บทความวิจัย

การจำลองสถานที่ตั้งของศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้าโดยพิจารณาการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบ

พรรัตน์ คงเกลี้ยง และ ฆนิศา รุ่งแจ้ง*
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ภัทรพงษ์ ภาคภูมิ
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 6353 6459 อีเมล: fengksr@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.03.005
รับเมื่อ 2 มิถุนายน 2565 แก้ไขเมื่อ 7 สิงหาคม 2565 ตอบรับเมื่อ 1 กันยายน 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 19 มีนาคม 2567
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

การจ่ายไฟฟ้าคืนระบบอย่างรวดเร็วจะช่วยพัฒนาความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศตามยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. 2561–2580) ที่เป็นการบริหารจัดการระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ที่ตั้งที่เหมาะสมของศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้าซึ่งมีหน้าที่แก้ไขไฟฟ้าขัดข้อง ด้วยวิธี P-Centering Problem โดยพิจารณาประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบตามดัชนีระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้องของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การวิเคราะห์ปัญหาการกำหนดที่ตั้งที่เหมาะที่สุดภายใต้ข้อจำกัดใช้โปรแกรมการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม โดยวิธีการหาคำตอบแบบแม่นตรงด้วยอัลกอริทึมการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต โดยใช้โปรแกรม GAMS ในการวิเคราะห์เพื่อแก้ไขสถานการณ์ไฟฟ้าขัดข้องในพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สาขาอำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองสามารถหาตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมซึ่งสามารถยกระดับประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบตามค่าดัชนีระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้องไปสู่ระดับที่ดีสุดคือระดับ 5 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ การปรับปรุงประสิทธิภาพนี้ช่วยลดเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้องลง 12.97 นาทีต่อรายต่อปี ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพร้อยละ 14.46 งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์บริการของหน่วยงานด้านพลังงานไฟฟ้าได้ โดยแบบจำลองสามารถวิเคราะห์หาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมในการให้บริการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบภายใต้ข้อจำกัดได้

คำสำคัญ: ศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้า การจ่ายไฟฟ้าคืนระบบ ดัชนีระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้อง ปัญหาการกำหนดที่ตั้งที่เหมาะที่สุด โปรแกรมการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม

การอ้างอิงบทความ: พรรัตน์ คงเกลี้ยง, ฆนิศา รุ่งแจ้ง และ ภัทรพงษ์ ภาคภูมิ, "การจำลองสถานที่ตั้งของศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้าโดยพิจารณาการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 34, ฉบับที่ 2, หน้า 1–10, เลขที่บทความ 242-016141, เม.ย.–มิ.ย. 2567.

Research Article

Optimal Location Modeling of Electricity Operations Center Considering the Electrical System Resiliency

Pornrat Khongkliang and Kanisa Rungjang*
Department of Civil Engineering. Faculty of Engineering. Kasetsart University, Bangkok, Thailand
Pattarapong Pakpoom
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kampheang Sean, Kasetsart University, Nakornphatom, Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 6353 6459, E–mail: fengksr@ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.03.005
Received 2 June 2022; Revised 7 August 2022; Accepted 1 September 2022; Published online: 19 March 2024
© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Improving electrical system resiliency can promote national energy security by enhancing energy efficiency and flexibility according to the country's vision in the National Strategy (2018–2037). This research establishes a P-Centering Problem model to analyze optimal locations for electricity operations centers, whose operation is to restore electrical resiliency. In terms of system resiliency, the constraints of the System Average Interruption Duration Index, which is the key performance index of Provincial Electricity Authority, are considered. The problem of analyzing optimal location under certain contraints is achieved by Mixed-Integer Programming. Solution finding algorithm is exact by branch-and-bound method. Through the GAMS language compiler, numerical analysis provides an optimal solution to the Provincial Electricity Authority Ongkharak Branch in Nakhon Nayok province. Numerical results demonstrate that the model can provide an optimal solution of number and location of Electricity Operations Center. This can enhance the System Average Interruption Duration Index efficiency to Level 5, which is the best service level of the Provincial Electricity Authority. This improvement can reduce the time of power outage by 12.97 minutes per customer per year, equivalent to 14.46 percent efficiency increment. The result of this work can be applied to the location problem of the Electricity Operations Center of electrical agencies. The model formulation estimates the number, location of service center, and service assignment to improve the resiliency of the electrical system under the service's constraints.

Keywords: Electricity Operations Center, Electrical System Resiliency, System Average Interruption Duration Index, Location Problem, Mixed-Integer Program

Please cite this article as: P. Khongkliang, K. Rungjang, and P. Pakpoom, "Optimal location modeling of electricity operations center considering the electrical system resiliency," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 2, pp. 1–10, ID. 242-016141, Apr.–Jun. 2024 (in Thai).

