



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

**ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มี
เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจายตัวที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวลผลิตไฟฟ้าตามฤดูกาลเชื่อมต่ออยู่**

**Economic value of distribution network reconfiguration connected with seasonal
biomass-based distributed generator**

คมสันต์ ดาโรจน์*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัด
อุบลราชธานี 34190

Komson Daroj*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani
34190

* Corresponding author.

E-mail: komsond@yahoo.com; Telephone: 0 4535 3326

วันที่รับบทความ 27 สิงหาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 22 ตุลาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 11 พฤศจิกายน 2566

วันที่ตอบรับบทความ 14 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการประเมินประโยชน์ที่ได้จากการลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในสายป้อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV ที่มีโรงไฟฟ้า
กระจายตัวไม่รวมศูนย์ของโรงงานน้ำตาลที่ใช้เชื้อเพลิงกากอ้อยเชื่อมต่ออยู่ วิธีที่นำเสนอจะมีการจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าใหม่
แยกอิสระจากกันระหว่างฤดูกาลผลิตและนอกฤดูกาลผลิตน้ำตาลโดยใช้องค์ความรู้ผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้สถานีไฟฟ้าย่อยในพื้นที่ของการไฟฟ้า
ส่วนภูมิภาคเขต 2 เป็นกรณีศึกษา และใช้ข้อมูลโหลดรายปีที่ได้จากการวัด ณ สถานีไฟฟ้าย่อยมาสังเคราะห์และสร้างเป็นแบบจำลองโหลดราย
ชั่วโมงทั้งในและนอกฤดูกาลผลิตน้ำตาล ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าการใช้สวิตช์เปลี่ยนโครงสร้างสายป้อนมีผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์สูงกว่าวิธีการ
ปรับปรุงระบบอย่างมีนัยสำคัญจากค่าผลตอบแทนที่ใกล้เคียงกันแต่มีต้นทุนที่ต่ำกว่า วิธีการที่นำเสนอจะมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อมีโรงไฟฟ้าชีว
มวลที่ผลิตไฟฟ้าตามฤดูกาลเพิ่มมากขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ

การจัดเรียงสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าใหม่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระจาย การลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย องค์ความรู้ผู้เชี่ยวชาญ

Abstract

This paper proposed the benefits of reducing real power loss of a 22 kV distribution system connected with a
Distributed Generator of a sugar cane factory, which used bagasse as fuel, by using the Distribution Network Reconfiguration
(DNR). The proposed DNR is performed separately between the seasonal and off-seasonal of producing sugar using
knowledge based of the experts. The substation in the north-eastern region area 2 of the Provincial Electricity of Authority
(PEA) is used as a test system. In addition, the hourly load model is synthesized from the substation's record data
between the seasonal and off-seasonal of producing sugar. The obtained results showed that the economic value of
reconfiguring obtained from using the installed tie switches has more significant benefits than improving the distribution

network. Additionally, the reduced losses are closed but investment is significant lower. The proposed methodology is more important under the increasing of seasonal biomass-based DG in the future.

Keywords

distribution network reconfiguration; distributed generator; energy loss reduction; specialized knowledge-based

1. คำนำ

การจัดเรียงสายป้อนใหม่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า หมายถึง ปัญหาการปรับปรุงโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าปฐมภูมิ (primary distribution system) ให้เหมาะสม [1] - [11] อันเนื่องมาจาก i) การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจปกติที่ทำให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในสายป้อนแต่ละเส้นเพิ่มขึ้นด้วยสัดส่วนที่ต่างกันทำให้เกิดปัญหาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในสายป้อนบางเส้นเพิ่มสูงมาก ii) เพื่อรองรับแผนการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากการเพิ่มวงจรสายป้อนใหม่ หรือจากก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยใหม่ ซึ่งจำเป็นต้องมีการย้ายโหลดจากวงจรเดิมมาสู่วงจรสายป้อนใหม่ [1] iii) เพื่อรองรับการเพิ่มขึ้นของโรงไฟฟ้ากระจายตัวไม่รวมศูนย์หรือเทคโนโลยีอื่นที่ทำให้ปัญหา DNR (Distribution Network Reconfiguration) เปลี่ยนไปจากเดิม [4] - [11] และนอกจากนี้ iv) ยังอาจรวมถึงความจำเป็นอันเนื่องมาจากมีปัญหาค่าคุณภาพแรงดันไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล แรงดันกระเพื่อม และปัญหาความเชื่อถือได้ (reliability) เกิดขึ้นในสายป้อนเดิม เช่น จากการมี DG เชื่อมต่อในระบบ จนทำให้ต้องย้ายโหลดบางส่วนจากสายป้อนนี้ไปรับไฟจากสายป้อนอื่น หรือแม้แต่การก่อสร้างสายป้อนใหม่เพื่อรับซื้อไฟจาก DG [7], [12] DNR ที่เกิดขึ้นเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าอย่างเดียวย่อมไม่นับรวมในปัญหา DNR ประเภท i) - iii) เนื่องจากเป็นเงื่อนไขที่ต้องดำเนินการเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพแรงดันไฟฟ้าซึ่งมักจะละเลยความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

โดยพื้นฐาน DNR จัดเป็นปัญหาในระดับกระบวนการวางแผนที่สามารถสร้างเป็นรูปแบบปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า “ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization problem)” แล้วจึงทำการค้นหาคำตอบที่เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด โดยองค์ประกอบของปัญหา DNR แบ่งได้เป็น

- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลักเพื่อลดมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบกับงบลงทุนที่ใช้ในโครงการให้มีค่ามากที่สุดภายในกรอบเวลาของโครงการที่พิจารณาประมาณ 5-7 ปี

- ต้องคำนึงถึงเงื่อนไขข้อจำกัดในการคำนวณ เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหลดในระบบต้องอยู่ในเกณฑ์ และโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าหลังดำเนินโครงการยังคงต้องเป็นแบบเรเดียล

- แบบจำลองโหลดที่ใช้ส่วนใหญ่นิยมเป็นแบบจำลองโหลดรายปีที่ต้องสังเคราะห์มาจากข้อมูลโหลดจริงของระบบ

- วิธีการแก้ปัญหาส่วนใหญ่ในรอบ 20 ปีที่ผ่านมา [3], [7] นิยมใช้วิธีการสุ่มและค้นหาคำตอบที่เลียนแบบกลไกทางกายภาพของระบบที่มีอยู่ในธรรมชาติ (metaheuristics method) เช่น การสร้างอาณานิคมของมด (ant colony method) รูปแบบการบินหาอาหารของฝูงนก (particle swarm optimization) วิธีทางพันธุกรรม (genetics algorithm) เป็นต้น นอกจากนี้วิธีการเหล่านี้การใช้ของครุฑของผู้เชี่ยวชาญที่มีความคุ้นเคยกับการวางแผนในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยลดภาระการคำนวณ สามารถรองรับเงื่อนไขข้อจำกัดในทางปฏิบัติ โดยที่ผลการคำนวณที่ได้ยังคงสามารถใช้งานได้

จากรูปแบบปัญหา DNR ที่มีสาเหตุหรือเป้าหมายที่แตกต่างกัน ทำให้วิธีการดำเนินการแตกต่างกันไปด้วย ในกรณีปัญหา DNR รูปแบบ i) ที่มาสาเหตุมาจากการใช้งานโหลดที่เพิ่มขึ้นมากในสายป้อนบางเส้น จนทำให้ต้องมีการกระจายโหลดใหม่ในกลุ่มสายป้อนที่พิจารณาให้สมดุลมากขึ้น มักนิยมใช้สวิตช์ที่มีการติดตั้งเดิมในระบบทั้งสวิตช์แบบปกติเปิด (NO, tie switch) และ สวิตช์แบบปกติปิด (NC, sectionalizer) เพื่อจัดโครงสร้างระบบใหม่รวมถึงอาจจะมีการก่อลงทุนก่อสร้างกิ่งแยก หรือ กิ่งแยกย่อยรวมทั้งสวิตช์เพิ่มเติม อย่างไรก็ตามการลงทุนติดตั้งสวิตช์ในระบบจำหน่ายโดยพื้นฐานมีไว้เพื่อปรับปรุงดัชนีความเชื่อถือได้ SAIDI (System Average Interruption Duration Index) ในระบบ จากการณีเมื่อเกิดเหตุผิดปกติในสายป้อนหลักหรือกิ่งแยกสำคัญจะได้ตัดแยกส่วนวงจรที่ผิดปกติออกจากระบบได้แบบกระชับพื้นที่ที่

พร้อมให้แคบ แล้วสามารถนำสายป้อนหลังจุดติดพร้อมไปรับไฟจากสายป้อนอื่นได้โดยการต่อสวิตช์แบบ NO ให้ปิดวงจรลง

