟฟ้า หัวข้อที่ 3 การกำหนดกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดัน หัวข้อที่ 4 การกำหนดขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ หัวข้อที่ 5 ผลการกำหนดกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดัน หัวข้อที่ 6 การเปรียบเทียบการใช้งาน Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1547-2018 กับ Q(U) ที่นำเสนอ ท้ายสุดหัวข้อที่ 7 สรุปผลการศึกษา

2. แบบจำลองระบบไฟฟ้า

2.1 โครงสร้างระบบไฟฟ้าที่ใช้ศึกษา

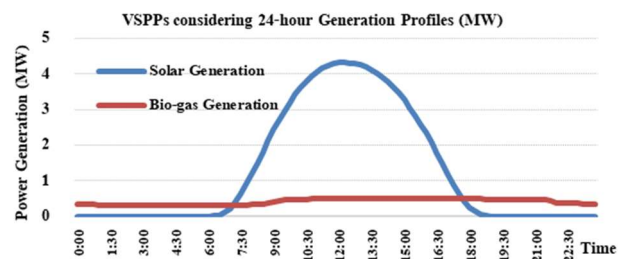
ทำการศึกษาระบบไฟฟ้าจริงของสถานีไฟฟ้าอุบลราชธานี 2 วงจรที่ 7 ซึ่งเป็นระบบไฟฟ้าที่มีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPPs) ได้แก่ โซลาร์ฟาร์มขนาด 6 MW และก๊าซชีวภาพขนาด 1.8 MW เชื่อมโยงอยู่ในระบบ มีผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งสิ้น 103 ราย กระจายตัวในฟีดเดอร์ ความยาวของสายส่งในวงจรหลักประมาณ 25.27 กม. [11] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ

2.2 VSPPs generation profile

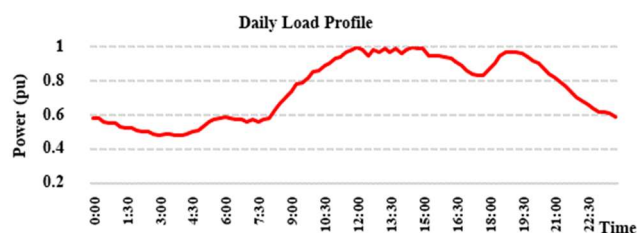
ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้ารายวันของโรงไฟฟ้าชีวภาพที่มีกำลังการผลิตติดตั้ง 1.8 MW และโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีกำลังการผลิตติดตั้ง 6.0 MW ที่เชื่อมอยู่กับระบบทดสอบ โดยแสดงค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่โรงไฟฟ้าแต่ละประเภทผลิตได้ในหน่วย MW จากการเก็บข้อมูลราย 15 นาที เป็นเวลา 1 ปี [11] แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ข้อมูลการผลิตไฟฟ้ารายวันของ VSPPs

2.3 Daily load profile

ข้อมูลการใช้ไฟฟ้ารายวันสุทธิของสายป้อนวงจรที่ 7 เมื่อทำการวัดค่าที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง พบว่ามีปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเป็น 2.92 MW ที่เวลา 14.30 น. แสดงปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้ารายวันสุทธิในหน่วย pu. [11] ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้ารายวันสุทธิของสายป้อนวงจรที่ 7

ระบบไฟฟ้าจริงของสถานีไฟฟ้าอุบลราชธานี 2 วงจรที่ 7 สามารถรองรับปริมาณผู้ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เพียง 80% ของจำนวนผู้ใช้ไฟในระบบ และต้องควบคุมขีดจำกัดของกำลังการผลิตต่อหลักคาของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ที่ 15% ของพิกัดหม้อแปลงจำหน่าย [11] หากมีผู้ใช้ไฟฟ้าติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ทุกจุดโหนด [12] การคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อดัวยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 [10] เป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าการคุมแรงดันด้วยวิธี Fixed-Q และ Fixed-PF เนื่องจากมีปริมาณการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบต่ำกว่า โดยยังสามารถควบคุมแรงดันได้ตามมาตรฐาน อย่างไรก็ตามการควบคุมแรงดันด้วยวิธี Q(U) นั้นต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อช่วยลดผลกระทบด้านแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณกำลังสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้า ดังนั้น การหาปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมในแต่ละจุดติดตั้ง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมจะทำให้ลดปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบได้ และช่วยลดขนาดของอินเวอร์เตอร์สำหรับบางจุดติดตั้งได้อีกด้วย

3. การกำหนดกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดัน

การปรับกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันด้วยวิธีเคมึน สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัว ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ได้แก่

3.1 ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสม

ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยตั้งสมการจุดประสงค์เป็นการหาลำดับกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบต่ำที่สุด [13], [14] และ [15] ดังสมการที่ (1)

$$\text{Min. } P_{\text{Loss}} = \text{Min. } \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N G_{ij} [V_i^2 - 2V_i V_j + V_j^2] \quad (1)$$

สมการเงื่อนไขบังคับ (Equality constraint) เป็นสมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load flow equations) ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$P_{PVi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{PVi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

อสมการเงื่อนไขบังคับ (Inequality constraint) กำหนดขอบเขตโดยพิจารณาขอบเขตแรงดันตามมาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดที่สภาวะปกติ [9] เป็น 0.95 – 1.05 pu. ดังสมการที่ (4) และขอบเขตของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันตามมาตรฐาน IEEE Std. 1547-2018 [10] ดังสมการที่ (5) เท่านั้น การศึกษานี้ต้องการลดผลกระทบของอุปกรณ์ที่ผู้ดูแลโครงข่ายต้องลงทุนติดตั้งในระบบไฟฟ้าเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ รวมทั้งเป็นการศึกษาการนำระบบไฟฟ้ามาเพียง 1 วงจร ดังนั้น จึงไม่พิจารณาขอบเขตการทำงานอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

$$0.95 \text{ pu.} \leq V_i \leq 1.05 \text{ pu.} \quad (4)$$

$$-0.44 \text{ pu.} \leq Q_{PVi} \leq +0.44 \text{ pu.} \quad (5)$$

โดย P_{PVi}, Q_{PVi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ บัสที่ i

P_{Li}, Q_{Li} คือ ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงและความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลด บัสที่ i

V_i, V_j คือ ขอบเขตของแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ i และ j

G_{ij}, B_{ij} คือ ค่าพารามิเตอร์ของสายรวมหม้อแปลงจำหน่าย

δ_{ij} คือ มุมของแรงดันระหว่างบัสที่ i และ j

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่องมือทางสถิติ

จากปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมจะได้ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบต่ำที่สุด จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูล โดยเขียนแผนภาพการกระจาย (Scatter plot) เพื่อดูลักษณะของข้อมูล และใช้เครื่องมือในการจำแนกกลุ่ม (Cluster analysis) ด้วยวิธีเคมีน (K-Means method)

การจำแนกกลุ่มด้วยวิธีเคมีน เป็นการจำแนกข้อมูล (Case) เป็นกลุ่มย่อยตาม [16] และ [17] จะใช้เมื่อมีข้อมูลปริมาณมากซึ่งวิธีนี้จะต้องการกำหนดจำนวนกลุ่มหรือจำนวน Cluster ที่ต้องการโดยกำหนดให้มี k กลุ่ม วิธีเคมีนเป็นการจัดกลุ่มของข้อมูลให้ไปอยู่กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งโดยพิจารณาระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างค่ากลางของกลุ่ม (Centroid) กับข้อมูลนั้นๆ แล้วคำนวณค่ากลางของกลุ่มใหม่ซึ่งจะคำนวณเช่นนี้หลายๆ รอบ (Iteration) จนกระทั่งค่ากลางของกลุ่มไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามวิธีเคมีนจำเป็นต้องกำหนดจำนวนกลุ่มที่แน่นอนไว้ล่วงหน้า ดังนั้น ก่อนใช้

วิธีการดังกล่าวจึงต้องเลือกค่าจำนวนกลุ่มที่เหมาะสม หรือการหาค่า Optimal cluster number (k_{opt}) ก่อน

การหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมสามารถทำได้ด้วยวิธี Elbow [17] โดยคำนวณจากผลรวมกำลังสองของระยะห่างระหว่างข้อมูลกับจุดกึ่งกลาง (Within-cluster sum of squares, WCSS) หรือผลรวมกำลังสองของความผิดพลาด (Sum square error, SSE) ดังสมการที่ (6) จากนั้นจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมหรือการหาค่า Optimal cluster number (k_{opt}) สามารถทำได้โดยการลากเส้นตรงจากจุดเริ่มไปยังปลายเส้นโค้ง จากนั้นหาระยะจากเส้นตรงตั้งฉากกับเส้นโค้งที่มีระยะห่างมากที่สุด

$$WCSS = SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} \|x_j - CP_i\|^2 \quad (6)$$