1. บทนำ

การเกิดไฟฟ้าขัดข้องนับเป็นความไม่มั่นคงด้านพลังงานที่ส่งผลต่อชีวิต ทรัพย์สิน และเศรษฐกิจ ซึ่งในพื้นที่ความรับผิดชอบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) นั้น มีอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าขัดข้องมีค่าประมาณ 86.30 บาทต่อหน่วย [1] ใน พ.ศ. 2564 กฟภ. มีหน่วยสูญเสียทางเทคนิค 5,937.51 ล้านหน่วย [2] เทียบเป็นมูลค่าความสูญเสียของประเทศ 512,407.11 ล้านบาท ระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้องมาจากผลรวมของระยะเวลาในการเดินทางเพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุกับระยะเวลาในการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้อง [3] ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบ (Electrical System Resiliency) โดยการจัดให้มีศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้า (Electricity Operations Center; EOC) ที่สามารถเข้าถึงจุดเกิดเหตุและแก้ไฟฟ้าขัดข้องได้อย่างรวดเร็ว จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและสร้างความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่าย ตามประเด็นด้านการพัฒนาความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศในแผนยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561–2580 [4] และกำหนดไว้ในแผนยุทธศาสตร์ กฟภ. พ.ศ. 2565–2569 [5] โดย กฟภ. ได้กำหนดค่าเป้าหมายของดัชนีระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้อง (System Average Interruption Duration Index; SAIDI) ซึ่งเป็นค่าดัชนีความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าที่นิยมใช้ในการวัดคุณภาพของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในข้อวัตถุประสงค์เชิงยุทธศาสตร์ที่ 2 ด้านระบบจำหน่ายที่มีประสิทธิภาพและสร้างความน่าเชื่อถือต่อผู้ใช้ไฟและทุกกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียให้ลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกปี

ทั้งนี้การบริหารจัดการศูนย์ EOC ให้มีจำนวนเพียงพอและมีตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมจะช่วยการส่งเสริมความมั่นคงของพลังงานไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการตัดสินใจในการกำหนดจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ EOC มีเงื่อนไขในการให้บริการที่ซับซ้อนหลายประการ ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) จึงเป็นแนวทางสำคัญในการแก้ปัญหา [6]–[9]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์จำนวนและตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมของศูนย์ EOC โดยพิจารณาการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบ ตามเกณฑ์วัดผลการดำเนินงานของ กฟภ. ภายใต้ค่า SAIDI และข้อจำกัดด้านการบริการด้วยปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของสถานที่ให้บริการ (Facility Location Problems; FLP) แบบจำลองนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาไฟฟ้าขัดข้องในพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สาขาอำเภอองครักษ์ (กฟส.อ.องครักษ์) ในสังกัดการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครนายก (กฟจ.นครนายก) ซึ่งเป็นการไฟฟ้าจุดรวมงาน ที่มีค่า SAIDI ที่ประเมินได้ในระดับ 4 (89.72 นาทีต่อรายต่อปี) ซึ่งระดับที่ดีสุด คือ ระดับ 5 (82.58 นาทีต่อรายต่อปี) เป็นค่าเป้าหมายที่เกณฑ์วัดผลการดำเนินงานใน พ.ศ. 2563 [10] อันจะนำไปสู่แนวทางในการบริหารจัดการศูนย์ EOC ในแต่ละเขตพื้นที่ของ กฟภ. ให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบได้

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้นำหลักการของ Discrete Location Problem ซึ่งเป็นปัญหา FLP แบบ Deterministic ประเภท P-Centering Problem; PCP [11], [12] โดยใช้วิธีการหาคำตอบแบบแม่นตรง (Exact Algorithm) [13] ด้วยการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (Branch and Bound) [14], [15] ซึ่งจะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) โดยใช้โปรแกรม GAMS (General Algebraic Modeling System) เป็นเครื่องมือจำลองสถานการณ์และทำการวิเคราะห์ตัวเลขในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด [16], [17] และใช้ CPLEX เป็นตัวแก้ปัญหา (Solver) [18] โดยแบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

2.1 การกำหนดปัญหาและข้อจำกัด

เมื่อเกิดไฟฟ้าขัดข้องปัญหาที่เกิดขึ้น คือ หน่วยงานที่รับผิดชอบในการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบจะต้องเลือกศูนย์ EOC ที่สามารถเข้าถึงและแก้ไขไฟฟ้าขัดข้องจนสามารถจ่ายไฟฟ้าคืนระบบได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด กฟภ. ได้กำหนดระยะเวลาดังกล่าวด้วยค่า SAIDI โดยค่า SAIDI เป็นค่าดัชนีแสดงระยะเวลาไฟฟ้าขัดข้องเฉลี่ยที่กระทบต่อผู้ใช้ไฟ 1 ราย ในช่วงระยะเวลา 1 ปี ซึ่งระยะเวลาไฟฟ้าขัดข้องมาจาก ผลรวม

