

การวางอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมที่สุดในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า โดยคำนึงถึงความสูญเสียเมื่อไฟดับ ราคาตลอดอายุการใช้งาน และดัชนีความเชื่อถือได้

รสรวรรณ บุพศิริ¹ และ นฤมล วัฒนพงศกร²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 1 สิงหาคม 2546 ตอรับเมื่อ 8 มีนาคม 2547

บทคัดย่อ

ในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า มีดัชนีหลายตัวที่สามารถใช้ในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบ ดัชนีความเชื่อถือได้ที่นิยมใช้มีอาทิเช่น ดัชนีค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งไฟดับ (SAIFI) และดัชนีค่าเฉลี่ยระยะเวลาไฟดับ (SAIDI) การออกแบบระบบไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆ อย่างเช่น ความสูญเสียเมื่อไฟดับ ราคาตลอดอายุการใช้งานและราคาการลงทุนของอุปกรณ์ป้องกันไฟดับ การใช้ อุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมในระบบสามารถลดความสูญเสียเมื่อไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถป้องกันผู้บริโภคจากเหตุการณ์ไฟดับและสามารถลดปริมาณพื้นที่ที่เกิดผลกระทบจากเหตุการณ์ไฟดับได้ แต่ในขณะเดียวกันก็อาจแลกกับการเพิ่มขึ้นของราคาตลอดอายุการใช้งานและราคาการลงทุนของอุปกรณ์ป้องกัน

บทความฉบับนี้นำเสนอวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบระบบไฟฟ้าโดยการหาค่าที่ต่ำสุดของความสูญเสียเมื่อไฟดับ ราคาตลอดอายุการใช้งาน รวมทั้งราคาการลงทุน โดยการวางอุปกรณ์ป้องกันในตำแหน่งที่เหมาะสม และสอดคล้องกับข้อจำกัดของระบบ ผลการทดลองนี้ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากอีก 2 กรณีศึกษาที่ได้พัฒนาขึ้นมาซึ่งมีสมการจุดประสงค์คือ การหาค่า SAIFI และ SAIDI ที่ต่ำที่สุด โดยประยุกต์ใช้การแก้ปัญหาแบบไบนารีโปรแกรมมิ่ง (binary programming) แบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งให้คำตอบที่ดีที่สุด (optimal results) และนำเสนอทางเลือกที่เหมาะสมอีกมากมายในการออกแบบระบบไฟฟ้า

¹ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

Optimal Protective Device Allocation for Electrical Distribution System Considering Outage Cost, Life Cycle Cost and Reliability Indices

Rosawan Bupasiri¹ and Naruemon Wattanapongsakorn²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Received 1 August 2003 ; accepted 8 March 2004

Abstract

In electrical distribution system, many indices can be used to evaluate system reliability. The most commonly used reliability indices are such as System Average Interruption Frequency Index (SAIFI) and System Average Interruption Duration Index (SAIDI). To design an efficient distribution system with high customer requirement, many other factors also have to be considered such as outage cost, life cycle cost (LCC) and investment cost of protective devices. Adding appropriate protective devices in the system can effectively decrease the outage cost by protecting public customers from local faults and limiting the affected fault area. At the same time, however, it may increase the LCC and investment cost of the protective devices.

In this paper, we present an optimization technique to minimize the outage cost, LCC and investment cost by allocating appropriate types and positions of protective devices according to system requirement constraints. We compare our optimization results with the results from two other cases that we develop where minimizing SAIFI and SAIDI are the system design objectives. We apply our optimization technique with a non-linear binary programming where optimal results can be obtained, and several system design choices are reported.

¹ Graduate Student, Department of Computer Engineering.

² Assistant Professor, Department of Computer Engineering.

1. บทนำ

ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าเป็นดัชนีวัดประสิทธิภาพซึ่งผู้ให้บริการไฟฟ้าสากลรู้จักกันอย่างแพร่หลาย และมักถูกใช้เป็นดัชนีชี้ระดับความเชื่อถือได้ของการไฟฟ้านั้นๆ [1] ดัชนีที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ ดัชนีค่าเฉลี่ยจำนวนครั้งไฟดับ (SAIFI) [2] และดัชนีค่าเฉลี่ยระยะเวลาไฟดับ (SAIDI) [2] ดัชนีทั้งสองใช้ประเมินผลกระทบของเหตุการณ์ไฟดับด้วยจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกกระทบจากไฟดับ และระยะเวลาไฟดับต่อครั้ง ตามลำดับ ในความเป็นจริงการประเมินความเสียหายของเหตุการณ์ไฟดับด้วยค่าดัชนีไม่เพียงพอที่จะสะท้อนความเสียหายเป็นมูลค่าได้ ทั้งนี้เป็นเพราะความหลากหลายของผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีความต้องการคุณภาพไฟฟ้าต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น โรงงานจะได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ไฟดับมากกว่าผู้ใช้ไฟฟ้าตามบ้าน ดังนั้น SAIFI และ SAIDI จึงไม่สามารถให้ความแตกต่างแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งสองประเภทได้ การประเมินมูลค่าความเสียหายของเหตุการณ์ไฟดับ (outage cost assessment) เป็นวิธีการที่สะท้อนความเสียหายได้ชัดเจนกว่า SAIFI, SAIDI และสามารถใช้พิจารณาความคุ้มค่าของการลงทุนในระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย

การออกแบบจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันสามารถเพิ่มระดับความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าได้โดยตรง เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันสามารถจำกัดพื้นที่ที่เป็นสาเหตุไฟดับ เพื่อให้พื้นที่ส่วนใหญ่ยังคงสามารถรับกระแสไฟฟ้าต่อไปได้ อย่างไรก็ตาม ราคาของอุปกรณ์ป้องกันมีราคาแพง การเลือกจุดติดตั้งต้องได้รับการพิจารณาอย่างรอบคอบ บทความของ Soudi et al. [3-4] ได้นำเสนอเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization technique) [5] ในการระบุจุดติดตั้งรีโคลสเซอร์ (recloser) และ ฟิวส์ (fuse) เพื่อลดค่า SAIFI และ SAIDI ให้ได้มากที่สุด และมีอีกหลายบทความที่นำเสนอการพิจารณามูลค่าความเสียหายของระบบประกอบการออกแบบระบบไฟฟ้า

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมที่สุดที่สมการจุดประสงค์แตกต่างกัน 3 กรณี โดยใช้การแก้ปัญหาแบบโบนารีโปรแกรมมิ่ง สมการจุดประสงค์ทั้ง 3 กรณีคือ

1. สมการจุดประสงค์ของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ SAIFI ต่ำสุด
2. สมการจุดประสงค์ของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ SAIDI ต่ำสุด
3. สมการจุดประสงค์ของมูลค่าราคารวมของระบบที่มีค่าต่ำสุด ซึ่งประกอบด้วย ราคาการลงทุน และมูลค่าความเสียหายของเหตุการณ์ไฟดับของทั้งผู้บริโภครวมและการไฟฟ้า [6]

2. ระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า

2.1 รูปแบบทั่วไปของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้า

บทความนี้พิจารณาเฉพาะระบบจำหน่ายกระแสไฟฟ้าเท่านั้น เริ่มตั้งแต่เบรกเกอร์ (breaker) ในสถานีไฟฟ้าย่อย (substation) ซึ่งใช้ป้องกันฟีดเดอร์หลัก (main feeder) ไปตลอดทั้งฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ย่อย (branch feeder) อุปกรณ์ป้องกันพื้นฐานในระบบจำหน่ายมีทั้งหมด 4 ชนิด คือ เบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์ อุปกรณ์ตัดตอน และ ฟิวส์ มีหน้าที่และการทำงานต่างกันดังนี้

- เบรกเกอร์ มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ฟอลท์ (จุดผิดพลาด หรือ fault) จากฟิดเดอร์ที่เบรกเกอร์ นั้นป้องกันอยู่มีผลกระทบต่อฟิดเดอร์อื่นๆ เบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าย่อยเท่านั้น ปกติเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติที่สามารถกำหนดลักษณะการทำงานให้ปิดวงจรคืนหลังเกิดฟอลท์ได้ เพื่อทดลองการจ่ายกระแสไฟฟ้าอีกครั้ง การทำงานแบบนี้เรียกว่า ทริป-รีโคลส (trip-reclose)

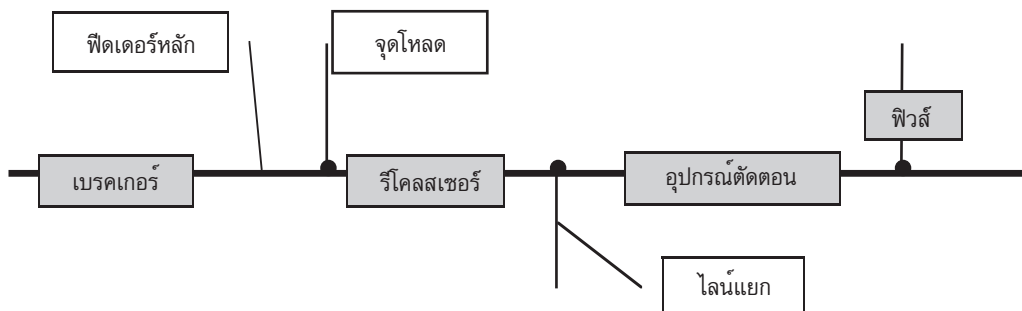
- รีโคลสเซอร์ มีการทำงานเหมือนกับเบรกเกอร์คือเป็นอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ แต่รีโคลสเซอร์จะถูกติดตั้งในระบบจำหน่ายหรือนอกบริเวณสถานีไฟฟ้าย่อย

การทำงานแบบทริป-รีโคลสสามารถช่วยแก้ปัญหาฟอลท์ชั่วคราว (momentary fault) ได้ แต่ในกรณีที่เป็นฟอลท์ถาวร (sustained fault) ที่ยังอยู่ในระบบ เบรกเกอร์หรือรีโคลสเซอร์จะเปิดวงจรถาวรจนกว่าจะมีการแก้ไข้ปัญหา การทำงานแบบนี้เรียกว่า ทริป-ล็อกเอาต์ (Trip-lock out)