ในกรณี DNR ประเภทที่ ii) แบ่งได้เป็น 2 กรณีย่อย โดยในกรณีแรกจะพิจารณาให้มีสายป้อนเพิ่มขึ้นในระบบจากการลงทุนตู้สวิตช์เกียร์เพิ่มขึ้นในสถานีไฟฟ้าย่อยและลงทุนก่อสร้างสายป้อนเพิ่มเติมบางส่วนในระบบ โดยแผนการดำเนินการทั้งหมดสามารถจัดเป็นปัญหา DNR แบบมีการคำนึงถึงสายป้อนเพิ่มในระบบก่อนที่จะมีการกระจายโหลดใหม่ในกลุ่มสายป้อนที่พิจารณา ส่วนกรณีที่สองปัญหาจะขยายกว้างและมีความซับซ้อนขึ้นมากเนื่องจากการเป็นลงทุนก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งใหม่มาพร้อมกับการก่อสร้างสายป้อนเพิ่มเติมบางส่วนก่อนที่จะไปแบ่งรับโหลดในพื้นที่เดิมให้มีการกระจายอย่างเหมาะสมตามเป้าประสงค์ที่พิจารณา การดำเนินการในกรณีนี้ผู้วางแผนนิยมใช้โปรแกรมช่วยวางแผนในระบบไฟฟ้า เช่น NEPLAN หรือ DigSilent คำนวณผลคร่าวๆ ก่อนที่จะใช้อองค์ความรู้ความเข้าใจที่มีต่อระบบเพื่อหาเส้นทางก่อสร้างและตัดจ่ายโหลดใหม่อย่างเหมาะสม

ในบทความนี้จะได้ประเมินผลกระทบของโรงไฟฟ้ากระจายตัวไม่รวมศูนย์ (Distributed Generators; DG) ของโรงงานน้ำตาลภายใต้โครงการผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก (Very Small Power Producer; VSPP) ที่ส่งผลกระทบต่อพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เพิ่มขึ้นในระบบ และจะได้ประเมินแนวทางแก้ปัญหา DNR แบบแยกอิสระจากกันในระหว่างฤดูการผลิตและนอกฤดูการผลิตน้ำตาล การประเมินรูปแบบทางเลือกการจัดเรียงสายป้อนใหม่ที่เหมาะสมจะใช้องค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแห่งหนึ่งของสถานีไฟฟ้าย่อยในพื้นที่ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 2 ที่มี DG ขายไฟตามสัญญา 1x5 MW เชื่อมต่ออยู่ ร่วมกับการใช้ข้อมูลโหลดจริงรายปีที่ได้จากการวัดมาสังเคราะห์และสร้างเป็นแบบจำลองโหลดรายชั่วโมงทั้งในและนอกฤดูการผลิตน้ำตาลเป็นกรณีศึกษา ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ได้จากวิธีการที่นำเสนอสามารถลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ วิธีการที่นำเสนอจะมีความสำคัญมากขึ้นโดยเฉพาะเมื่อมีโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ผลิตไฟฟ้าตามฤดูกาลขายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้นในอนาคต

2. ทฤษฎีและประเด็นที่เกี่ยวข้อง

2.1 การขายไฟของ DG โรงงานน้ำตาล

สัญญาซื้อขายไฟฟ้าจากโรงงานน้ำตาล (power purchase agreement) ที่ดำเนินการในโครงการผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก (Very Small Power Producer: VSPP) เริ่มขายไฟเข้าสู่ระบบตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบันมีทั้งสิ้น 52 โครงการ กำลังไฟฟ้าตามสัญญาระหว่าง 2 – 8 MW โดยมีจำนวนถึง 30 โครงการที่มีกำลังไฟฟ้า 8 MW คิดเป็นกำลังการผลิตไฟฟ้ารวมที่ขายตามสัญญา 346.02 MW

สำหรับโรงงานน้ำตาลขนาดใหญ่ สามารถแบ่งรอบการดำเนินการในแต่ละปีได้เป็น

□ ฟังก์ชันวัตถุดิบน้ำตาลทรายแดง ระหว่างเดือนธันวาคม – มีนาคม โดย DG สามารถขายไฟเข้าสู่ระบบโดยใช้ชานอ้อยบางส่วนที่เกิดจากการที่บ่น้ำอ้อย และเก็บชานอ้อยส่วนที่เหลือไว้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าเมื่อสิ้นสุดฤดูกาล

□ ฤดูผลิตน้ำตาลทรายขาว ในช่วงระหว่างเดือนเมษายน – กรกฎาคม ซึ่งเป็นช่วงปิดหีบผลิตน้ำตาลทรายขาวโดย DG จะขายไฟเข้าสู่ระบบโดยใช้เชื้อเพลิงชานอ้อยที่สะสมในระหว่างฤดูผลิตน้ำตาลทรายแดง

□ ฤดูซ่อมบำรุงเครื่องจักร ในช่วงระหว่างเดือนสิงหาคม – พฤศจิกายน ซึ่งเป็นช่วงซ่อมบำรุงเครื่องจักรหลังจากที่ใช้งานมาตลอด 8 เดือน เพื่อเตรียมเปิดหีบสำหรับฤดูกาลหน้า โดย DG หยุดขายไฟเข้าสู่ระบบ แต่จะรับซื้อไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงาน

2.2 ผลกระทบของ DG ต่อพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

ผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าจาก DG ที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กำลังการผลิตไฟฟ้าและตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบปริมาณโหลดและการกระจายโหลดในสายป้อน เป็นต้น ในทางทฤษฎีอาจกล่าวได้ว่าถ้า DG จ่ายกำลังการผลิตไฟฟ้าไม่สูงมากกว่าโหลดในระบบและตำแหน่งการเชื่อมต่ออยู่บริเวณกลุ่มโหลด จะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีแนวโน้มลดลงได้แม้ในช่วงเวลาที่โหลดในระบบน้อยจะมีกำลังไฟฟ้าไหลย้อนกลับจากสายป้อนเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อย ในทางตรงกันข้ามถ้า DG จ่ายกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงมากกว่าโหลดในระบบและตำแหน่งการเชื่อมต่ออยู่บริเวณปลายสายป้อน ก็อาจทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบมี

แนวโน้มสูงขึ้นได้มากเนื่องจากจะมีพลังงานไฟฟ้าไหลย้อนกลับจากสายป้อนเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อยเป็นปริมาณมาก ในการวางแผนอาจประเมินผลกระทบของ DG ที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าสูญเสียได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อย่อยถัดไป

2.3 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า [13]

การวิเคราะห์ปัญหา DNR จะใช้สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ละเลยพลวัตของระบบร่วมกับสมมติฐานการควบคุมระบบอย่างเหมาะสมสอดคล้องกับสภาพของข้อมูลที่ใช้ในการจำลอง เพื่อประเมินพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่สายจำหน่ายของทางเลือกการจัดโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าใหม่ สมการการไหลของกำลังไฟฟ้ามีพื้นฐานการคำนวณจากการสร้างสมการสมดุลกำลังไฟฟ้าที่ทุกบัสในระบบ โดยแบ่งคุณสมบัติของตัวแปรในระบบเป็น ตัวแปรควบคุม (control variables) เช่น แรงดันไฟฟ้าที่บัสจากการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกติฟของคาปาซิเตอร์ การควบคุมแท็ปหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังของสถานีไฟฟ้าย่อย เป็นต้น และตัวแปรสถานะ (state variables) ซึ่งเป็นตัวแปรตามหรือผลลัพธ์ที่ได้จากการควบคุมระบบ ซึ่งมักหมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัสและค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่ทุกๆ บัส จากที่กล่าวมาสามารถเขียนสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบ ณ สภาวะคงตัวดังสมการที่ (1)

$$F(\bar{X}, \bar{U}) = 0 \quad (1)$$

โดย $\bar{X}$ คือ ตัวแปรสถานะของระบบ
 $\bar{U}$ คือ ตัวแปรควบคุมของระบบ

2.4 พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

ผลที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละชั่วโมงของระบบได้ตามสมการที่ (2)

$$P_{loss}^h = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N |V_a| |V_b| |Y_{ab}| \cos(\theta_{ab} - \delta_a + \delta_b) \quad (2)$$

โดยที่ N แทนจำนวนบัสในระบบจำหน่ายไฟฟ้า δ แทนมุมของแรงดันไฟฟ้าที่บัส θ แทนมุมของสมาชิกในเมตริกซ์บัสแอดมิทแตนซ์ของระบบ และอักษรด้วย h แทนค่าชั่วโมงในแบบจำลองโหลดรายชั่วโมง จาก (2) สามารถคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในหนึ่งวันได้ตามสมการที่ (3)

$$E_{loss}^{day} = \sum_{h=1}^{24} P_{loss}^h \quad (3)$$

พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบตลอดทั้งปีเมื่อแบ่งเป็น 3 ฤดูสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4)

$$E_{loss}^{year} = \sum_{s \in \mathcal{Y}} ((E_{loss}^{day, s}) \times T_s) \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) อักษร T แสดงระยะเวลาเป็นชั่วโมงในแต่ละฤดู $\mathcal{Y}$ ซึ่งประกอบด้วยฤดูผลิตน้ำตลทรายแดง ฤดูผลิตน้ำตลทรายขาว และฤดูซ่อมบำรุงเครื่องจักร

