

การวางแผนและปฏิบัติการเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ด้วยการวิเคราะห์แผนเหตุการณ์

Planning and Operation for Increasing Capacity of Transmission System with Scenarios Analysis

ณัฏชพล เรืองทรัพย์¹ มนัส บุญเกียรติทอง² และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ^{3*}

^{1,2,3*}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

^{3*}E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการวางแผนและปฏิบัติการเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์แผนเหตุการณ์ วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าตามแผนเหตุการณ์ ปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มที่สูงขึ้นถ้าเกิดเหตุการณ์เพิ่มหรือลดโหลดในระบบอย่างทันทีทันใด จะส่งผลให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ารับภาระโหลดทางไฟฟ้ามากเกินไป ดังนั้นจึงเสนอบทความนี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการณ์ปกติ กรณีที่ 2 การเพิ่มวงจรสายส่ง กรณีที่ 3 การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า กรณีที่ 4 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว จากผลการจำลองพบว่าในกรณีที่ 2, 3 และ 4 สามารถเพิ่มสมรรถนะในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

คำสำคัญ: การวางแผนและปฏิบัติการ ระบบส่งกำลังไฟฟ้า การวิเคราะห์แผนเหตุการณ์

* Corresponding author, e-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

Abstract

This paper presents planning and operation for increasing capacity of transmission system with scenarios analysis. The objective is studying the capacity of transmission system follow scenario. Nowadays, electricity consumption tends to increase. If an abrupt increase or decrease in load occurs in the system, it will result in an overload of the electrical power transmission system. Therefore, this paper is proposed to increase capacity of transmission system by using a mathematical simulation program. It is divided into 4 case studies namely, Case 1: Power flow in normal conditions. Case 2: Adding a transmission line. Case 3: Increasing the voltage. Case 4 installation a distributed generation. From the simulation results, it was found that in cases 2, 3 and 4 the capacity of transmission system could be increased.

Keywords: Planning and Operation, Transmission System, Scenarios Analysis

1. บทนำ

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั่วโลกกำลังอยู่ระหว่างการปรับโครงสร้างใหม่อย่างต่อเนื่องระบบส่งกำลังไฟฟ้าปัจจุบันมีภาระทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ดังนั้นความยืดหยุ่นของระบบส่งกำลังไฟฟ้าจึงเป็นคุณสมบัติสำคัญเพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดในอนาคต [1] ในอดีตมีวิธีการมากมายสำหรับการปรับปรุงระบบส่งกำลังไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 2004 [2] มีการศึกษาวิเคราะห์เพื่อกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง (Distributed Generation : DG) ในระบบเครือข่าย วัตถุประสงค์เพื่อลดการสูญเสียพลังงานของระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัติ มีข้อจำกัดอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อตำแหน่ง DG อย่างไรก็ตาม วิธีการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพและประโยชน์กับนักออกแบบระบบในการเลือกขนาดที่เหมาะสมเพื่อวาง DG ในปี ค.ศ. 2005 [3] มีการพิจารณาประโยชน์ของ DG ในการลดความสูญเสียของสายส่งไฟฟ้าที่มีโหลดสูงที่ส่วนท้ายและหนึ่ง DG ผลการวิจัยพบว่า DG สามารถลดการสูญเสียของสายไฟฟ้าได้ ในปี ค.ศ. 2016 [4] มีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อถึงกัน ในงานวิจัยนี้มีการพิจารณาดัชนีความเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้า ดัชนีเสถียรภาพการถ่ายโอนของกำลังไฟฟ้า ดัชนีการเบี่ยงเบนความต้องการกำลังไฟฟ้า ดัชนีการโหลดหม้อแปลง และดัชนีการโหลดสายส่ง ประสิทธิภาพของสายส่งแต่ละเส้นจะถูกเปรียบเทียบกับสายส่งอื่น ๆ ในระบบที่เชื่อมต่อกันและความจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่จำเป็นสำหรับการติดตั้งที่สถานีกริดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพจะได้รับการประเมินด้วยอัลกอริทึม Comparison Based DG Implementation ทำการจำลองในโปรแกรม MATLAB ในปี ค.ศ. 2019 [5] มีการศึกษาประยุกต์ใช้เทคนิค Multi-Verse Optimizer (MVO) เพื่อปรับปรุงการวางแผนขยายโครงข่ายสายส่ง (TNEP) มีวัตถุประสงค์เพื่อการเลือกเส้นทาง ประเภทและจำนวนของวงจรที่เพิ่ม MVO ได้รับการพัฒนาและนำไปใช้เพื่อแก้ปัญหา TNEP สำหรับเครือข่ายระบบ West Delta