โดย x_j คือ ข้อมูลที่มีเอกภาพสัมพันธ์ (Universe) เป็น S_i

CP_i คือ จุดกึ่งกลางของกลุ่มที่ i

เมื่อได้จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมแล้วให้หาข้อมูล (V_{pu}^{PV}, Q_{pu}^{PV})

ในแต่ละกลุ่มมาทำการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ตาม [18] เพื่อหาสมการเส้นตรงแทนความสัมพันธ์ระหว่าง (V_{pu}^{PV}, Q_{pu}^{PV})

ในรูปของฟังก์ชัน Q(U) ในแต่ละกลุ่ม การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวสามารถได้จากสมการที่ (7) ถึง (9)

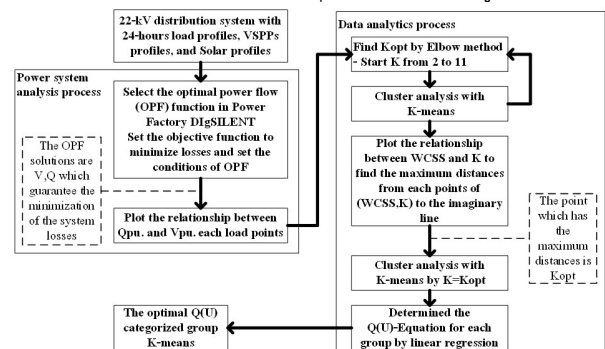
$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (7)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (8)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right) \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \text{ และ } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

การปรับกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันด้วยวิธีเคมีน สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัว สามารถสรุปเป็นขั้นตอนได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้วิธีเคมีนเพื่อกำหนด Q(U)

4. การกำหนดขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

การสร้างแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในโปรแกรม Power Factory DigSILENT 2019 เป็นแบบ Static Generator ซึ่งสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟให้เป็นไปตามคุณลักษณะในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ (Capability curve of the inverter) ได้ โดยกำหนดให้มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ถูกติดตั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 103 ราย กำลังการผลิตติดตั้งรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละจุดติดตั้ง (Install Capacity) เป็น 2 เท่าของความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดสูงสุด ($P_{Load,i}$) ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายต้องการ ดังสมการที่ (10) ซึ่งจะทำให้มีกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เหลือใช้จ่ายเข้าระบบไฟฟ้าและพิจารณาผลของกำลังการผลิตไฟฟ้ารายวันสำหรับแสงอาทิตย์ตามโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในหน่วย pu. ในรูปที่ 3

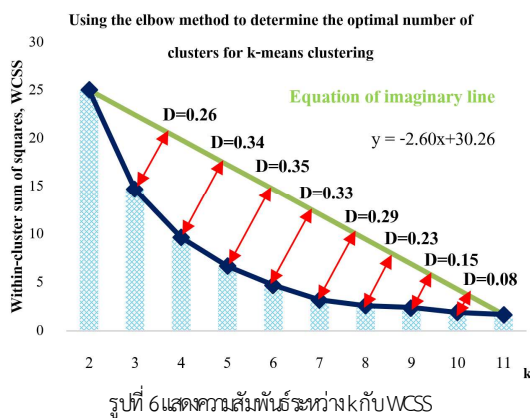
$$\text{Install Cap. (kW)} = 2 \cdot P_{Load,i} \quad (10)$$

การเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์ (Inverter Rating, kVA) เพื่อช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจะขึ้นอยู่กับกำลังการผลิตติดตั้งรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละจุดติดตั้งโดยกำหนดให้ขนาดของอินเวอร์เตอร์ (Inverter Rating, kVA) เป็น 110% เมื่อเทียบกับกำลังการผลิตติดตั้งรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละจุดติดตั้ง ดังสมการที่ (11)

$$\text{Inverter Rating (kVA)} = 1.1 \times \text{Install Cap. (kW)} \quad (11)$$

