

การหาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุแบบขนานบนสายป้อนแบบเรเดียลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel Solver^{*}

วรศักดิ์ นริศชนาภรณ์¹⁾ จิตติพัฒน์ ตรียางกูรศรี²⁾ อำนาจ สุขศรี³⁾ และเชี่ยวชาญ เนตรหาญ⁴⁾

¹⁾ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾ ศูนย์ควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

³⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴⁾ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Email : vorasak@elec.kku.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ เป็นการนำเสนอวิธีการ หาขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานบนสายป้อนแบบเรเดียลในระบบจำหน่ายขนาด 22kV เพื่อต้องการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียและรักษาระดับแรงดันในระบบให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel Solver ซึ่งเป็น Add-Ins ของโปรแกรม Microsoft Excel ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์เชิงเงื่อนไข โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าในเซลล์ที่กำหนด(Changing Cells) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับเซลล์เป้าหมาย(Target Cell) สำหรับการทดสอบวิธีที่ได้พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ใช้ระบบอ้างอิงจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจำนวน 2 ฟีดเดอร์ โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากฟังก์ชันเป้าหมาย(Objective Function) 2 แบบ คือ ฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการค่ากำลังสูญเสียในระบบน้อยที่สุดและฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่าระยะเวลาในการคืนทุนเร็วที่สุด ผลที่ได้รับจากการทดสอบจะนำไปทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PowerWorld โดยใช้ข้อมูลและเงื่อนไขในการวิเคราะห์เดียวกัน พบว่าผลการทดสอบที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองมีความถูกต้องไปในทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่า วิธีการที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงคุณภาพของระบบจำหน่ายได้จริงและมีประสิทธิภาพที่เชื่อถือได้ โดยมีข้อดีในกรณีที่ไม่ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ในการใช้งานโปรแกรมและผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการทำงานของโปรแกรมให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานเองได้

คำสำคัญ : ตัวเก็บประจุแบบขนาน, ค่าระยะเวลาในการคืนทุน, ระบบจำหน่าย

^{*} รับตีพิมพ์เมื่อวันที่ 27 กันยายน 2548 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 15 กันยายน 2548

Optimal Shunt Capacitor Sizing and Location on the Electrical Radial Distribution System with Microsoft Excel Solver^{*}

Vorasak Nirukkanaporn¹⁾ Jittipath Triyangkulsri²⁾ Amnart Suksri³⁾ and Cheiwchan Nethan⁴⁾

¹⁾ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

²⁾ Northeastern Dispatching Center, Electricity Generating Authority of Thailand.

³⁾ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University.

⁴⁾ Graduate student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen .

Email : vorasak@elec.kku.ac.th

ABSTRACT

This paper presented the method of placing optimal shunt capacitor on the radial distribution system 22 kV to reduce power loss and to keep the constant level of voltage of system. The Microsoft Excel Solver is an Add-Ins of Microsoft Excel program that could analyze the data with the changing cells for optimized target cells. This method was developed by testing with two feeder modifications from the Provincial Electricity Authority (PEA) and compared the results to 2 types that were the targets of minimized power loss and minimized rate of return. The results from the Microsoft Excel Solver were compared with the results from the power world program by the same data and condition. The results from 2 methods were similar, therefore, the Microsoft Excel Solver was efficient to solve the position placing capacitor problems as well as improvement on the quality of distribution system and reliability. The great benefit of the Microsoft Excel Solver is that it does not need to pay the license and the users could configure the condition of the program by themselves.

Keywords : shunt capacitor, rate of return, distribution system

^{*} Original manuscript submitted: June 27, 2005 and Final manuscript received: September 15, 2005

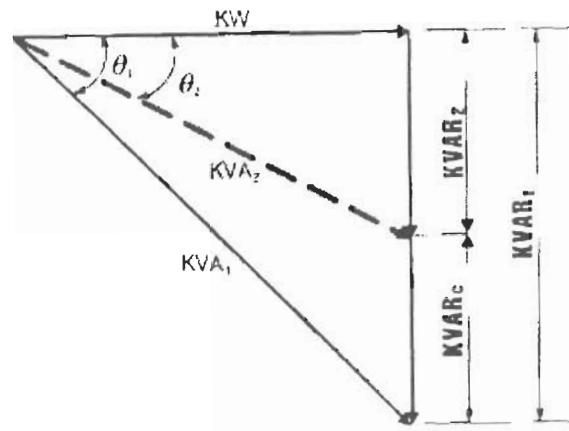
บทนำ

ปัจจุบันมีความเจริญเติบโตทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่ประสบปัญหาด้านความสูญเสียทางกำลังไฟฟ้า นอกจากนั้นยังมักส่งผลให้คุณภาพของระดับแรงดันมีคุณภาพต่ำลง ซึ่งวิธีการแก้ไขปัญหาที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน คือ การเลือกติดตั้งตัวเก็บประจุแบบขนานที่มีขนาดเหมาะสมเข้ามาในระบบจำหน่าย เพราะเป็นวิธีที่มีการลงทุนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นและง่ายต่อการบำรุงรักษา ซึ่งจะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบลดลงและสามารถช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้สำหรับการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นโดยทั่วไปแล้วจะทำการพิจารณาถึงตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งและขนาดของตัวเก็บประจุ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ ได้พิจารณาถึงเงินลงทุน ซึ่งประกอบด้วยราคาของตัวเก็บประจุพร้อมการติดตั้งและราคากำลังงานสูญเสียหลังจากการติดตั้งตัวเก็บประจุให้มีค่าต่ำสุด โดยต้องคำนึงถึงระดับแรงดันบนสายป้อนที่กำหนดด้วย

ปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับศึกษาเพาเวอร์โฟลว์และหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นจำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งใช้ภาษาคอมพิวเตอร์ขั้นสูงในการเขียน การใช้งานถูกจำกัด ต้องเสียค่าลิขสิทธิ์ในการใช้และผู้ใช้โดยทั่วไปไม่สามารถพัฒนาโปรแกรมต่อไปได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุด้วย Solver ซึ่งเป็นฟังก์ชันเพิ่มเติม (Add-in) ที่มีมาพร้อมกับโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เป็นที่นิยมและถูกใช้อย่างแพร่หลายทั้งในด้านการศึกษา อุตสาหกรรมและทางราชการ โดย 80-90% ของผู้ใช้โปรแกรม Microsoft Office จะมีความสามารถในการใช้โปรแกรม Microsoft Excel ด้วย (Fylstra, et al, 1998) ทำให้ผู้ใช้ส่วนใหญ่มีความชำนาญและคุ้นเคยกับโปรแกรม ส่งผลให้สามารถเข้าใจหลักการใช้และหลักการแก้ปัญหาได้โดยง่าย

คุณสมบัติของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในทางไฟฟ้า โครงสร้างทั่วไปของตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยแผ่นโลหะสองแผ่นที่มีวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Material) อยู่ตรงกลาง แต่ตัวเก็บประจุกำลังต้องอยู่ในสภาวะที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูง ทำให้ต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตสูงและประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน เมื่อนำไปต่อขนานกับสายป้อนจะทำให้หน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของอินดักทีฟโหลด โดยการให้กระแสที่มีเฟสนำหน้าซึ่งจะหักล้างกับองค์ประกอบที่มีเฟสล้าหลังของกระแสอินดักทีฟโหลด ณ จุดที่ทำการติดตั้ง ทำให้ขนาดของกระแสไฟฟ้าในระบบลดลงและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้ดีขึ้นดังรูปที่ 1 (Justo, 1992)



รูปที่ 1 แสดงการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังโดยการติดตั้งตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ

เมื่อ	KW	: System Active Power
	KVAR ₁	: Original System Reactive Power. Before PF correction
	KVAR ₂	: Improved System Reactive Power. After PF correction
	KVAR _c	: Corrected System Reactive Power. After PF correction

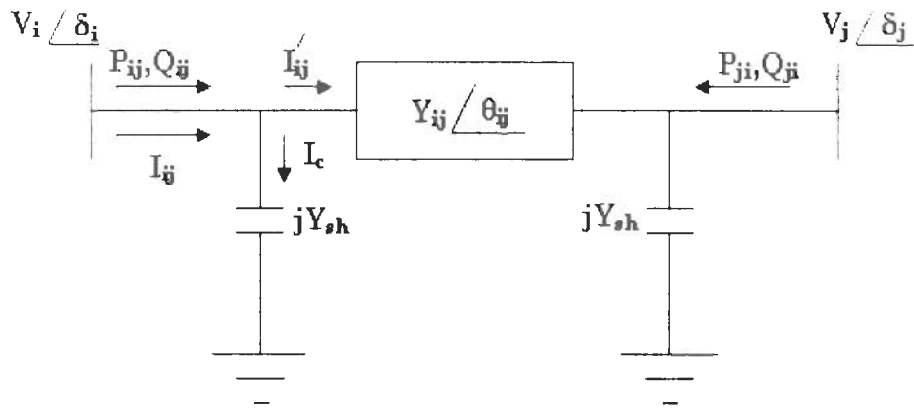
ประโยชน์จากการติดตั้งตัวเก็บประจุ

- 1) ระบบไฟฟ้าสามารถรองรับโหลดได้เพิ่มขึ้น (Release of System Capacity)
- 2) ปรับปรุงระดับแรงดันของระบบให้ดีขึ้น (Voltage Improvement)
- 3) ลดแรงดันตกในหม้อแปลง (Reduce Transformer Voltage Drop)
- 4) ลดค่ากำลังสูญเสียภายในสาย (Reduce Line Power Loss)
- 5) ลดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง (Reduce Transformer Power Loss)

จากประโยชน์ที่ได้รับพบว่า การไฟฟ้าสามารถประหยัดพลังงานและรองรับขนาดของโหลดในระบบได้เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการชะลอการลงทุนในอนาคต

การออกแบบ

สายส่งในระบบจำหน่ายจะมีระยะทางในการส่งไม่มากนัก ทำให้การออกแบบระบบตั้งสมมุติฐานในกรณีของสายส่งความยาวระยะกลาง (Medium-Length Line) ซึ่งมีการนำค่า Line Charging Capacitance เข้ามาประกอบการวิเคราะห์ระบบด้วย โดยใช้วงจรสมมูลแบบ Nominal Π -Model ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ของสายส่งขนาดกลาง

จากพารามิเตอร์ของสายจะได้สมการ การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งใดๆจากบัส i ไปยังบัส j และจากบัส j ไปยังบัส i ดังสมการที่ (1)-(4)

$$P_{ij} = V_i^2 Y_{ij} \cos(\theta_{ij}) - V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \tag{1}$$

$$Q_{ij} = V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - V_i^2 Y_{ij} \sin(\theta_{ij}) - V_i^2 Y_{sh} \tag{2}$$

$$P_{ji} = V_j^2 Y_{ji} \cos(\theta_{ji}) - V_j V_i Y_{ji} \cos(\theta_{ji} - \delta_j + \delta_i) \tag{3}$$

$$Q_{ji} = V_j V_i Y_{ji} \sin(\theta_{ji} - \delta_j + \delta_i) - V_j^2 Y_{ji} \sin(\theta_{ji}) - V_j^2 Y_{sh} \tag{4}$$

จากสมการที่ (1)-(4) ขนาดและมุมของแรงดัน ณ บัสต่างๆจะเป็นตัวกำหนดการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งหลักการหาคำตอบของเพาเวอร์ฟลิวคือ การปรับเปลี่ยนขนาดและมุมของแรงดันหรือขนาดของกำลังรีแอกทีฟ ณ บัสที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ไหลเข้าไปยังบัสเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากบัส สามารถสรุปการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ บัสใดๆได้ตามสมการที่ (5)-(6)

$$P_{Li} - P_{Gi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n P_{ij} = 0 \tag{5}$$

$$Q_{Li} - Q_{Gi} - Q_{sh} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Q_{ij} = 0 \tag{6}$$

