http://journal.rmutp.ac.th/

เทคนิคการจัดเรียงสายป้อนและการกำหนดตำแหน่งตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อทำให้ค่าดัชนีโหลดสมดุลต่ำสุด

นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ* และ สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 9 ตุลาคม 2016; ตอบรับบทความ 30 พฤษภาคม 2017

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้เสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลจากการจัดเรียงสายป้อนเพื่อพิจารณาดัชนีค่าโหลดสมดุลและการขจัดโอเวอร์โหลดโดยการใช้ดัชนีโหลดสมดุลเพื่อกำหนดเงื่อนไขและพิกัดสูงสุดในการจ่ายโหลด ซึ่งค่าดัชนีนั้นต้องมีค่าต่ำที่สุดในการจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสมเพื่อให้โหลดสมดุล วิธีที่นำเสนอจะอาศัยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดมาค้นหาผลเฉลย ซึ่งใช้วิธีการค้นหาแบบตาบูในการค้นหาตำแหน่งการเปิด-ปิด สวิตช์ตัดตอนและสวิตช์ถ่ายโอนเพื่อให้เกิดการจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสมที่สุด โดยทำการทดสอบวิธีที่นำเสนอผ่านแบบจำลองของระบบจำหน่าย 69 บัสแบบเรเดียล ด้วยการจัดเรียงสายป้อนและการกำหนดตำแหน่งตัวเก็บประจุ จากการประมวลผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าในระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุและมีรูปแบบการเปิด-ปิดสวิตช์อย่างเหมาะสมที่สุดจะทำให้ได้การจัดเรียงสายป้อนที่สามารถช่วยให้โหลดสมดุลในระบบจำหน่ายได้

คำสำคัญ: การจัดเรียงสายป้อน; ดัชนีโหลดสมดุล; ระบบจำหน่าย; การติดตั้งตัวเก็บประจุ

** ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 1353 6426, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: nattachote.r@rmutp.ac.th*

http://journal.rmutp.ac.th/

The Technique of Feeder Reconfiguration and Capacitors Placement in Power Distribution System to Achieve Minimum Load-Balancing

Nattachote Rugthaicharoencheep* and Sakhon Woothipatanapan

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok, 10800

Received 9 October 2016; accepted 30 May 2017

Abstract

This paper presents an efficient algorithm for optimization of radial distribution systems by a feeder reconfiguration to balance feeder loads and eliminate overload conditions. The system load-balancing index is used to determine the loading conditions of the system and maximum system loading capacity. The index value has to be minimum in the optimal feeder reconfiguration of load balancing. A method based on Tabu search algorithm, The Tabu search algorithm is employed to search for the optimal feeder reconfiguration. Simulation results for a radial 69-bus system with reconfiguration and capacitors placement. The study results show that the distribution system with capacitor placement and optimal on/off patterns of the switches, feeders reconfiguration can be load balancing in distribution systems.

Keywords: Feeder Reconfiguration; Load Balancing Index; Distribution System; Capacitor Placement

** Corresponding Author. Tel.: +666 1353 6426, E-mail address: nattachote.r@rmutp.ac.th*

1. บทนำ

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ามีความสำคัญมากโดยระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะเป็นจุดเชื่อมต่อสุดท้ายระหว่างระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้ากับผู้ใช้ไฟฟ้า โดยระบบส่งจ่ายไฟฟ้านั้นเป็นระบบเรเดียล ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย สายป้อนหลักของระบบจำหน่ายจะส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังสถานีย่อยหลายหน่วย สถานีเหล่านี้เป็นแหล่งจ่ายไฟไปยังจุดรับไฟของผู้ใช้ Where large plant areas are involved, จึงจำเป็นต้องมีความน่าเชื่อถือเพื่อความพึงพอใจของผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดเหตุขัดข้องในการจำหน่ายไฟฟ้าจึงมีการจัดเรียงสายป้อนขึ้นเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์เหล่านั้น โดยการจัดเรียงสายป้อนทำได้โดยกำหนดสถานะเปิด-ปิดของทั้งสองสวิตช์ คือ สวิตช์ถ่ายโอน (Ties Switches) และสวิตช์ตัดตอน (Sectionalizing Switches) [1] ผลจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของสวิตช์นั้นยังทำให้รูปแบบการจ่ายไฟคงเดิมแต่ระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีโครงสร้างเปลี่ยนไป ซึ่งการจัดเรียงสายป้อนใหม่นอกจากจะทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวแล้ว ยังช่วยให้มีการส่งพลังงานในเวลาที่เหมาะสมโดยลดเวลาการหยุดดำเนินการ บรรเทาความเสียหายจากสภาวะโอเวอร์โหลด ช่วยประหยัดพลังงานของการผลิตกำลังไฟฟ้าจากการลดกำลังการสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [2]

การจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับปฏิบัติการจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งช่วยให้สามารถจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับลูกค้าได้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยแก้ไขเหตุผิดพร่องและจำกัดเวลาการหยุดดำเนินการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากการบำรุงรักษาระบบ นอกจากนั้นยังสามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและช่วยทำให้โหลดสมดุล โดยวรรณกรรมของการจัดเรียงสายป้อนได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงสายป้อน

วัตถุประสงค์	บทความอ้างอิง
การลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย	(Savier, J. S., 2007) [1]
การเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า	(Kashem, M. A., 2000) [2]
การลดความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์	(Bahadoorsingh, S., 2007) [3]
การนำกำลังไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่	(Zhun, Q. 1994) [4]
การทำให้โหลดสมดุล	(Kashem, M. A., 2000) [5]
ความน่าเชื่อถือสูงสุด	(Kashem, M. A., 1999) [6]
การป้องกันระบบ	(Li, F. 2005) [7]

การจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าคือการดำเนินการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของระบบจำหน่ายโดยการเปลี่ยนสถานะเปิด-ปิดของสวิตช์ถ่ายโอนและสวิตช์ตัดตอน โดยการถ่ายโอนจากปริมาณโหลดที่มากไปยังปริมาณโหลดที่น้อย ซึ่งทำให้โหลดสมดุลและขจัดการเกิดโอเวอร์โหลด โดยใช้ดัชนีโหลดสมดุล (Load Balancing Index: LBI) เพื่อกำหนดเงื่อนไขการสมดุลและความจุสูงสุดของโหลด ซึ่งดัชนีนี้จะต้องมีค่าต่ำที่สุดในการจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสมเพื่อให้โหลดสมดุล

การพัฒนาเทคนิคการจัดเรียงสายป้อนมีอยู่มากมาย เช่น การจัดสรรการสูญเสียพลังงานให้กับผู้บริโภคของระบบจำหน่ายทั้งก่อนและหลังการจัดเรียงสายป้อน [1] การจัดเรียงสายป้อนเพื่อการเพิ่มเสถียรภาพที่สูงที่สุดสำหรับการตั้งค่าของโหลดในระบบจำหน่าย [2] การใช้วัฏจักรเชิงพันธุกรรมซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดเรียงสายป้อนเพื่อแก้ไขแรงดันตกและยังสามารถลดความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งทำการทดลองกับระบบจำหน่าย 295 บัส [3] การจัดเรียงสายป้อนเพื่อนำกำลังไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่และทำให้โหลดสมดุลในสภาพแวดล้อมตามเวลาจริง [4] เทคนิคการวัดระยะทาง (Distance Measurement

Technique: DMT) ช่วยให้โหลดสมดุลและมีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยทดลองกับแบบจำลองของระบบจำหน่าย 69 บัส แบบเรเดียล [5] การประเมินความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลโดยพิจารณาลำดับการฟื้นฟูและขีดจำกัดของระบบ [6] และการจัดเรียงสายป้อนเพื่อประสานงานกับอุปกรณ์ป้องกัน [7]

บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายและการกำหนดตำแหน่งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงรายละเอียดแรงดันเพื่อทำให้โหลดสมดุล โดยใช้การค้นหาแบบตาบูมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งที่ดีที่สุดของการเปิด-ปิดสวิตช์เพื่อหาค่าดัชนีโหลดสมดุลต่ำสุด โดยวิธีที่นำเสนอนี้ประมวลผลด้วยแบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส

2. วิธีการศึกษา

การจัดเรียงสายป้อนของระบบจำหน่ายแบบเรเดียลมีข้อดีและรายละเอียดดังนี้

2.1 การลดความสูญเสียกำลังไฟฟ้า

การจัดเรียงสายป้อนใหม่ทำได้โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายป้อนโดยการเปลี่ยนแปลงสถานะเปิด-ปิดของสวิตช์ตัดตอนและสวิตช์ถ่ายโอนช่วยให้ทำการถ่ายโอนจากโหลดหนักไปยังโหลดเบา เช่น การถ่ายโอนโหลดที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงรายละเอียดแรงดันไฟฟ้า เพื่อลดการสูญเสียพลังงานของระบบ การจัดเรียงสายป้อนจะดำเนินการโดยการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการดำเนินงานเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ หรือลดการสูญเสียในสายขณะที่ยังคงการจ่ายโหลดดังเดิม [1]

2.2 การเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า

ปกติรูปแบบการส่งจ่ายกำลังงานในระบบจำหน่ายเป็นแบบเรเดียล เมื่อเวลาผ่านไปจำเป็นต้องการมีปรับเปลี่ยนโครงสร้างของการจ่ายกำลัง โดยเปลี่ยนสถานะเปิด-ปิดของสวิตช์ถ่ายโอนและสวิตช์ตัดตอนจากโหลดหนึ่งไปยังอีกโหลดหนึ่งเพื่อปรับปรุงสภาพการทำงานของระบบทั้งหมด ซึ่งจะช่วยปรับปรุงรายละเอียดแรงดันไฟฟ้าและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ [2]

นอกจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ถ่ายโอนและสวิตช์ตัดตอนแล้ว การควบคุมตัวเก็บประจุยังช่วยให้สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงและปรับปรุงรายละเอียดแรงดันไฟฟ้า โดยการจัดเรียงสายป้อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการไหลเวียนของพลังงานที่ใช้งานในระบบในขณะที่การควบคุมตัวเก็บประจุจะช่วยลดกระแสไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาในระบบ โดยทั้งสองวิธีดังกล่าวจะมีคุณสมบัติและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน แต่สิ่งที่สำคัญคือคุณสมบัติเหล่านี้จะช่วยเสริมความแข็งแกร่งซึ่งกันและกัน ดังนั้นเมื่อรวมเอาวิธีการจัดเรียงสายป้อนและวิธีการควบคุมตัวเก็บประจุเข้าด้วยกันจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่าย

2.3 การลดความสูญเสียทางเศรษฐศาสตร์

ปัจจัยสำคัญของระบบจำหน่ายคือจัดสรรกำลังไฟฟ้าให้กับลูกค้า ดังนั้นวิศวกรต้องออกแบบระบบจำหน่ายที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ประหยัดที่สุด โดยการออกแบบต้องมั่นใจว่าเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้า การหยุดชะงักของแรงดันไฟฟ้า และสูญเสียกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งหากสามารถทำได้ดังที่กล่าวมาจะช่วยลดค่าไฟของลูกค้าและลดต้นทุนการผลิตสำหรับผู้ผลิต [3-4]

2.4 การนำกำลังไฟฟ้ากลับมาให้บริการใหม่

การนำกำลังไฟฟ้ากลับมาให้มาบริการใหม่ให้กับผู้ใช้ไฟเมื่อเกิดไฟฟ้าดับอันเนื่องมาจากการเกิดฟอลต์โดยการจัดเรียงสายป้อน ซึ่งยังสามารถใช้สำหรับวางแผนเพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมของระบบในระหว่างขั้นตอนของการวางแผนทั้งหมด [5]

2.5 การทำให้โหลดสมดุล

การจัดเรียงสายป้อนเพื่อให้โหลดสมดุลจะช่วยบรรเทาการเกิดโอเวอร์โหลดในระบบ โดยการถ่ายโอนโหลดหนึ่งไปยังอีกโหลดหนึ่งเพื่อปรับปรุงสภาวะการทำงานของระบบทั้งหมด ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดได้ตลอดเวลา โดยระบบจำหน่ายจะมีโหลดหนักบางช่วงเวลาและโหลดเบาในเวลาอื่น ๆ สำหรับโหลดสมดุล โหลดจะต้องมีการเลื่อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดโดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างสายป้อนในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยต้องพิจารณาถึงความจำเป็นของปัญหาที่เกิดขึ้นในวงจรและความไม่สมดุลของโหลด รายละเอียดโครงสร้างจำลอง และความยุ่งยากในการคำนวณ [6]