System (WDS) ของอียิปต์ที่มีการส่งสัญญาณจริงสองเครือข่าย และ 500 kV ของระบบไฟฟ้าแรงสูงพิเศษ (EHVS) ผลการจำลองสำหรับทั้งสองระบบแสดงความสามารถของ MVO ที่เสนอในการแก้ปัญหา TNEP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถวางแผนทางเศรษฐกิจและกำหนดเส้นทางการส่งข้อมูลที่ปลอดภัย ในปีเดียวกัน (ค.ศ. 2019) [6] มีการศึกษาการประยุกต์ใช้การปรับปรุงโพรไฟล์แรงดันไฟฟ้าโดยฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทดสอบในแบบจำลองระบบการจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ด้วยเทคนิคการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ผลลัพธ์พบว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถปรับปรุงแรงไฟฟ้าดันตกในระบบจำหน่ายได้

ดังนั้นบทความนี้เสนอวิธีการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์แผนเหตุการณ์ ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องนำโปรแกรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์เนื่องจากความซับซ้อนของระบบซึ่งใช้เวลานานในการคำนวณโปรแกรม MATLAB/Simulink ใช้ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์โดยใช้บล็อกและเครื่องมือ (Simscape Electric) ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า [7] โดยแบ่งออกเป็น 4 กรณีศึกษา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ปัจจุบันการขยายตัวอย่างรวดเร็วของเศรษฐกิจและการคมนาคมส่งผลให้ความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสวนทางกับระบบส่งกำลังไฟฟ้าเนื่องจากความจุในการส่งถูกจำกัดด้วยความร้อนของสายส่ง [8] สายส่งไฟฟ้าจะมีความจุที่กำหนดถ้าในระบบไฟฟ้ามีการเพิ่มหรือลดโหลดจะส่งผลให้สายส่งบางเส้นในระบบรับภาระโหลดทางไฟฟ้าสูงเกินไป จากมุมมองของการรักษาความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือในการทำงานของระบบสายส่งจำเป็นต้องรักษาวิสัยความสามารถของระบบเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณโหลดที่เพิ่มขึ้นให้เพียงพอในกรณีฉุกเฉินเพื่อให้มั่นใจถึงสถานะด้านความปลอดภัยผู้จ่ายไฟจะปรับความจุของสายให้สามารถรับโหลดได้สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อรองรับกรณีฉุกเฉิน [9]

แอดมิตแตนซ์และอิมพีแดนซ์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า [10] ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$y = \frac{j}{x_C} \quad (1)$$

$$z = r + jx_L \quad (2)$$

โดยที่	y	คือ แอดมิตแตนซ์ของสายส่ง
	z	คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง
	r	คือ ปริมาณของความต้านทาน
	j	คือ ส่วนจินตภาพ
	x_C	คือ ค่ารีแอคแตนซ์คาปาซิทีฟ
	x_L	คือ ค่ารีแอคแตนซ์ความเหนี่ยวนำ

2.2 โปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

Simulink เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานอยู่บนโปรแกรม MATLAB ใช้ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์โดยใช้บล็อกและเครื่องมือในหมวด Simscape Electric ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า [7] MATLAB/Simulink ในหมวดระบบไฟฟ้าใช้การคำนวณตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)-(4)

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i) \tag{3}$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j + \delta_i) \tag{4}$$