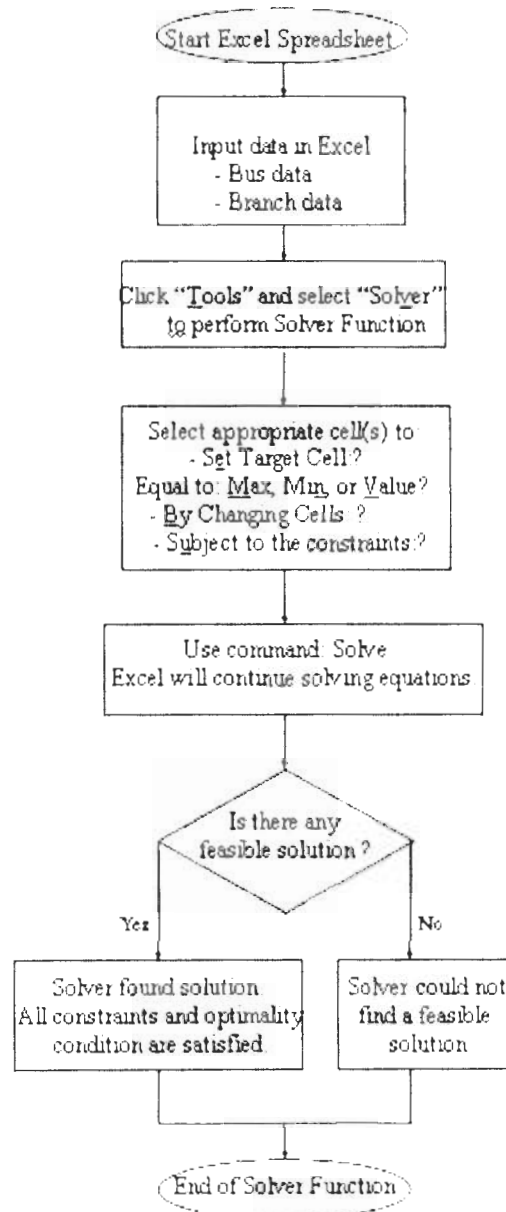
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการติดตั้ง จะพิจารณาจากระยะเวลาในการคืนทุนดังสมการที่ (7)

$$Rate\ of\ Return = \frac{\sum_{i=1}^n C_i - (G \times S)}{S \times T \times M} \tag{7}$$

เมื่อ $Rate\ of\ Return$ คือ ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)
 C_i คือ เงินลงทุนในการติดตั้งตัวเก็บประจุ ณ บัส i (บาท)

- G คือ มูลค่าการชะลอการลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าที่ประมาณการโดยเฉลี่ยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (1,000\$/kW)
- S คือ พลังงานสูญเสียจริงที่ลดลงเนื่องจากการติดตั้งตัวเก็บประจุ (kW)
- M คือ ราคาซื้อไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (บาท/kWh)
- T คือ ช่วงเวลาที่เกิดความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด (ชั่วโมง/ปี)
- n คือ จำนวนบัสทั้งหมดของระบบ

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Microsoft Excel Solver



รูปที่ 3 แสดงแผนผังการทำงานของ โปรแกรม Microsoft Excel Solver

การทำงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นโดยการป้อนข้อมูลให้แก่แผ่นงานที่1 โดยรูปแบบของข้อมูล ที่ทำการป้อนจะคล้ายกับข้อมูลในการวิเคราะห์โปรแกรมเพาเวอร์ฟลัวร์ทั่วไป คือประกอบด้วย Bus Data และBranch Data ดังแสดงในรูปที่ 8 ส่วนข้อมูลที่ป้อนให้กับ Solver ในแผ่นงานที่(2-4) คือ เซลล์วัตถุประสงค์ (Set Target Cell) เป็นเซลล์เป้าหมายซึ่งมีได้เพียงเซลล์เดียวเท่านั้น ทั้งนี้สามารถเลือก วิเคราะห์เซลล์เป้าหมายในกรณีให้เป้าหมายมีค่ามากที่สุด น้อยที่สุดหรือเท่ากับค่าใดค่าหนึ่งที่ใช้ กำหนดให้ โดย Solver จะทำการค้นหาคำตอบโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรที่กำหนดให้ใน By Changing Cells ซึ่งสามารถกำหนดเงื่อนไขในการคำนวณได้ที่ Subject to the Constrains ทำให้สามารถประยุกต์ การใช้งาน Solver ได้อย่างหลากหลาย ขึ้นอยู่กับตัวแปรและเงื่อนไขที่กำหนดให้แก่โปรแกรม โดยมี แผนผังการทำงานดังรูปที่3

ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ปัญหาผู้ใช้ต้องตั้งค่า Solver Option ให้แก่โปรแกรม โดยมีรายละเอียด ดังนี้

Solver Options		
Max Time:	100 seconds	OK
Iterations:	100	Cancel
Precision:	0.000001	Load Model...
Tolerance:	5 %	Save Model...
Convergence:	0.001	Help
☐ Assume Linear Model ☐ Use Automatic Scaling ☐ Assume Non-Negative ☐ Show Iteration Results		
Estimates Derivatives Search ☒ Tangent ☒ Forward ☒ Newton ☐ Quadratic ☐ Central ☐ Conjugate		

รูปที่ 4 แสดงหน้าต่างป้อนค่าของ Solver Option

Max Time: เวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาและคำนวณซ้ำ

Iterations: จำนวนการคำนวณซ้ำสูงสุด (หากกระบวนการแก้ปัญหาถึงเวลาสูงสุดหรือจำนวนการคำนวณซ้ำสูงสุดก่อน Solver แก้ปัญหาได้ Solver จะแสดงกล่องตอบโต้ Show Trial Solution เพื่อให้ผู้ใช้เลือกว่าต้องการคำนวณต่อ (Continuous) หรือหยุดการคำนวณ (Stop)

Precision: ระดับความแม่นยำ (ยิ่งตัวเลขมีค่าน้อยยิ่งแม่นยำมาก)