2.6 ความน่าเชื่อถือสูงสุด

ความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีหลักการสำคัญคือการออกแบบและวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างประหยัด จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้สม่ำเสมอต่อเนื่องและเวลาการหยุดจ่ายน้อยที่สุด [7-8]

หนึ่งในมาตรการเพื่อเสริมสร้างความน่าเชื่อถือของระบบในการวางแผนการจัดจำหน่ายและดำเนินการคือการลดเวลาในการฟื้นฟูระบบหลังจากความล้มเหลวที่เกิดขึ้น ซึ่งเวลาฟื้นฟูขึ้นอยู่กับลำดับการสลับสวิตช์ซึ่งสามารถกำหนดได้จากที่ตั้งและขนาดของสวิตช์ การเพิ่มประสิทธิภาพของลำดับการฟื้นฟูจะเริ่มจากการปรับปรุงระบบ ความน่าเชื่อถือของจุดโหลดและการพิจารณาประเมินความน่าเชื่อถือ

การจัดเรียงสายป้อนใหม่จะมีส่วนช่วยลดการสูญเสียพลังงานที่แท้จริงของระบบ แต่ในความเป็นจริงอาจมีโหลดที่เพิ่มขึ้นและความผิดพลาดที่ไม่คาดคิดปรากฏขึ้นซึ่งจะสร้างปัญหาด้านความปลอดภัย ซึ่งระบบรักษาความปลอดภัยมีความสำคัญอย่างมากในระบบจำหน่าย เนื่องจากเป็นสิ่งที่ช่วยรักษารายละเอียดแรงดันที่ดีและเป็นการจำกัดกระแสภายในสาย ดังนั้นกลยุทธ์ที่ดีที่สุดคือหลีกเลี่ยงการเกิดโอเวอร์โหลดโดยเพิ่มความปลอดภัยของการถ่ายโอนโหลดไปยังโหลดที่เบา นอกจากนี้การเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันยังเป็นการรักษาความปลอดภัยได้อีกทางหนึ่ง

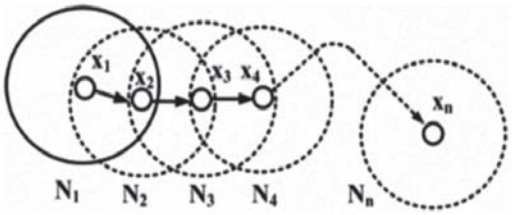
อุปกรณ์ป้องกันจะต้องประสานงานอย่างถูกต้องเพื่อลดการหยุดชะงักของการจำหน่ายไฟฟ้ากรณีเมื่อเกิดฟอลต์ขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ป้องกันประกอบด้วยค่าสูงสุด/ต่ำสุดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ขนาดของฟิวส์ คันโยกรีเลย์ เป็นต้น เนื่องจากการกำหนดค่าของอุปกรณ์ที่ไม่ซ้ำกัน มนุษย์จึงมีบทบาทสำคัญในการตัดสินกฎเกณฑ์การทำงานของระบบ

2.7 การค้นหาแบบตาบู

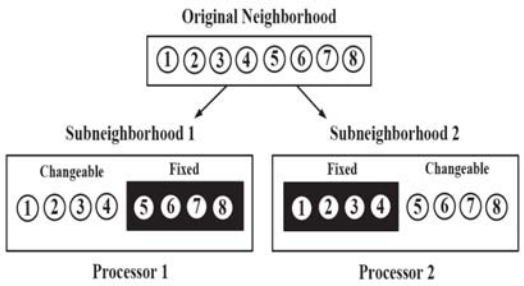
การค้นหาแบบตาบู (Tabu Search: TS) คำว่า Tabu มีความหมายว่า “ต้องห้าม” ดังนั้นในองค์ประกอบของตาบู จึงประกอบไปด้วยสถานะต้องห้ามหรือองค์ประกอบที่ไม่สามารถใช้งานได้อยู่ด้วย และเปลี่ยนไปตามเวลาหรือสถานะต่าง ๆ ของระบบที่พิจารณาจนกระทั่งได้คำตอบที่ถูกต้องเหมาะสมที่สุด ดังไดอะแกรมแนวคิดของตาบู ซึ่งแสดงในรูปที่ 1

