

การจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมในระบบจำหน่ายปฐมภูมิโดยใช้รูปแบบโหลด Optimal Capacitor Placement in Primary Distribution System Using Load Profile Consideration

ณัฐพล ชูสกุล พงษ์ศักดิ์ ทามแก้ว กฤติเดช บัวใหญ่ และกานต์ เกิดชื่น*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

Nataphon Choosakun, Pongsak Tamkeaw, Krittidet Buayai and Kaan Kerdchuen*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture
Rajamangala University of Technology Isan

744 Suranarai Road, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand, 30000

*ผู้รับผิดชอบบทความ: kaan.kerdchuen@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 081-7003242

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมในระบบจำหน่ายปฐมภูมิ โดยพิจารณาจากรูปแบบโหลด ในการพิจารณาจะใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดหลายวัตถุประสงค์ที่เรียกว่าวิธีการเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) ในฟังก์ชันเป้าหมายเดียวประกอบด้วยสองวัตถุประสงค์ คือพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบ และการเบี่ยงเบนของแรงดันของโหลดบัส โหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในบทความนี้จะพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ คือ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม และโหลดแบบที่พักอาศัย โดยทำการทดลองในระบบ 33 บัสแบบเรเดียล ที่พิจารณาโหลดแบบสูงสุด โหลดรายวันเฉลี่ย โหลดรายวันที่แบ่งเป็นสามช่วง และโหลดรายวัน ผลการทดสอบพบว่าวิธีการพิจารณาแบบโหลดรายวันเฉลี่ยสามารถหาค่าตัวเก็บประจุที่ประนีประนอมระหว่างพลังงานไฟฟ้าสูญเสียกับคุณภาพแรงดันไฟฟ้าได้ดีที่สุด

คำสำคัญ การจัดวางตัวเก็บประจุ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าปฐมภูมิ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมหลายวัตถุประสงค์

Abstract

This paper proposes the optimal capacitor placement in primary distribution power systems using multi-objective optimization called Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II. The energy loss and average voltage deviation are included in the objective function. The load of distribution power systems are considered in three different settings: department store, factory and residential area, all installed in a 33-bus test system. These three load profiles are considered at peak load, average load, daily load divided in three durations, and real daily load. The results show that the compromise between system energy loss and voltage profile can be reached in average load.

Keywords: capacitor placement, primary distribution power systems, multi-objective optimization

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระบบไฟฟ้ามีพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายมีเพิ่มมากขึ้นและทำให้คุณภาพของแรงดันไฟฟ้าลดลง ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ถูกติดตั้งเพื่อทำให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีคุณภาพระดับแรงดันดีขึ้น แต่เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลต่อพลังงานสูญเสียในระบบระบบไฟฟ้าและโหลดของการใช้พลังงานไฟฟ้ายังมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตามการใช้งาน

ดังนั้นการพิจารณาเกี่ยวกับการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมควรจะพิจารณาทั้งแรงดันไฟฟ้า และพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยคำนึงถึงโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงไปพร้อมๆกัน

ในหลายบทความ มีการศึกษาเกี่ยวกับการจัดวางตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ใน [1] มีการใช้วิธีการฝูงผึ้งเพื่อกำหนดตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย โดยจะเป็นการพิจารณาที่โหลดคงที่ ใน [2] นำ RCGA



มาใช้ในการหาขนาดตัวเก็บประจุที่โดยพิจารณาโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา ทำให้ตัวเก็บประจุมีความเหมาะสมมากกว่าที่เป็นแบบโหลดคงที่ ใน [3] ได้นำโหลดโพรไฟล์มาใช้ในการพิจารณาการหาขนาดและตำแหน่งของตัวเก็บประจุ โดยใช้วิธีการวนซ้ำ อย่างไรก็ตามใน[1-3]เป็นการพิจารณาหาขนาดและตำแหน่งของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมเป็นลักษณะของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว ใน [4] ได้นำเสนอวิธีการโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมวัตถุประสงค์หลายอย่าง NSGA-II ในการหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุ แต่โหลดที่ใช้ในการพิจารณาใช้เพียงแคeloadสูงสุดเพียงอย่างเดียว ใน [5] ได้นำวิธีการหาค่าที่เหมาะสมหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาใช้ในการหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยจะพิจารณาทั้งแรงดันไฟฟ้าและพลังงานสูญเสียในระบบจำหน่าย แต่จะมีเฉพาะการพิจารณาโหลดที่รายวันที่แบ่งเป็นสามช่วง โดยในวิธี NSGA-II นี้ได้มีการนำเสนอครั้งแรกใน [6] ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการแก้ปัญหาได้อย่างดี