โดยที่ P_i คือ กำลังไฟฟ้าที่บัส i และ Q_i คือ กำลังไฟฟารีแอกทีฟที่บัส i โดยรูปแบบสมการเมทริกซ์สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta |V_i| \end{bmatrix} \tag{5}$$

โดยที่ J คือ เมทริกซ์จาโคเบียน V_i คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส i และ δ_i คือ มุมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่บัส i การคำนวณสายส่งไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังสมการที่ (6)-(8)

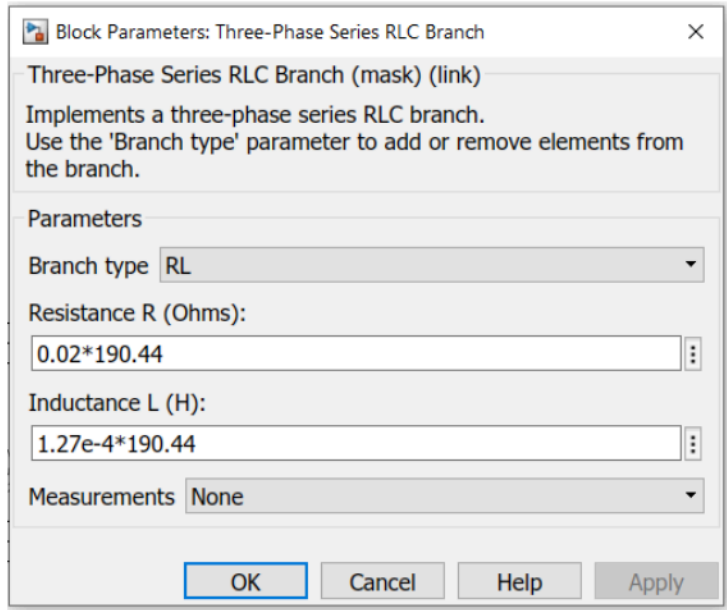
$$Z_{actual} = Z_{p.u.} \times Z_{base} \tag{6}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \tag{7}$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \tag{8}$$

- โดยที่ Z_{actual} คือ ค่าอิมพีแดนซ์จริง
- Z_{base} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ฐาน
- $Z_{p.u.}$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์เปอร์ยูนิต

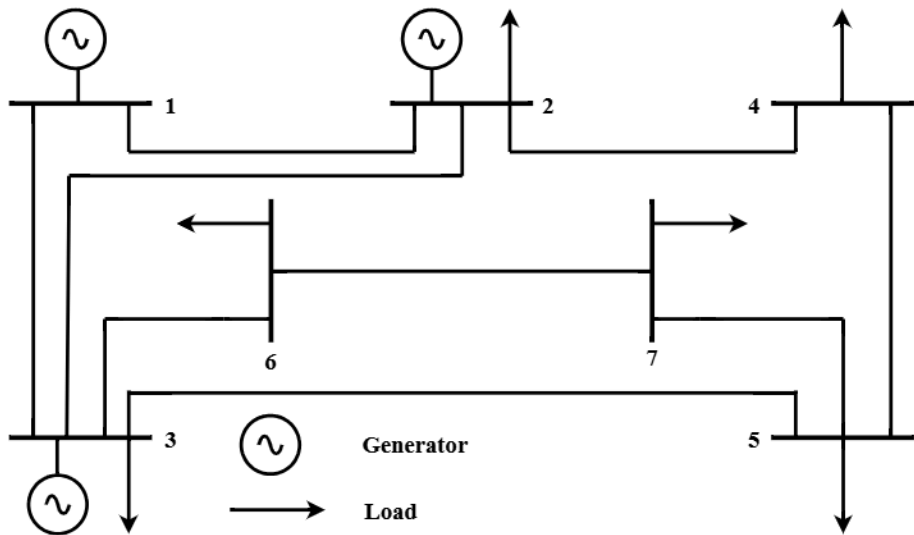
การคำนวณสายส่งไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การคำนวณสายส่งไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink

2.3 กรณีศึกษา

ในบทความนี้มีการประมวลผลเทคนิคที่นำเสนอด้วยโปรแกรมทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าโดยจะเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าทดสอบในแบบจำลองระบบส่งกำลังไฟฟ้า 7 บัส ประกอบด้วย 3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ 6 โหลดทางไฟฟ้าโหลดรวมของระบบ 280 MW 145 MVar แรงดันไฟฟ้าฐาน คือ 138 kV ค่าฐานของระบบ คือ 100 MVA แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 7 บัส ดังแสดงในรูปที่ 2 กรณีศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 7 บัส ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 7 บัส

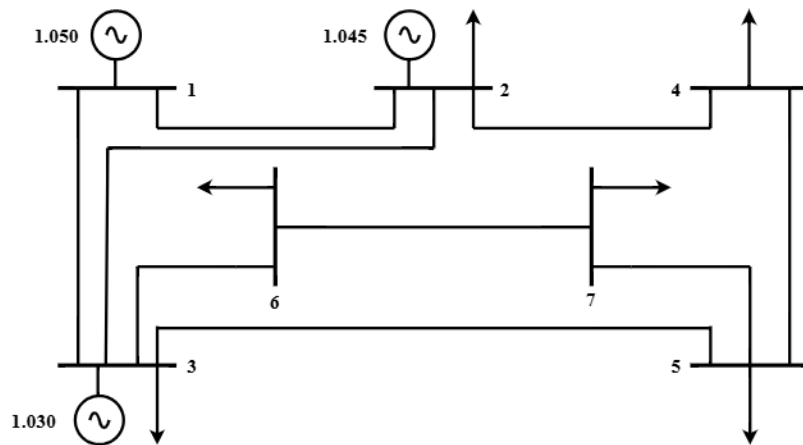
ตารางที่ 1 กรณีศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 7 บัส

กรณี	การทดสอบ
1	การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการณ์ปกติ
2	การเพิ่มวงจรสายส่ง
3	การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า
4	การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

3. ผลการทดสอบ

กรณีที่ 1

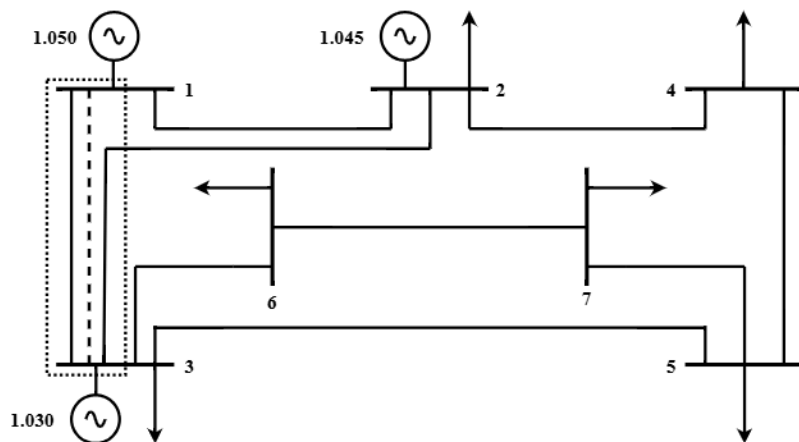
การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการณ์ปกติในกรณีนี้เป็นกรณีพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กรณีการไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการณ์ปกติ