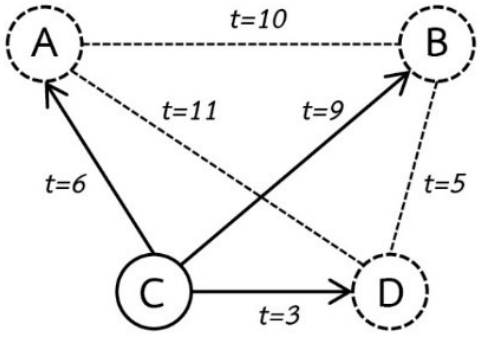
ของระยะเวลาในการเดินทาง (Access Time; Atime) (t) จากศูนย์ EOC (i) เพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุ (j) กับระยะเวลาในการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้อง (Service Time; Stime) ศูนย์ EOC มีหน้าที่ในการบริหารงานแก้ไฟฟ้าขัดข้อง (Outage Management) เพื่อให้สามารถบริการผู้ใช้ไฟในพื้นที่รับผิดชอบได้อย่างทั่วถึง กฟภ. จึงกำหนดบริเวณที่ดิน (Zone) สำหรับก่อสร้างศูนย์ EOC ให้อยู่ในเขตชุมชนหรือมีรัศมีห่างจากศูนย์กลางชุมชนออกมาตามถนนสายหลัก ไม่เกิน 4 กิโลเมตร ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความหนาแน่นของผู้ใช้ไฟสูง [19] เมื่อพื้นที่การให้บริการมีขนาดใหญ่และมีจุดเสี่ยงในการเกิดไฟฟ้าขัดข้องหลายแห่งและอาจเกิดเหตุขัดข้องที่ต้องใช้ระยะเวลานานในการแก้ไข การกำหนดให้มีจำนวนศูนย์ EOC ที่เพียงพอ (p แห่ง) และมีตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมจะส่งผลให้สามารถลดความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์จากการเกิดไฟฟ้าขัดข้องได้ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศมากขึ้น ภาครัฐจึงกำหนดให้หน่วยงานมีมาตรฐานในการบริการที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยกำหนดให้ค่า SAIDI ลดลงในทุกปี

ดังนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถแก้ปัญหาโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีข้อจำกัดหลายประการ (NP Hard Problem) เพื่อให้หน่วยงานสามารถวางแผนและตัดสินใจในการกำหนดจำนวนและที่ตั้งของศูนย์ EOC ในแต่ละพื้นที่ได้อย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ข้อจำกัดในการให้บริการ (Constraints) ประการหนึ่ง คือ พื้นที่ที่เกิดไฟฟ้าขัดข้องจะได้รับบริการจากศูนย์ EOC เพียงแห่งเดียว เพื่อไม่ให้เกิดการให้บริการซ้ำซ้อน และข้อจำกัดอีกประการหนึ่ง คือ การเลือกเส้นทางเดินทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุดจะพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของการจราจรที่แตกต่างกัน โดยคำนึงถึงระยะเวลาในการเดินทางในช่วงจราจรคับคั่ง (Peak Hour) และระยะเวลาในการเดินทางในช่วงจราจรปกติ (Off-Peak Hour) [20] นอกจากนี้ระยะเวลาในการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้อง (ไม่รวมระยะเวลาเดินทาง) มีความแตกต่างกันไปตามสาเหตุของการเกิดไฟฟ้าขัดข้อง [21] ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้แบบจำลองสามารถนำเข้าข้อมูลข้อจำกัดในการให้บริการ ข้อมูลโครงข่ายการเดินทาง ข้อมูลระยะเวลาในการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้องรวมถึงข้อจำกัดอื่นที่จำเป็น ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะต้องกำหนดปัญหาตำแหน่งที่ตั้ง (Location Problem Formulation) ข้อมูลนำเข้า (Input Data) และข้อจำกัดในการให้บริการ เพื่อหาค่าจำนวนและที่ตั้งที่เหมาะที่สุด (Optimization)

2.2 การจำลองปัญหาการกำหนดจำนวนและเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์บริการ