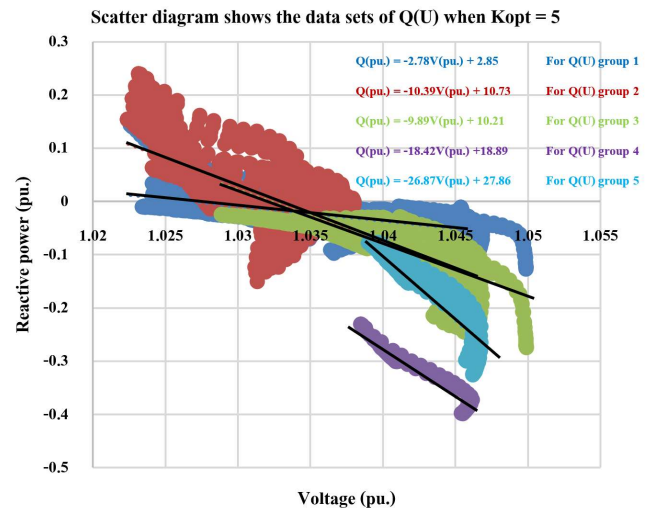
5. ผลการกำหนดกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟกับแรงดัน

เมื่อนำผลลัพธ์จากการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่เหมาะสม มาหาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมด้วยวิธี Elbow โดยเริ่มทำการจำแนกกลุ่มด้วยวิธีเคมีน กำหนดให้ $k=2$ จนถึง $k=11$ เพื่อเขียนความสัมพันธ์ของจำนวนกลุ่ม (k) กับค่าผลรวมกำลังสองของระยะห่างระหว่างข้อมูลกับจุดกึ่งกลาง (WCSS) ได้ผลดังรูปที่ 6



จากรูปที่ 6 พบว่าเมื่อหาระยะจากจุดบนเส้นโค้งตั้งฉากกับเส้นตรง $y = -2.60x + 30.26$ จะได้ระยะห่างมากที่สุดเป็น 0.35 ซึ่งตรงกับ k เท่ากับ 5 ดังนั้น k_{opt} ที่เหมาะสมสำหรับการจำแนกกลุ่มด้วยวิธีเคมีน คือ 5 กลุ่ม เมื่อนำผลของการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้า

รีแอคทีฟที่เหมาะสมมาจำแนกกลุ่มด้วยวิธีเคมีน โดยกำหนด k เท่ากับ 5 สามารถเขียนแผนภาพการกระจายของแต่ละกลุ่ม พร้อมหาสมการเส้นตรงแทนความสัมพันธ์ระหว่าง (V_{pu}^{PV} , Q_{pu}^{PV}) ในรูปของฟังก์ชัน $Q(U)$ ในแต่ละกลุ่มได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพการกระจายของ $Q(U)$ เมื่อ k_{opt} เป็น 5

การหาจุดแรงดันบนกราฟคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟกับแรงดันพิจารณาจากค่าของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟบนแผนภาพการกระจายของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟกับแรงดัน จะสามารถแบ่ง $Q(U)$ ได้เป็น 2 ลักษณะดังต่อไปนี้

$Q(U)$ ไม่มีช่วง Deadband ได้แก่ กลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมีค่าทั้งบวกและลบ หมายความว่า อินเวอร์เตอร์จะมีการรับและการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ทำให้จุดตัดบนแกนแรงดัน (Vintercept) เป็นค่าของจุดแรงดัน V_2 และ V_3 บน $Q(U)$ นั้นเอง สำหรับหาจุดแรงดัน V_1 และ V_4 บน $Q(U)$ สามารถหาได้โดยนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมาจัดรูปให้อยู่ในรูปของ $V(Q)$ โดยทำการหาค่าสูงที่สุดของค่าสัมบูรณ์ของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในกลุ่มเพื่อนำไปแทนสมการเส้นตรงเพื่อหาจุดแรงดัน V_1 และ V_4 บน $Q(U)$ ต่อไปตามสมการที่ (12) และ (13)

$$V_1 = V(Q) \Big|_{Q=\max[abs(Q_{pu.,\max}, Q_{pu.,\min})]} \quad (12)$$

$$V_4 = V(Q) \Big|_{Q=-\max[abs(Q_{pu.,\max}, Q_{pu.,\min})]} \quad (13)$$

$Q(U)$ มีช่วง Deadband ได้แก่ กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่ 4 และกลุ่มที่ 5 ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมีเฉพาะค่าลบเท่านั้น ซึ่งหมายความว่า อินเวอร์เตอร์จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเท่านั้นเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ ทำให้จุดตัดบนแกนแรงดัน (Vintercept) จะเป็นค่าของจุดแรงดัน V_3 บน $Q(U)$ นั้นเอง สำหรับจุดแรงดัน V_4 หาได้โดยการนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมาจัดรูปให้อยู่ในรูปของ $V(Q)$ หลังจากนั้นทำการหาค่าต่ำที่สุดของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในกลุ่มเพื่อนำไปแทนสมการเส้นตรงเพื่อหาจุดแรงดัน V_4 บน $Q(U)$ ตามสมการที่ (14)