กรณีที่ 2

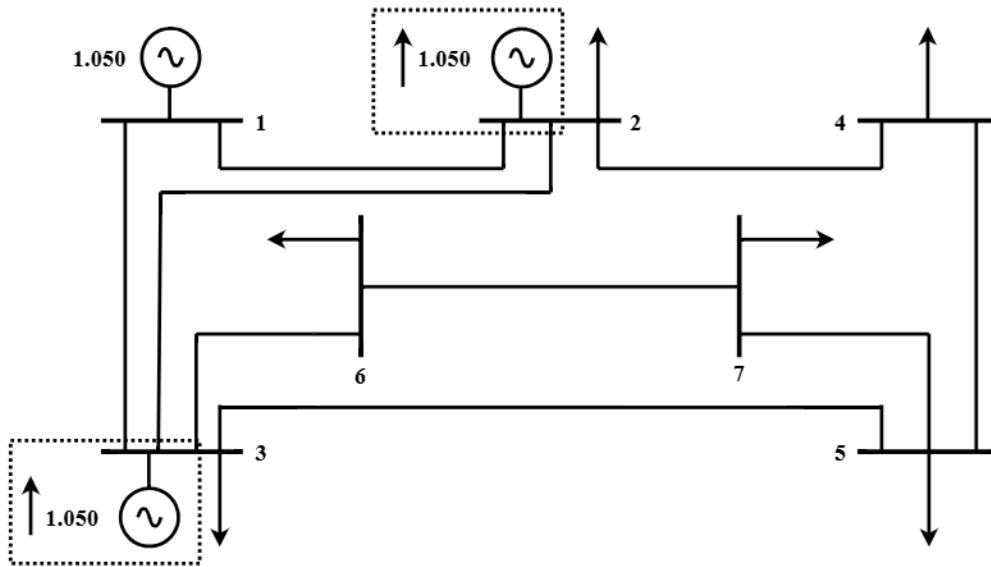
การเพิ่มวงจรสายส่งในกรณีนี้ทำการเพิ่มวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 3 จำนวน 1 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กรณีการเพิ่มวงจรสายส่งระหว่างบัสที่ 1 และ 3 จำนวน 1 เส้น

กรณีศึกษาที่ 3

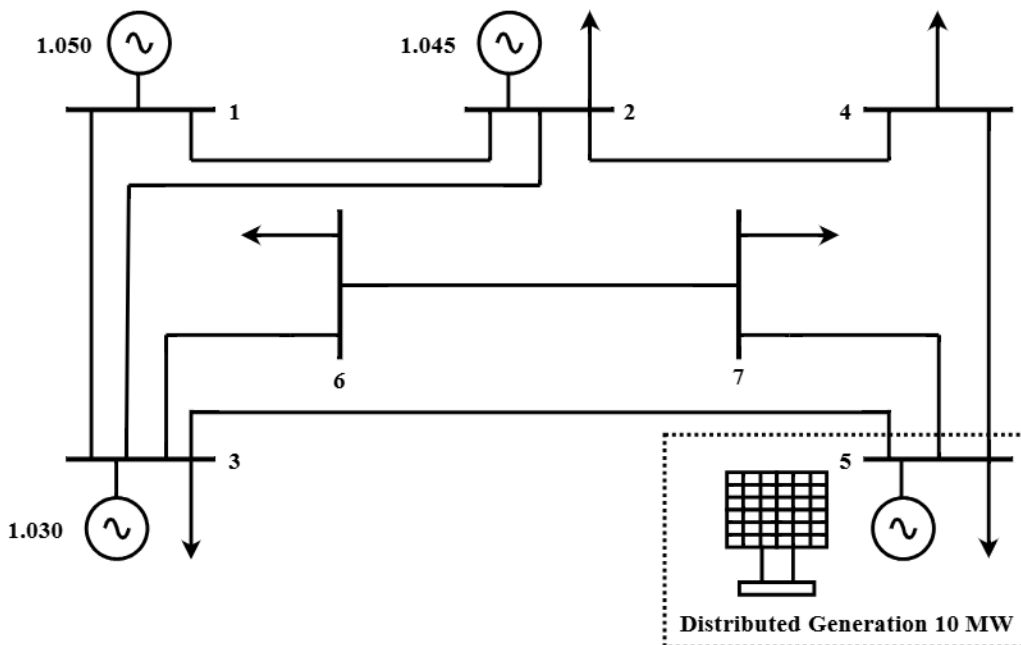
การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ในกรณีนี้กำหนดแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2 และ 3 มีค่า 1.05 p.u. ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กรณีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2 และ 3 มีค่า 1.05 p.u.