- อุปกรณ์ตัดตอน (disconnecting switch) เป็นอุปกรณ์ที่ไม่สามารถตัดฟอลท์ออกไปโดยอัตโนมัติได้ แต่ใช้หลังจากที่อุปกรณ์ป้องกันทำงานแล้ว อุปกรณ์ตัดตอนสามารถลดพื้นที่ไฟดับลงโดยการเปิดวงจรส่วนที่เกิดฟอลท์ออกไปเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าในพื้นที่ที่ไม่มีฟอลท์ได้

- ฟิวส์ มีหน้าที่ตัดวงจรที่เกิดฟอลท์ออกไปเช่นกัน แต่ฟิวส์จะใช้ป้องกันเหตุการณ์ไฟดับในฟิดเดอร์หลักที่มีสาเหตุเกิดจากฟอลท์ที่เกิดในฟิดเดอร์ย่อย ฟิวส์ไม่มีการทำงานทริปรีโคลสเพื่อกำจัดฟอลท์ชั่วคราวและไม่สามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก

กระแสไฟฟ้าจะถูกจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าผ่านฟิดเดอร์ย่อย ซึ่งแยกออกมาจากฟิดเดอร์หลัก จุดที่ติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าลงจ่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า เรียกว่า จุดโหลด (จุดภาระ หรือ load point) รูปที่ 1 อธิบายลักษณะโดยทั่วไปของระบบจำหน่าย อุปกรณ์ป้องกันบนระบบจำหน่าย และจุดโหลด



รูปที่ 1 ลักษณะของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน

2.2 ดัชนี SAIFI และ SAIDI

ทั้งดัชนี SAIFI และ SAIDI เป็นดัชนีสากลที่การไฟฟ้าทั่วไปนำไปใช้บ่อยที่สุดในการแสดงประสิทธิภาพของความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกกระทบทั้งหมด}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{N_T} \quad (1)$$

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{ผลรวมทั้งหมดผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกกระทบ} \times \text{เวลาไฟดับ}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} = \frac{\sum U_i N_i}{N_T} \quad (2)$$

โดยที่ N_i เป็นจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าในวงจร ณ จุดโหนดที่ i , N_T คือจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดในฟีดเดอร์, λ_i และ U_i คือผลคูณของอัตราความเสียหายและระยะเวลาไฟดับของจุดโหนด i ตามลำดับ

2.3 มูลค่าความเสียหาย (outage cost) และราคาตลอดอายุการใช้งาน (life cycle cost)

มูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟดับมีอยู่ 2 ประเภท คือ มูลค่าความเสียหายต่อครั้งที่ไฟดับและมูลค่าความเสียหายต่อระยะเวลา ของผู้ใช้ไฟฟ้าและการไฟฟ้า มูลค่าความเสียหายต่อครั้งหมายถึง มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นทันทีเนื่องจากเหตุการณ์ไฟดับโดยมากเกิดจากผลกระทบต่อกระบวนการผลิตสินค้าและอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า ขณะที่มูลค่าความเสียหายต่อระยะเวลามีถึง ความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นขณะเหตุการณ์ไฟดับยังคงอยู่ และค่าไฟฟ้าที่การไฟฟ้าจะได้จำหน่ายถ้าไฟไม่ดับทั้งนี้มูลค่าความเสียหายรวมไปถึงค่าเสียหายทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น ราคาสินค้าซึ่งน่าจะผลิตได้ในช่วงเวลาไฟดับ ค่าจ้างแรงงาน ค่าเดินระบบใหม่ ค่าเสียหายของระบบหรือชิ้นส่วนต่างๆ เป็นต้น นอกจากนี้ความแตกต่างของประเภทผู้ใช้ไฟฟ้ายังมีผลต่อลักษณะของความเสียหายด้วย โดยทั่วไปมูลค่าความเสียหายประมาณได้จากค่า IER (Interrupted Energy Rate) ซึ่งเป็นอัตรามูลค่าความเสียหายต่อพลังงานที่ไม่ได้จำหน่ายออกไปขณะไฟดับ [7] โดยมีหน่วยเป็นบาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

มูลค่าอีกประเภทที่ต้องพิจารณา คือ ราคาตลอดอายุการใช้งานซึ่งเป็นราคาที่เกิดขึ้นตลอดอายุงานของอุปกรณ์ป้องกัน ประกอบด้วย

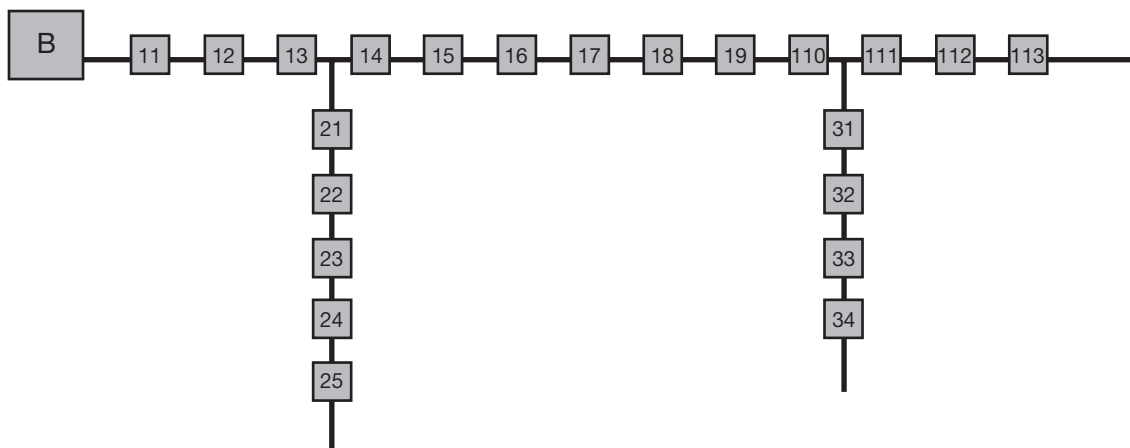
- 1) ราคาจัดซื้อหรือจัดหา (initial procurement cost) รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องอื่นๆ เช่น ค่าเช่าที่ เก็บสินค้า ค่าขนส่ง ค่าการจัดการ เป็นต้น
- 2) ค่าติดตั้งอุปกรณ์ (installation cost) เช่น ค่าแรงงานหรือค่าสมนาคุณผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทาง
- 3) ค่าทดสอบสินค้า (testing cost) ก่อนจะติดตั้งสินค้าตลอดจนค่าทดสอบขณะสินค้าถูกติดตั้งแล้ว
- 4) ค่าใช้จ่ายระหว่างการใช้งานต่างๆ (operation cost)
- 5) ค่าบำรุงรักษา (maintenance cost) เช่น ค่าดูแล ค่าน้ำมันหล่อลื่น ค่าอะไหล่
- 6) ค่ากำจัดสินค้า (disposal cost) สามารถเป็นได้ทั้งรายได้หรือรายจ่าย อุปกรณ์ป้องกันที่สามารถนำไปจำหน่ายได้จะเป็นรายรับ หรือค่ากำจัดอุปกรณ์ป้องกันเป็นรายจ่าย เป็นต้น
- 7) เงินดอกเบี้ย (interests on a loan of investment cost) ที่จะได้เมื่อนำเงินลงทุนซื้ออุปกรณ์ป้องกันไปฝากธนาคาร

เมื่อการไฟฟ้าสามารถคำนวณราคาตลอดอายุการใช้งานและเฉลี่ยราคาต่อปีได้แล้ว การไฟฟ้าก็จะสามารถเลือกอุปกรณ์ป้องกัน ที่ให้ราคาตลอดอายุการใช้งานได้ต่ำที่สุดหรือให้ผลประโยชน์สูงสุด

3. เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.1 การสร้างแบบจำลองสำหรับฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ด้อย

กำหนดให้ระบบจำหน่ายในบทความนี้มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าทางเดียวหรือระบบจำหน่ายแบบเรเดียล (radial) ระบบจำหน่ายจะถูกแบ่งแยกการคำนวณของฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ด้อยออกจากกัน ฟีดเดอร์ด้อยที่มีฟิวส์ติดตั้งที่จุดแยกออกจากฟีดเดอร์หลักให้แยกการคำนวณออกเป็นอิสระได้ และพิจารณาได้ว่าไม่มีฟอลท์จากฟีดเดอร์ด้อยที่กระทบฟีดเดอร์หลักได้ ในกรณีที่ฟีดเดอร์ด้อยไม่มีฟิวส์ติดตั้งให้คำนวณรวมกับฟีดเดอร์หลัก เมื่อแบ่งฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ด้อยตามที่กล่าวมาแล้วดังรูปที่ 2 สัญลักษณ์สี่เหลี่ยมป้ายชื่อ "B" หมายถึงตำแหน่งของเบรกเกอร์ แต่ละสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมเล็กหมายถึงจุดโหลดหรือจุดที่อาจพิจารณาติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน หมายเลขตัวแรกที่กำกับไว้ในสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมหมายถึงลำดับของฟีดเดอร์ด้อยและหมายเลขตัวที่สองแสดงลำดับของจุดโหลด ข้อมูลประจำแต่ละจุดโหลดเหล่านี้ประกอบด้วยจำนวนกิโลวัตต์ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า และอัตราความเสียหายถาวรและชั่วคราว



รูปที่ 2 ฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ด้อยที่ถูกแบ่งแยกสำหรับใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.2 สมการจุดประสงค์ของมูลค่าการรวม