Tolerance: ระดับเปอร์เซ็นต์ของข้อผิดพลาดที่ผู้ใช้ยอมรับได้ในการแก้ปัญหา

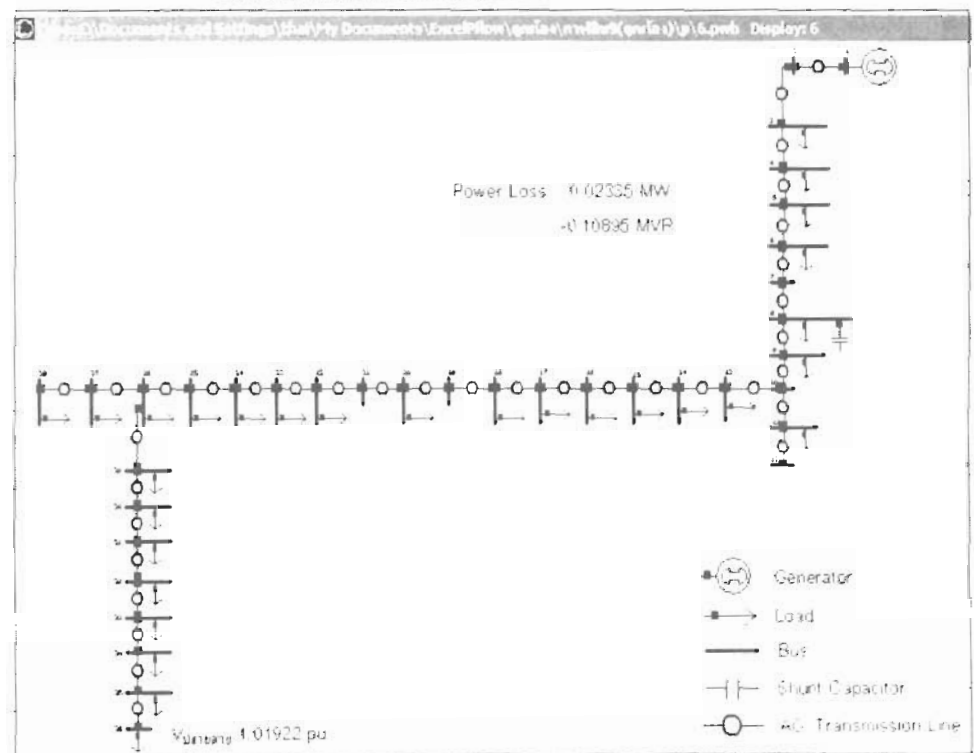
Convergence: จำนวนข้อแก้ไขสัมพัทธ์ที่ผู้ใช้ต้องการในการคำนวณซ้ำครั้งสุดท้ายก่อนที่ Solver จะหยุดเมื่อพบคำตอบ

ข้อกำหนดและข้อจำกัดของ Microsoft Excel Solver

- 1) เซลล์ที่ปรับเปลี่ยนได้ไม่เกิน 200 ตัวแปร
- 2) เงื่อนไขสูงสุดไม่เกิน 100 เงื่อนไขและเงื่อนไขรวมแล้วจะต้องไม่เกิน 1000 เซลล์
- 3) ความเที่ยงตรงของตัวเลขเท่ากับ 15 ทศนิยม
- 4) ระดับที่ซ้อนกันของฟังก์ชันไม่เกิน 7 ชั้น
- 5) การคำนวณซ้ำไม่เกิน 32,767 รอบ
- 6) ความยาวเนื้อหาของสูตรไม่เกิน 1,024 อักขระ

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม PowerWorld

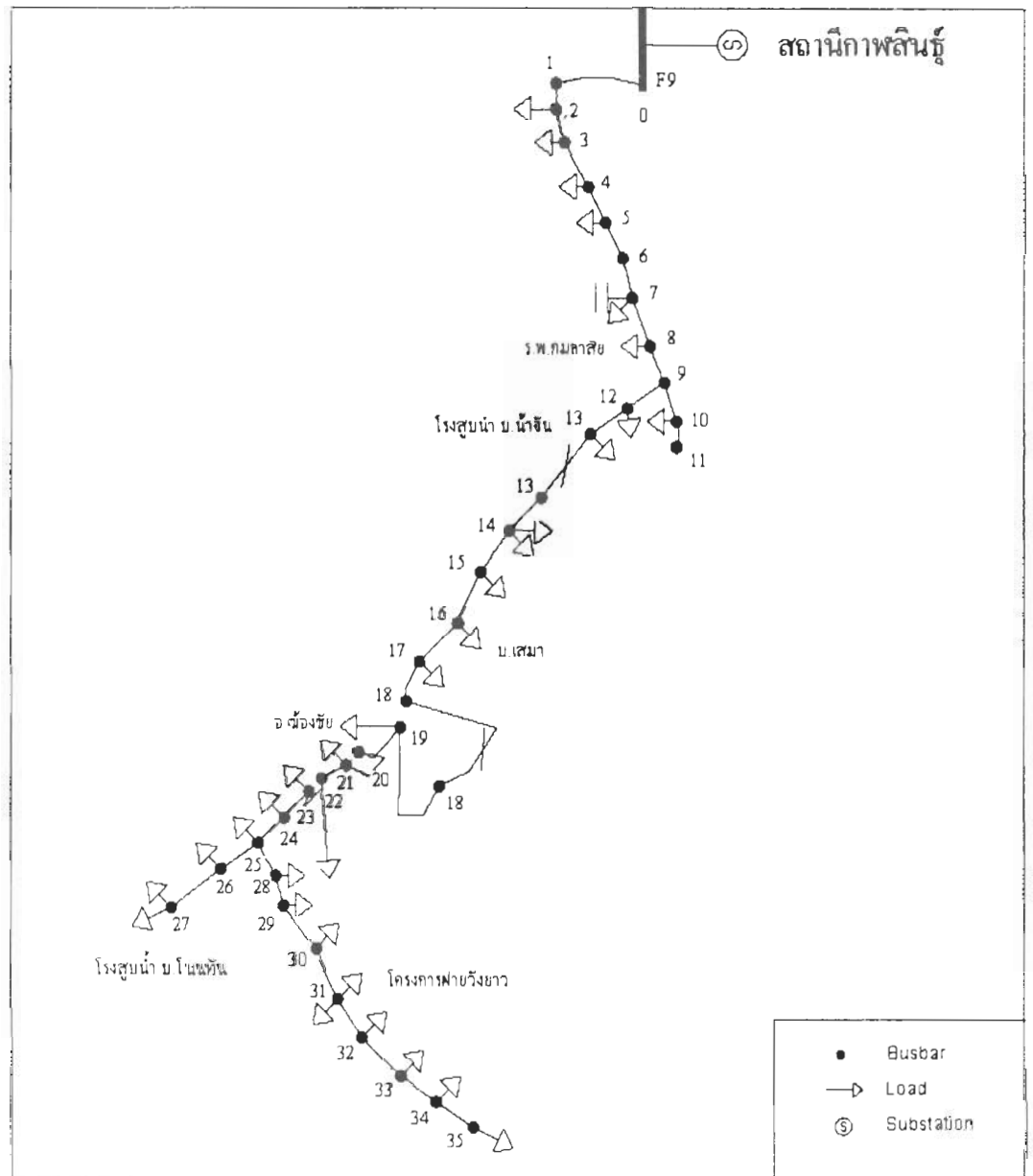
โปรแกรม PowerWorld เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่เป็นที่เชื่อถือและนิยมใช้ในปัจจุบัน ทั้งในด้านการศึกษาและการวิเคราะห์ระบบของการไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย โดยการทำงานของโปรแกรมประกอบด้วย 2 Mode คือ Edit Mode สำหรับสร้าง One-Line Diagram ของระบบพร้อมป้อนค่าพารามิเตอร์และกำหนดค่าที่ต้องการทราบจากการ Simulation และ Run Mode สำหรับทำการ Simulation ระบบและแสดงผลตามตำแหน่งที่กำหนดไว้