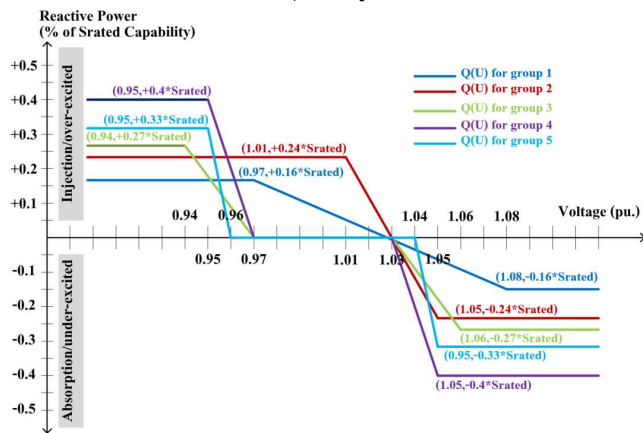
$$V_4 = V(Q)|_{Q=Q_{pu.,min}} \quad (14)$$

สำหรับช่วงที่อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟเพื่อช่วยรักษา ระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อเนื่องจากเกิดปัญหาแรงดันตก เหตุการณ์นี้ จะไม่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงาน แสงอาทิตย์แบบกระจายตัวในทุกจุดโหลด ดังนั้นการกำหนดกราฟ คุณสมบัติกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟกับแรงดัน $Q(U)$ สำหรับช่วงที่ อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟจะอาศัยความสมมาตรของกราฟ โดยใช้ความสัมพันธ์ของจุดแรงดันต่าง ๆ บน $Q(U)$ ตามสมการที่ (15) และสมการที่ (16)

$$V_1 = 2 - V_4 \quad (15)$$

$$V_2 = (V_4 - V_3) + V_1 \quad (16)$$

จากการวิเคราะห์ผลการกำหนดกราฟคุณสมบัติกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟกับแรงดันโดยการประยุกต์ใช้วิธีเคมึนเพื่อจำแนกกลุ่มของค่า $(V_{pu}^{PV}, Q_{pu}^{PV})$ สามารถกำหนดกราฟคุณสมบัติกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟกับแรงดันทั้ง 5 เส้น จำแนกตามกลุ่มได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 $Q(U)$ สำหรับ 5 กลุ่มเมื่อ k_{qp} เป็น 5

ผลของการเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์เพื่อช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของ $Q(U)$ ที่นำเสนอพบว่า ผู้ผลิตไฟฟ้าในระบบไม่จำเป็นต้องควบคุมแรงดันที่ $PF=0.90$ ตลอดเวลา แต่จะขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟในแต่ละกลุ่ม ซึ่งจะส่งผลต่อการกำหนดขีดความสามารถในการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟที่ผู้ผลิตไฟฟ้าทำให้ผู้ผลิตไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์เกินความจำเป็นเพื่อคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ สามารถแสดงผลของการเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์ได้ตารางที่ 1

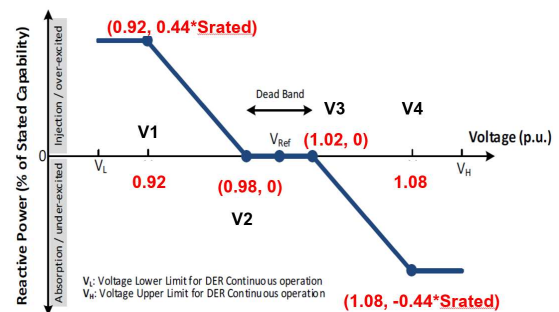
ตารางที่ 1 การเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์เพื่อช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟของ $Q(U)$ ที่นำเสนอ

Group No.	Qlimit	PF	%Oversizing of inverter	Oversized factor
1	0.16	0.987	1.3%	1.013
2	0.24	0.971	2.9%	1.029
3	0.27	0.963	3.7%	1.037
4	0.40	0.917	8.3%	1.083
5	0.33	0.944	5.6%	1.056

6. การเปรียบเทียบการใช้งาน $Q(U)$ ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 กับ $Q(U)$ ที่นำเสนอ