การจำลองปัญหาการกำหนดจำนวนและเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์บริการ จำแนกเป็นประเภทปัญหา PCP มีลักษณะเป็นโครงข่ายการเดินทางประกอบด้วยจุดต่อ (Node; V) ซึ่งสามารถเป็นทั้งศูนย์บริการ (i) และจุดรับบริการ (j) และเส้นทาง (Arc; A) เชื่อมต่อระหว่างจุดต่อโดยกำหนดให้ t_{ij} เป็นระยะเวลาในการเดินทางระหว่างจุดต่อ i และ j มีหน่วยเป็นนาที เช่น เมื่อจุดต้นทางการเดินทาง (Origin) เป็นศูนย์บริการ i จะใช้ระยะเวลาไปยังจุดปลายทางการเดินทาง (Destination) ณ จุดรับบริการ j เท่ากับค่า t_{ij} เมื่อให้บริการแล้วเสร็จจึงเดินทางกลับมายังจุดศูนย์บริการ i เริ่มต้น ในรูปที่ 1 กำหนดให้เซตจุดต่อ V = {A, B, C, D} และเส้นทาง (Arc, A) เป็นเซต ของ A = {A-B, A-C, A-D, B-A, B-C, B-D, C-A, C-B, C-D, D-A, D-B, D-C} โดยมีระยะเวลาในการเดินทาง t_{ij} ที่ต้องเริ่มต้นจากจุดต่อที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถตั้งเป็นศูนย์บริการ i ไปยังจุดต่อที่เป็นจุดรับบริการ j โดยระยะเวลาในการเดินทาง t_{ij} ระหว่างจุด Origin และจุด Destination สามารถกำหนดเป็นข้อมูลนำเข้าโดยแสดงเป็นตาราง (Origin-Destination; O-D) การเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์บริการ จำนวน p แห่ง จากเซตของจุดต่อ เมื่อ p = 1 ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของศูนย์บริการคือ จุด C เนื่องจากระยะเวลาในการเดินทางเพื่อเข้าถึงจุดรับบริการสำหรับแต่ละเส้นทาง C-A, C-B, C-C และ C-D ทั้ง 4 เส้น มีระยะเวลาในการเดินทางเป็น $t(C,A)$ = 6, $t(C,B)$ = 9, $t(C,C)$ = 0 และ $t(C,D)$ = 3 โดย $t(C,B)$ มีค่ามากที่สุด (Maximum) เท่ากับ 9 นาที แต่ยังเป็นระยะเวลาที่น้อยที่สุด (Minimum) จากกลุ่มระยะเวลาในการเดินทางที่มากที่สุดหากเลือกจุดอื่นๆ เป็นที่ตั้งของศูนย์บริการ จึง



รูปที่ 1 การเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์บริการที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเลือกเปิด 1 แห่ง จากโครงข่ายการเดินทาง

ทำให้วิธี PCP มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า Minimax โดยในการจำลองปัญหาในการวิจัยนี้ มุ่งเน้นหาค่าของจำนวน p และตำแหน่งที่เหมาะที่สุดที่จะทำให้ ค่า Minimax นี้มีค่าไม่เกินค่าเป้าหมายโดยพิจารณาการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบตามเกณฑ์วัดผลการดำเนินงานของ กฟภ. และข้อจำกัดด้านการบริการ

งานวิจัยนี้จึงกำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการ ดังนี้

i คือ ตำแหน่งที่สามารถตั้งศูนย์ EOC ได้

j คือ ตำแหน่งจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง

m คือ เซตของศูนย์ EOC

n คือ เซตของจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง

Z คือ ระยะเวลาในการเดินทาง (Atime) จากศูนย์ EOC (i) เพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) ที่ดีที่สุดจากจากกลุ่มผลลัพธ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเดินทางที่มากที่สุด

p คือ ค่าพารามิเตอร์แทนจำนวนศูนย์ EOC ที่กำหนดให้เปิดบริการ

t_{ij} คือ ระยะเวลาในการเดินทางจากศูนย์ EOC (i) ในการเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) เพื่อให้บริการ

x_i คือ ตัวแปรตัดสินใจ โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเลือกตั้งศูนย์ EOC ที่ตำแหน่ง (i) และมีค่าเท่ากับ 0 ถ้าไม่ถูกเลือก

y_{ij} คือ ตัวแปรตัดสินใจ โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) ได้รับบริการจากศูนย์ EOC (i) และมีค่าเท่ากับ 0 ถ้าไม่ได้รับบริการ

จากนั้นจึงสร้างสมการเพื่อแก้ปัญหา ได้ดังนี้

สมการที่ (1) เป็นสมการวัตถุประสงค์ เพื่อให้ Z เป็นระยะเวลาในการเดินทาง (Atime) จากศูนย์ EOC (i) เพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) ที่ดีที่สุดจากกลุ่มผลลัพธ์ที่ใช้ระยะเวลาในการเดินทางที่มากที่สุด โดย $Z \leq \text{SAIDI - Stime}$

$$Minimize \quad Z \tag{1}$$

สมการที่ (2) เป็นสมการข้อจำกัด กำหนดให้การรับประกันว่าทุกจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) จะได้รับบริการจากศูนย์ EOC (i) จำนวน 1 แห่ง โดย $\forall_j \in n$

$$\sum_{i \in m} y_{ij} = 1 \tag{2}$$

สมการที่ (3) เป็นสมการข้อจำกัด กำหนดให้จำนวนตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ EOC (i) ที่ถูกเลือกให้เท่ากับจำนวนศูนย์ EOC ที่กำหนดให้เปิดบริการ จำนวน p แห่ง