TS เป็นขั้นตอนวิธีการคิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาของระบบที่เรียกว่าปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถูกสร้างขึ้นมาโดยกลไกการสืบเชื้อสายที่จะย้ายไปยังค่าที่ต่ำกว่าค่าเป้าหมาย ซึ่งมีความสามารถในการหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น และยังสามารถทำการค้นหาคำตอบต่อไปจนกระทั่ง ให้คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบวงกว้าง

คำตอบใกล้เคียง (Neighborhood) คือขั้นตอนการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดในละแวกใกล้เคียง จากนั้นจะเลือกคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน โดยประเมินคำตอบจากค่ารอบข้างเหล่านั้น แล้วจึงเลือกคำตอบที่ดีที่สุดเพื่อมาเป็นคำตอบใหม่ต่อไป [9] ดังไดอะแกรมในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการค้นหาทิศทางของตาบู



รูปที่ 1 แนวคิดของตาบู

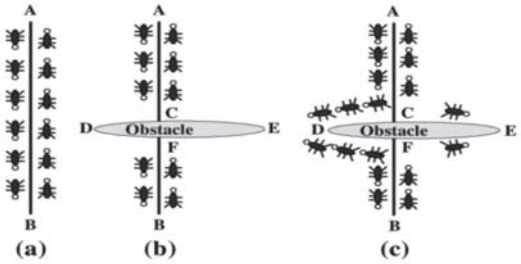


รูปที่ 2 การค้นหาทิศทางของตาบู

การค้นหาแบบตาบู ถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการหารูปแบบเปิด-ปิดของสวิตช์ตัดตอนและสวิตช์ถ่ายโอนเพื่อให้มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารวมต่ำที่สุด รวมทั้งมีค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุด [10]

2.8 การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมมด

การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมของมด (Ant Colony Optimization: ACO) เป็นการเลียนแบบพฤติกรรมของมดที่มีความสามารถหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการหาแหล่งอาหารและนำกลับไปรังในเส้นทางที่ไม่ซ้ำกัน มีความสามารถในการปรับตัวตามสภาพแวดล้อม นอกจากนี้มดสามารถสร้างเส้นทางที่สั้นที่สุดผ่านสื่อที่เรียกว่า “ฟีโรโมน” เพื่อทำให้เส้นทางใด ๆ ที่ตนเองต้องการซึ่งอุดมไปด้วยฟีโรโมนกลายเป็นเส้นทางเป้าหมาย โดยรูปที่ 3 (a) แสดงกรณีที่มดลำเลียงอาหารจากจุด A ไปยังจุด B เป็นเส้นทางตรง รูปที่ 3 (b) แสดงกรณีเมื่อเกิดอุปสรรคขึ้นทำให้เส้นทางถูกตัดออก มดจึงไม่สามารถลำเลียงอาหารตามเส้นทางเดิมได้ ซึ่งสถานการณ์ เช่นนี้มีความเป็นไปได้ที่มดจะลำเลียงไปทางซ้ายหรือขวา และรูปที่ 3 (C) แสดงกรณีที่มดเดินทางด้วยเส้นทาง A-C-D-F-B ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเส้นทางช่วง CDF (ซ้าย) มีจำนวนฟีโรโมนมากกว่าเส้นทางช่วง CEF (ขวา) [11]



รูปที่ 3 ตัวอย่างพฤติกรรมของมด

ในการจัดเรียงสายป้อนใหม่นั้นโดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยอาณานิคมมดนั้น เป็นวิธีการเลือกตำแหน่งสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดโดยเช่นเดียวกับการที่มดกำหนดฟีโรโมนในเส้นทางที่เข้มที่สุด