2.5 ต้นทุนของปัญหา DNR [12]

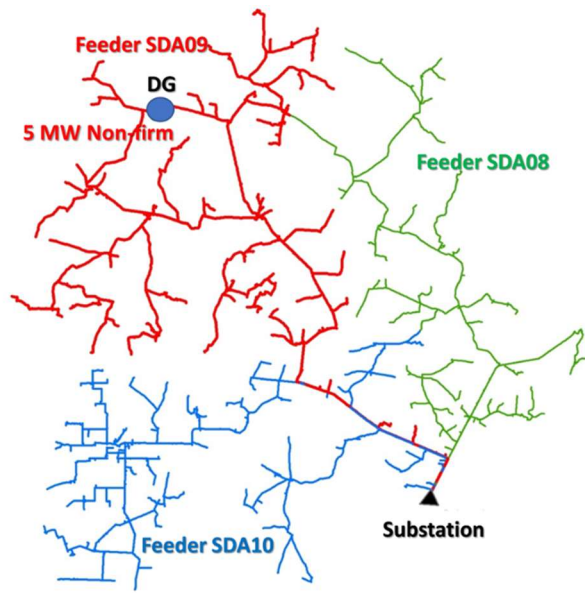
ต้นทุนปัญหา DNR ขึ้นกับรูปแบบการปรับโครงสร้างระบบ โดยแบ่งได้เป็น

- ☐ ดำเนินการปลด/สับสวิตช์ที่มีติดตั้งอยู่แล้วในระบบมีต้นทุน 20,000 บาท/ครั้ง
- ☐ ติดตั้งสวิตช์ใหม่เพิ่มมีต้นทุน 569,470 บาท/ตัว
- ☐ ก่อสร้างสายจำหน่าย ACSR 50 mm² เพิ่มเติมในระบบมีต้นทุน 436,490 บาท/cc-km.
- ☐ ปรับปรุงระบบวงจรของสายจำหน่ายไฟฟ้าจาก 1 เฟส ให้เป็น 3 เฟส ด้วยสาย ACSR 50 mm² มีต้นทุน 67,100 บาท/cc-km.

3. ระบบทดสอบ

ระบบทดสอบ 3 สายป้อนและค่าโหลดแสดงได้ดังนี้

3.1 โครงสร้างระบบทดสอบ



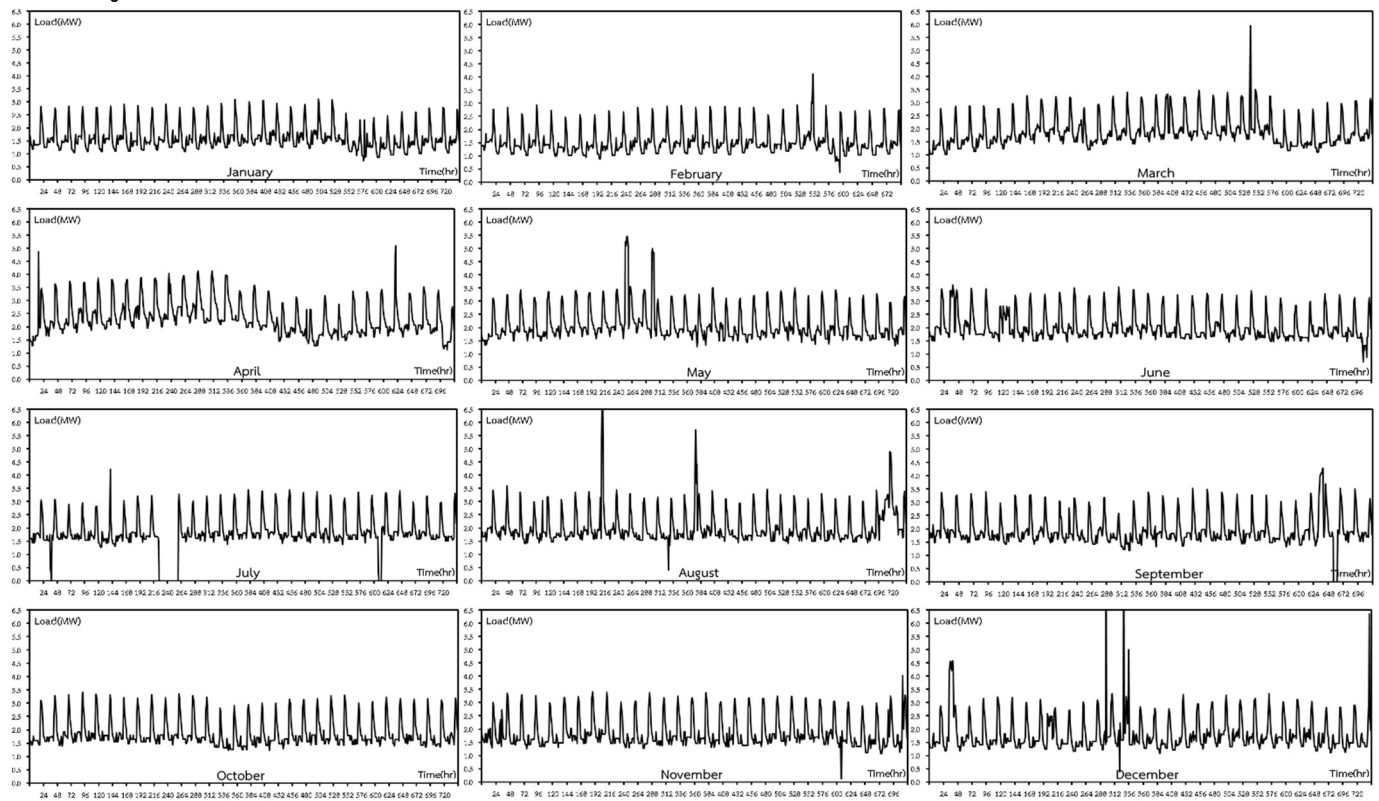
รูปที่ 1 โครงสร้างระบบทดสอบ

3.3 ผลสังเคราะห์ข้อมูลโหลด

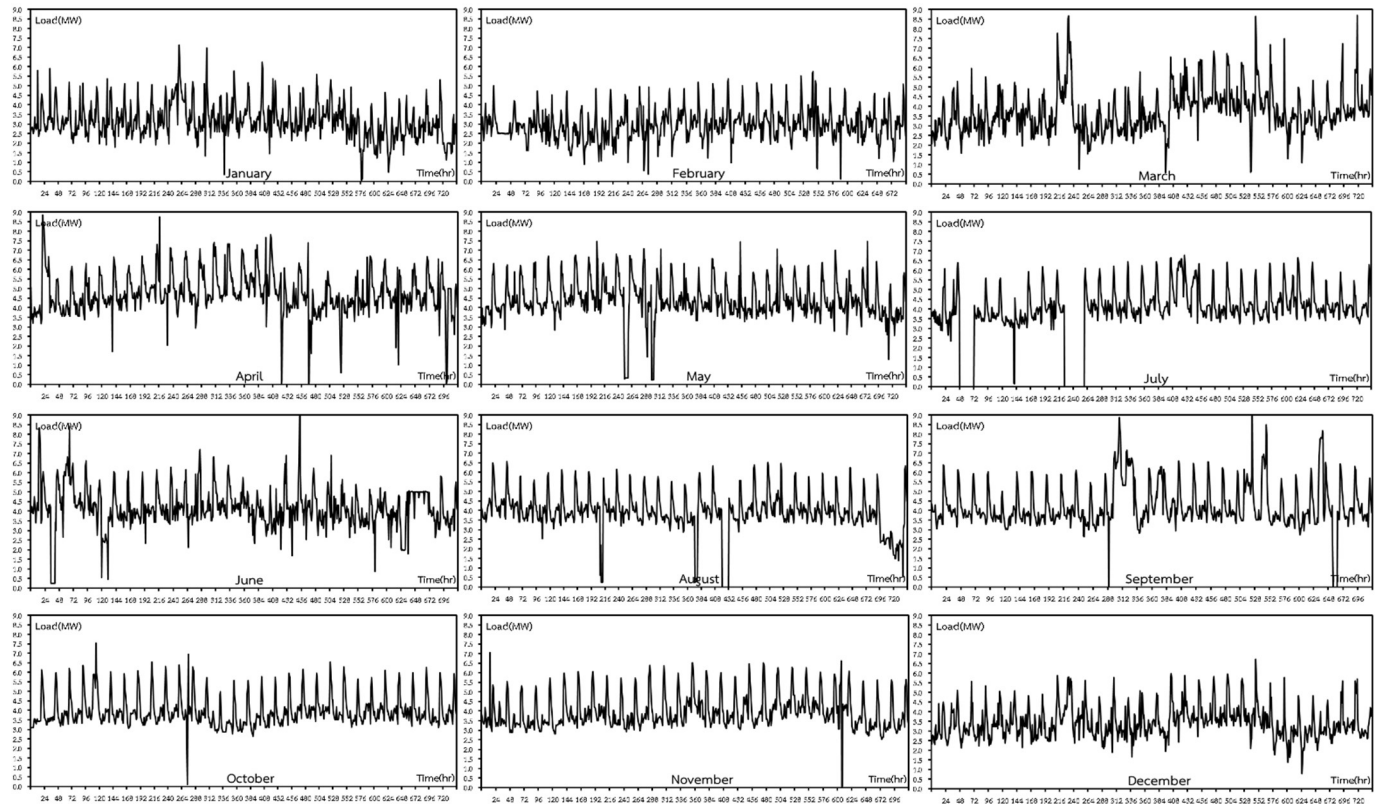
ข้อมูลโหลดที่สังเคราะห์ได้ตามรูปที่ 2 – 4 จะไม่รวมกำลังการผลิตไฟฟ้าของ DG และในวันที่มีความผิดปกติของข้อมูล จะไม่นำมาพิจารณาในแบบจำลองโหลด บทความนี้ได้แบ่งฤดูกาลทำงานของ DG และโหลดในรอบปีเป็น 3 ฤดู ตามลักษณะการทำงานของโรงงานน้ำตาลตั้งที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2 ดังนี้