บทความนี้จะนำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งและหาขนาดของตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยนำโหลดหลายรูปแบบมาพิจารณา โหลดแต่ละรูปแบบจะพิจารณาในลักษณะโหลดที่แตกต่างกันคือ โหลดสูง โหลดรายวันเฉลี่ย โหลดตามช่วงเวลา และโหลดรายวัน โดยนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งตัวเก็บประจุที่จะถูกนำมาติดตั้งเป็นแบบคงที่และแบบสวิทช์ โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมวัตถุประสงค์หลายอย่างที่พิจารณาทั้งพลังงานสูญเสียและคุณภาพแรงดันไปพร้อมๆ กัน

2. กำหนดปัญหาและฟังก์ชันเป้าหมาย

2.1 กำหนดปัญหา

ในบทความนี้จะนำเสนอการจัดวางตัวเก็บประจุที่เหมาะสมสำหรับระบบจำหน่าย โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ การติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว และ 2 ตัว โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบ 1 ตัวจะพิจารณาทั้งหมด 6 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาโหลดสูงสุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 2 พิจารณาโหลดรายวันเฉลี่ย โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 3 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 4 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบสวิทช์

กรณีที่ 5 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบคงที่

กรณีที่ 6 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวแบบสวิทช์

ในส่วนของ การติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัวจะพิจารณาทั้งหมด 6 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาโหลดสูงสุด โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 เป็นแบบคงที่ทั้ง 2 ตัว

กรณีที่ 2 พิจารณาโหลดรายวันเฉลี่ย โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 เป็นแบบคงที่ทั้ง 2 ตัว

กรณีที่ 3 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 เป็นแบบคงที่ทั้ง 2 ตัว

กรณีที่ 4 พิจารณาโหลดที่แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 แบบคงที่ และตัวที่ 2 แบบสวิทช์

กรณีที่ 5 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 และ 2 แบบคงที่

กรณีที่ 6 พิจารณาโหลดรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 แบบคงที่ ตัวที่ 2 แบบสวิทช์

โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว และ 2 ตัว จะมีเงื่อนไขในการกำหนดขนาดของตัวเก็บประจุโดยขนาดของตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดให้มี 4 ขนาด คือ 0.3 0.6 0.9 1.2 เมกะวาร์ โดยอ้างอิงจากขนาดตัวเก็บประจุของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ปัญหาการติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังสมการที่ (1)

$$F(x,u) = [f_1(x,u), f_2(x,u)] \quad (1)$$

เมื่อ $F(x,u)$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย x คือ สถานะของระบบจำหน่าย เช่น โหลดของระบบไฟฟ้า u คือ ตัวแปรแทนตำแหน่งติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ F_1 คือ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบ F_2 คือ แรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสเฉลี่ย

2.2 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)

สำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิมีฟังก์ชันเป้าหมาย คือ 1.) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุด และ 2.) แรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสน้อยที่สุด

2.2.1.) พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุด (Minimize the system energy loss: E_{loss})

$$\text{Min } f_1(x,u) = 24P_L \quad (2)$$

$$\text{Min } f_1(x,u) = \sum_{h=1}^H \sum_{b=1}^B \Delta P_h^{(b)}(x,u) \Delta t_h \quad (3)$$

เมื่อ P_L คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในระบบจำหน่าย (กิโลวัตต์) $\Delta P_h^{(b)}$ คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในแต่ละสาขา $b = 1, \dots, B$ ที่ช่วงเวลา $h = 1, \dots, H$

2.2.2.) แรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสน้อยที่สุด (Minimize the average load voltage deviation:LVD)

$$\text{Min } f_2(x, u) = \sum_{i=2}^N \left(\frac{V^{(ref)} - V^{(i)}}{V^{(ref)}} \right) \quad (4)$$

$$\text{Min } f_2(x, u) = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \sum_{i=2}^N \left(\frac{V^{(ref)} - V_h^{(i)}(x, u)}{V^{(ref)}} \right) \quad (5)$$