สมการจุดประสงค์มูลค่าการรวมประกอบด้วย ราคาตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกันและมูลค่าความเสียหายของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งได้มาจากการสำรวจ ดังแสดงในสมการที่ 3

$$\begin{aligned}
 \text{มูลค่าการรวม (total cost)} &= \text{มูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าต่อครั้งไฟดับ} \\
 &+ \text{มูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าต่อระยะเวลาไฟฟ้ามืด} \\
 &+ \text{มูลค่าความเสียหายของการไฟฟ้าต่อระยะเวลาไฟฟ้ามืด} \\
 &+ \text{ราคาตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกัน}
 \end{aligned}$$

$$= IER_{fc}A_p + IER_{dc}A_e + IER_{du}A_e + LCC \tag{3}$$

โดยที่ IER_{fc} แทนอัตราค่าพลังงานที่ไม่สามารถจ่ายได้หรือมูลค่าความเสียหายต่อครั้งต่อกิโลวัตต์
 IER_{dc} และ IER_{du} แทนอัตราค่าพลังงานที่ไม่สามารถจ่ายได้หรือมูลค่าความเสียหายต่อระยะเวลาต่อกิโลวัตต์ ของผู้ใช้ไฟฟ้าและการไฟฟ้า
 LCC แทนราคาตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกัน
 A_p แทนกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้จากเหตุการณ์ไฟดับทั้งหมด (kW)
 A_e แทนพลังงานที่ไม่ได้จ่ายในเวลาไฟดับ (kWmin)
 ซึ่ง A_p และ A_e แสดงอยู่ในสมการ (4) และ (5) ดังนี้

$$A_p = \sum_{q=1}^{\alpha+1} A_{pq} \tag{4}$$

$$A_e = \sum_{q=1}^{\alpha+1} A_{eq} \tag{5}$$

โดยที่ A_{pq} คือกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้จากเหตุการณ์ไฟดับของแต่ละฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ย่อย และ A_{eq} คือพลังงานที่ไม่ได้จ่ายในเวลาไฟดับของแต่ละฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ย่อย หรือเป็นผลรวมของสมการที่ 4 และ 5 ให้ α เป็นจำนวนฟีดเดอร์ย่อยที่มีฟิวส์ติดตั้งอยู่ที่จุดแยกออกจากฟีดเดอร์หลัก ฟีดเดอร์ย่อยที่ไม่มีฟิวส์ติดตั้งอยู่จะถูกรวมเป็นส่วนหนึ่งของฟีดเดอร์หลัก " $\alpha + 1$ " หมายถึงจำนวนฟีดเดอร์ ซึ่งประกอบด้วยหนึ่งฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ย่อยจำนวน α ส่วน q แทนลำดับของฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ย่อย ในที่นี้เรากำหนดให้ฟีดเดอร์หลักมี $q=1$ และลำดับต่อไปให้เป็นฟีดเดอร์ย่อย ให้จุดโหลดแรกของฟีดเดอร์หลักต้องเป็นจุดติดตั้งเบรกเกอร์เท่านั้น เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ของสมการ A_{pq} และ A_{eq} ขึ้นมาใหม่ โดยอ้างอิงจากผลงานวิจัยที่ผ่านมา [3, 4] เป็นต้นแบบ เป็นสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$A_{pq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=1}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} x_{qk2} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} (1-x_{qi2}) \sum_{j=1}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{qi2}) \sum_{k=j}^{q_n} W_{qk} \prod_{l=j+1}^i x_{ql2} \tag{6}$$

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=1}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} x_{qk2} x_{qk3} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} r_s \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} x_{qk2} (1-x_{qk3}) + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} r_r (1-x_{qi2}) \sum_{j=1}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} r_r \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{qi2}) \sum_{k=j}^{q_n} W_{qk} \prod_{l=j+1}^i x_{ql2} \tag{7}$$

ให้ q_n เป็นจำนวนจุดโหลดของฟีดเดอร์ q ในที่นี้ q หมายถึงฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอร์ย่อยตามสมการที่ 4 และ 5 สัญลักษณ์กำกับล่างของตัวแปรในสมการมีความหมายเหมือนตัวเลขในสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมในรูปที่ 2 เช่น หมายเลข "14" แทนจุดโหลดที่ 4 ในฟีดเดอร์ลำดับที่ $q=1$ ตัวแปรอื่นๆ ใช้ความหมายของสัญลักษณ์กำกับล่าง ใน

รูปแบบเดียวกัน W_{qi} แทนกำลังไฟฟ้าที่จุดโหลด i ใช้เฉลี่ย ในพิดเตอร์ลำดับที่ q เช่นเดียวกับ λ และ γ ซึ่งหมายถึงอัตราความเสียหายจากพอลท์ถาวรและพอลท์ชั่วคราว ตามลำดับ ตัวแปร x เป็นเลขฐานสอง มีสัญลักษณ์กำกับล่างทั้งหมดสามตัว ความหมายของสัญลักษณ์กำกับล่างสองตัวแรกมีความหมายเช่นเดิม สำหรับสัญลักษณ์กำกับล่างตัวที่สาม (หลักขวาสุด) หมายถึงชนิดของอุปกรณ์ป้องกัน รีโคลสเซอร์แทนด้วย “1” ฟิวส์แทนด้วย “2” และอุปกรณ์ตัดตอนแทนด้วย “3” ยกตัวอย่างเช่น x_{qk1} หมายถึงรีโคลสเซอร์ที่พิดเตอร์ที่ q จุดโหลดที่ k ในกรณี $x_{qk1} = 1$ หมายความว่าไม่ติดตั้งรีโคลสเซอร์ที่ตำแหน่งดังกล่าว ในทางกลับกันถ้า $x_{qk1} = 0$ หมายความว่าติดตั้งรีโคลสเซอร์สมการ (7) หรือ A_{eq} เป็นผลรวมของพลังงานที่ไม่สามารถจ่ายได้ หรือผลคูณของกำลังไฟฟ้าและเวลา r_r ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมหรือแก้ไขสาเหตุของเหตุการณ์ไฟดับ (repair time) และ r_r เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการเปิดวงจรอุปกรณ์ตัดตอนเพื่อแยกส่วนที่เป็นสาเหตุไฟดับและจ่ายกระแสไฟฟ้าให้วงจรส่วนที่เหลือหรือเรียกว่าเวลาสับเปลี่ยนวงจร (switching time)

แต่ละพจน์ของ A_{pq} มีความหมายดังนี้ พจน์แรกคือกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากเกิดความขัดข้องแบบถาวรที่จุดโหลด i โดยรวมตั้งแต่จุดโหลด i จนถึงจุดโหลดสุดท้ายหรือจุดโหลดที่ q พจน์ที่สองคือกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากเกิดความขัดข้องแบบถาวรที่จุดโหลด i โดยรวมตั้งแต่จุดโหลดก่อนจุดโหลด i ที่ติดตั้งรีโคลสเซอร์หรือฟิวส์ที่ใกล้จุดโหลด i ที่สุดจนถึงจุดโหลด i พจน์ที่สามคือกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากอัตราความเสียหายชั่วคราวที่จุดโหลด i ที่ติดตั้งฟิวส์ พจน์ที่สี่คือกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากอัตราความเสียหายชั่วคราวที่จุดโหลด i ซึ่งไม่ติดตั้งฟิวส์

A_{eq} ในสมการ (7) ต่างจาก A_{pq} โดย A_{eq} เป็นผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากไฟฟาดับ ซึ่งความหมายของแต่ละพจน์คล้ายกันกับสมการ (6) พจน์แรกคือพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากอัตราความเสียหายถาวรที่จุดโหลด i ในช่วงเวลาแก้ไข โดยรวมตั้งแต่จุดโหลด i จนถึงจุดโหลดสุดท้ายหรือจุดโหลดที่ q พจน์ที่สองคือพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากอัตราความเสียหายถาวรที่จุดโหลด i ในช่วงเวลาแก้ไข โดยรวมตั้งแต่จุดโหลดก่อนจุดโหลด i ที่ติดตั้งรีโคลสเซอร์หรือฟิวส์หรืออุปกรณ์ตัดตอนที่ใกล้จุดโหลด i ที่สุดจนถึงจุดโหลด i พจน์ที่สามคือกำลังไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายได้เนื่องจากอัตราความเสียหายถาวรที่จุดโหลด i ในช่วงเวลาสับเปลี่ยนวงจร โดยรวมตั้งแต่จุดโหลดก่อนจุดโหลด i ที่ใกล้ที่สุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอนและไม่มีอุปกรณ์ป้องกันอื่นใดๆ จนถึงจุดโหลด i พจน์ที่สี่และห้าของ A_{eq} คล้ายกับพจน์ที่สามและสี่ของ A_{pq} แต่มีช่วงเวลาซ่อมแซมจุดเกิดเหตุคูณอยู่

3.3 สมการจุดประสงค์ของ SAIFI และ SAIDI

สมการคำนวณ SAIFI และ SAIDI มีความคล้ายกับสมการของ A_{pq} และ A_{eq} โดยการเปลี่ยนตัวแปรกำลังไฟฟ้าเป็นตัวแปรจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า ดังสมการ (8), (9), (10) และ (11)

$$\sum \lambda_i N_i = \sum_{q=1}^{\alpha+1} A_{fq} \quad (8)$$

$$\sum U_i N_i = \sum_{q=1}^{\alpha+1} A_{dq} \quad (9)$$

$$A_{fq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=i}^{q_n} N_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=1}^{i-1} N_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} x_{qk2} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} (1-x_{qi2}) \sum_{j=i}^{q_n} N_{qj} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{qj2}) \sum_{k=j}^{q_n} N_{qk} \prod_{l=j+1}^i x_{ql2} \quad (10)$$

$$A_{dq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=1}^{q_n} N_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=1}^{i-1} N_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} x_{qk2} x_{qk3} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} r_s \sum_{j=1}^{i-1} N_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} x_{qk2} (1-x_{qk3}) + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} r_r (1-x_{qi2}) \sum_{j=1}^{q_n} N_{qj} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} r_r \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{qj2}) \sum_{k=j}^{q_n} N_{qk} \prod_{l=j+1}^i x_{ql2} \quad (11)$$

ให้ A_{fq} และ A_{dq} เป็นจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกกระทบจากเหตุการณ์ไฟดับ และผลคูณระหว่างจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกกระทบกับระยะเวลาไฟดับของแต่ละฟีดเดอร์ลำดับที่ q และ N_{qj} เป็นจำนวนของผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุดโหลด j สังเกตว่าลักษณะแต่ละพจน์ของ A_{fq} และ A_{dq} คล้ายกับ A_{eq} และ A_{pq} ต่างกันที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้า W เป็นจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า N เท่านั้น เพราะฉะนั้นหลักการคำนวณจึงคล้ายกัน