- Low Load และ DG จ่ายเข้าระบบ: ระหว่างเดือน ธันวาคม – มีนาคม เป็นฤดูที่บอ้อยเพื่อผลิตน้ำตาลทรายแดง โดยโหลดในสายป้อนจะมีค่าไม่สูงมากเนื่องจากอยู่ในช่วงหน้าหนาวย่างเข้าสู่หน้าร้อน
- High Load และ DG จ่ายเข้าระบบ: ระหว่างเดือน เมษายน – กรกฎาคม ค่าโหลดในสายป้อนจะมีค่าสูงมากเนื่องจากอยู่ในช่วงหน้าร้อน

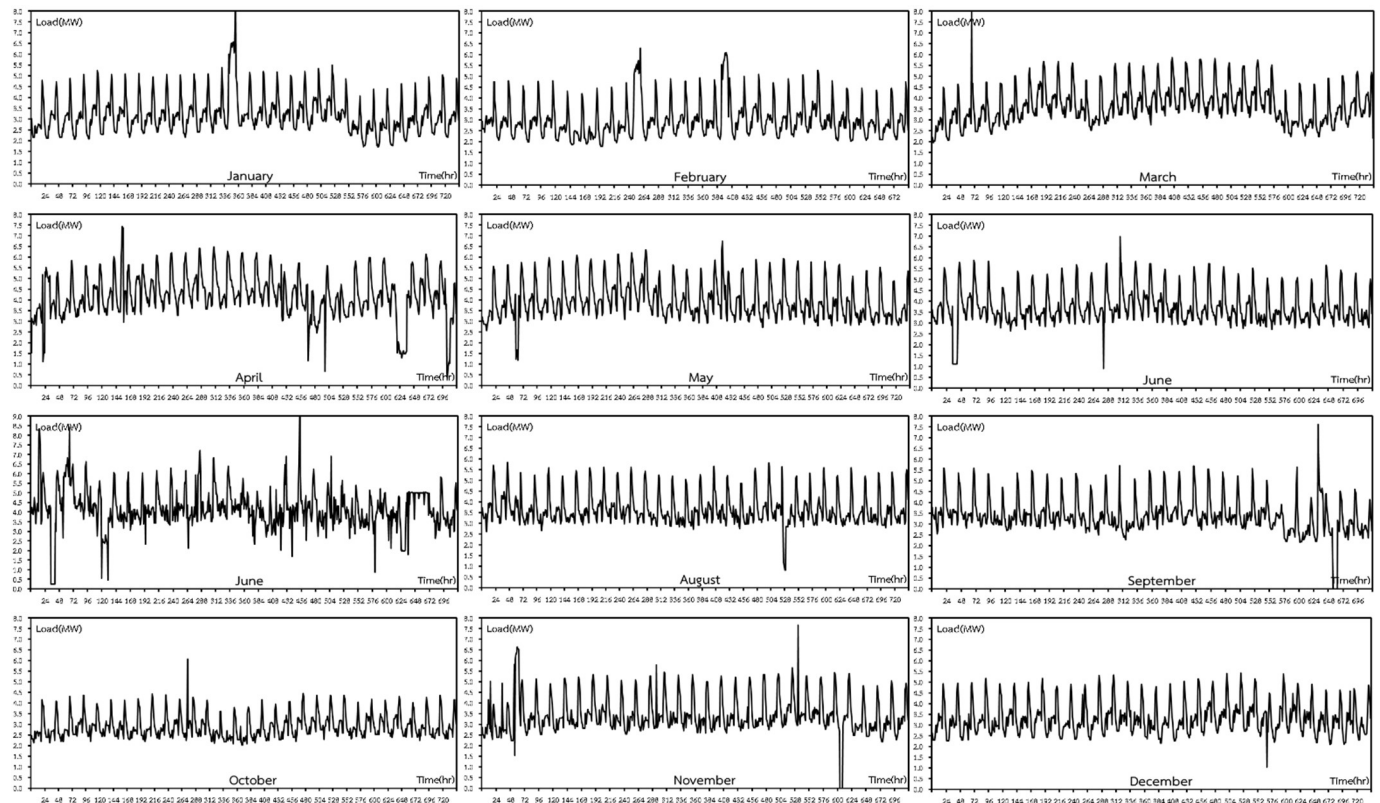
3.2 ข้อมูลโหลด



รูปที่ 2 ข้อมูลโหลดรายเดือนของสายป้อน SDA08

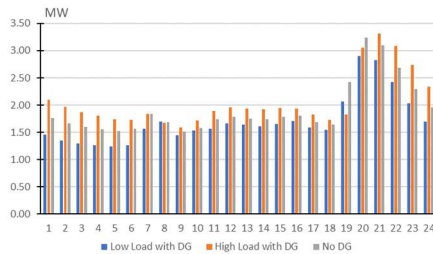


รูปที่ 3 ข้อมูลโหลดรายเดือนของสายป้อน SDA09

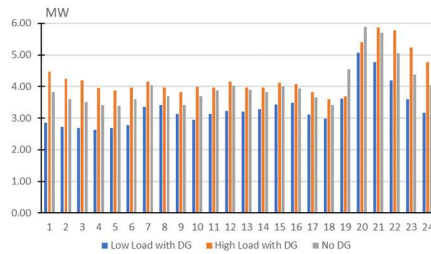


รูปที่ 4 ข้อมูลโหลดรายเดือนของสายป้อน SDA10

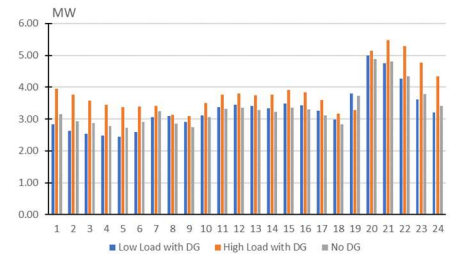
□ DG ไม่จ่ายเข้าระบบ: ระหว่างเดือนสิงหาคม – พฤศจิกายน ซึ่งเป็นช่วงฤดูซ่อมบำรุงเครื่องจักรของโรงงานและเตรียมเปิดหีบสำหรับฤดูกาลหน้า DG หยุดขายไฟเข้าสู่ระบบ



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5 ข้อมูลโหลดในสายป้อน (a) SDA08, (b) SDA09, และ (c) SDA10

4. กระบวนการคำนวณ

4.1 รูปแบบปัญหา DNR

$$\text{Minimize } \left(C_c - (\Delta E_{\text{loss}}^{\text{year}}) \times E_c \right) \quad (5)$$

โดย C_c หมายถึงต้นทุนในการปรับปรุงระบบ 4 กรณีถ้ามีการดำเนินการดัดรายละเอียดที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.5 และ E_c คือต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า 3.08 บาท/kWh โดยคำตอบของสมการที่ (5) ต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

- สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า (1) เป็นจริง
- โครงสร้างของระบบทั้ง 3 สายป้อนยังคงเป็นเรเดียล
- ขนาดแรงดันไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 0.95 – 1.05 p.u.
- โหลดสูงสุดในสายป้อนไม่เกิน 10 MW ตามพิกัดของสาย