เมื่อ $V^{(ref)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง(ปกติเป็น 1 pu.) $V^{(i)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส $i = 2, \dots, N$ (ยกเว้นบัสอ้างอิง) $V_h^{(i)}$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส $i = 2, \dots, N$ (ยกเว้นบัสอ้างอิง) ที่ช่วงเวลา $h = 1, \dots, H$

สำหรับการหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบน้อยที่สุดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวในกรณี 1 และ 2 หาได้ในสมการที่ (2) และในกรณี 3-6 หาได้ในสมการที่ (3) ส่วนในการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว จะหาค่าที่ดีที่สุดในการกรณี 1 และ 2 ได้จากสมการที่ (2) และกรณี 3-6 หาได้จากสมการที่(3) และการหาแรงดันเบี่ยงเบนเฉลี่ยของโหลดบัสน้อยที่สุดสำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัวในกรณี 1 และ 2 แสดงในสมการที่(4)และในกรณี 3-6 ดังแสดงในสมการที่(5) ในการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว ในกรณี 1 และ 2 หาได้จากสมการ(4) และในกรณี 3-6 หาได้จากสมการที่(5)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทความวิจัยนี้จะเป็นการหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพิจารณาหาค่าเหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ เมื่อพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ จะมีวิธีการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

3.1. การนำเข้าโหลด

ในบทความนี้จะนำโหลดมาพิจารณา 3 รูปแบบ คือ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า[7] โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม[7] และโหลดแบบที่พักอาศัย โดยโหลดที่ที่พักอาศัยนำข้อมูลมาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สถานี NRC02VB-01 นครราชสีมา 03 ฟีดเดอร์ 02 ซับ 01 [8] โหลดทั้ง 3 รูปแบบจะทำการหาโหลดสูงสุด โหลดรายวันเฉลี่ย และโหลดตามช่วงเวลาซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา คือ โหลดสูงสุด โหลดปานกลาง และโหลดต่ำสุด และโหลดรายวัน

โหลดแบบห้างสรรพสินค้า ได้จากการจำลอง[7] โดยจะกำหนดค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่า 0.85 โดยโหลดรายวัน ดังรูปที่ 1 จะมีโหลดสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลา 16:00 น. มีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.987 และ 0.612 pu. โหลดรายวันเฉลี่ยมี กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.565 และ 0.350 pu. โหลดตามช่วงเวลา 3 ช่วงเวลา โหลดสูงสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.955 และ 0.592 pu. และมีเวลา 10 ชั่วโมง โหลดปานกลางมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.615 และ 0.381 pu. และมีเวลา 4 ชั่วโมง โหลดต่ำสุดมีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.156 และ 0.096 pu. และมีเวลา 10 ชั่วโมง



รูปที่ 1 โหลดแบบห้างสรรพสินค้า

โหลดแบบอุตสาหกรรม ได้จากการจำลอง[8] จะถูกกำหนดค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่า 0.85 โดยโหลดรายวัน ดังรูปที่ 2 โหลดสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลา 00:00 น. มีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.987 และ 0.612 pu. โหลดรายวันเฉลี่ยมี กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.767 และ 0.475pu. โหลดตามช่วงเวลา 3 ช่วงเวลา โหลดสูงสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.942 และ 0.583 pu. และมีเวลา 9 ชั่วโมง โหลดปานกลางมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.766 และ 0.475 pu. และมีเวลา 6 ชั่วโมง โหลดต่ำสุดมีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ คือ 0.592 และ 0.367 pu. และมีเวลา 9 ชั่วโมง



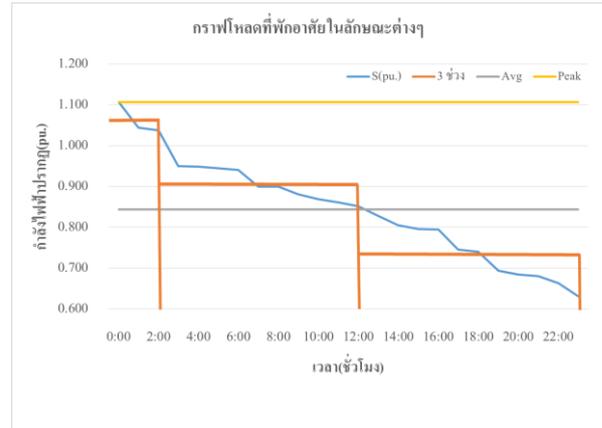
รูปที่ 2 โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