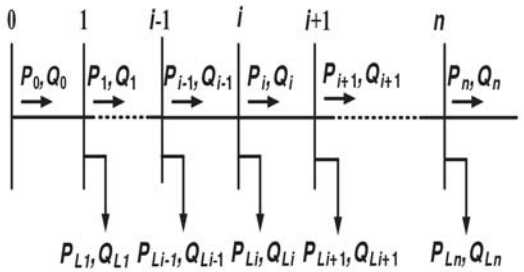
2.9 การอบอ่อนจำลอง

แนวคิดของการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะแล้วปล่อยให้เย็นลง เพื่อให้เปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่มีพลังงานภายในน้อยที่สุด ทำให้โลหะมีคุณสมบัติที่แข็งแรง และทนทานการอบอ่อนสามารถแก้ปัญหาที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ได้รับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง มีรูปแบบกระบวนการทำงานแบบวนซ้ำจนกว่าจะได้คำตอบที่พอใจ เป็นการค้นหาคำตอบแบบเดี่ยว จะเก็บคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเอาไว้เพื่อเปรียบเทียบผล แล้วมองหาคำตอบใหม่ที่ดีกว่าเดิมจากคำตอบใกล้เคียง ถ้าไม่มีคำตอบใกล้เคียงที่ดีกว่าก็จะทำการคำนวณความน่าจะเป็นของการยอมรับคำตอบนั้น โดยเวลาในการค้นหาคำตอบอาจไม่เหมาะสมในการใช้งานจริง [12] โดยการประยุกต์ใช้การอบอ่อนจำลองในการจัดเรียงสายป้อนนั้นทำได้โดยการกำหนดสถานะของสวิตช์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อค้นหาค่ากำลัง

ไฟฟ้าสูญเสียที่น้อยที่สุดจากการเพิ่มอุณหภูมิของการอบโลหะ

2.10 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

การไหลของกำลังไฟฟ้ามีความสำคัญอย่างมากในการค้นหาความสัมพันธ์ของบัสต่างๆ ในการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งพิจารณาจากแบบจำลองเส้นเดี่ยวดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองของสายป้อนหลัก

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} - R_{i,j+1}\left[\frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2}\right] \quad (1)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} - X_{i,j+1}\left[\frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2}\right] \quad (2)$$

$$|V_{i+1}|^2 = V_i^2 - 2\,(R_{i,i+1}P_i + X_{i,i+1}Q_i) + (R^2_{i,i+1} + X^2_{i,i+1})\left[\frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2}\right] \quad (3)$$

การสูญเสียพลังงานของสายที่เชื่อมต่อระหว่างบัส *i* และ *i*+1 อาจคำนวณเป็น

$$P_{Loss}(i, i+1) = R_{i,i+1}\left[\frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2}\right] \quad (4)$$

โดยที่

P_i, Q_i = กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ ณ บัส **i**

V_i = แรงดันของบัส **i**

$R_{i,i+1}$ = ความต้านทานของช่วงสายระหว่างบัส **i** และ **i** +1

$X_{i,i+1}$ = Reactance ของช่วงสายระหว่างบัส **i** และ **i** +1

2.11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่าดัชนีโหลดสมดุล คือ ค่าระดับของโหลดของสายป้อน ซึ่งใช้เป็นตัวแปรเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์สำหรับการแก้ปัญหาและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ [11] สามารถแสดงโดยการลดค่าดัชนีโหลดสมดุลดังในสมการที่ (5)

$$Min\ LBI = \Sigma L_k \left(\frac{|I_{k,t}|}{I_k^{max}}\right)^2 \quad (5)$$

โดยที่

B = ชุดของการสร้างเครือข่ายสาขา

L_K = ระยะทางของสาขา k

$I_{k,t}$ = ความจุกระแสของสาขา k สำหรับรูปแบบการจัดเรียงสายป้อน t

I_K^{max} = ความจุกระแสสูงสุดของสาขา k

วัตถุประสงค์ของสมการที่ 5 ต้องอยู่ภายใต้ข้อเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1) สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