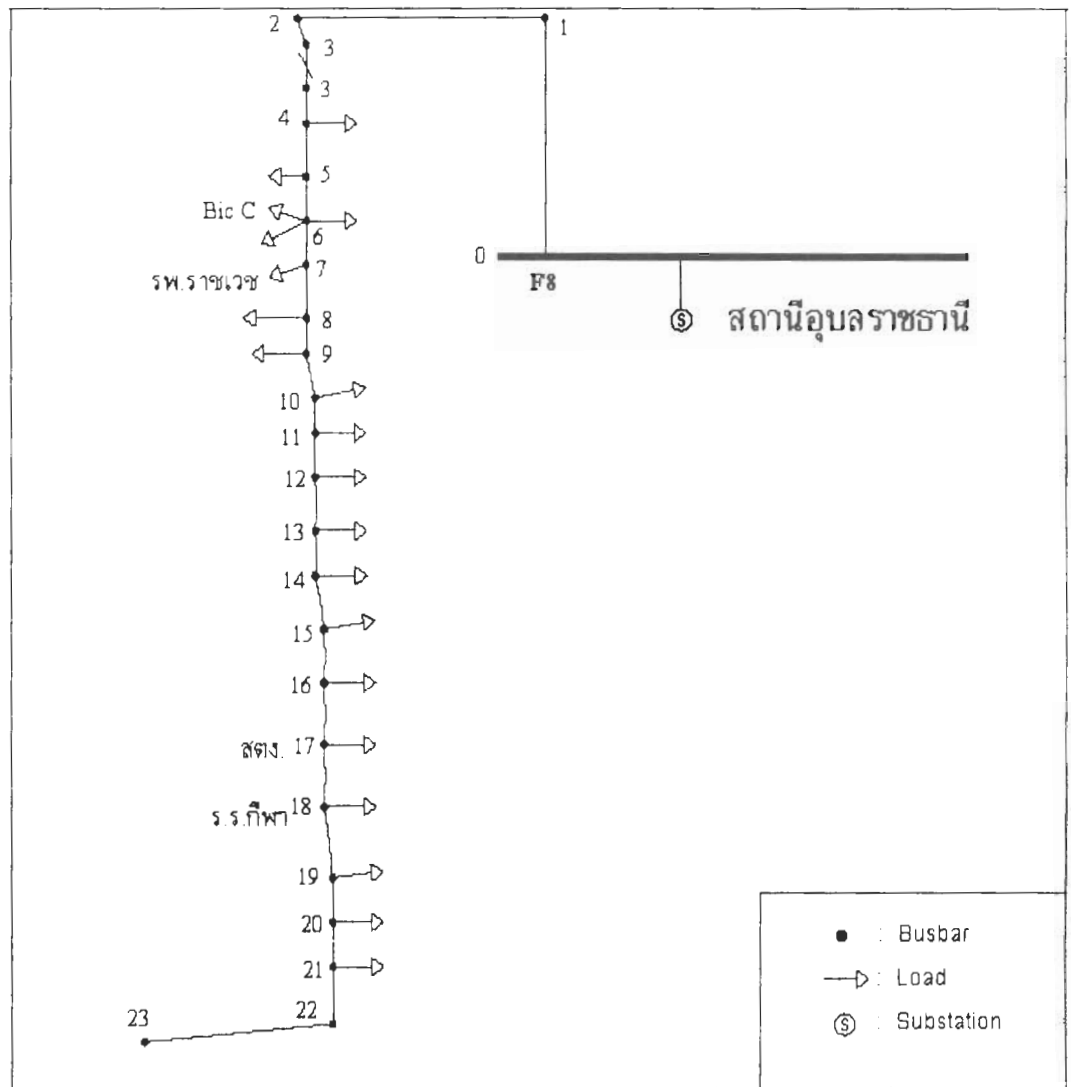
รูปที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบของจังหวัดกาฬสินธุ์ Feeder9 ด้วยโปรแกรม PowerWorld

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการทดลองโดยการนำข้อมูลอ้างอิงของระบบจำหน่าย จังหวัดกาฬสินธุ์ Feeder 9 และจังหวัดอุบลราชธานี Feeder 8 มาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Solver