การเปรียบเทียบการใช้งาน $Q(U)$ ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 กับ $Q(U)$ ที่นำเสนอ จะแสดงให้เห็นว่าการกำหนดกราฟคุณสมบัติกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟกับแรงดัน $Q(U)$ ให้กับระบบไฟฟ้ายังกำหนดให้เหมาะสมกับความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟที่เกิดขึ้นในระบบในแต่ละกลุ่ม จะมีผลดีในแง่ของการคุมแรงดัน ปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟและปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบมากกว่าการกำหนด $Q(U)$ เพียงเส้นเดียวให้กับผู้ผลิตไฟฟ้า

เมื่อนำ $Q(U)$ ที่นำเสนอมาทดสอบกับระบบไฟฟ้าจริงของสถานีไฟฟ้าอุบลราชธานี 2 วงจรที่ 7 โดยกำหนดให้มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ถูกติดตั้งที่ผู้ใช้ไฟทั้งหมด 103 ราย กำลังการผลิตติดตั้งรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละจุดติดตั้งเป็น 2 เท่าของความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดสูงสุด เปรียบเทียบกับการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อด้วยวิธี $Q(U)$ ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 เมื่อ Nominal Voltage เป็น 1 pu. จะได้กราฟคุณสมบัติกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟกับแรงดัน $Q(U)$ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 $Q(U)$ ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018

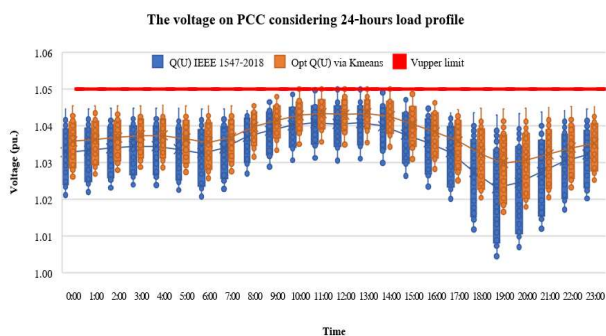
การเปรียบเทียบการใช้งาน $Q(U)$ ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 กับ $Q(U)$ ที่นำเสนอ สามารถเปรียบเทียบผลการใช้งานได้ดังต่อไปนี้

6.1 การคุมระดับแรงดัน

ผลการเปรียบเทียบพบว่าทั้งการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี $Q(U)$ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1547-2018 และวิธี $Q(U)$ ที่นำเสนอ สามารถคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์ 0.95 – 1.05 pu. ที่กำหนดได้ โดยที่ระบบทดสอบสามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทุกจุด โหลดแสดงผลของการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อรายชั่วโมงสำหรับหนึ่งวัน ได้ดังรูปที่ 10

6.2 ปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟ

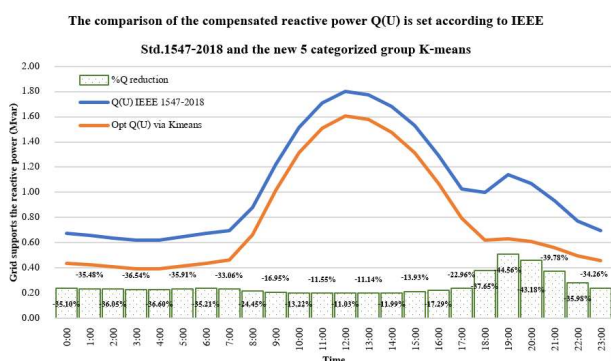
ผลการเปรียบเทียบพบว่าทั้งการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี $Q(U)$ ที่นำเสนอ นั้น มีความต้องการปริมาณกำลังไฟฟ้รีแอคทีฟในแต่ละอินเวอร์เตอร์ต่ำกว่าการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี $Q(U)$ ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 ประมาณ 10.96%-44.57% ต่อวัน ทั้งนี้ เนื่องจาก



รูปที่ 10 เปรียบเทียบแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ เมื่อคุมแรงดัน

ด้วยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 และวิธี Q(U) ที่นำเสนอ

การคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสม ทำให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแต่ละอินเวอร์เตอร์ที่ต่ำกว่ากรณีที่คุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อด้วยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 ซึ่งไม่ได้พิจารณาการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสม แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรายชั่วโมงสำหรับหนึ่งวันดังรูปที่ 11