4.2 ขั้นตอนการคำนวณ

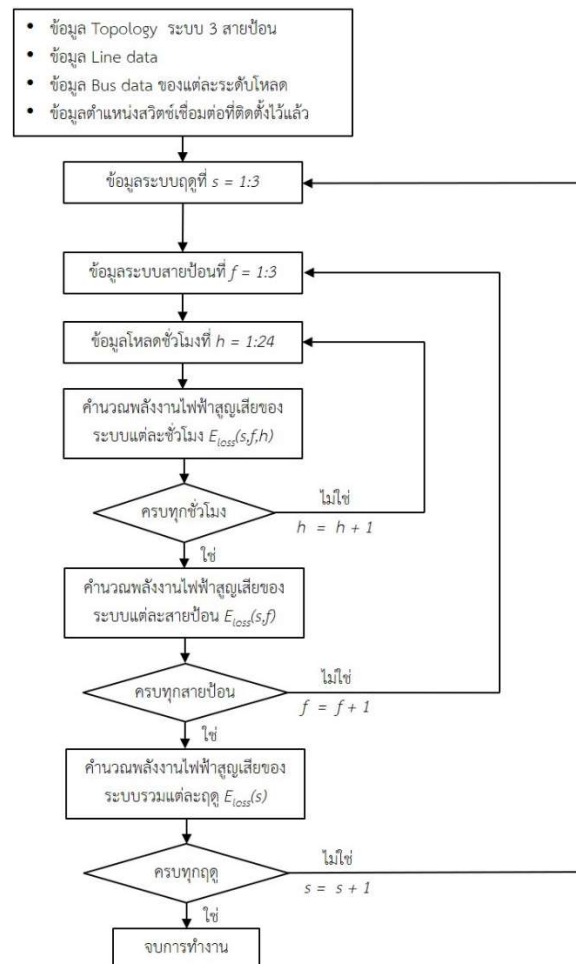
ปัญหา DNR เริ่มจากการนำเข้าสู่ข้อมูลโครงสร้างระบบและข้อมูลโหลดในแต่ละฤดูผลิตและซ่อมบำรุงแล้วคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียตลอดทั้งปีตามที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.4 หรือใช้ขั้นตอนตามรูปที่ 1 ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดของพลังงานสูญเสียในแต่ละสายป้อนในแต่ละฤดูเพื่อใช้เป็นกรณีฐานอ้างอิงก่อนที่จะมีการปรับโครงสร้างระบบ

จากผลที่ได้ในรูปที่ 6 จะดำเนินการค้นหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่ให้ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละฤดูต่ำที่สุดโดยการย้ายโอนโหลดระหว่างสายป้อน SDA08 และ SDA10 ไปยัง

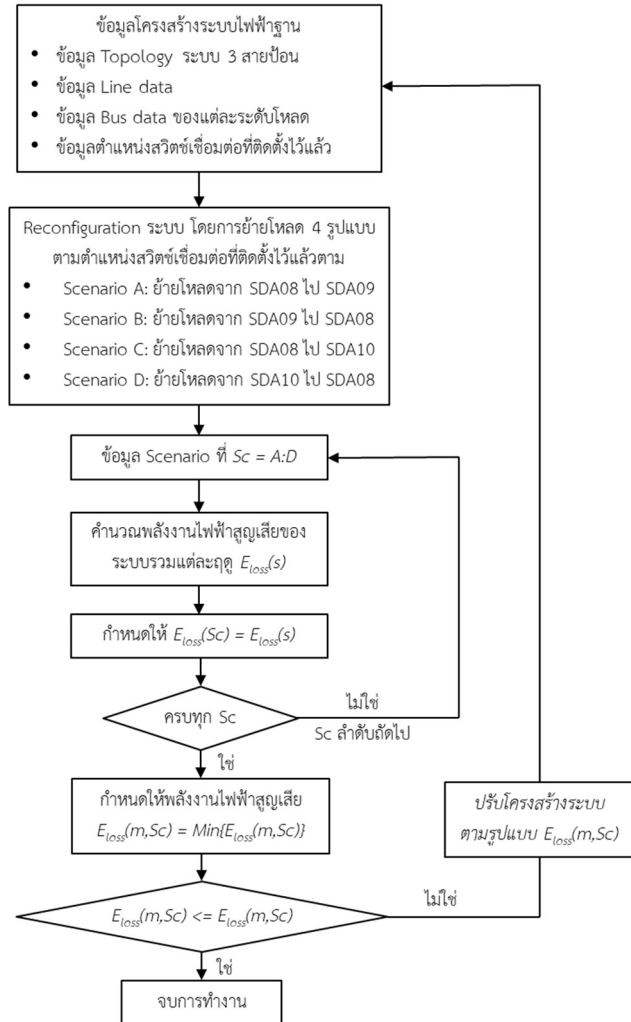
เมื่อใช้เชื้อเพลิงขาน้อยจนหมด และค่าโหลดในสายป้อนจะมีค่าไม่สูงมากเนื่องจากอยู่ในช่วงปลายฝนต้นหนาว

กราฟโหลดที่สังเคราะห์จากค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงของโหลดแต่ละสายป้อนในแต่ละฤดู แสดงได้ดังรูปที่ 5

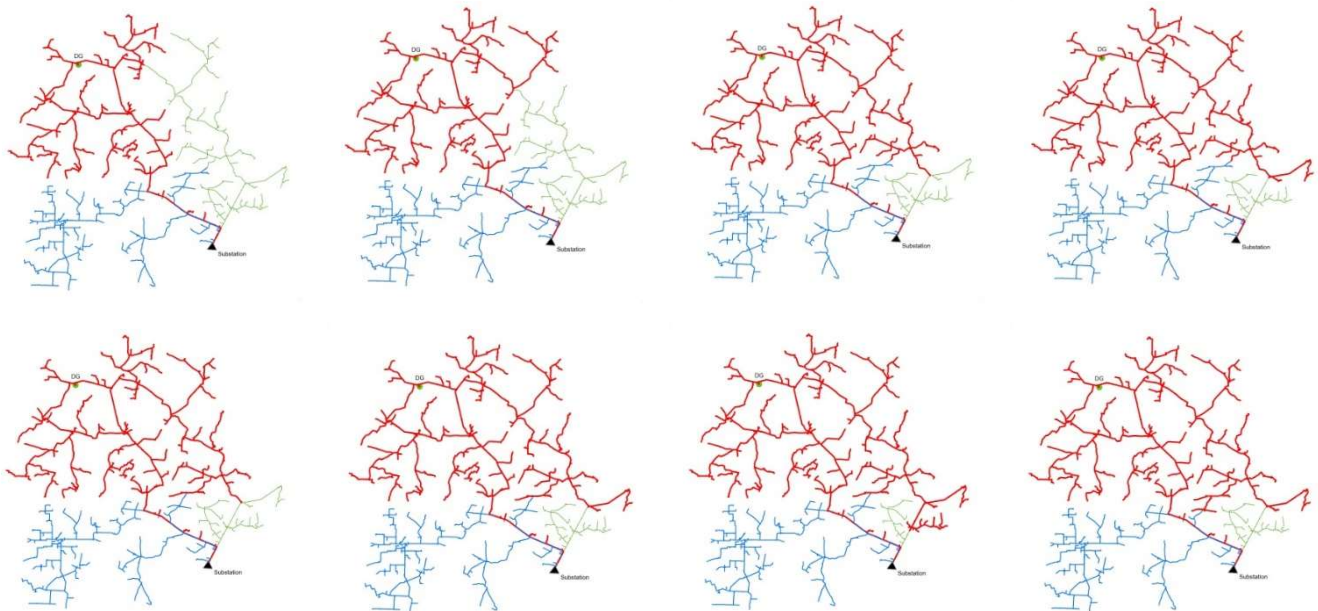
SDA09 รูปแบบ DNR ที่ใช้องค์ความรู้ผู้เชี่ยวชาญจะค้นหาทิศทางที่การย้ายโหลดระหว่างสายป้อนสามารถลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบได้มากที่สุด ซึ่งกระบวนการนี้ต้องดำเนินการทลายรอบจนได้โครงสร้างระบบที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ขั้นตอนการคำนวณพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย



รูปที่ 7 ขั้นตอนการคำนวณปัญหา DNR

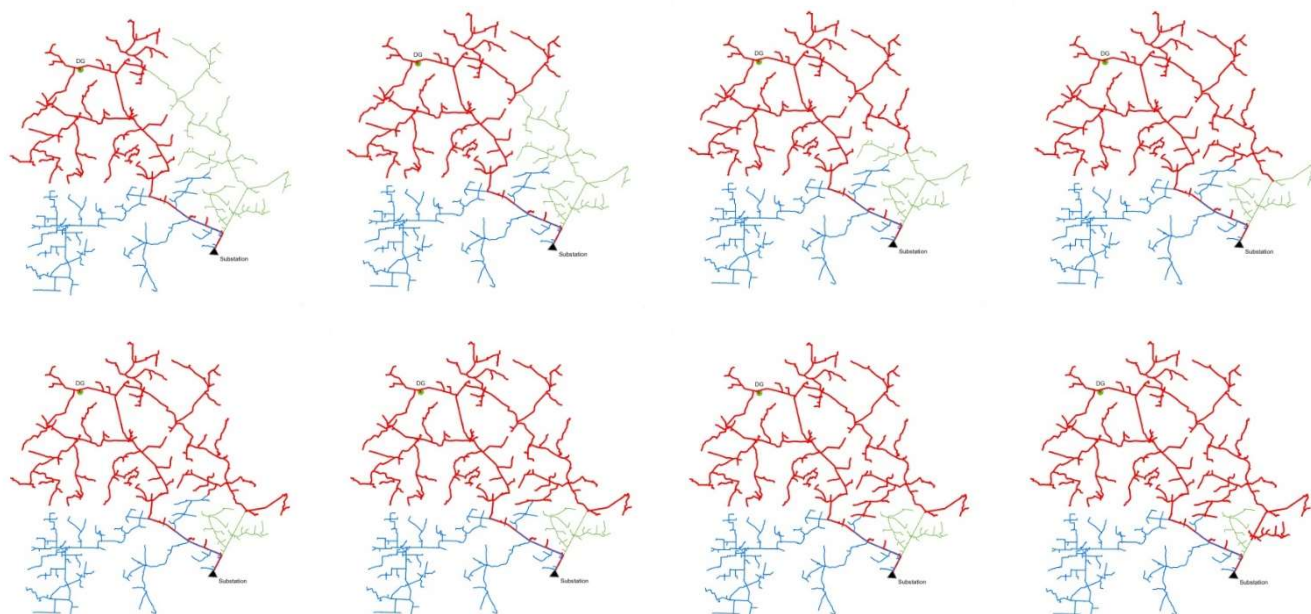


รูปที่ 8 ลำดับขั้นตอน DNR ในฤดูผลิตน้ำตลทรายแดง ระหว่างเดือนธันวาคม - มีนาคม กรณีใช้สวิตช์ติดตั้งอยู่เดิม

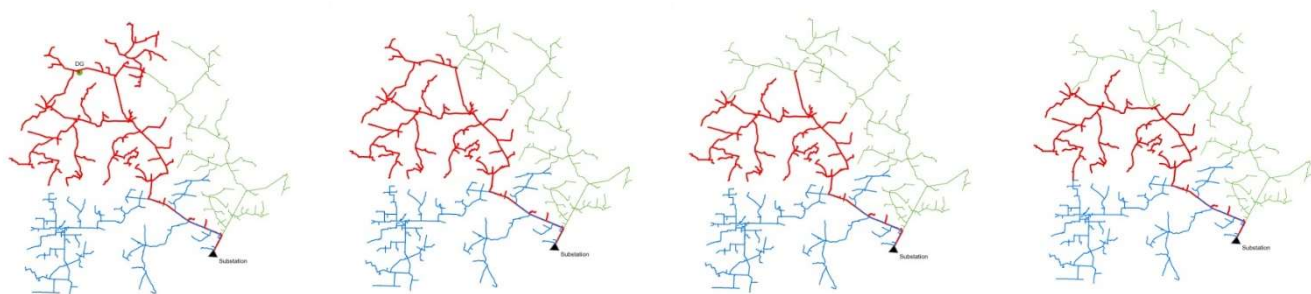
5. ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีหลัก ได้แก่ กรณีที่ใช้สวิตช์ติดตั้งอยู่เดิมและกรณีที่ลงทุนระบบเพิ่มเติมสำหรับกระบวนการ DNR โดยที่ผลการคำนวณในแต่ละกรณีหลักประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ รูปแบบโครงสร้างของระบบจำหน่ายตามลำดับการค้นหาคำตอบดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.2 โดยมีลำดับผลลัพธ์การค้นหาคำตอบเรียงจากซ้ายไปขวาและจากบนลงล่าง พลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นตามลำดับการค้นหาคำตอบ ดังแสดงในรูปที่ 8 - 13 และในตอนท้ายของหัวข้อนี้นี้จะได้กล่าวถึงมูลค่าต้นทุนของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นเมื่อกระบวนการ DNR ลู่เข้าสู่คำตอบแล้วรวมถึงผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี

5.1 ใช้สวิตช์ที่ติดตั้งอยู่เดิม



รูปที่ 9 ลำดับขั้นตอน DNR ในฤดูผลิตน้ำตาทรายขาว ระหว่างเดือนเมษายน – กรกฎาคม กรณีใช้สวิตช์ติดตั้งอยู่เดิม

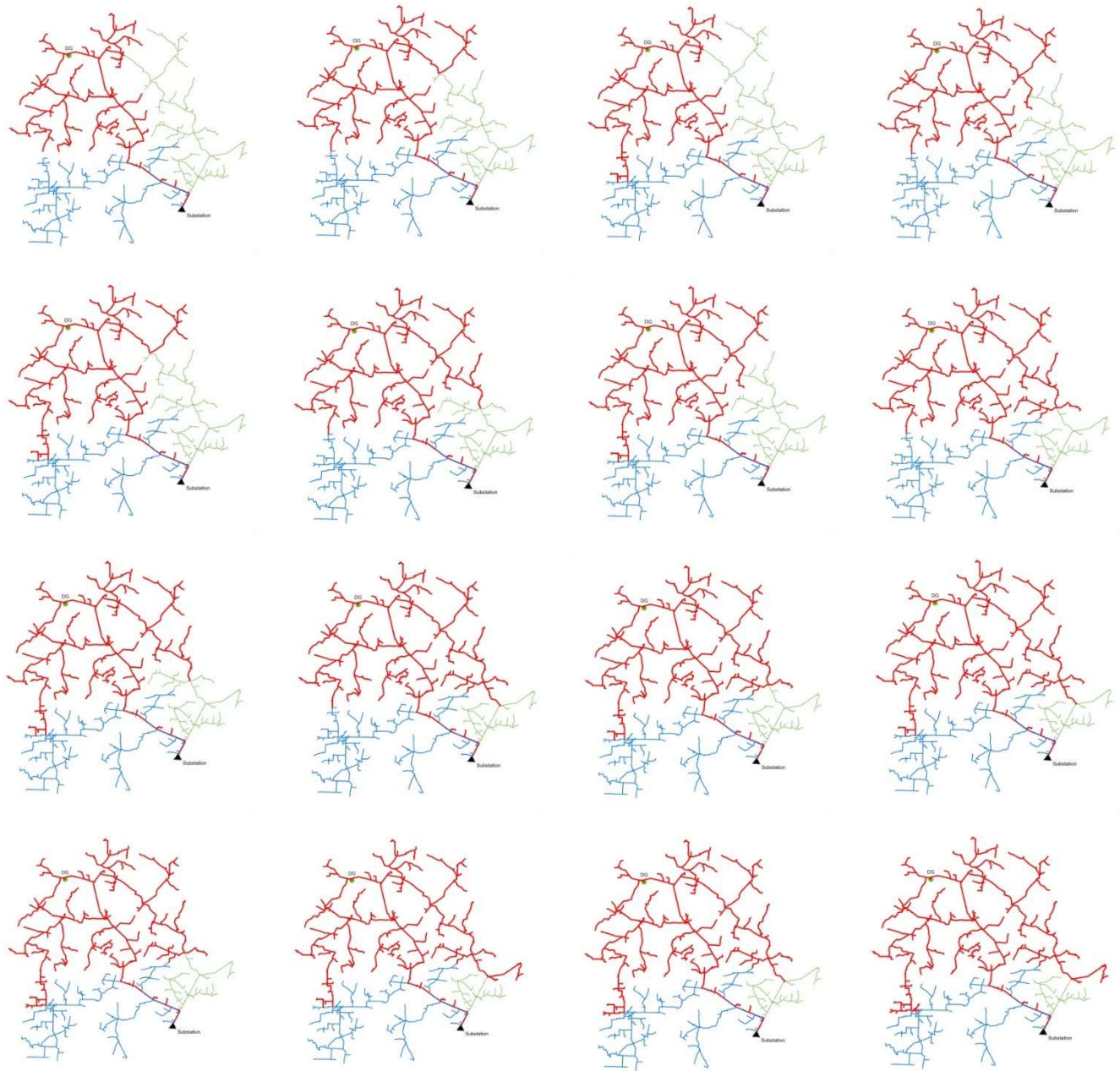


รูปที่ 10 ลำดับขั้นตอน DNR ในฤดูซ่อมบำรุงเครื่องจักร ระหว่างเดือนสิงหาคม – พฤศจิกายน กรณีใช้สวิตช์ติดตั้งอยู่เดิม