รูปที่ 6 แสดงรูป Single Line Diagram ของระบบทดสอบจังหวัดกาฬสินธุ์ Feeder 9



รูปที่ 7 แสดงรูป Single Line Diagram ของระบบทดสอบจังหวัดอุบลราชธานี Feeder8

โดยเริ่มต้นกระบวนการวิเคราะห์ด้วยการป้อนค่า Input ของระบบที่แผนงานที่ 1 แล้วทำการ Solver หาค่าในแผนงานที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งป้อนค่าความสัมพันธ์ของเซลล์ตามสมการที่ (1)-(7) โดยกำหนดค่า Solver Option ของการคำนวณตามรูปที่ 4 ที่ Base 100MVA ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ระบบของจังหวัดกาฬสินธุ์ตามแผนงาน ดังนี้

LOAD		Capacitor		Voltage		Line Charging Capacitance		BASE	
From	Active Power (MW)	Reactive Power (MVAR)	Q ₀ (MVAR)	(kV)	(Degree)	(Siemens/km)	Power (MW)	Voltage (kV)	
0	-	-	-	23	0	3.365	100	22	
1	0	0							
2	0.06375	0.039508702							
3	0.1105	0.068481749				มูลค่าของค่าการชาร์จไฟ			Capacitor Price
4	0.068	0.042142615				(Bath/KW)			Size (kVAR)
5	0.0885	0.005267827				40000			(Bath)
6	0	0							300
7	0.17425	0.107990451	1.2						600
8	0.24395	0.151186631				Peak Time			900
9	0	0				(Hour/Year)			1200
10	0.0612	0.037928354				1825			1500
11	0	0							1800
12	0.1428	0.086459432							2100
13	0.01224	0.007585671				ราคาหน่วยของไฟ			2400
14	0.1236875	0.076778577				(Bath/Unit)			
15	0.08075	0.050044355				2.2629			
Total	1.1437435	1.328572277	1.2						
BUS		Impedance		Distance					
From	To	Resistance	Inductance	(km)					
0	1	0.17571	0.33444	0.34					
1	2	0.17571	0.33444	0.21					
2	3	0.17571	0.33444	1.07					
3	4	0.17571	0.33444	2.42					
4	5	0.17571	0.33444	1.59					
Total				38.45					

รูปที่ 8 แสดงรูปแบบแผนงานที่ 1 สำหรับป้อนค่า Input ให้แก่ระบบการวิเคราะห์

แผนงานที่ 1: แสดงตารางป้อนค่า Input ของระบบที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อนำไปเป็นข้อมูลเริ่มต้นในการ Solver ของแผนงานที่ 2, 3 และ 4 โดยเป็นข้อมูลของ โหลด ณ ตำแหน่งบัสต่างๆของระบบ ขนาดและตำแหน่งตัวเก็บประจุที่ติดกับระบบก่อนการวิเคราะห์ ความต้านทานและความยาวของสายส่งจากบัส i ไปยังบัส j ช่วงเวลาความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในหนึ่งปี (Peak Time) และค่า Line Charging Capacitance ของระบบ โดยขนาดของตัวเก็บประจุที่ทำการติดตั้งจะเพิ่มขึ้นลำดับขั้นละ 300kVAR และจะพิจารณาในกรณีของช่วงเวลาความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ประสบปัญหามากที่สุดเท่าที่นั้น โดยไม่พิจารณาถึงความต้านทานของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าและผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุ

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1		PL	QL	Qsh	PC	QC	Qsd	Wpu	delta	Ppu	Qpu	Qshat	sumP	sumQ	Actual	voltage	Cste	BASE		
2	bus	name	(MW)	(MVAR)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(MVAR)	deg	(voltag)	(rad)				(kV)	(degree)	(MVAR)	Power(MW)	Voltage(kV)	
3	1		0	0	0	0	0	1.0455	0						23	0		100	23	
4	1		0	0	0	0	0	1.0452	-5E-04	0	0	0	1.62E-09	-8.8570E-10	22.93478	-0.0272	0.3			
5	2		0.0375	0.0351	0	0	0	1.0451	-8E-04	0.0004	0.0004	0	4.03E-09	-1.93704E-09	22.93156	-0.344	0.3			Z(Base)
6	3		0.1125	0.0348	0	0	0	1.0444	-0.002	0.0011	0.0008	0	1.92E-08	-6.5104E-09	22.97026	-0.1201	0.3			0.84
7	4		0.048	0.04214	0	0	0	1.0451	-0.003	0.0008	0.0002	0	4.67E-08	-1.44013E-08	22.94687	-0.3117	0.3			
8	5		0.0035	0.00227	0	0	0	1.0422	-0.001	0.1E-03	3.3E-05	0	3.77E-09	-1.11464E-09	22.92799	-0.4218	0.3			
9	6		0	0	0	0	0	1.042	-0.001	0	0	0	1.31E-08	-3.634E-09	22.92473	-0.4512	0.3			
10	7		0.12425	0.10799	1.2	0	0	1.0453	-0.003	0.00124	0.00108	-0.013	-0.0E-08	-1.3403E-07	22.92283	-0.469	0.3			
11	8		0.24395	0.15114	0	0	0	1.0451	-0.001	0.00244	0.00151	0	2.14E-08	-5.04692E-09	22.92044	-0.4712	0.3			
12	9		0	0	0	0	0	1.0419	-0.003	0	0	0	5.49E-08	-1.91819E-08	22.91675	-0.4728	0.3			
13	10		0.0412	0.03793	0	0	0	1.0416	-0.001	0.0004	0.00038	0	7.75E-09	-2.1557E-09	22.91403	-0.4789	0.3			
14	11		0	0	0	0	0	1.0416	-0.001	0	0	0	-1.7E-11	-3.64195E-11	22.91083	-0.4789	0.3			
15	12		0.1428	0.0885	0	0	0	1.0405	-0.001	0.00143	0.00088	0	1.44E-08	-5.11993E-09	22.89851	-0.507	0.3			
16	13		0.01224	0.00759	0	0	0	1.04	-0.001	0.00012	7.6E-05	0	-3.2E-11	-5.09794E-11	22.87954	-0.5134	0.3			
17	14		0.12389	0.07678	0	0	0	1.0393	-0.003	0.00124	0.00077	0	1.33E-08	-4.23789E-09	22.86489	-0.5159	0.3			
18	15		0.0075	0.00084	0	0	0	1.038	-0.01	0.00001	0.0005	0	0.22E-08	-3.26392E-09	22.85578	-0.5497	0.3			
19	16		0.0315	0.00793	0	0	0	1.0362	-0.011	0.00034	0.0003E	0	1.04E-08	-3.72025E-09	22.79619	-0.6344	0.3			
20	17		0.0425	0.02634	0	0	0	1.035	-0.011	0.00043	0.00024	0	1.32E-08	-2.00361E-09	22.76992	-0.6454	0.3			
21	18		0	0	0	0	0	1.0342	-0.012	0	0	0	7.6E-08	-4.02487E-08	22.75538	-0.6667	0.3			
22	19		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	20		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	21		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	22		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	23		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	24		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	25		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	26		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30	27		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31	28		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
32	29		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
33	30		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
34	31		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
35	32		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
36	33		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
37	34		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
38	35		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
39	36		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
40	37		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
41	38		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
42	39		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
43	40		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
44	41		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
45	42		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
46	43		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
47	44		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
48	45		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
49	46		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
50	47		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
51	48		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
52	49		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
53	50		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
54	51		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
55	52		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
56	53		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
57	54		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
58	55		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
59	56		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
60	57		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
61	58		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
62	59		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
63	60		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
64	61		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
65	62		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
66	63		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
67	64		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
68	65		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
69	66		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
70	67		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
71	68		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
72	69		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
73	70		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
74	71		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
75	72		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
76	73		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
77	74		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
78	75		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
79	76		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
80	77		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
81	78		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
82	79		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
83	80		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
84	81		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
85	82		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
86	83		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
87	84		0	0	0	0														