โหลดที่พิกอ้าย [8] เนื่องจากเป็นโหลดที่ได้จากการใช้งานจริง ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไม่เท่ากัน เพื่อจัดทำกราฟช่วงเวลาโหลด จะนำกำลังไฟฟ้าจริง และ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ [8] มาหาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ จากสมการที่ (6) และจะแสดงกราฟช่วงเวลาโหลดในรูปที่ 3

$$S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 \quad (6)$$

เมื่อ S_i คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ช่วงเวลา i (pu) P_i คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่ช่วงเวลา i (pu.) และ Q_i คือ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ช่วงเวลา i (pu.)

โหลดแบบที่พิกอ้าย [8] โหลดสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลา 20:00 น. มีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ คือ 0.952 และ 0.656 pu. ตามลำดับ โหลดรายวันเฉลี่ยมีกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ คือ 0.770 และ 0.346 pu. ตามลำดับ โหลดตามช่วงเวลา 3 ช่วงเวลา โหลดสูงสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ คือ 0.925 0.523 pu. ตามลำดับ และมีเวลา 3 ชั่วโมง โหลดปานกลางมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ คือ 0.823 0.373 pu. ตามลำดับ และมีเวลา 10 ชั่วโมง โหลดต่ำสุดมีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ คือ 0.679 0.275 pu. ตามลำดับ และมีเวลา 11 ชั่วโมง



รูปที่ 3 กราฟช่วงเวลาโหลดของสถานี NRC02VB-01 นครราชสีมา

3.2 กำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย

ในการหาตำแหน่งติดตั้งและขนาดที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุขึ้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.2

3.3 รั้นโหลดโพล์

ในบทความนี้จะนำเข้าข้อมูลโหลดแบบห้างสรรพสินค้า โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม และโหลดแบบที่พิกอ้าย จะนำเข้าโหลดแต่ละรูปแบบเป็นค่าต่อหน่วย (Per Unit) แล้วนำมาคูณกับค่าโหลดดีมานต์ของระบบจำหน่าย 33 บัสแบบเรเดียล [9] มี Base kV = 12.66 kV และ Base MVA = 10 MVA กำลังไฟฟ้รวมของโหลดคือ 3.72 MW และ 2.3 MVar ตามลำดับ โดยมีบัสที่ 1 เป็นบัสอ้างอิง มีโหลดบัสตั้งแต่บัสที่ 2-33

3.4 การหาตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุด้วยวิธีการ NSGA-II

การแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์เป็นการค้นหาเซตคำตอบภายในพื้นที่ของคำตอบที่เป็นไปได้ เพื่อต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุด หรือค่าสูงสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในแต่ละฟังก์ชันพร้อมๆ

ในงานวิจัยนี้จะใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรมแบบการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ NSGA-II ในการหาค่าเหมาะสมที่สุด รายงานการใช้ครั้งแรกโดย [6] แสดงให้เห็นว่าเป็นอัลกอริทึมที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแก้ปัญหาฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ อัลกอริทึมนี้โดดเด่นด้วยวิธีการจัดการลำดับที่ไม่ถูกครอบงำได้อย่างรวดเร็ว ส่วนขั้นตอนและรายละเอียดการประยุกต์ใช้ NSGA-II ในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อจัดวางตัวเก็บประจุนี้เป็นดังใน [4]

3.5 การเลือกคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการฟัซซี่ [4]

ในบทความนี้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเชิงเส้นอย่างง่ายได้รับการพิจารณาสำหรับแต่ละฟังก์ชันเป้าหมาย ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมีดังสมการที่(7)

$$\mu_{f_i}(z) = \begin{cases} 1 & f_i(z) \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i(z)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} < f_i(z) < f_i^{\max} \\ 0 & f_i(z) \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