$$\sum_{i \in m} x_i = p \tag{3}$$

สมการที่ (4) เป็นสมการข้อจำกัด กำหนดให้จุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) ในทุกตำแหน่งจะได้รับบริการจากศูนย์ EOC (i) ได้ก็ต่อเมื่อตำแหน่งที่ i มีศูนย์ EOC ตั้งอยู่ พิจารณาในกรณีที่ไม่มีข้อจำกัดด้านขีดความสามารถในการให้บริการของสถานที่ให้บริการโดย $\forall_i \in m$, $\forall_j \in n$

$$y_{ij} \leq x_i \tag{4}$$

สมการที่ (5) เป็นสมการข้อจำกัด ที่เชื่อมโยงกับสมการวัตถุประสงค์ โดยจะแสดงค่าระยะเวลาในการเดินทาง (t) เพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) จากศูนย์ EOC (i) ที่มากที่สุด โดยจะใช้เวลาในการเข้าถึงไม่เกินค่า Z จากนั้นจะเลือกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดจากกลุ่มผลลัพธ์ข้างต้น ซึ่งจะแสดงเป็นผลลัพธ์ของสมการวัตถุประสงค์ (ค่า Z จากสมการวัตถุประสงค์) และสมการข้อจำกัด โดย $\forall_j \in n$

$$\sum_{i \in m} t_{ij} y_{ij} \leq Z \tag{5}$$

สมการที่ (6), (7) แสดงข้อจำกัดเชิงตัวเลขของตัวแปรตัดสินใจ โดย $\forall_i \in m$, $\forall_j \in n$

$$x_i \in \{0,1\} \quad (6)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad (7)$$

2.3 การประยุกต์ใช้กับพื้นที่

การประยุกต์ใช้แบบจำลองกับพื้นที่ กฟส.อ. องครักษ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะจำลองให้ใช้ที่ตั้งขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น 12 แห่ง ประกอบด้วย เทศบาลตำบลองครักษ์ (V1) องค์การบริหารส่วนตำบลพระอาจารย์ (V2) องค์การบริหารส่วนตำบลบึงศาล (V3) องค์การบริหารส่วนตำบลศีรษะกระบือ (V4) องค์การบริหารส่วนตำบลโพธิ์แทน (V5) องค์การบริหารส่วนตำบลบางสมบูรณ์ (V6) องค์การบริหารส่วนตำบลทรายมูล (V7) องค์การบริหารส่วนตำบลบางปลากด (V8) องค์การบริหารส่วนตำบลบางลูกเสือ (V9) องค์การบริหารส่วนตำบลองครักษ์ (V10) องค์การบริหารส่วนตำบลชุมพล (V11) องค์การบริหารส่วนตำบลคลองใหญ่ (V12) เป็นจุดศูนย์กลางชุมชนที่มีโอกาสเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องสูง (j) และเป็นตำแหน่งที่สามารถตั้งศูนย์ EOC (i) ได้ จำลองให้ใช้ค่า SAIDI ที่ระดับ 5 ตามค่าเป้าหมายที่เกณฑ์วัดผลการดำเนินงานใน พ.ศ. 2563 เป็นเวลาเฉลี่ย 82.58 นาทีต่อรายต่อปี จำลองให้ใช้ค่า Stime ตามค่าเฉลี่ยของระยะเวลาแก้ไฟฟ้าขัดข้อง ตามประเภทของอุปกรณ์และลักษณะงาน ณ จุดปฏิบัติงาน (ไม่รวมระยะเวลาในการเดินทาง) เป็นเวลาเฉลี่ย 58.75 นาที และจำลองให้ใช้ข้อมูลการจราจรในช่วงจราจรคับคั่งกำหนดให้เป็นตัวแทนของสถานการณ์วิกฤต โดยเก็บข้อมูลระยะเวลาในการเดินทางจากศูนย์ EOC ไปยังจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องเป็นระยะทางสมมาตร (Symmetrical Distance Matrix) เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยเก็บข้อมูลจาก Google Maps ดังตารางที่ 1

2.4 การหาค่าคำตอบของปัญหา

เนื่องจากปัญหาการกำหนดจำนวนและเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ EOC ด้วยปัญหา PCP ซึ่งเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่มีความซับซ้อนมีข้อจำกัดและมีกฎเกณฑ์ในการหาคำตอบ ฉะนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม GAMS เป็นเครื่องมือจำลองสถานการณ์และทำการวิเคราะห์ตัวเลขในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลองพบว่า แบบจำลองสามารถหาคำตอบที่เหมาะที่สุดที่เป็น Global Optimal Solution ได้

ตารางที่ 1 ข้อมูลระยะเวลาในการเดินทางจากศูนย์ EOC ไปยังจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง

Origin/Destination	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
V1	0	26	15	20	24	25	8	19	15	14	22	11
V2	26	0	16	17	41	31	24	34	18	18	9	20
V3	15	16	0	29	26	36	9	18	27	17	9	9
V4	20	17	29	0	36	24	20	31	14	19	23	21
V5	24	41	26	36	0	45	18	9	35	29	34	21
V6	25	31	36	24	45	0	35	40	18	36	33	32
V7	8	24	9	20	18	35	0	10	21	12	17	4
V8	19	34	18	31	9	40	10	0	30	21	26	13
V9	15	18	27	14	35	18	21	30	0	23	24	19
V10	14	18	17	19	29	36	12	21	23	0	21	9
V11	22	9	9	23	34	33	17	26	24	21	0	17
V12	11	20	9	21	21	32	4	13	19	9	17	0

3. ผลการทดลอง

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เขียนด้วยโปรแกรม GAMS มีรูปแบบ ดังนี้

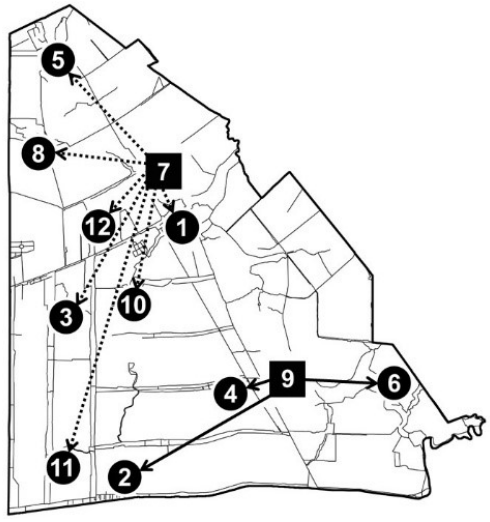
```
Variable          Z;                                    (8)
Variable          Atime;                                (9)
Parameter         SAIDI /82.58/                         (10)
                  Stime /58.75/
                  p /2/;
Binary Variable   x(i);
                  (11)
Binary Variable   y(i,j);                               (12)
Equation          defobj                                (13)
                  outage(j)
                  station
                  EOC(i,j)
                  Maxtt(j);
defobj..          Z                    =e= Atime;       (14)
outage(j)..       sum(i,y(i,j))        =e= 1;           (15)
station..         sum(i,x(i))          =e= p;           (16)
EOC(i,j)..        y(i,j)               =L= x(i);        (17)
Maxtt(j)..        sum((i),t(i,j)*y(i,j)) =L=Atime;      (18)
Model             PCP /all/;                            (19)
solve             PCP using mip min Z;                  (20)
display           Z.L, x.L, y.L;                        (21)
```

กำหนดให้ Z เป็นตัวแปร (8) กำหนดให้ Atime หรือ Access Time เป็นตัวแปร แสดงระยะเวลาในการเดินทางจากศูนย์ EOC เพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง โดย Atime = SAIDI - Stime (9) กำหนดให้ SAIDI, Stime และ p เป็นพารามิเตอร์ให้สามารถนำเข้าข้อมูลได้ในแบบจำลองนี้ จำลองให้ SAIDI = 82.58, Stime = 58.75 (10) กำหนดให้ x(i) เป็นตัวแปรตัดสินใจที่เป็นตัวแปรฐานสอง (Binary Variable) โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเลือกตั้งศูนย์ EOC ที่ตำแหน่ง (i) และมีค่าเท่ากับ 0 ถ้าไม่ถูกเลือก (11) กำหนดให้ y(i,j) เป็นตัวแปรตัดสินใจที่เป็นตัวแปรฐานสอง โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) ได้รับบริการจากศูนย์ EOC (i) และมีค่าเท่ากับ 0 ถ้าไม่ได้รับบริการ (12) กำหนดให้ defobj, outage(j), station, EOC(i,j) และ Maxtt(j); เป็นสมการข้อจำกัด (13) โดยให้ defobj คือ ค่า Z มีค่าเท่ากับ Atime (14) ให้ outage(j) คือ ผลรวมของจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) ที่ได้รับบริการจากศูนย์ EOC (i) มีค่าเท่ากับ 1 (15) ให้ station คือ ผลรวมของการเลือกตั้งศูนย์ EOC ที่ตำแหน่ง i เท่ากับ p (16) ให้ EOC(i,j) คือ จุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) ในทุกตำแหน่งจะต้องได้รับบริการจากศูนย์ EOC (i) อย่างน้อย 1 แห่ง (17) ให้ Maxtt(j) คือ ผลรวมของค่าระยะเวลาในการเดินทาง (t) เพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (j) จากศูนย์ EOC (i) ที่มีค่ามากที่สุดไม่เกินค่า Atime (18) กำหนดให้แบบจำลองชื่อ PCP และต้องการใช้ข้อจำกัดทั้งหมดในการวิเคราะห์ (19) กำหนดให้วิเคราะห์แบบจำลอง PCP ด้วยโปรแกรมการกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Programming; MIP) มุ่งเน้นค่าน้อยที่สุด (Minimum, MIN) (20) กำหนดให้แสดงระยะเวลาในการเดินทางเพื่อเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง ตำแหน่งที่ตั้งศูนย์ EOC และจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องที่ได้รับบริการจากศูนย์ EOC ที่เปิดให้บริการ