3.4 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

โปรแกรมคำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เลือกใช้ชื่อว่า “LINGO” ถูกพัฒนาโดยบริษัท LINDO Software Inc [8] LINGO เป็นโปรแกรมใช้ได้กับปัญหาเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาในทางคณิตศาสตร์ (Mathematics Programming) สำหรับปัญหาในบทความนี้ สามารถทำให้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดง่ายขึ้น โดยการลดความซับซ้อนของสมการ A_{pq} และ A_{eq} ได้โดยการแยกพิจารณาสมการจุดประสงค์ออกเป็นสมการฟีดเดอร์หลักและฟีดเดอรีย่อยทำให้ได้สมการ (12) และ (13) สำหรับฟีดเดอร์หลัก และได้สมการ (14) และ (15) สำหรับฟีดเดอรีย่อย นอกจากนี้ยังสามารถตัดพจน์ของอัตราความเสียหายชั่วคราวออกจากสมการของฟีดเดอร์หลักได้เนื่องจากรีโกลสเซอร์หรือเบรกเกอร์สามารถขจัดปัญหาไฟดับชั่วคราวได้โดยอัตโนมัติ

$$A_{pq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=i}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk2} \quad (12)$$

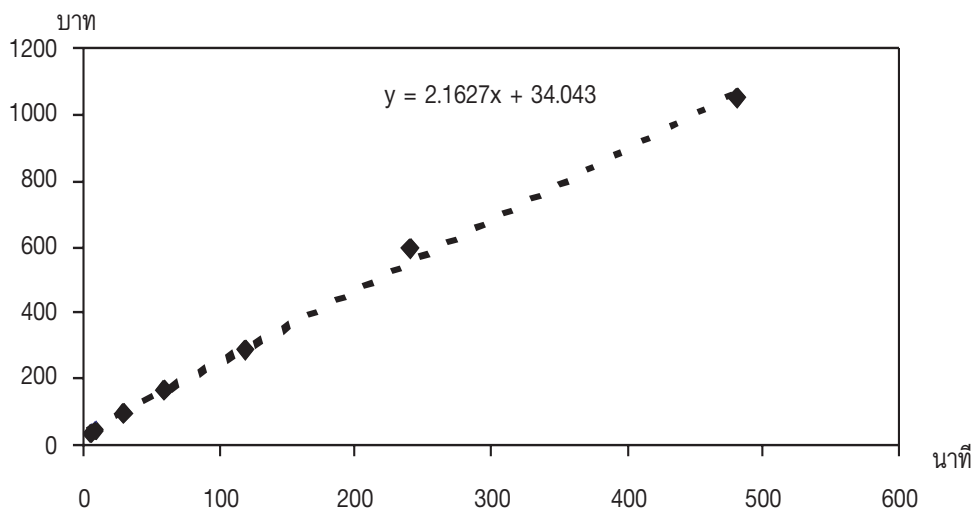
$$A_{eq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=i}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} x_{qk3} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} r_s \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk1} (1-x_{qk3}) \quad (13)$$

$$A_{pq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=1}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk2} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} (1-x_{qi2}) \sum_{j=i}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{qj2}) \sum_{k=j}^{q_n} W_{qk} \prod_{l=j+1}^i x_{ql2} \quad (14)$$

$$A_{eq} = \sum_{i=1}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=1}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{qi} r_r \sum_{j=1}^{i-1} W_{qj} \prod_{k=j+1}^i x_{qk2} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} r_r (1-x_{qi2}) \sum_{j=i}^{q_n} W_{qj} + \sum_{i=1}^{q_n} \gamma_{qi} r_r \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{qj2}) \sum_{k=j}^{q_n} W_{qk} \prod_{l=j+1}^i x_{ql2} \quad (15)$$

4. กรณีศึกษา

กรณีศึกษาในบทความนี้ใช้พื้นฐานข้อมูลจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ระหว่างปี 2541-2544 [9] ซึ่งใกล้เคียงความเป็นจริงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ข้อมูลจาก กฟภ. ประกอบด้วยข้อมูลเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าขัดข้อง ราคาอุปกรณ์ป้องกันและค่าใช้จ่ายอื่นๆ รวมทั้งราคาค่าไฟฟ้า และมูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์ไฟดับโดยการสำรวจจากผู้ใช้ไฟฟ้าของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [7] ข้อมูลของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมในประเทศไทยถูกแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามมาตรฐาน TSIC (Thai Standard Industrial Classification)



รูปที่ 3 มูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดเล็กต่อระยะเวลาไฟดับ

บทความนี้พิจารณาผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดเล็ก รูปที่ 3 อธิบายมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ประเภทนี้โดยประมาณเป็นกราฟเชิงเส้นได้จากรูปมูลค่าความเสียหาย IER_{fc} หรือมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นทันทีที่เกิดไฟดับ ในบทความนี้เราจะสมมุติให้มีค่าเท่ากับ 34.043 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อครั้ง IER_{dc} หรือมูลค่าความเสียหายต่อระยะเวลาไฟดับซึ่งเท่ากับความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 2.1627 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อนาที สำหรับมูลค่าความเสียหายของการไฟฟ้าได้มาจากค่าไฟฟ้าที่ไม่ได้จ่ายออกไปเมื่อไฟดับเท่ากับ 0.04811 บาทต่อกิโลวัตต์นาที [10]

ให้กรณีศึกษาประกอบด้วยหนึ่งพีคเตอร์หลักและสองพีคเตอร์ย่อย มีข้อมูลอัตราความเสียหายถาวรและชั่วคราว กิโลวัตต์เฉลี่ยของจุดโหลด และจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าของจุดโหลดแสดงอยู่ในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1 ข้อมูลของฟีดเดอร์ ($q=1$ และ $q_n=13$) โดยที่เวลาแก้ไข (r_r) เท่ากับ 58.5625 นาที และเวลาปรับเปลี่ยนวงจร (r_s) เท่ากับ 25.2438 นาที

q_i	λ_{qi}	W_{qi}	N_{qi}
11	0.40533	142	34
12	0.53333	215	53
13	2.12267	237	103
14	1.06667	212	28
15	0.50412	246	62
16	0.12143	188	32
17	0.25576	172	84

q_i	λ_{qi}	W_{qi}	N_{qi}
18	0.17812	67	18
19	0.55123	254	79
110	0.86256	213	47
111	0.17234	183	24
112	0.63256	98	6
113	0.82556	136	57

q_i : จุดโหนดที่ i ของฟีดเดอร์ หรือฟีดเดอร์ด้อยที่ q

λ_{qi} : อัตราความเสียหายถาวร (ครั้ง/ปี)

W_{qi} : กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่บริโภค ณ จุดโหนด (กิโลวัตต์)

N_{qi} : จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า

ตารางที่ 2 ข้อมูลของฟีดเดอร์ด้อยแรก ($q=2$ และ $q_n=5$) โดยที่เวลาแก้ไข (r_r) เท่ากับ 38.5351 นาที

q_i	λ_{qi}	γ_{qi}	W_{qi}	N_{qi}
21	0.521394	0.639414	81	43
22	0.200035	0.357431	47	23
23	0.694322	0.481284	39	9
24	0.499022	0.885314	49	12
25	0.600958	0.223843	21	16

γ_{qi} : อัตราความเสียหายชั่วคราว (ครั้ง/ปี)

ตารางที่ 3 ข้อมูลของฟีดเดอร์ด้อยที่สอง ($q=3$ และ $q_n=4$) โดยที่เวลาแก้ไข (r_r) เท่ากับ 45.5771 นาที

q_i	λ_{qi}	γ_{qi}	W_{qi}	N_{qi}
31	0.402173	0.116384	77	9
32	0.389024	0.831144	43	18
33	0.709822	0.569382	65	14
34	0.820032	0.687477	28	6

ตารางที่ 1-3 เป็นข้อมูลประกอบกรณีศึกษาจากรูปที่ 2 จากข้อมูลค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกัน [11] ของ กฟผ. ราคาตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่อปีได้ถูกพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันที่ให้ประโยชน์มากที่สุด กรณีศึกษานี้พิจารณาผู้ผลิต 4 ราย ประกอบไปด้วยราคาตลอดอายุการใช้งานและอายุการใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยเลือกรีโคสเซอร์ของผู้ผลิตรายที่สองและอุปกรณ์ตัดตอนจากผู้ผลิตรายที่สาม ซึ่งให้ราคาตลอดอายุการใช้งานต่อปีต่ำสุด กรณีของฟิวส์ไม่ได้จำกัดจำนวน เพราะฟิวส์มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับรีโคสเซอร์และอุปกรณ์ตัดตอน

ตารางที่ 4 ผู้ผลิตและราคาตลอดอายุการใช้งานของรีโคสเซอร์และอุปกรณ์ตัดตอนโดยประมาณ

ผู้ผลิต	ราคาตลอดอายุการใช้งาน (บาท)	อายุงาน (ปี)	ราคา (บาท/ปี)
รีโคสเซอร์			
1	728,341.22	12.9	56,460.56
2	733,243.80	14.8	49,543.50
3	871,283.40	13.4	65,021.15
4	930,383.64	15.1	61,614.81
อุปกรณ์ตัดตอน			
1	654,475.37	13.7	47,771.92
2	709,356.45	16.1	44,059.41
3	639,147.15	15.5	41,235.30
4	818,258.83	16.4	49,893.83