กรณีศึกษาที่ 4

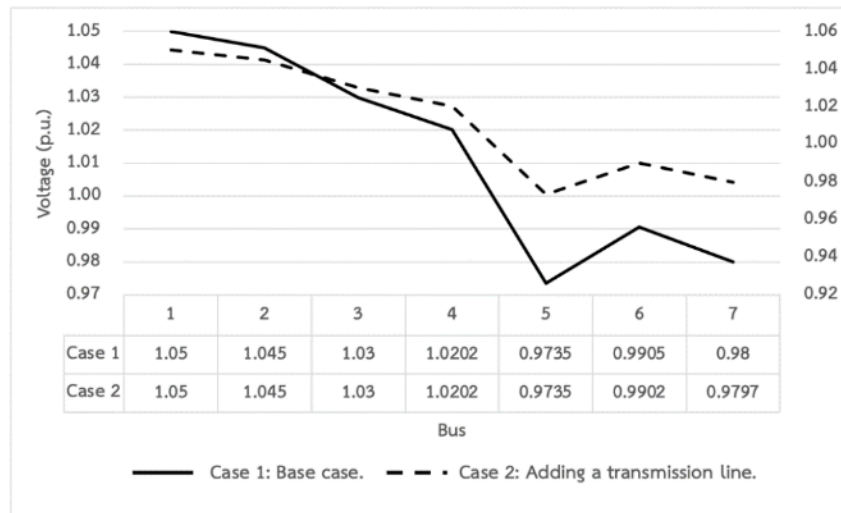
การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ในกรณีนี้ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 กรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW

4. สรุปวิจารณ์ผล

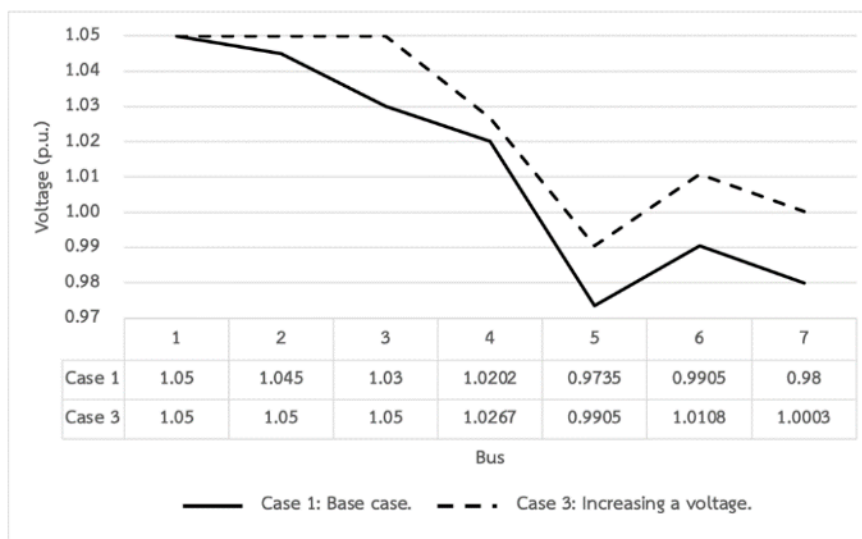
ผลลัพธ์การจำลองในกรณีที่ 1 (สภาวะการณ์ปกติ) พบว่าระบบผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมด 290.90 MW 175.61 MVar และเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 10.90 MW 30.61 MVar ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีพื้นฐานและกรณีการเพิ่มวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีพื้นฐานและกรณีการเพิ่มวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 7 เมื่อทำการทดสอบเพิ่มวงจรสายส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างบัสที่ 1 และ 3 จำนวน 1 เส้นพบว่าระบบผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมด 289.01 MW และเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 9.01MW ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 ซึ่งสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 1.89 MW คิดเป็นร้อยละ 17.33 ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีพื้นฐาน