2) ขนาดแรงดันแต่ละบัสมีขีดจำกัดดังสมการที่ (6)

$$V_{\min} \le |V_i| \le V_{\max} \quad (6)$$

3) ขีดจำกัดความสามารถของสายป้อน

$$|I_k| \le I_{k,\max} : k \in \{1, 2, 3, ...1\} \quad (7)$$

4) รูปแบบของการจัดเรียงสายป้อนเป็นแบบเรเดียล

5) ทุกจุดโหลดในระบบจำหน่ายต้องไม่เกิดไฟฟ้าดับ

โดยที่

V_i = แรงดันที่บัส

V_{min}, V_{max} = แรงดันต่ำสุดและสูงสุด

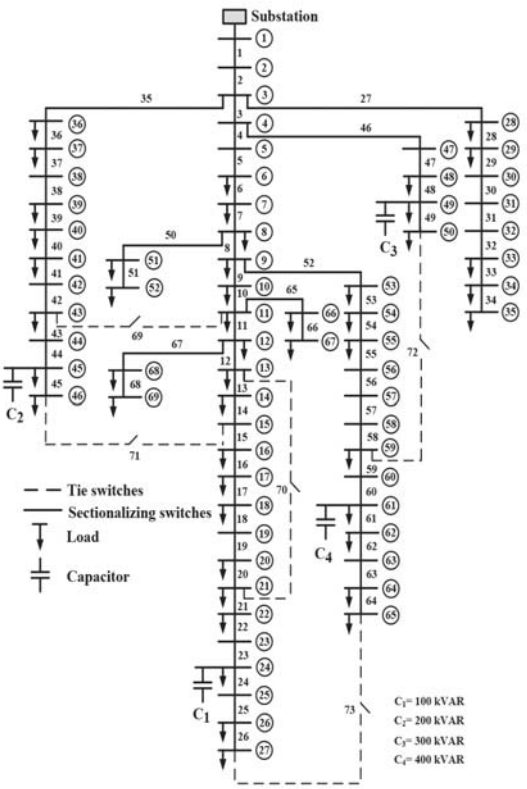
Ik = กระแสที่ไหลในสาขา

$Ik_{,max}$ = ความจุกระแสสูงสุดในสาขา

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การทดสอบใช้ระบบจำหน่าย 69 บัส 12.66 kV แบบเรเดียลดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ความสามารถในการรองรับกระแสของสาขาหมายเลข 1-9 เท่ากับ 400 A หมายเลข 46-49 และ 52-64 เท่ากับ 300 A สาขาอื่น ๆ ที่เหลือรวมทั้งสายตัดตอนเท่ากับ 200 A ซึ่งแต่ละสาขาในระบบจะมีสวิตช์ถ่ายโอนเพื่อวัตถุประสงค์ในการจัดเรียงใหม่และข้อมูลโหลดดังแสดงใน [13] กำหนดตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุที่บัส 24, 45, 49 และ 61 โดยมีค่าความจุขนาด 100, 200, 300 และ 400 kVar ตามลำดับ

การกำหนดค่าเริ่มต้นการทำงานของสวิตช์ตัดตอน กำหนดให้สวิตช์หมายเลข 1-68 ปิดทั้งหมด ในขณะที่สวิตช์ถ่ายโอน กำหนดให้สวิตช์หมายเลข 69-73 อยู่ในสถานะเปิดทั้งหมด ผลรวมโหลดจากการทดสอบระบบเท่ากับ 3,801.89 kW และ 2,694.10 kVar ประยุกต์วิธีการค้นหาแบบตาบู เพื่อใช้หาโครงสร้างที่เหมาะสมของระบบ โดยที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดตั้งไว้ที่ 0.95 และ 1.05 p.u. และการวนรอบของวิธีการหาแบบตาบู เท่ากับ 100 รอบ



รูปที่ 5 การทดสอบการจัดเรียงสายป้อนระบบจำหน่าย 69 บัสแบบเรเดียลและตำแหน่งการติดตั้งตัวเก็บประจุ

กรณีศึกษาสำหรับการจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสมสำหรับค่าดัชนีโหลดสมดุลในระบบจำหน่ายได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2 การประมวลผลทดสอบด้วยเทคนิคที่นำเสนอได้สรุปผลการทดสอบไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 กรณีศึกษาเพื่อโหลดสมดุลในระบบจำหน่าย