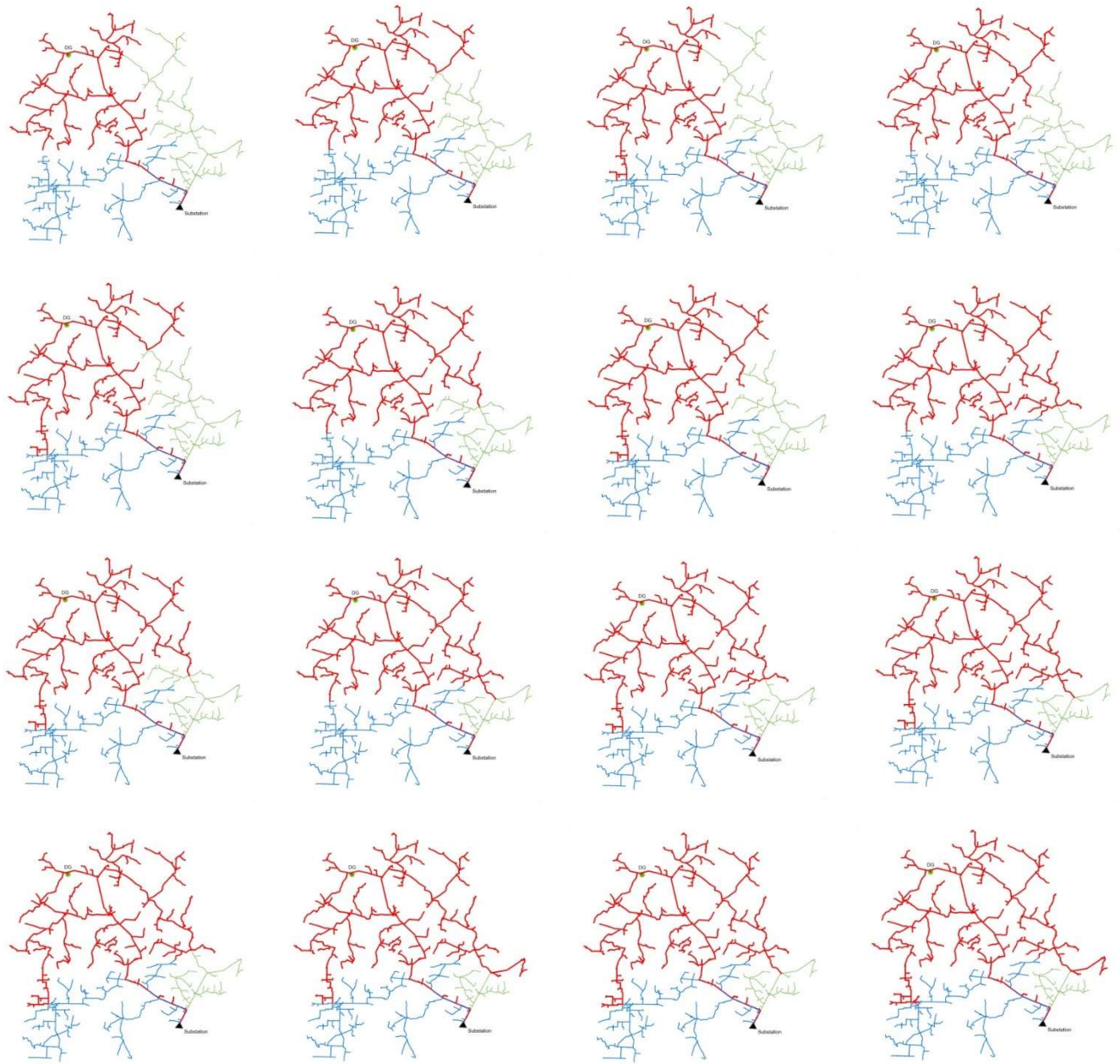
5.2 ลงทุนเพิ่มเติม

จากรูปที่ 8 – 13 พบว่ากรณีที่ 5.2 จะมีจำนวนลำดับขั้นตอนการค้นหาคำตอบในฤดูการที่มี DG เชื่อมต่ออยู่มากกว่ากรณีที่ 5.1 เนื่องจากกรณีนี้มีการลงทุนติดตั้งสวิตช์และ

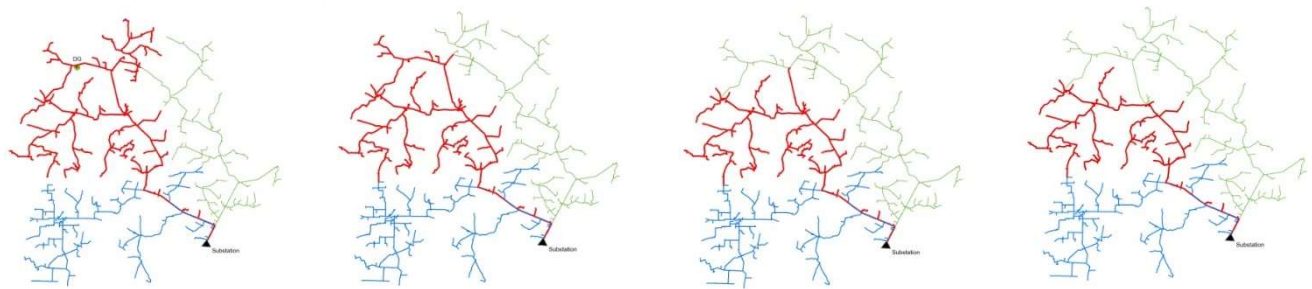
เชื่อมโยงสายจำหน่ายเพิ่มเติม พลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 11 ลำดับขั้นตอน DNR ในฤดูผลิตน้ำตาลทรายแดง ระหว่างเดือนธันวาคม - มีนาคม กรณีลงทุนระบบเพิ่มเติม



รูปที่ 12 ลำดับขั้นตอน DNR ในฤดูผลิตน้ำตาทรายขาว ระหว่างเดือนเมษายน - กรกฎาคม กรณีลงทุนระบบเพิ่มเติม



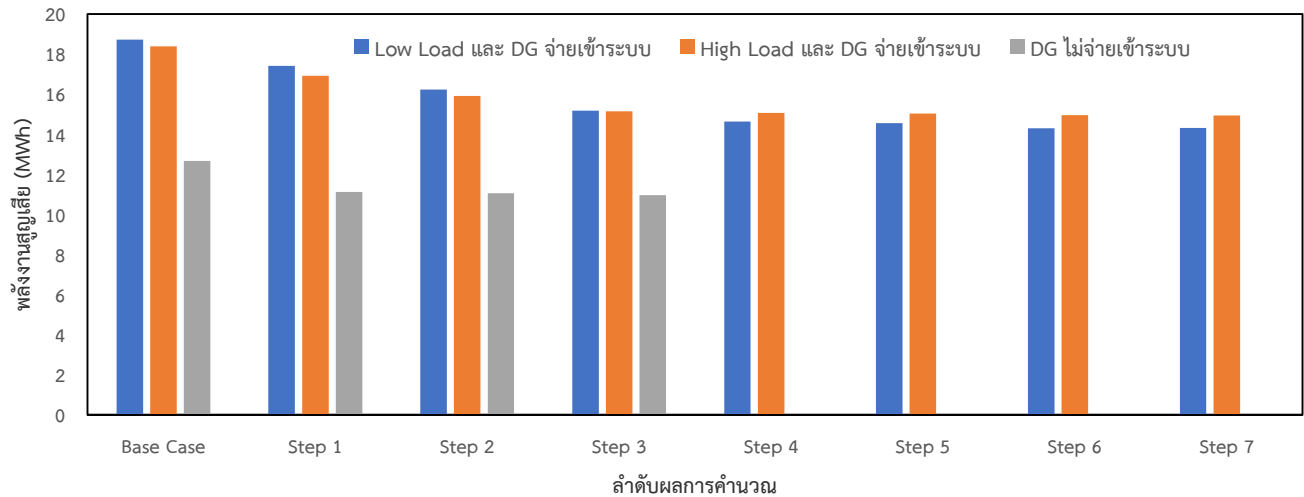
รูปที่ 13 ลำดับขั้นตอน DNR ในฤดูซ่อมบำรุงเครื่องจักร ระหว่างเดือนสิงหาคม - พฤศจิกายน กรณีลงทุนระบบเพิ่มเติม