ฟังก์ชันสมาชิก $\mu_{f_i}(z)$ จะมีค่า 0 ถึง 1 เมื่อ $\mu_{f_i}(z) = 0$ หมายถึงความไม่เข้ากันของชุดคำตอบ ขณะที่ $\mu_{f_i}(z) = 1$ หมายถึง ความเข้ากันได้แบบเต็มรูปแบบ

คำตอบที่ประนีประนอมสามารถหาได้โดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบสุ่ม สำหรับแต่ละคำตอบที่ไม่ถูกครอบงำ k ฟังก์ชันสมาชิกแบบสุ่ม หาได้จากสมการที่ (8)

$$\mu^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N_{obj}} \mu_i^k} \quad (8)$$

เมื่อ M คือ จำนวนของลำดับที่ไม่ถูกครอบงำ N_{obj} คือ จำนวนฟังก์ชันเป้าหมาย

ฟังก์ชัน $\mu_{f_i}(z)$ ถือเป็นฟังก์ชันสมาชิกคำตอบไม่ถูกครอบงำในฟัซซี่เซต จุดที่มีสมาชิกคำตอบมากที่สุดในฟัซซี่เซตคือ คำตอบประนีประนอมที่ดีที่สุด

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

ผลการติดตั้งตัวเก็บประจุจะถูกนำเสนอ ในโหลดทั้ง 3 รูปแบบ โดยโหลดแต่ละรูปแบบจะทำการติดตั้งตัวเก็บประจุทั้งแบบ 1 และ 2 ตัว โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบผลของการติดตั้งตัวเก็บประจุทั้ง 6 กรณี ดังที่กล่าวมาในขั้นตอนที่ 2.1 แล้วหากกรณีที่ดีที่สุด ที่ลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบและแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนเฉลี่ยน้อยที่สุด

4.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับโหลดแบบห้างสรรพสินค้า

โดยในกรณีฐาน (Base Case) คือกรณีที่ไม่มีกรติดตั้งตัวเก็บประจุ จะมีพลังงานสูญเสียในระบบเป็น 1.1784 เมกะวัตต์ชั่วโมง และค่าความเบี่ยงเบนของแรงดัน LVD เฉลี่ยเป็น 0.0403 pu.

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว สำหรับโหลดแบบห้างสรรพสินค้า

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง	ขนาดตัว เก็บประจุ (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน				1.1784	0.0403
1	F1&F2	10	1.2	3.7124	0.0424
2	F1&F2	7	1.2	1.1597	0.0107
3	F1&F2	7	1.2	1.6822	0.0221
4	F1&F2	10	ตารางที่ 7	1.8117	0.0162
5	F1&F2	7	1.2	1.7011	0.0233
6	F1&F2	10	ตารางที่ 8	1.7755	0.0203

จากตารางที่ 1 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 7 ขนาดตัวเก็บประจุ 1.2 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าลดลง 1.59% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 73.45% เมื่อเทียบกับกรณีฐานสำหรับขนาดของตัวเก็บประจุในกรณีที่ 4 และ 6 จะมีค่าดังตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

จากตารางที่ 2 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ที่บัส 29 ขนาดตัวเก็บประจุ 0.9 เมกะวาร์ และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ที่บัส 14 ขนาด 0.6 เมกะวาร์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 33.36% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 90.82% เมื่อเทียบกับกรณีฐานโดยขนาดตัวเก็บประจุในตำแหน่งติดตั้งที่ 2 ในกรณีที่ 4 และ 6 จะแสดงในตารางที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว สำหรับโหลดแบบห้างสรรพสินค้า

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง ที่1	ขนาดตัว เก็บประจุ 1 (MVar)	ตำแหน่ง ที่2	ขนาดตัว เก็บประจุ 2 (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน						1.1784	0.0403
1	F1&F2	30	0.2	14	0.6	3.5950	0.0279
2	F1&F2	29	0.9	14	0.6	1.5715	0.0037
3	F1&F2	14	0.6	30	0.6	1.8424	0.0156
4	F1&F2	10	0.6	7	ตารางที่ 9	1.8462	0.0129
5	F1&F2	14	0.6	30	0.6	1.8605	0.0178
6	F1&F2	17	0.3	30	ตารางที่ 10	1.7181	0.0177



4.2 การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับโหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