หลังจากลดความซับซ้อนของสมการจุดประสงค์ทั้งสาม แล้วแทนค่าของมูลค่าความเสียหายและราคาตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกันลงในสมการ (3) จะได้สมการจุดประสงค์รวมเมื่อ $q=1, 2$ และ 3 ซึ่งแสดงในสมการ (17) (18) และ (19) ตามลำดับ ข้อมูลในรูป 3 และตาราง 1-4 เป็นข้อมูลที่ใช้แทนค่าลงในสมการเหล่านี้และใช้เป็นสมการจุดประสงค์ซึ่งโปรแกรม LINGO สามารถคำนวณหาจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมที่สุดได้

$$\begin{aligned}
 \text{Total cost}_1 = & [34.043 \sum_{i=1}^{13} \lambda_{1i} \sum_{j=i}^{13} W_{1j} + \sum_{i=2}^{13} \lambda_{1i} \sum_{j=1}^{i-1} W_{1j} \prod_{k=j+1}^i x_{1k2}] + [58.5625(2.1627+0.048108) \sum_{i=1}^{13} \lambda_{1i} \sum_{j=i}^{13} W_{1j} + \\
 & 58.5625 \sum_{i=2}^{13} \lambda_{1i} \sum_{j=1}^{i-1} W_{1j} \prod_{k=j+1}^i x_{1k1} x_{1k3} + 25.2438 \sum_{i=2}^{q_n} \lambda_{1i} \sum_{j=1}^{i-1} W_{1j} \prod_{k=j+1}^i x_{1k1} (1-x_{1k3})] + \\
 & [49,543.5 \sum_{i=2}^{13} (1-x_{1i1}) + 41,235.3 \sum_{i=2}^{13} (1-x_{1i3})] \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total cost}_2 = & (34.043 + 38.5351(2.1627 + 0.048108)) \left[\sum_{i=1}^5 \lambda_{2i} \sum_{j=i}^5 W_{2j} + \sum_{i=2}^5 \lambda_{2i} \sum_{j=1}^{i-1} W_{2j} \prod_{k=j+1}^i x_{2k2} + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^5 \gamma_{2i} (1-x_{2i2}) \sum_{j=i}^5 W_{2j} + \sum_{i=1}^5 \gamma_{2i} \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{2j2}) \sum_{k=j}^5 W_{2k} \prod_{l=j+1}^i x_{2l2} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{Total cost}_3 = & (34.043 + 45.5771(2.1627 + 0.048108)) \left[\sum_{i=1}^4 \lambda_{3i} \sum_{j=i}^4 W_{3j} + \sum_{i=2}^4 \lambda_{3i} \sum_{j=1}^{i-1} W_{3j} \prod_{k=j+1}^i x_{3k2} + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^4 \gamma_{3i} (1-x_{3i2}) \sum_{j=i}^4 W_{3j} + \sum_{i=1}^4 \gamma_{3i} \sum_{j=1}^{i-1} (1-x_{3j2}) \sum_{k=j}^4 W_{3k} \prod_{l=j+1}^i x_{3l2} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

สำหรับสมการจุดประสงค์ของ SAIFI และ SAIDI ไม่เกี่ยวข้องกับตัวแปรของมูลค่าความเสียหายและราคาตลอดอายุการใช้งาน รูปแบบสมการจึงซับซ้อนน้อยกว่าสมการราคารวม เมื่อนำข้อมูลของจำนวนจุดโหลด ระยะเวลาแก้ไข และระยะเวลาสลับเปลี่ยนวงจร มาแทนค่าในสมการจุดประสงค์ SAIFI และ SAIDI เมื่อ $q = 1$ จะได้สมการ (19) และ (20) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับสมการจุดประสงค์ SAIFI และ SAIDI เมื่อ $q = 2$ และ 3

$$A_{f1} = \sum_{i=1}^{13} \lambda_{1i} \sum_{j=i}^{13} N_{1j} + \sum_{i=2}^{13} \lambda_{1i} \sum_{j=1}^{i-1} N_{1j} \prod_{k=j+1}^i x_{1k1} x_{1k2} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} A_{d1} = & \sum_{i=1}^{13} 58.5625 \lambda_{1i} \sum_{j=i}^{13} N_{1j} + \sum_{i=2}^{13} 58.5625 \lambda_{1i} \sum_{j=1}^{i-1} N_{1j} \prod_{k=j+1}^i x_{1k1} x_{1k3} \\ & + \sum_{i=2}^{13} 25.2438 \lambda_{1i} \sum_{j=1}^{i-1} N_{1j} \prod_{k=j+1}^i x_{1k1} (1-x_{1k3}) \end{aligned} \quad (20)$$

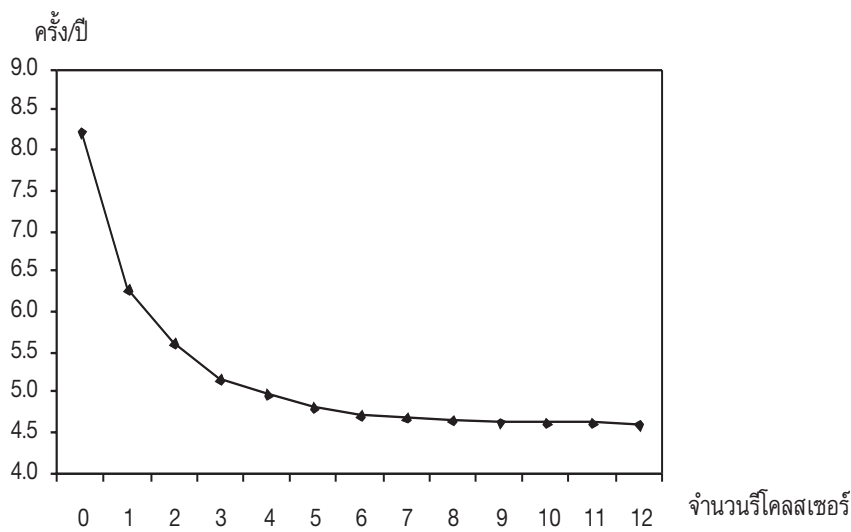
ความซับซ้อนของการหาจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันขึ้นอยู่กับจำนวนความเป็นไปได้ของจุดติดตั้งทั้งหมดหรือจำนวนจุดโหลดเป็นหลัก ก่อนหาจุดติดตั้งโดยโปรแกรม LINGO จำเป็นต้องมีเงื่อนไขบังคับคำตอบ 2 ข้อ คือ กำหนดให้จุดติดตั้งแรกเป็นเบรคเกอร์เท่านั้นและจุดโหลดเดียวกันสามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้เพียงหนึ่งตัวเท่านั้น ส่วนเงื่อนไขอื่นๆ ก็สามารถเพิ่มได้เช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นเงื่อนไขเกี่ยวกับการออกแบบความสัมพันธ์กันของอุปกรณ์ป้องกัน (Line co-ordination) เป็นงานที่ต้องการความละเอียดมาก ซึ่งไม่ใช่จุดประสงค์หลักของบทความนี้ แต่ให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดจุดบังคับหรือห้ามติดตั้งอุปกรณ์ได้ เช่น กำหนด $x_{141} = 0$ หมายถึงบังคับติดตั้งรีโคลสเซอร์ที่จุดโหลดที่ 4 หรือ กำหนด $x_{141} + x_{151} > 0$ ห้ามติดตั้งอุปกรณ์ติดกันที่จุดโหลดที่ 4 และ 5 เป็นต้น จากการทดลองโปรแกรม LINGO สามารถทำงานได้เร็วในแต่ละครั้งของการค้นหาจุดติดตั้งจากสมการ โดยกำหนดค่าของจำนวนอุปกรณ์ป้องกันและนำผลที่ได้มาสร้างกราฟ

5. ผลลัพธ์ของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

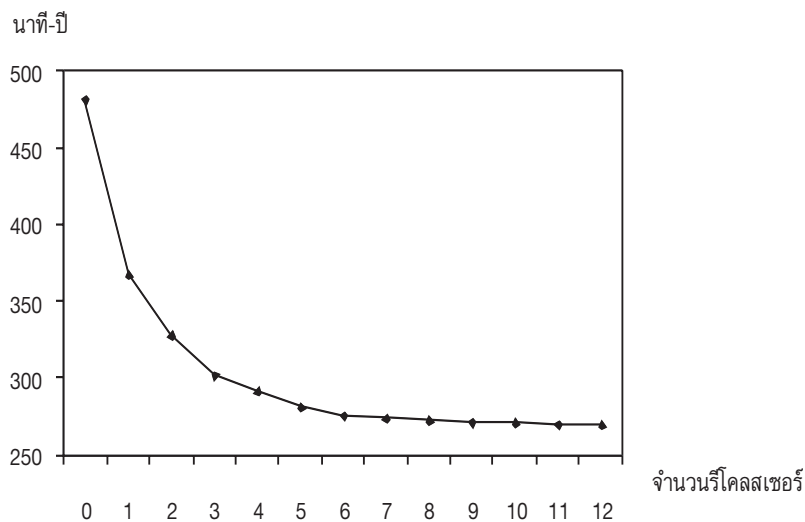
ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะเริ่มค้นหาที่จุดที่ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันบนฟีดเดอร์และเพิ่มจำนวนรีโคลสเซอร์ครั้งละหนึ่งตัว ทุกครั้งที่เพิ่มรีโคลสเซอร์จะได้จุดติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของจำนวนอุปกรณ์ขณะนั้น เมื่อเพิ่มรีโคลสเซอร์จนครบทุกจุดโหลดแล้วให้เริ่มทำซ้ำอีกครั้งแต่เพิ่มอุปกรณ์ตัดตอนขึ้นหนึ่งตัวและเพิ่มจำนวนรีโคลสเซอร์ครั้งละตัวเช่นเดิม ทำเช่นเดิมจนครบทุกรูปแบบจำนวนอุปกรณ์ป้องกัน ผลลัพธ์ที่ได้ทุกครั้งที่จะเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ป้องกันคือจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันค่า SAIFI, SAIDI และราคารวม