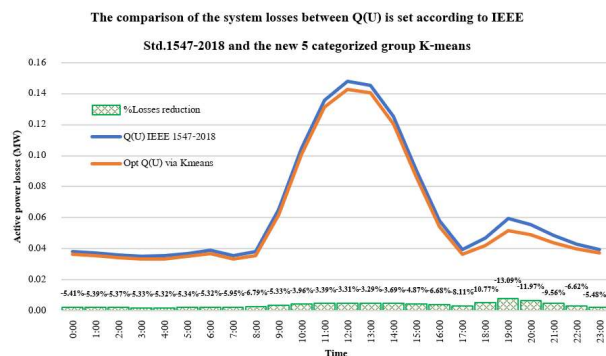


รูปที่ 11 เปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวมของระบบเมื่อคุมแรงดัน

ด้วยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 และวิธี Q(U) ที่นำเสนอ

6.3 ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบ

ผลการเปรียบเทียบพบว่า การคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U) ที่นำเสนอ นั้น ส่งผลทำให้ปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบลดลงต่ำกว่าการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 ประมาณ 3.16% - 13.13% ต่อวัน ทั้งนี้ เนื่องมาจากการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสมนั้นมีสมการจุดประสงค์กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบต่ำที่สุด โดยที่ในกรณีที่คุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อด้วยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 ไม่ได้พิจารณาการคำนวณปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เหมาะสม หากพิจารณาปริมาณหน่วยไฟฟ้าสูญเสีย (MWh) รวมของระบบในหนึ่งวัน พบว่าการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U) ที่นำเสนอ สามารถลดปริมาณหน่วยไฟฟ้าสูญเสีย (MWh) ได้ถึง 5.59% ต่อวัน แสดงการเปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบรายชั่วโมงสำหรับหนึ่งวันดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 เปรียบเทียบปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบเมื่อคุมแรงดัน

ด้วยวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 และวิธี Q(U) ที่นำเสนอ

7. สรุปผลการศึกษา

การปรับปรูปคุณลักษณะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับแรงดันด้วยวิธีเคมีน สำหรับระบบจำหน่าย 22 KV ที่มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัวกับระบบไฟฟ้าจริงของสถานีไฟฟ้าอุบลราชธานี 2 วงจรที่ 7 ซึ่งมีผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPPs) ได้แก่ โซลาร์ฟาร์มขนาด 6 MW และก๊าซชีวภาพขนาด 1.8 MW เชื่อมโยงอยู่ในระบบ โดยกำหนดให้มีระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ถูกติดตั้งกับให้ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้ง 103 ราย โดยติดตั้งเป็น 2 เท่าของความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงของโหลดสูงสุด สามารถจำแนก Q(U) เพื่อใช้คุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อได้ทั้งหมด 5 เส้น เมื่อนำ Q(U) ที่นำเสนอไปใช้งานเปรียบเทียบกับวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 ผลการเปรียบเทียบพบว่าทั้ง 2 วิธี สามารถคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้อยู่ในเกณฑ์ 0.95 - 1.05 pu. ได้ทุกจุดโหลดและระบบไฟฟ้าไม่มีปัญหาแรงดันเกินเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายตัวมีกำลังไฟฟ้าส่วนเกินไหลเข้ามาในระบบ ในแง่ของปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบพบว่าวิธี Q(U) ที่นำเสนอ สามารถลดปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและปริมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่อวันของระบบได้ถึง 10.96% - 44.57% และ 3.16% - 13.13% ตามลำดับเมื่อเทียบกับวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 หากพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบในรูปของหน่วยไฟฟ้าสูญเสีย (MWh) พบว่าวิธี Q(U) ที่นำเสนอ สามารถลดปริมาณหน่วยไฟฟ้าสูญเสียได้ถึง 5.59% ต่อวัน ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายของผู้ดูแลระบบไฟฟ้า อีกทั้งผู้ดูแลระบบไฟฟ้ายังสามารถอนุญาตให้มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทุกจุดโหลดโดยไม่ต้องลงทุนปรับปรุงระบบจำหน่าย

การเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์เพื่อช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ พบว่าการคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อสำหรับอินเวอร์เตอร์ด้วยวิธี Q(U) ที่นำเสนออินเวอร์เตอร์ควรเพิ่มขนาดตั้งแต่ 1.3% - 8.39% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ในหน่วย kVA ซึ่งน้อยกว่าวิธี Q(U) ตามมาตรฐาน IEEE Std.1547-2018 ที่ต้องพิจารณาการเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์เป็น 10% ของพิกัดอินเวอร์เตอร์ในหน่วย kVA