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	PLI	QLI	QOU	PGI	QOI	QOOD	STP	Volage	delta	Pipu	Qipu	Qoutot	sumP	sumQ	Actual	Volage	Cost	BASE		
2	name	QVARS	QVARS	QVARS	QVARS	QVARS									QVARS	QVARS	QVARS	Power	Volage	Power
3	0						0	1.0455	0						23	0		100	27	
4	5	0	0	0			0	1.0455	-5E-04	0	0	0	3.7E-12	0.2751E-11	21.9364	-0.0283	0.5			
5	2	0.00735	0.03553	0			0	1.0453	-5E-04	0.00004	0.0004	0	1.6E-15	2.0000E-10	21.9363	-0.0476	0.5			
6	3	0.1105	0.03048	0			0	1.04673	-0.002	0.00113	0.00018	0	4.0E-11	1.6667E-10	22.0039	-0.158	0.5			
7	4	0.068	0.04216	0			0	1.0438	-0.001	0.00018	0.00042	0	1.0E-11	0.5551E-10	22.9451	-0.3363	0.5			
8	5	0.0005	0.00327	0			0	1.0434	-0.001	0.0E-05	5.0E-05	0	2.0E-11	2.1004E-10	22.9182	-0.4639	0.8			
9	6	0	0	0			0	1.0432	-0.001	0	0	0	3.7E-11	-0.0007E-11	22.9326	-0.6075	0.1			
10	7	0.17625	0.03759	1.2			0	1.04325	-0.001	0.00176	0.00008	-0.01184	2.0E-10	-0.07102E-10	22.9523	-0.1043	0.8			
11	8	0.24395	0.05119	0			0	1.0433	-0.001	0.00246	0.00051	0	3E-10	-0.42397E-10	22.9526	-0.3083	0.9			
12	9	0	0	0			0	1.04305	-0.001	0	0	0	1.7E-09	1.27000E-09	22.9673	-0.5163	0.1			
13	10	0.0432	0.03793	0			0	1.04302	-0.001	0.00018	0.00018	0	-0.0E-11	-7.69132E-11	22.9666	-0.5176	0.8			
14	11	0	0	0			0	1.04302	-0.001	0	0	0	2.3E-10	-0.4970E-11	22.9645	-0.5276	0.8			
15	12	0.0458	0.0385	0			0	1.04289	-0.01	0.00143	0.00001	0	5.1E-10	0.60110E-04	22.9250	-0.5542	0.9			
16	13	0.01224	0.00759	0			0	1.04167	-0.01	0.00012	7.0E-03	0	-0.2E-14	3.55510E-09	22.9166	-0.5703	0.9			
17	14	0.12389	0.07678	0			0	1.04115	-0.01	0.00126	0.00077	0	-3.0E-10	0.01709E-09	22.9060	-0.5924	0.8			
18	15	0.00075	0.05064	0			0	1.04008	-0.011	0.00018	0.0005	0	-1.4E-09	1.64726E-09	22.8834	-0.6582	0.8			
19	total	2.94534	1.0017				0						error	-0.07607E-10						
20							Flow	21.9571	kW											
21							Qflow	-131.874	kVAR											
22							Power Factor	1.0035	kW											
23							Power Factor	0.9741	%											
24							Rate Of Return	0	%											
25							Set Target Cost	Maximum \$3510												
26							By Charging Costs	\$154.18355												
27							Subject to the constraints:													

รูปที่ 11 แสดงรูปแบบแผนงานที่ 4 สำหรับวิเคราะห์หาค่า Rate of Return ที่น้อยที่สุดของระบบเมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุ

แผ่นงานที่ 4: แสดงตารางวิเคราะห์ตำแหน่งและขนาดของตัวเก็บประจุที่ทำการติดตั้งให้แก่ระบบ บนเงื่อนไข เพื่อให้ระยะเวลาในการคืนทุน (Rate of Return) น้อยที่สุดและแรงดันในระบบไม่ต่ำกว่า 0.95 Per-unit

เพื่อเป็นการยืนยันว่าโปรแกรม Microsoft Excel Solver สามารถวิเคราะห์ระบบได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ จึงนำข้อมูลของกรณีทดสอบ มาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PowerWorld โดยใช้ข้อมูลและเงื่อนไขในการวิเคราะห์เดียวกันกับโปรแกรม Microsoft Excel Solver เพื่อให้อ้างอิงเปรียบเทียบในการพิจารณา จากการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทั้งสองได้ผล ดังต่อไปนี้