กรณีศึกษา	จัดเรียงสายป้อนใหม่	ติดตั้งตัวเก็บประจุ
1	-	-
2	✓	-
3	-	✓
4	✓	✓

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ

รายการทดสอบ	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
สวิตช์ตัดตอนที่เปิด	-	13, 20, 58, 63	-	14, 20, 52, 61
สวิตช์ถ่ายโอนที่ปิด	-	70, 71, 72, 73	-	70, 71, 72, 73
ค่าดัชนีโหลดสมดุล (LBI)	2.949	2.197	1.821	1.796
แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	0.909	0.948	0.921	0.956
กำลังไฟฟ้าสูญเสียรวม (kW)	224.68	105.65	154.48	108.94

จากผลการทดสอบทั้ง 4 กรณีศึกษาแสดงให้เห็นว่า กรณีที่ 1 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าและ LBI มีค่าสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าที่บัสต่ำสุดโดยไม่ถึงเกณฑ์ที่กำหนดคือไม่อยู่ในช่วง 0.95-1.05 p.u. โดยในกรณีที่ 2 ค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดคือ 105.65 kW แต่พบว่าแรงดันไฟฟ้าไม่ถึง 0.95 p.u. โดยในกรณีที่ 4 บรรลุวัตถุประสงค์ทั้งหมด คือ LBI มีค่า 1.796 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.956 p.u. และผลรวมค่าความสูญเสียกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 108.94 kW ซึ่งต่างจากกรณีที่ 2 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4. สรุป

เมื่อทำการทดสอบการจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสมสำหรับค่าดัชนีโหลดสมดุลในระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ จากการประมวลผลแสดงให้เห็นว่า เทคนิคการค้นหาแบบตาบู สามารถช่วยให้ค้นหาผลเฉลยสถานะของสวิตช์ถ่ายโอนและสวิตช์ตัดตอนที่ทำให้ค่าดัชนีโหลดสมดุลมีค่าต่ำที่สุดได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคที่นำเสนอว่ามีประโยชน์ในการใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการวางแผนและการดำเนินงานในระบบจำหน่าย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. S. Savier and D. Das, “Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2473-2480. 2007.

[2] M. A. Kashem, V. Ganapathy and G. B. Jasmon, “Network reconfiguration for enhancement of voltage stability in distribution networks,” *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 147, no. 3, pp. 171–175, May. 2000.

[3] S. Bahadoorsingh, J. V. Milanovic, Y. Zhang, C. P. Gupta and J. Dragovic, “Minimization of voltage sag costs by optimal reconfiguration of distribution network using genetic algorithms,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2271–227, Oct. 2007.

[4] A. Thongplaw and N. Rugthaicharoencheep, “Power quality assessment of distribution system in the industry area,” *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 127-140, Mar. 2016.

[5] Q. Zhun, D. Shirmohammadi and W. H. E. Liu, “Distribution feeder reconfiguration for service restoration and load balancing,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 724-729, May. 1997.

[6] M. A. Kashem, V. Ganapathy and G. B. Jasmon, "Network reconfiguration for load balancing in distribution networks," *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 6, pp. 563–567, Nov. 1999.

[7] F. Li, "Distributed processing of reliability index assessment and reliability-based network reconfiguration in power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 230-238, Feb. 2005.

[8] N. Rugthaicharoencheep, "Placement of distributed generation for reliability in distribution system," *RMUTP Research Journal*, vol. 10, no. 2, pp.148-156, Sep. 2016.

[9] Y. Hsuy and Y. J. hwu, "Planning of distribution feeder reconfiguration with protective device coordination," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1340–1347, July. 1993.

[10] H. Mori and Y. Ogita, "Parallel tabu search for capacitor placement in radial distribution system," in *Proceeding of Power Engineering Society Winter Meeting*, Singapore, pp. 2334-2339. 2000.

[11] C. F. Chang, "Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 1747-1755, Nov. 2008.

[12] L. G. Santander and et. al., "Minimal Loss Reconfiguration Based on Simulated Annealing Meta-Heuristic," in *Proceedings of 15th International Conference on Electronics, Communications and Computers*, Puebla, Mexico, 2005, pp. 95-99.

[13] G. Pepionis, and M. Papadopoulos, "Reconfiguration of radial distribution networks: application of heuristic methods on large-scale networks," *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 6, pp. 631-638, Nov. 1995.