5.1 การหาค่า SAIFI ที่เหมาะสมที่สุด

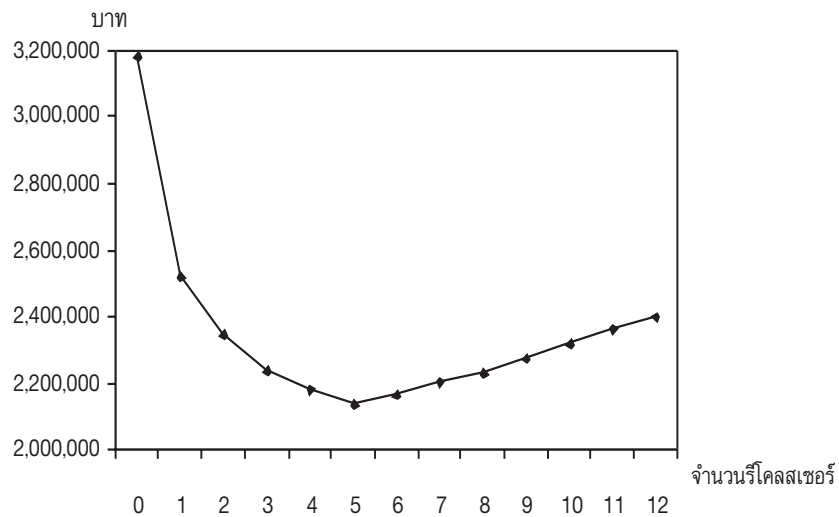
สมการจุดประสงค์ SAIFI เป็นสมการที่ซับซ้อนน้อยที่สุดเพราะไม่มีตัวแปรของอุปกรณ์ตัดตอนเกี่ยวข้องกับเนื่องจากอุปกรณ์ตัดตอนเป็นอุปกรณ์ป้องกันที่สามารถลดเวลาไฟดับของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ไม่สามารถลดจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกกระทบจากไฟดับ เมื่อนำสมการจุดประสงค์ SAIFI ในสมการ (19) มาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยโปรแกรม LINGO จะได้ผลลัพธ์เป็นจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันประเภทรีโคลสเซอร์ที่หาค่า SAIFI น้อยที่สุดดัง แสดงในรูปที่ 4 โดยมี SAIFI และมูลค่าการรวม ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 4 SAIFI ที่น้อยที่สุดของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 5 SAIDI ของระบบที่พิจารณาโดยใช้ SAIFI เป็นสมการจุดประสงค์



รูปที่ 6 มูลค่าราคารวมของระบบที่พิจารณาโดยใช้ SAIFI เป็นสมการจุดประสงค์

กราฟในรูปที่ 4 ถึง 6 แสดงผลลัพธ์จำนวนรีเลย์ต่อทั้ง 3 สมการ SAIFI และ SAIDI จะเริ่มถึงจุดอิมิตัวที่จำนวนรีเลย์เท่ากับ 5 ตัวหรือ SAIFI เท่ากับ 4.81 ครั้งต่อปี และ SAIDI เท่ากับ 281.62 นาที่ต่อปี นอกจากนี้กราฟของมูลค่าราคารวมในรูปที่ 6 ยังแสดงให้เห็นชัดเจนว่าจำนวนรีเลย์เท่ากับ 5 ตัวเป็นจุดที่ค่อมมูลค่ารวมที่สุด การเพิ่มจำนวนรีเลย์มากกว่า 5 ตัว ไม่สามารถทำให้ค่า SAIFI ลดลงไปมากนัก ค่าดัชนี SAIFI ที่น้อยที่สุดคือการติดตั้งรีเลย์ทุกจุดโหลดทั้งหมด 12 ตัว มีค่าเท่ากับ 4.61 ครั้งต่อปี ซึ่งต่างกับจำนวนรีเลย์ 5 ตัวเพียง 0.2 ครั้งต่อปีเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 5

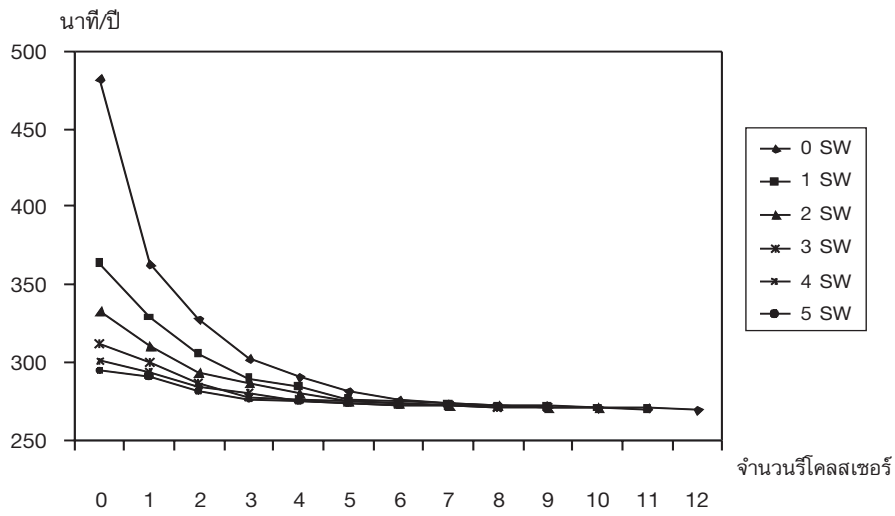
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่า SAIFI, SAIDI และมูลค่าราคารวมที่ SAIFI เริ่มอิมิตัว และ SAIFI น้อยที่สุดจากการใช้ SAIFI เป็นสมการจุดประสงค์

ตำแหน่งติดตั้งรีเลย์	มูลค่ารวม (บาท)	SAIFI (ครั้ง/ปี)	SAIDI (นาที่/ปี)
ทุกจุดโหลด	2,401,497	4.61	269.72
3, 4, 7, 10, 12	2,139,428	4.81	281.62

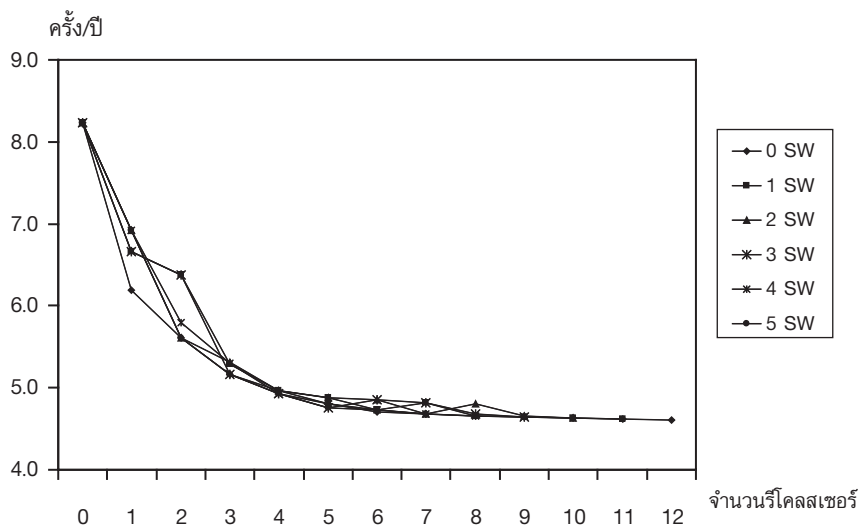
5.2 การหาค่า SAIDI ที่เหมาะสมที่สุด

สมการจุดประสงค์ของ SAIDI และมูลค่าราคารวมมีตัวแปรของอุปกรณ์ตัดตอนเข้ามาเกี่ยวข้อง กราฟในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงจำนวนอุปกรณ์ตัดตอน (หรือ SW ย่อมาจาก switch) ที่มากขึ้นสามารถลดระยะเวลาไฟดับของผู้ใช้ไฟฟ้าได้ ที่จำนวนรีเลย์มากกว่าหรือเท่ากับ 3 จำนวนอุปกรณ์ตัดตอนเริ่มไม่มีผลกับดัชนี SAIDI สำหรับ

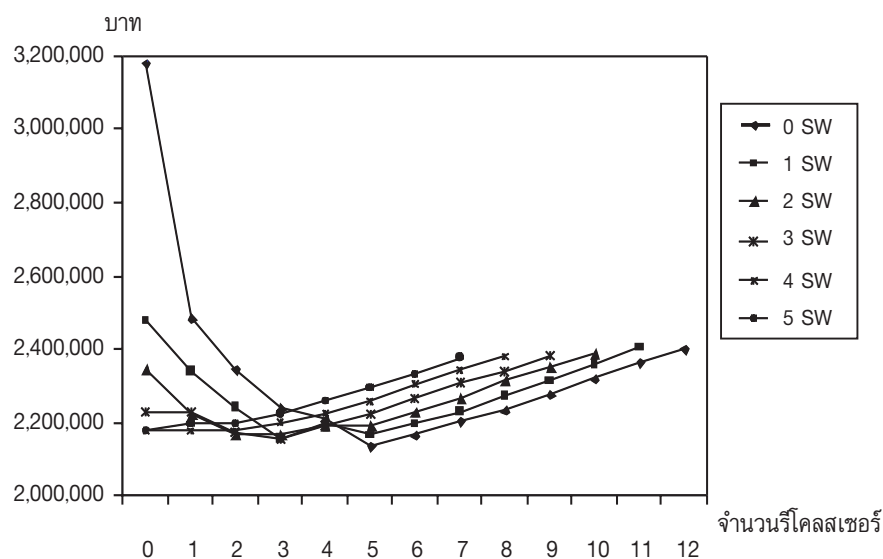
กราฟ SAIFI แต่ละเส้นในรูปที่ 8 จะมีความแตกต่างกันน้อยมาก เพราะการติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอนเพิ่มขึ้นจะไม่มีผลกับ SAIFI ความต่างกันเล็กน้อยของเส้นกราฟ SAIFI เป็นสาเหตุจากตำแหน่งติดตั้งของอุปกรณ์เปลี่ยนไป การติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอนมีผลต่อมูลค่าการรวม เนื่องจากอุปกรณ์ตัดตอนสามารถลดเวลาไฟดับและมูลค่าความเสียหายได้ ขณะที่กราฟมูลค่าการรวมในรูปที่ 8 ให้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจ มูลค่าการรวมขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ป้องกันทั้งสองชนิดโดยมีจุดผกผัน ซึ่งเมื่อผ่านจุดผกผันนี้ไปแล้วการเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันไม่สามารถลดมูลค่าการรวมได้อีก แต่กลับยิ่งทำให้เพิ่มขึ้นเนื่องจากราคาตลอดอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ลักษณะนี้จะต่างกับกราฟของ SAIFI และ SAIDI ที่ยิ่งเพิ่มอุปกรณ์ค่าจะยิ่งลด