จังหวัดกาฬสินธุ์	Excel Solver	Power World	% Error	Capacitor Placement (ขนาดkVAR, ตำแหน่งBus)
แผนงานที่ 2				
Ploss(kW)	23.35562	23.35273	0.01237	-
Qloss(kVAR)	-108.93146	-108.9468	-0.01408	-
Vปลายสาย(V)	1.01922	1.01927	-0.00491	-
แผนงานที่ 3				
Ploss(kW)	21.61041	21.60929	0.00518	(300,22),(300,29)
Qloss(kVAR)	-111.05694	-111.06967	-0.01146	
Vปลายสาย(V)	1.02917	1.02922	-0.00486	
Ploss ลดลง(kW)	1.74521	-	-	
Rate of Return(ปี)	5.2989	-	-	
แผนงานที่ 4				
Ploss(kW)	21.85213	21.84939	0.01254	(300,22)
Qloss(kVAR)	-110.83621	-110.85146	-0.01376	
Vปลายสาย(V)	1.02307	1.02312	-0.00489	
Ploss ลดลง(kW)	1.50349	-	-	
Rate of Return(ปี)	0	-	-	

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบของจังหวัดกาฬสินธุ์ Feeder9 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Solver
เปรียบเทียบกับโปรแกรม PowerWorld

จังหวัดอุบล	Excel Solver	Power World	% Error	Capacitor Placement (ขนาดkVAR, ตำแหน่งBus)
แผนงานที่ 2				
Ploss(kW)	14.40029	14.40272	-0.01687	-
Qloss(kVAR)	2.69034	2.6891	0.04609	-
Vปลายสาย(V)	1.03848	1.03848	0	-
แผนงานที่ 3				
Ploss(kW)	10.45553	10.45726	-0.01655	(300,3),(300,4),(300,5),(300,6)
Qloss(kVAR)	-3.45596	-3.45696	-0.02894	(300,8),(300,9),(300,15)
Vปลายสาย(V)	1.04168	1.04168	0	
Ploss ลดลง(kW)	3.94476	-	-	
Rate of Return(ปี)	24.2709	-	-	
แผนงานที่ 4				
Ploss(kW)	14.40029	14.40272	-0.01687	-
Qloss(kVAR)	2.69034	2.6891	0.04609	-
Vปลายสาย(V)	1.03848	1.03848	0	-
Ploss ลดลง(kW)	0	-	-	
Rate of Return(ปี)	0	-	-	

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ระบบของจังหวัดอุบลราชธานี Feeder8 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Solver
เปรียบเทียบกับโปรแกรม PowerWorld

จากผลการทดลองพบว่า ระบบของจังหวัดกาฬสินธุ์ เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุจะสามารถลดค่าพลังงานสูญเสียในระบบได้มากเมื่อเทียบกับจำนวนตัวเก็บประจุที่ทำการติดตั้งบนแผ่นงานที่ 3 และใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อยทำให้คุ้มค่าต่อการลงทุนติดตั้ง เมื่อทำการวิเคราะห์บนแผ่นงานที่ 4 จึงพบว่า ระบบแนะนำให้ติดตั้งตัวเก็บประจุเหลือหนึ่งตัว เพื่อให้คุ้มค่าต่อการลงทุนมากที่สุด และในส่วนระบบของจังหวัดอุบลราชธานี เมื่อทำการติดตั้งตัวเก็บประจุพบว่า สามารถลดค่าพลังงานสูญเสียในระบบได้น้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนตัวเก็บประจุที่ทำการติดตั้งบนแผ่นงานที่ 3 และใช้ระยะเวลาในการคำนวณมาก ทำให้ไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนติดตั้ง เมื่อทำการวิเคราะห์บนแผ่นงานที่ 4 จึงพบว่าไม่ควรทำการติดตั้งตัวเก็บประจุเพิ่มให้แก่ระบบเนื่องจากระบบมีประสิทธิภาพที่ดีอยู่แล้ว ซึ่งตัวเก็บประจุที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบมีอายุการใช้งาน 20 ปี หากการวิเคราะห์พบว่าค่าระยะเวลาในการลงทุนต่ำกว่า 20 ปี แสดงให้เห็นว่ามีความคุ้มค่าในการติดตั้งตัวเก็บประจุนั้นๆ และจากค่าความผิดพลาด ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมทั้ง 2 พบว่ามีค่าน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม Microsoft Excel Solver สามารถวิเคราะห์ระบบได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการหาตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุบนระบบจำหน่ายแบบเบเรเดียล ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Solver โดยมีเงื่อนไขในการรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบโดยใช้ระยะเวลาในการคำนวณเร็วที่สุด โดยนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PowerWorld พบว่ามีความถูกต้องไปในทางเดียวกันและมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทำให้สามารถสรุปได้ว่าโปรแกรม Microsoft Excel Solver สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงคุณภาพของระบบจำหน่ายได้จริงและมีประสิทธิภาพที่เชื่อถือได้ โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทราบถึงวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขหรือแม้กระทั่งการเขียนโปรแกรม ทั้งยังสามารถพัฒนาเงื่อนไขการทำงานของโปรแกรมให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานเองได้โดยไม่เสียค่าลิขสิทธิ์ในการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ แผนกวางแผนการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต2(ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยและภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น รวมทั้งผู้สนับสนุนทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- Justo Benitez. 1992. Application of Capacitor for Power Factor Correction for Industrial Electrical Distribution System. **Conference on Petroleum and Chemical Industry Industry Applications Society 39th Annual: 77-86**
- Daniel Fylstra, Leon Lasdon, John Watson and Alan Waren Glover. 1998. Desige and Use of the Microsoft Excel Solver. **INFORMS INTERFACES**. 28, 5 September-October: 29-55
- J.Duncan Glover and Mulukutla S.Sarma. 2002. **Power System Analysis and Design**. 3th ed. USA: BROOKS/COLE
- Wayne L.Winston. 1994. **Operations Research:Applications and Algorithms**. 3th ed. USA: Wadsworth Publishing Company.