3.2 ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

ผลประยุกต์ใช้แบบจำลองในการกำหนดจำนวนและเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ EOC โดยพิจารณาเปิดศูนย์ EOC จำนวน p แห่ง เปรียบเทียบกับค่า Z ดังตารางที่ 2

ในกรณีพิจารณาเปิดศูนย์ EOC จำนวน 2 แห่ง ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด คือ V7 (องค์การบริหารส่วนตำบลทรายมูล) และ V9 (องค์การบริหารส่วนตำบลบางลูกเสือ) มีระยะเวลาการเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้อง (ค่า Z) ที่มากที่สุดไม่เกิน 18 นาที ทำให้ กฟส.อ.องครักษ์ มีค่าดัชนี SAIDI เป็นเวลาเฉลี่ย 76.75 นาทีต่อรายต่อปี (Z+Stime) ซึ่งได้ตามค่าเป้าหมาย (ค่าเป้าหมายที่ระดับ 5 เป็นเวลาเฉลี่ย 82.58 นาทีต่อรายต่อปี) โดยศูนย์ EOC ที่ตำบลทรายมูลมีพื้นที่รับผิดชอบ 8 พื้นที่ และศูนย์ EOC ที่ตำบลบางลูกเสือมีพื้นที่รับผิดชอบ 4 พื้นที่ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ EOC ที่เหมาะสมที่สุดและพื้นที่รับผิดชอบ ในกรณีพิจารณาเปิด 2 แห่ง

ตารางที่ 2 จำนวนศูนย์ EOC ที่เปิดให้บริการเปรียบเทียบกับค่า Z

จำนวนศูนย์ EOC (แห่ง)	ตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ EOC	ค่า Z (นาที)
1	V1	26
2	V7, V9	18
3	V2, V7, V9	18
4	V4, V5, V6, V12	17
5	V2, V4, V5, V6, V7	14
6	V4, V5, V6, V9, V11, V12	11
7	V4, V6, V7, V8, V9, V11, V12	9
8	V1, V2, V4, V6, V8, V9, V10, V11	9
9	V1, V2, V4, V5, V6, V8, V9, V10, V11	9
10	V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11	8
11	V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11	4
12	V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9, V10, V11, V12	0

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์จำนวนและตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมที่สุดของศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้า (Electricity Operations Center; EOC) ด้วยปัญหาการเลือกตำแหน่งที่ตั้งของสถานที่ให้บริการ (Facility Location Problems; FLP) แบบ Deterministic ประเภท P-Centering Problem; PCP โดยพิจารณาการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบ (Electrical System Resiliency) ตามเกณฑ์วัดผลการดำเนินงานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ภายใต้ค่าดัชนีระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้อง (System Average Interruption Duration Index; SAIDI) และข้อจำกัดด้านการบริการ โดยใช้วิธีการหาคำตอบแบบแม่นตรง (Exact Algorithm) ด้วยการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (Branch and Bound) โดยใช้โปรแกรม GAMS (General Algebraic Modeling System) เป็นเครื่องมือจำลองสถานการณ์และทำการวิเคราะห์ตัวเลขในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

ผลประยุกต์ใช้แบบจำลองในการกำหนดจำนวนและเลือกตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้า ในพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สาขาอำเภอองครักษ์ ผลการวิเคราะห์พบว่า หากเปิดศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้า จำนวน 2 แห่ง ในพื้นที่องค์การบริหารส่วนตำบลทรายมูล และองค์การบริหารส่วนตำบลบางลูกเสือ จะทำให้ค่าระยะเวลาการเข้าถึงจุดเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องจากศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้าที่มากที่สุดไม่เกิน 18 นาที ทำให้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สาขาอำเภอองครักษ์ มีค่าดัชนีระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้องเป็นเวลาเฉลี่ย 76.75 นาทีต่อรายต่อปี (Z+Stime) ซึ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพนี้ช่วยลดระยะเวลาที่ไฟฟ้าขัดข้องลง 12.97 นาทีต่อรายต่อปี (SAIDI (เดิม) – SAIDI (ใหม่)) ซึ่งเทียบได้กับการเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบได้ร้อยละ 14.46 (เทียบกับ SAIDI (เดิม)) สามารถยกระดับประสิทธิภาพการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบไปสู่ระดับที่ดีสุด ตามค่าเป้าหมายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (ค่าเป้าหมายที่ระดับ 5 เป็นเวลาเฉลี่ย 82.58 นาทีต่อรายต่อปี) แบบจำลองในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งของศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้าในแต่ละเขตพื้นที่ให้บริการของการ

ไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและหน่วยงาน อื่น ๆ ที่ให้บริการด้านพลังงานไฟฟ้าได้ โดยแบบจำลองสามารถวิเคราะห์หาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมในการให้บริการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจ่ายไฟฟ้าคืนระบบ เพื่อระบบจำหน่ายที่มีประสิทธิภาพและสร้างความน่าเชื่อถือต่อผู้ใช้ไฟและทุกกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ทั้งนี้การวิเคราะห์จำนวนและตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสมที่สุดของศูนย์ปฏิบัติการระบบไฟฟ้าควรศึกษาภายใต้สถานการณ์ที่เป็นพลวัต (Dynamic) เช่น ด้านการจราจร ด้านระยะเวลาในการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้องในแต่ละสภาพอากาศ การเพิ่มเติมการพิจารณาแบบพลวัตจะได้ค่าที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาระดับปริญญาโท ประจำปี 2564 และข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ ตลอดจน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

[1] King Mongkut's University of Technology North Bangkok, “Final report of The electrical outage cost study,” Energy Policy and Planning office, Bangkok, Thailand, 2013 (in Thai).

[2] System Operation Division, “Report of electric power losses in distribution networks 2021,” Provincial Electricity Authority, Bangkok, Thailand, 2022 (in Thai).

[3] Corporate Management System Division, “Provincial electricity authority service standards 2020,” Provincial Electricity Authority, Bangkok, Thailand, 2021 (in Thai).

[4] National Economic and Social Development Board, “National strategy 2018–2037,” Office of the National Economic and Social Development Council, Bangkok, Thailand, 2018 (in Thai).

[5] Strategic Planning Division, “Provincial electricity authority strategic plan in 2022–2026,” Provincial Electricity Authority, Bangkok, Thailand, 2021 (in Thai).

[6] S. H. Owen and M. S. Daskin, “Strategic facility location: A review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 111, no. 3, pp. 423–447, 1998.

[7] K. Khaosa-ard, S. Klongboonjit, R. Masuchun, and U. Janjarassuk, “Optimization of the vehicle routing problem in postal transportation a case study of Kabinburi mail center,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 1–13, 2022 (in Thai).

[8] C. Boonmee, M. Arimura, and T. Asada, “Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 24, pp. 485–498, 2017.

[9] Y. Liu, Y. Yuan, J. Shen, and W. Gao, “Emergency response facility location in transportation networks: A literature review,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 8, no. 2, pp. 153–169, 2021.

[10] System Operation Division, “Report of SAIFI & SAIDI 2020,” Provincial Electricity Authority, Bangkok, Thailand, 2021 (in Thai).

[11] C. Singhtaun, “Facility locations selection using exact algorithms,” *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 24, no.78, pp. 107–122, 2011.

[12] S. Dantrakul, C. Likasiri, and R. Pongvuthithum,

"Applied p-median and p-center algorithms for facility location problems," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no.8, pp. 3596–3604, 2014.

[13] H. Calik and H. Çalık, "Exact solution methodologies for the p-center problem under single and multiple allocation strategies," Ph.D. dissertation, Department of Industrial Engineering, Bilkent University, Ankara, Turkey, 2013.

[14] S. Srithongchai, "A branch and bound algorithm for the porbabilistic traveling salesman problem with return," *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 30, no. 1, pp. 65–74, 2019.

[15] V. Beresnev, "Branch-and-bound algorithm for a competitive facility location problem," *Computers & Operations Research*, vol. 40, no. 8, pp. 2062–2070, 2013.

[16] M. Hosseini and M. Ameli, "A bi-objective model for emergency services location-allocation problem with maximum distance constraint," *Management Science Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 115–126, 2011.

[17] Y. Liu, "Two lower-bounding algorithms for the p-center problem in an area," *Computational Urban Science*, vol. 2, no.1, pp. 1–9, 2022.

[18] V. Pongsangiam, C. Vongpisal, and O. Sangsawang, "Locating the optimal emergency services stations on highway using maximal covering location model: Case study Nakhon Pathom province," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 3, pp. 493–502, 2018 (in Thai).

[19] Civil Work Design Division, "Report of guidelines for determining the location of provincial Electricity Authority's office," Provincial Electricity Authority, Bangkok, Thailand, 2018 (in Thai).

[20] N. J. Garber and L. A. Hoel, *Traffic and Highway Engineering*, 3th ed., Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 2002.

[21] Power System Control and Operation Department, "Report of The average repair time by type of equipment and work," Provincial Electricity Authority, Bangkok, Thailand, 2015 (in Thai).