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Norbert, G. Kerber, R. Witzmann, M. Sebeck and R. Keck, Increasing Grid Transmission Capacity and Power Quality by New Solar Inverter Concept and Inbuilt Data Communication, 2009.
- [2] L. HÜLSMANN, "Evaluation of two distribution grids in terms of PV penetration limits and effectiveness of reactive power controls," in *Master degree Thesis, KTH - Royal Institute of Technology*, 2016, pp. 10-11.
- [3] V. A. Muresan, "Control of Grid Connected PV Systems with Grid Support Functions," in *Master Thesis, Department of Energy Technology - Pontoppidanstraede 101, Aalborg University, Denmark*, 15/09/2011 – 31/08/2012, pp. 36-38.
- [4] F. Zhang, X. Guo, X. Chang, G. Fan, L. Chen, Q. Wang, Y. Tang and J. Dai, "The reactive power voltage control strategy of PV systems in Low-voltage string lines," in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 18-22 June 2017.
- [5] M. Jafari, T. O. Olowu and A. I. Sarwat, "Optimal Smart Inverters Volt-Var Curve Selection with a Multi-Objective Volt-Var Optimization using Evolutionary Algorithm Approach," in *2018 North American Power Symposium (NAPS)*, Fargo, ND, USA, 9-11 Sept. 2018.
- [6] M. U. Qureshi, S. Grijalva and M. J. Reno, "A Fast Quasi-Static Time Series Simulation Method for PV Smart Inverters with VAR Control using Linear Sensitivity Model," in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa Village, HI, USA, 10-15 June 2018.
- [7] A. M. Howlader, S. Sadoyama, L. R. Roose and S. Sepasi, "Distributed Voltage Control Method Using Volt-Var Control Curve of Photovoltaic inverter for a Smart Power Grid System," in *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Honolulu, USA, 12 – 15 December 2017.
- [8] A. M. Howlader, S. Sadoyama, L. R. Roose and S. Sepasi, "Distributed voltage regulation using Volt-Var controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study," *Renew. Energy* 127 (2018) an international journal, pp. 145-157, 2018.
- [9] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่าย พ.ศ.2559, กรุงเทพฯ: การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2559.
- [10] IEEE Standard 1547-2018, IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces, New York, USA: IEEE, Approved 15 Feb 2018.
- [11] P. Ruangchan, S. Satarworn and N. Hoonchareon, "The study of impact of solar rooftop in PEA's medium voltage distribution feeder," in *The 41st electrical engineering conference (EECON-41)*, Ubonratchathani, Thailand, 21-23 Nov 2018.
- [12] P. Ruangchan, S. Satarworn and P. Mahasuweerachai, "The study of voltage regulation by reactive power compensation with distributed PV inverters on 22-kV distribution feeder," in *PEACON&INNOVATION 2019*, Bangkok, Thailand, 2019, 23-24 Sep. 2019.
- [13] N. M. Tabatabaei, A. J. Aghbolaghi, N. Bizon and F. Blaabjerg, "Reactive Power Optimization in AC Power Systems," in *Reactive Power Control in AC Power Systems Fundamentals and Current Issues*, Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland, Springer International Publishing, 2017, pp. 345-409.
- [14] C. M. KUPPAMUTHU SIVALINGAM, S. RAMACHANDRAN and P. S. S. RAJAMANI, "Reactive power optimization in a power system network through metaheuristic algorithms," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, no. 25, pp. 4615-4623, 2017.
- [15] Y. d. Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J. C. Hernandez and R. G. Harley, "Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, vol. 2, no. 12, pp. 171-195, APRIL 2008.
- [16] Z. S. Y. Saffawi, D. Mohamad, T. Saba, M. H. Alkawaz, A. Rehman, M. Al-Rodhaan and A. Al-Dhelaan, "Content-based image retrieval using PSO and k-means clustering algorithm," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 8, no. 8, pp. 6211-6224, August 2014.
- [17] T. Kansal, S. Bahuguna, V. Singh and T. Choudhury, "Customer Segmentation using K-means Clustering," in *2018 International Conference on Computational Techniques, Electronics and Mechanical Systems (CTEMS)*, Belgaum, India, 21-22 Dec. 2018.
- [18] D. C. Montgomery and G. C. Runger, "Simple Linear Regression and Correlation," in *Applied Statistics and Probability for Engineers*, USA, John Wiley & Sons, 2014, pp. 427-435.