รูปที่ 7 SAIDI ที่น้อยที่สุดของของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 8 SAIFI ของระบบที่พิจารณาโดยใช้ SAIDI เป็นสมการจุดประสงค์



รูปที่ 9 มูลค่าราคารวมของระบบที่พิจารณาโดยใช้ SAIDI เป็นสมการจุดประสงค์

ตารางที่ 6 แสดงดัชนี SAIDI ที่น้อยที่สุด 8 ค่า การติดตั้งรีโคลเซอร์ทุกจุดโหนดจะให้ค่า SAIFI และ SAIDI น้อยที่สุดดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 แต่ให้มูลค่าราคารวมสูงถึง 2,401,497 บาท กฟภ. สามารถเปลี่ยนทางเลือกมาใช้ข้อมูลในตารางที่ 7 ได้ เพราะจุดติดตั้งในตารางนี้ให้ค่าดัชนีน้อยเช่นกัน แต่มีมูลค่าราคารวมน้อยกว่าถึง 2.0-2.3 แสนบาทต่อปี โดยทั่วไป กฟภ. ไม่ได้พิจารณาค่าดัชนีเพียงอย่างเดียว แต่พิจารณาถึงการลงทุนที่คุ้มค่าที่สุดด้วย

ตารางที่ 6 ค่า SAIDI ที่น้อยที่สุด

ลำดับ	ตำแหน่งติดตั้งรีโคลเซอร์	ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอน	มูลค่าราคารวม (บาท)	SAIFI (ครั้ง/ปี)	SAIDI (นาท./ปี)
1	ทุกตำแหน่ง	-	2,401,497	4.61	269.72
2	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	13	2,406,418	4.61	269.91
3	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12	-	2,365,183	4.61	270.18
4	2,3,4,5,7,8,9,10,12	6,13	2,391,063	4.63	270.22
5	2,3,4,5,7,8,9,10,12	6	2,358,542	4.63	270.48
6	2,3,4,5,7,8,9,10,12	6,11,13	2,384,804	4.64	270.54
7	2,3,4,5,7,8,9,10,11,12	-	2,320,542	4.63	270.88
8	2,3,4,5,6,8,10,12	7,9,11,13	2,379,573	4.66	270.97

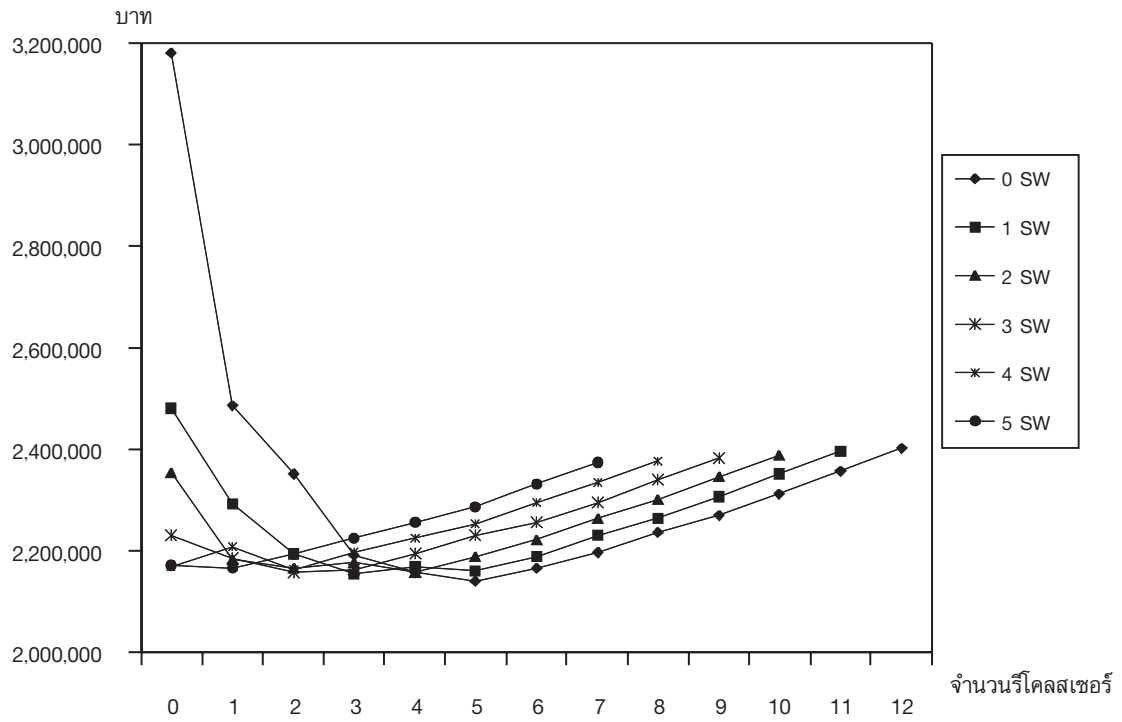
ตารางที่ 7 จุดที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ SAIDI เป็นสมการจุดประสงค์

ลำดับ	ตำแหน่งติดตั้งรีโกลเซอร์	ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอน	มูลค่าราคารวม (บาท)	SAIFI (ครั้ง/ปี)	SAIDI (นาที/ปี)
1	2, 3, 4, 8, 12	6	2,197,746	4.73	274.25
2	3, 4, 8, 10	2, 6, 12	2,191,817	4.93	275.59
3	3, 10	2, 4, 7, 8, 12	2,195,136	5.61	281.13
4	3, 4, 7, 10, 12	-	2,139,428	4.81	281.62
5	3, 9, 10	4, 12	2,167,669	5.32	286.34
6	4, 12	3, 7, 8, 10	2,179,013	6.92	293.38

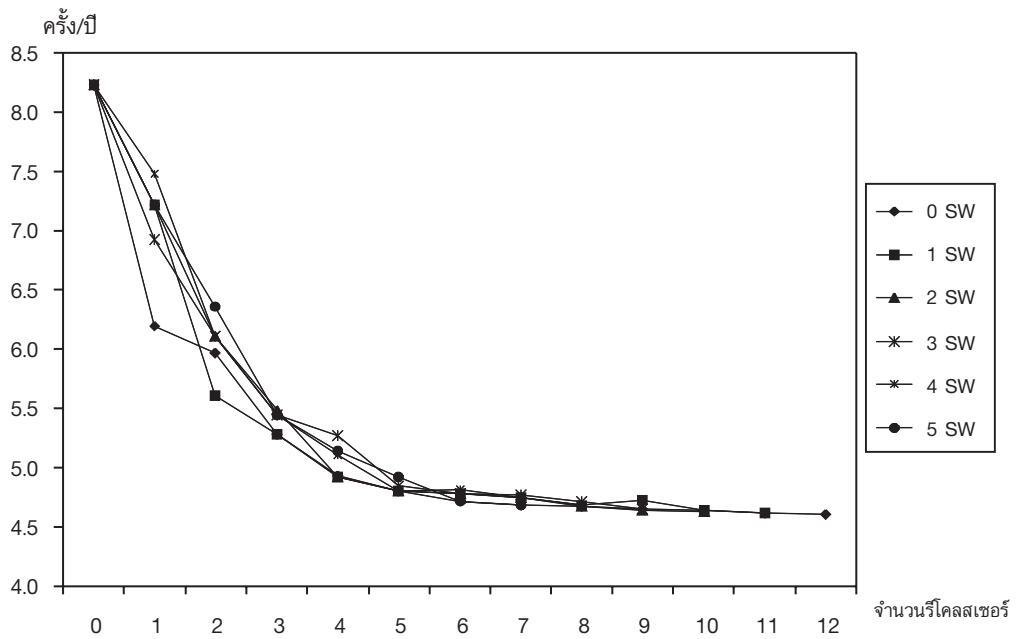
5.3 ผลลัพธ์ของสมการจุดประสงค์ราคารวม

กฟภ. ที่เป็นผู้ประกอบการเอกชนมักคำนึงถึงผลประโยชน์ที่ตอบแทนกลับมาจากเงินที่ลงทุนเสมอ หรือ แม้แต่ กฟภ. ที่เป็นองค์การบริหารสาธารณะประโยชน์ก็ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อด้านการเงินลงทุนหลังจากลงทุนเช่นกัน เพราะฉะนั้นราคารวมจึงมักเป็นปัจจัยที่แท้จริงที่ต้องคำนึงถึงก่อนเลือกลงทุนเสมอ สมการจุดประสงค์ของมูลค่าราคารวมจึงเหมาะสมกับกรณีนี้อย่างยิ่ง SAIFI และ SAIDI มักถูกพิจารณาเป็นสมการจุดประสงค์ในกรณีที่ กฟภ. กำหนดค่าดัชนีให้อยู่ในเกณฑ์จำกัด