ในกรณีฐาน (Base Case) คือกรณีที่ไม่มีติดตั้งตัวเก็บประจุ จะมีพลังงานสูญเสียในระบบเป็น 2.2772 เมกะวัตต์ ชั่วโมง และค่าความเบี่ยงเบนของแรงดัน LVD เฉลี่ย เป็น 0.0534 pu

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว สำหรับโหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง	ขนาดตัว เก็บประจุ (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน				2.2772	0.0534
1	F1&F2	10	1.2	3.7124	0.0424
2	F1&F2	7	1.2	1.9802	0.0268
3	F1&F2	7	1.2	2.0755	0.0287
4	F1&F2	10	ตารางที่ 7	2.2483	0.0227
5	F1&F2	7	1.2	2.0830	0.0292
6	F1&F2	10	ตารางที่ 8	2.3202	0.0271

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณา f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 7 ขนาดตัวเก็บประจุ 1.2 เมกะวัตต์ มีค่าที่ดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าลดลง 13.04% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 49.81% เมื่อเทียบกับกรณีฐานสำหรับขนาดของตัวเก็บประจุในกรณีที่ 4 และ 6 จะแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ที่บัส 15 ขนาดตัวเก็บประจุ 0.6 เมกะวัตต์ และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ที่บัส 30 ขนาด 0.9 เมกะวัตต์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.30% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 74.72% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน โดยตัวเก็บประจุขนาดที่ 2 ในกรณีที่ 4 และ 6 จะแสดงในตารางที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว สำหรับโหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง ที่ 1	ขนาดตัว เก็บประจุ 1 (MVar)	ตำแหน่ง ที่ 2	ขนาดตัว เก็บประจุ 2 (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน						2.2772	0.0534
1	F1&F2	30	0.2	14	0.6	3.5950	0.0279
2	F1&F2	15	0.6	30	0.9	2.284	0.0135
3	F1&F2	29	1.2	14	0.6	2.6303	0.0125
4	F1&F2	30	0.9	14	ตารางที่ 9	2.5103	0.0129
5	F1&F2	14	0.6	29	1.2	2.6372	0.0129
6	F1&F2	15	0.6	30	ตารางที่ 10	2.3622	0.0161

4.3 การติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับโหลดแบบที่พักอาศัย

โดยในกรณีฐาน (Base Case) คือกรณีที่ไม่มีติดตั้งตัวเก็บประจุ จะมีพลังงานสูญเสียในระบบเป็น 2.0611 เมกะวัตต์ ชั่วโมง และค่าความเบี่ยงเบนของแรงดัน LVD เฉลี่ย เป็น 0.0463 pu.

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบการติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว สำหรับโหลดแบบที่พักอาศัย

กรณี ที่	ฟังก์ชัน เป้าหมาย	ตำแหน่ง	ขนาดตัว เก็บประจุ (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
กรณีฐาน				2.0611	0.0463
1	F1&F2	10	1.2	3.4811	0.0371
2	F1&F2	7	1.2	2.0660	0.0228
3	F1&F2	9	1.2	2.3634	0.0238
4	F1&F2	10	ตารางที่ 7	2.2528	0.0245
5	F1&F2	7	1.2	2.0533	0.0239
6	F1&F2	10	ตารางที่ 8	2.2280	0.0227

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณา f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน ติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 30 ขนาดตัวเก็บประจุ 1.2 เมกะวัตต์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าลดลง 2.67% และมีแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 50.76% เมื่อเทียบกับกรณีฐานสำหรับตัวเก็บประจุในกรณีที่ 4 ดูได้จากตารางที่ 7 และตัวเก็บประจุในกรณีที่ 6 ดูได้จากตารางที่ 8

จากตารางที่ 6 ติดตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว เมื่อพิจารณาทั้ง f_1 และ f_2 โดยเปรียบเทียบทั้ง 6 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 คือพิจารณาที่โหลดเฉลี่ยรายวัน โดยติดตั้งตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ที่บัส 29 ขนาดตัวเก็บประจุ 0.9 เมกะวัตต์ และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ที่บัส 14 ขนาด 0.6 เมกะวัตต์ มีค่าดีที่สุด คือ มีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 17.77% และมี

แรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนลดลง 75.16% เมื่อเทียบกับกรณีฐาน โดยตัวเก็บประจุขนาดที่ 2 ในกรณีที่ 4 จะแสดงในตารางที่ 9 และตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 6 จะแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบการตั้งตัวเก็บประจุ 2 ตัว สำหรับโหลดแบบที่พักอาศัย