5.3 พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

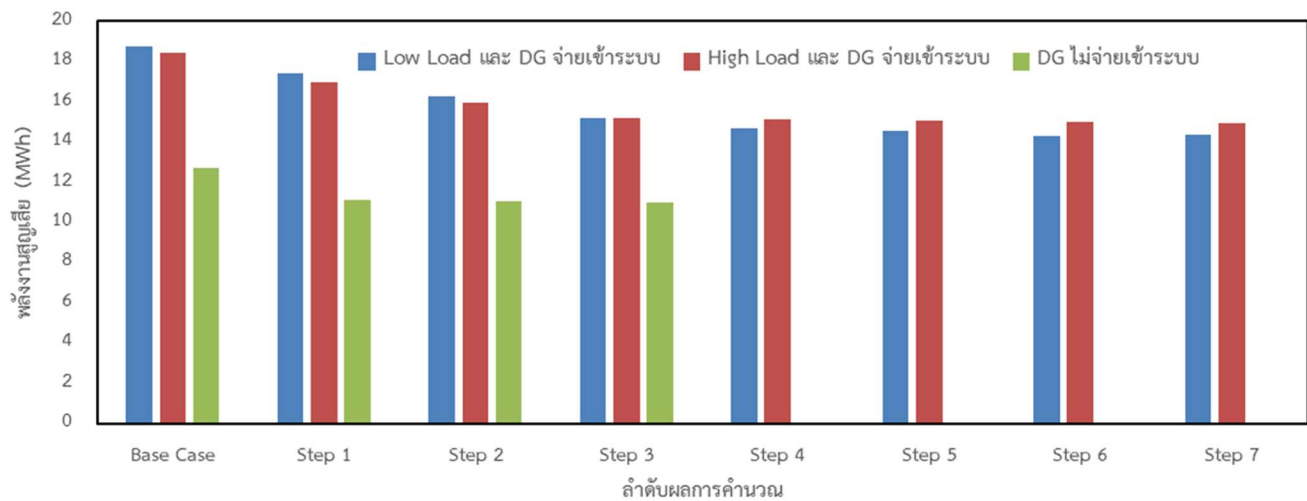
ผลการคำนวณพลังงานไฟฟ้าสูญเสียกรณี 5.1 และ 5.2 แสดง

ได้ดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ ผลการคำนวณค่าที่เหมาะสม

ที่สุดตามสมการที่ (5) สรุปผลได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 14 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียแต่ละฤดูกาลตามลำดับผลการคำนวณกรณีที่ใช้สวิตช์ติดตั้งอยู่เดิม



รูปที่ 15 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียแต่ละฤดูกาลตามลำดับผลการคำนวณกรณีที่มีการลงทุนระบบเพิ่มเติม

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย

กรณี	Case	พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (kWh/day)		
		กรณีฐาน	ปรับโครงสร้างระบบใหม่	ลดลง
1	Low Load with DG	18,722.20	14,430.12	4,292.08
2	High Load with DG	18,385.55	14,929.43	3,456.12
3	No DG	12,663.31	11,050.12	1,613.19
4	Low Load with DG (Add Switch)	18,722.20	14,285.54	4,436.66
5	High Load with DG (Add Switch)	18,385.55	14,722.30	3,663.25
6	No DG (Add Switch)	12,663.31	11,050.12	1,613.19

5.4 ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์

การดำเนินการปรับเปลี่ยนโครงสร้างระบบจำหน่ายในกรณีที่ใช้สวิตช์ที่มีการติดตั้งอยู่แล้วในระบบมีต้นทุนค่อนข้างน้อยจากการส่งเจ้าหน้าที่ไปดำเนินการปลด/สับสวิตช์ ในกรณี

ที่มีการปรับปรุงระบบด้วยองค์ความรู้ผู้เชี่ยวชาญพบว่าต้องมีการถ่ายโอนโหลดระหว่างสายป้อน SDA09 และ SDA10 จึงจะทำให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้มากที่สุด กรณีศึกษาในบทความนี้ประมาณการต้นทุนการปรับปรุงระบบแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ต้นทุนในการดำเนินการและปรับปรุงระบบ

ลำดับ	ภาระงาน	ต้นทุน (Baht/cc-km.)	ระยะทาง (km.)	เงินลงทุน (บาท)
1	ก่อสร้างระบบไฟฟ้าเชื่อมโยง (สาย 50ACSR)	436,490	1.3	567,437
2	ปรับปรุงระบบไฟฟ้า สาย 50ACSR (1to 3Phase)	67,100	2.9	194,590
3	ติดตั้งโหลดเบรกสวิตช์ SF 6	-	-	569,470
4	Operate switch (ครั้ง/ปี)	-	-	20,000

เมื่อใช้ต้นทุนพลังงานไฟฟ้า 3.6199 บาท/kWh ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาครับซื้อพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV สามารถประเมินความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ

ปรับเปลี่ยนโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทั้งกรณีที่มีการใช้สวิตช์เดิมที่ติดตั้งในระบบอยู่แล้วและกรณีลงทุนก่อสร้างสายป้อนใหม่เพื่อเชื่อมสายป้อน SDA09 และ SDA10 ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ

กรณี	รูปแบบการปรับโครงสร้างใหม่	พลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง (kWh/ปี)	มูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลง (บาท/ปี)	ต้นทุน (บาท)
1	Use installed switch	1,138,969.12	4,122,954	40,000
2	Add switch	1,181,761.50	4,277,854	1,371,497

6. สรุปผลการศึกษา

ในสายป้อน SDA09 ที่มี DG โรงงานน้ำตาลเชื่อมต่ออยู่นั้น ค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่ กับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ DG จ่ายเข้าระบบ ตำแหน่งของ DG ที่เชื่อมต่อในระบบ และปริมาณและรูปแบบการกระจายตัวของโหลดในสายป้อน พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบทั้ง 3 สายป้อน มีค่า 6,055,478.97 kWh/ปี เมื่อมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้ตำแหน่งสวิตช์เดิมที่มีในระบบและลงทุนก่อสร้างสายจำหน่ายในระบบเพิ่มเติม พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบทั้ง 3 สายป้อนสามารถลดลงเหลือ 4,916,509.85 kWh/ปี และ 4,873,718.47 kWh/ปี ตามลำดับ คิดเป็นมูลค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่ลดลงได้ 4,122,954 บาท/ปี และ 4,277,854 บาท/ปี ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองแนวทางมีค่าใกล้เคียงกันแต่ต้นทุนกรณีการใช้สวิตช์เดิมที่มี

ติดตั้งอยู่แล้วในระบบจะถูกกว่ามาก ในโครงการนี้จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่ากรณีก่อสร้างสายจำหน่ายเพิ่มเติม และเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม กระบวนการจัดการเชื้อเพลิงพลังงานทางด้านการเกษตรตามฤดูกาลจึงเป็นหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจสามารถต่อยอดจากรูปแบบการบริหารจัดการระบบพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้วิธีการปรับปรุงโครงสร้างระบบระบบจำหน่ายไฟฟ้าใหม่โดยใช้องค์ความรู้ผู้เชี่ยวชาญทำให้มีความยืดหยุ่นและศักยภาพสูงสูง จึงสามารถใช้งานได้จริง นอกเหนือจากแนวทางคณิตศาสตร์อื่นที่กระบวนการวิจัยยังต้องมุ่งเน้นรูปแบบการสร้างปัญหาให้มีความเหมาะสมกับกรอบงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

ทีมวิจัยขอความขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จ. 2 ภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ อุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ข้อมูลสนับสนุนงานวิจัยนี้จนแล้วเสร็จ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gonen T. *Electric Power Distribution System Engineering*, 3rd. edition. McGraw-Hill; 2014.
- [2] Carreno EM, Romero R, Feltrin AP. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transaction on Power System*. 2008;(23): 1542-1551.
- [3] Guedes LSM, Lisboa AC, Vieira DAG, Saldanha RR. A multi-objective heuristic for reconfiguration of the electrical radial network. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 2013;(28): 311-319.
- [4] Yuan-ang W, Ching-Yin L, Le-Chang L, Shao-Hong T. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 2010; (25): 1678-1685.
- [5] Wu Y, Lee C, Liu L, Tsai S. Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2010; 25(3): 1678-1685.
- [6] Imran AM, Kowsalya M, Kothari D. A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014; 63:461-472.
- [7] Bayat A, Bagheri A, Noroozian R. Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA - based heuristic method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2016; 77: 360-371.
- [8] Esmaeili S, Moghaddam AA, Jadid S, Guerrero JM. Optimal simultaneous day-ahead scheduling and hourly reconfiguration of distribution systems considering responsive loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019;104: 537-548.
- [9] Liu Z, Liu Y, Qu G, Wang X, Wang X. Intra-day dynamic network reconfiguration based on probability analysis considering the deployment of remote control switches. *IEEE Access*. 2019; 7: 145272-145281.
- [10] Hao T, Lin LU, Hongjun GA, Min L, Gang W, Siqi C, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic. *Power System Protection Control*. 2015;43(1):107925.
- [11] Samman MA, Mokhlis H, Mansor NN, Mohamad H, Suyono H, Sapari NM. Fast optimal network reconfiguration with guided initialization based on a simplified network approach. *IEEE Access*. 2020; 8:11948-11963.
- [12] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. *ค่าพารามิเตอร์ของสายระบบจำหน่ายแรงสูง 22/33 kV และระบบสายส่ง 115 kV*. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.
- [13] Wood AJ, Wollenberg BF. *Power Generation Operation and Control*. 2nd. edition, Copyright 1996, John Wiley & Sons Inc.