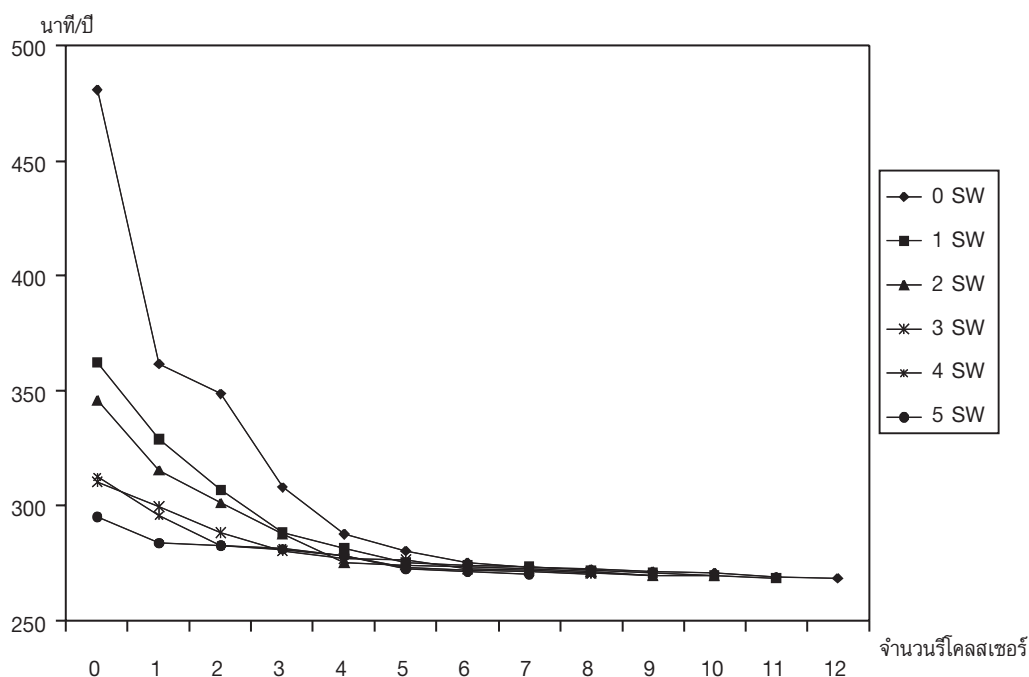
สมการ (16) ถูกนำมาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของมูลค่าราคารวมของฟีดเดอร์หลัก สำหรับมูลค่าราคารวมของฟีดเดอรี่่อยใช้สมการ (19)-(20) ผลของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแสดงในรูปที่ 10-12 โดยรูปที่ 10 แสดงผลของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสมการจุดประสงค์มูลค่าราคารวมซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับมูลค่าราคารวมที่ใช้สมการจุดประสงค์ SAIDI หรือหมายความว่า การเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ป้องกันไม่สามารถลดมูลค่าราคารวมได้เสมอไป นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตอีกประการหนึ่งนั่นคือ ในช่วงที่จำนวนอุปกรณ์ป้องกันไม่เกิน 5 ตัว ทั้งรีโกลเซอร์และอุปกรณ์ตัดตอนสามารถลดมูลค่าราคารวมได้ แต่เมื่อจำนวนอุปกรณ์ป้องกันมากกว่า 5 ตัว จะเห็นได้ชัดว่าทำให้มูลค่าราคารวมสูงขึ้น เพราะการเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันไม่สามารถลดมูลค่าราคารวมได้ ขณะที่ราคาตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 มูลค่าราคารวมที่น้อยที่สุดของระบบที่พิจารณา



รูปที่ 11 SAIFI ของระบบที่พิจารณาโดยใช้มูลค่าราคารวมเป็นสมการจุดประสงค์



รูปที่ 12 SAIDI ของระบบที่พิจารณาโดยใช้มูลค่าราคารวมเป็นสมการจุดประสงค์

ตารางที่ 8 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันและมูลค่าราคารวม SAIFI และ SAIDI ที่ให้มูลค่าราคารวมต่ำที่สุด 6 ลำดับแรก

ลำดับ	ตำแหน่งติดตั้งรีโคลสเซอร์	ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตัดตอน	มูลค่าราคารวม (บาท)	SAIFI (ครั้ง/ปี)	SAIDI (นาฬิกา/ปี)
1	3, 4, 7, 10, 12	-	2,139,428	4.81	281.62
2	3, 4, 9	12	2,155,307	5.28	289.56
3	3, 4, 9, 12	-	2,157,155	4.93	288.95
4	3, 12	4, 6, 9	2,158,024	6.11	289.40
5	3, 4, 8, 10	6, 12	2,158,739	4.93	276.55
6	3, 4, 7, 10, 12	9	2,161,183	4.81	276.76

โดยปกติ กฟภ. ไม่สามารถลงทุนเพื่อให้ได้ค่า SAIFI และ SAIDI น้อยที่สุดได้ เพราะข้อจำกัดของงบประมาณ แต่ในกรณีของสมการจุดประสงค์ราคารวม กฟภ. สามารถเลือกติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่ให้มูลค่าราคารวมที่น้อยที่สุดจากกราฟและพิจารณา SAIFI และ SAIDI ที่น่าพอใจ ตารางที่ 8 แสดงมูลค่าราคารวมที่น้อยที่สุด 6 ทางเลือก ทางเลือกที่ 1 ให้มูลค่าราคารวมน้อยที่สุดโดยใช้รีโคลสเซอร์ 5 ตัว ซึ่งให้ดัชนี SAIFI เท่ากับ 4.81 ครั้งต่อปี และ SAIDI เท่ากับ 281.62 นาฬิกาต่อปี อย่างไรก็ตาม กฟภ. อาจเปลี่ยนไปเลือกทางเลือกที่ 2 หรือ 3 ซึ่งมูลค่าราคารวมต่างกับทางเลือกที่ 1 ไม่มากนัก แต่ กฟภ. ไม่จำเป็นต้องติดตั้งรีโคลสเซอร์ที่ราคาแพงถึง 5 ตัว อย่างไรก็ตาม ทางเลือกที่

2 มีค่า SAIFI เท่ากับ 5.28 ครั้งต่อปี ซึ่งค่อนข้างมากกว่าทางเลือกที่ 1 และ 3 ในกรณีนี้ขึ้นอยู่กับค่าดัชนี SAIFI นี้เป็นที่น่าพอใจของ กฟภ. หรือไม่ ขณะที่ค่าดัชนี SAIDI เท่ากับ 289.56 เป็นค่าที่ใกล้เคียงทางเลือกที่ 1 อยู่แล้ว ทางเลือกที่ 3 น่าจะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับ กฟภ. ที่ไม่ต้องการค่าดัชนี SAIFI สูง นั่นคือเลือกติดตั้งรีโคลสเซอร์ 4 ตัว ที่ให้ค่าดัชนี SAIFI เท่ากับ 4.93 ครั้งต่อปี และ SAIDI เท่ากับ 288.95 นาทีต่อปี หรือในกรณีที่การไฟฟ้าต้องการค่าดัชนี SAIDI ต่ำ กฟภ. อาจเลือกทางเลือกที่ 5 ซึ่งให้ค่าดัชนี SAIDI ต่ำกว่าทางเลือกอื่นๆ หรือเท่ากับ 276.55 นาทีต่อปี และค่าดัชนี SAIFI เท่ากับ 4.93 ครั้งต่อปี

SAIFI, SAIDI และมูลค่าการรวม มีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับจำนวนอุปกรณ์ป้องกัน รีโคลสเซอร์สามารถลดจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกระทบจากไฟดับ และผลคูณของเวลาไฟดับกับจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกระทบจากไฟดับ เมื่อจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกระทบลดลง มูลค่าความเสียหาย IER_{fc} และ IER_{dc} ก็จะลดลงตามไปด้วย ในขณะที่อุปกรณ์ตัดตอน ไม่สามารถลดจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกระทบ แต่ลดผลคูณของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ไม่สามารถจ่ายไฟและเวลาไฟดับได้ เพราะฉะนั้นจึงลดมูลค่าความเสียหาย IER_{dc} เท่านั้น

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีทางเลือกในการเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามากมาย อาทิเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของแผนบำรุงรักษาระบบจำหน่าย การปรับเปลี่ยนระบบไฟฟ้า การเพิ่มจำนวนฟีดเดอร์ เป็นต้น การเพิ่มอุปกรณ์ป้องกันไม่ใช่ทางเลือกเดียวของการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ป้องกันก็ไม่สามารถลดอัตราความเสียหายได้เสมอไป นั่นหมายความว่า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถพิจารณาวิธีการเพิ่มความเชื่อถืออื่นที่ดีกว่าการเพิ่มอุปกรณ์ตัดตอน อย่างไรก็ตาม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคก็ต้องคำนวณประสิทธิภาพของเงินทุนที่จำกัดกับทางเลือกต่างๆ ที่มี มาเปรียบเทียบกับเพิ่มของความเชื่อถือได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เทคนิคการระบุจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันในบทความนี้สามารถใช้ได้ในกรณีที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต้องการเพิ่มอุปกรณ์ป้องกัน และสามารถช่วยเลือกจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันได้อย่างเหมาะสม

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชำนาญ ห่อเกียรติ ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบสมการในบทความนี้ และขอขอบคุณแผนกความเชื่อถือได้ระบบไฟฟ้า กองควบคุมการจ่ายไฟ และกองวิจัยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จได้ด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

1. Billinton, R. and Allan, R., 1990, *Reliability Evaluation of Power System*, 2nd ed., Pitman, Northern Ireland.
2. IEEE Working Group on System Design, 1999, "IEEE Trial-Use Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices", IEEE Standards [Electronic], pp. 2-12.

3. Soudi, F. and Tomsovic, K., Jan, 1998, "Optimized Distribution Protection Using Binary Programming", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, pp. 218-224.
4. Soudi, F. and Tomsovic, K., 2001, "Optimal Trade-offs in Distribution Protection Design," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 16, No. 12, pp. 292-296.
5. Song, Y. H. and Irving, M. R., 2001, "Optimization Techniques for Electrical Power Systems Part 2 Heuristic Optimization Methods", *Power Engineering Journal*, pp. 151-160.
6. Bupasiri, R., Wattanapongsakorn, N., Hokierti, J., and David, W. C., 2003, "Optimal Electric Power Distribution Reliability Indices using Binary Programming", *The Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 27-30 January 2003, Tampa, Florida, pp. 556-561.
7. Energy Research Institute, Chulalongkorn University, November 1996, *Study of Economical Impacts from Electricity Interruption : Final Report*, Thailand.
8. LINDO System Inc., LINGO [Online], Available : www.lindo.com [2001, May 5].
9. The Reliability Analysis Section, System Operation Division, Provincial Electricity Authority (PEA), 1998-2001, *Reliability Field Data*, Thailand.
10. The Statistics Section, Power Economic Division, Provincial Electricity Authority (PEA), *Average Baht per Energy Sale of Small General Business Customers (baht/kWh) data*, 2001, Thailand.
11. The Power System Analysis Section, Research Division, Provincial Electricity Authority (PEA), *Estimation Cost Report for Protective Devices Data*, 2001, Thailand.