กรณี	ฟังก์ชันเป้าหมาย	ตำแหน่งที่ 1	ขนาดตัวเก็บประจุ 1 (MVar)	ตำแหน่งที่ 2	ขนาดตัวเก็บประจุ 2 (MVar)	Eloss (MWh)	LVD (pu.)
Base Case						2.0611	0.0463
1	F1&F2	15	0.6	30	1.2	3.4757	0.0233
2	F1&F2	29	0.9	14	0.6	2.4274	0.0115
3	F1&F2	14	0.6	30	0.9	2.4865	0.0154
4	F1&F2	29	0.9	14	ตารางที่ 9	2.6036	0.0116
5	F1&F2	14	0.6	29	0.9	2.4713	0.0126
6	F1&F2	14	0.6	30.0	ตารางที่ 10	2.3278	0.0146

จากการทดลอง การติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายด้านปฐมภูมิ แบบติดตั้ง 1 ตัว และ 2 ตัว โดยพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ คือ โหลดแบบห้างสรรพสินค้า โหลดแบบโรงงานอุตสาหกรรม และโหลดแบบที่พักอาศัย พบว่า การพิจารณาลักษณะของโหลดรายวันเฉลี่ย จะให้ค่าพลังงานสูญเสียรวมในระบบและแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนเฉลี่ยดีที่สุดในทุกรูปแบบโหลด

ตารางที่ 7 ขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 4 โหลดรายวันที่แบ่งเป็น 3 ช่วง ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบโหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงานอุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย
สูงสุด	1.2	1.2	1.2
ปานกลาง	1.2	1.2	0.9
ต่ำสุด	0.3	0.9	0.9

จากตารางที่ 7 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 4 คือแบ่งโหลดออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิทช์ ขนาดของตัวเก็บประจุจะมี 3 ค่า คือขนาดของตัวเก็บประจุ เมื่อโหลดสูงสุด จะเปลี่ยนแปลงเมื่อถึงโหลดปานกลาง และจะเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดต่ำสุดโดยที่ตำแหน่งของตัวเก็บประจุจะคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม

จากตารางที่ 8 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 6 คือโหลดรายวัน ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิทช์ ขนาดของตัวเก็บประจุจะมี 24 ค่า คือขนาดของตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนแปลงเป็นรายชั่วโมง จนครบ 1 วัน

จากตารางที่ 9 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 4 คือแบ่งโหลดออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิทช์ โดยตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 1 จะคงไว้เช่นเดิม ส่วนตำแหน่งของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 จะคงไว้และเปลี่ยนแปลงขนาดไปตามโหลดที่ถูกแบ่งไว้เป็น 3 ช่วง

ตารางที่ 8 ขนาดของตัวเก็บประจุ 1 ตัว ในกรณีที่ 6 โหลดรายวัน ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบโหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงานอุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย	รูปแบบโหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงานอุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย
เวลา	Mvar			เวลา	Mvar		
1:00	0.3	0.9	1.2	13:00	0.9	0.6	0.9
2:00	1.2	0.6	0.9	14:00	0.9	0.9	0.9
3:00	1.2	0.9	0.9	15:00	0.9	1.2	1.2
4:00	0.3	1.2	1.2	16:00	0.9	0.6	1.2
5:00	0.6	0.9	0.9	17:00	1.2	0.9	0.9
6:00	1.2	0.6	0.9	18:00	0.6	1.2	0.9
7:00	1.2	0.6	0.9	19:00	0.9	0.9	0.6
8:00	0.6	1.2	1.2	20:00	0.3	1.2	1.2
9:00	0.9	0.9	1.2	21:00	0.9	0.9	1.2
10:00	0.9	0.6	0.6	22:00	1.2	1.2	0.9
11:00	0.9	0.9	0.9	23:00	0.3	1.2	0.9

ตารางที่ 9 ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 4 โหลดรายวันที่แบ่งเป็น 3 ช่วง ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบโหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงานอุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย
สูงสุด	0.9	1.2	1.2
ปานกลาง	0.9	1.2	0.9
ต่ำสุด	0.3	0.3	0.3

จากตารางที่ 10 จะแสดงขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีที่ 6 คือโหลดรายวัน โดยตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 1 จะคงไว้เช่นเดิม ส่วนตำแหน่งของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 จะคงไว้และขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุแบบสวิทช์ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

5. สรุป

บทความนี้ได้พิจารณาการติดตั้งตัวเก็บประจุที่คำนึงถึงทั้งพลังงานสูญเสียรวมในระบบและคุณภาพระดับแรงดัน โดยพิจารณาโหลดหลายรูปแบบ โดยการทดลองติดตั้งตัวเก็บประจุ 1 ตัว และ 2 ตัว โดยที่ชนิดของตัวเก็บประจุเป็นแบบคงที่ และสวิทช์ โดยการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายอย่าง สามารถแก้ปัญหาเพื่อหาตำแหน่งและค่าตัวเก็บประจุที่ประนีประนอมกันระหว่างพลังงาน



สูญเสียรวมในระบบและคุณภาพระดับแรงดันได้ โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุที่พิจารณาที่โหลดรายวันเฉลี่ย จะให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบและแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนที่ดีที่สุด

ตารางที่ 10 ขนาดของตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ในกรณีนี้ 6 โหลดรายวัน ของโหลด 3 รูปแบบ

รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงานอุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย	รูปแบบ โหลด	ห้างสรรพสินค้า	โรงงานอุตสาหกรรม	ที่พักอาศัย
	Mvar				Mvar		
เวลา				เวลา			
0:00	0.6	0.9	0.6	12:00	0.9	0.9	0.3
1:00	0.6	0.9	0.6	13:00	0.6	0.9	0.6
2:00	1.2	0.6	0.9	14:00	1.2	0.9	0.9
3:00	0.6	0.9	0.9	15:00	0.3	1.2	0.9
4:00	0.3	1.2	0.9	16:00	0.6	0.6	0.3
5:00	0.9	0.6	0.6	17:00	0.9	0.3	0.6
6:00	1.2	0.3	0.9	18:00	0.9	0.6	0.9
7:00	1.2	1.2	0.6	19:00	0.6	1.2	1.2
8:00	0.3	0.6	0.6	20:00	0.6	1.2	0.6
9:00	0.9	0.6	0.6	21:00	1.2	0.6	0.3
10:00	0.9	0.9	0.9	22:00	1.2	0.9	0.6
11:00	0.9	0.9	0.9	23:00	0.3	1.2	0.6

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M Mozaffarilegha et al, "Capacitor Placement in Radial Distribution System For Improve Network Efficiency Using Artificial Bee Colony," Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 3, Issue 6, Nov- Dec 2013, pp.228.233.
- [2] R. A. hHooshmand and M. Ataei, "Optimal Capacitor Placement in Actual Configuration And Operational Conditions of Distribution Systems Using RCGA," Journal of Electrical Engineering, Vol. 58, No. 4, 2007, 189-199
- [3] ธนาพัฒน์ พูนคล้าย ยุทธนา คงจีน กาณท์ เกิดขึ้น และกฤติเดช บัวใหญ่ "การหาตำแหน่งและขนาดในการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยมีค่าโหลดบัสเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา". ESTATON2017. 21 กรกฎาคม 2560
- [4] K. Buayai, C. Lekdee, P. Inrawong, and K. Kerdchuen, "Practical Capacitor Placement for Power Loss Reduction and Voltage Improving by NSGA-II," 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer,

Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2016

- [5] กฤติเดช บัวใหญ่ มงคล ตรีกิจจานนท์ ประเสริฐ เผื่อนหมื่นไวย กิตติวุฒิ จินนະบุตร และ กาณท์ เกิดขึ้น "การจัดวางตัวเก็บประจุอย่างเหมาะสมโดยใช้ NSPSO" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 37 (EECON37) พ.ศ.2557
- [6] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Trans., Evol. Comput. 6 (2) (2002) 182-197.
- [7] ชำนาญ ห่อเกียรติ "ระบบไฟฟ้ากำลัง" มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2552
- [8] ข้อมูลโหลดจากระบบจำหน่ายสถานีนครราชสีมา 03 ฟีดเดอร์ 02 ซับ 01 สถานะวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ.2560, แผนกควบคุมศูนย์สั่งการ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา
- [9] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989.