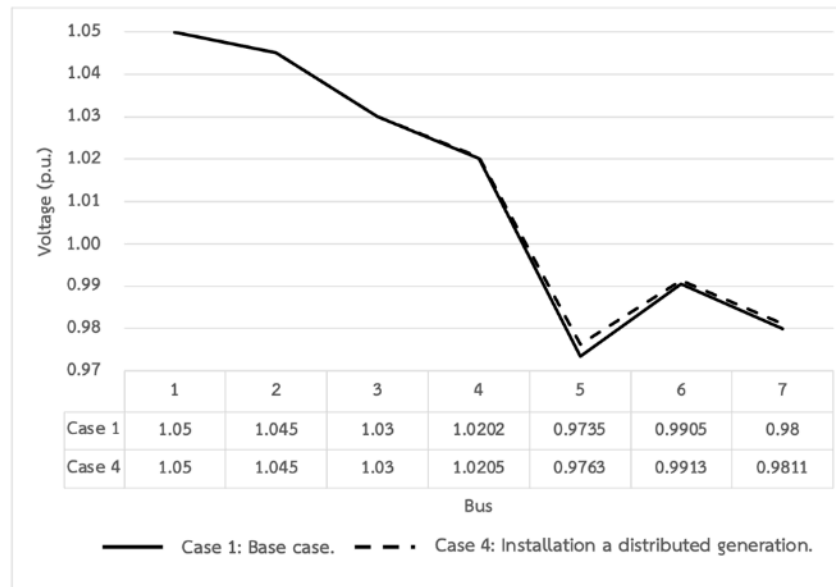
ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีพื้นฐานและกรณีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีพื้นฐานและกรณีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัส 2 และ 3

จากรูปที่ 8 เมื่อทำการทดสอบการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ 2 และ 3 มีค่า 1.05 p.u. พบว่าระบบผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมด 290.89 MW และเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 10.89 MW ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 ซึ่งสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 0.01 MW คิดเป็นร้อยละ 0.09 ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีพื้นฐานและยกระดับแรงดันไฟฟ้าบัส 4 ถึง 7

ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีพื้นฐานและกรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลลัพธ์เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าสำหรับกรณีพื้นฐานและกรณีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW

จากรูปที่ 9 เมื่อทำการทดสอบติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 5 ขนาด 10 MW พบว่าระบบผลิตกำลังไฟฟ้าทั้งหมด 289.79 MW และเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 9.79 MW ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกรณีที่ 1 ซึ่งสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ 1.11 MW คิดเป็นร้อยละ 10.18 ของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของกรณีพื้นฐานและปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าบัสที่ 5 และบัสข้างเคียง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวางแผนและปฏิบัติการเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์แผนเหตุการณ์ทดสอบด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้ดำเนินการ 4 กรณีดังนี้ กรณีที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้าในสภาวะการปกติ กรณีที่ 2 การเพิ่มวงจรสายส่ง กรณีที่ 3 การเพิ่มแรงดันไฟฟ้า กรณีที่ 4 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว พบว่าในกรณีที่ 2, 3 และ 4 เมื่อเพิ่มวงจรสายส่ง, เพิ่มแรงดันไฟฟ้าและติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวตามลำดับ สามารถลดการผลิตของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง ลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและสามารถเพิ่มสมรรถนะในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีพื้นฐาน แต่กรณีที่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน คือ การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร โครงการส่งเสริมสิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรมเพื่อคนรุ่นใหม่งบประมาณปี 2564 ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] André, L. P. d. O. (2008). The main aspects of fixed series compensation demensioning at Brazilian 230 kV transmission system. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. 10.1109/TDC-LA.2008.4641859
- [2] Caisheng, W., & M., H. Nehrir. (2004). Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 19 (4), 2068 - 2076. 10.1109/TPWRS.2004.836189
- [3] Pathomthat, C. (2005). Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis. 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. 10.1109/ TDC. 2005.1546964
- [4] M. I. Khan,. Anis, U. R., & Atiq, U. R. (2016). Performance analysis of transmission system with Distributed Generation using analytical approach. 2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube). 10.1109/ICECUBE.2016.7495207
- [5] Abdullah, M. S., & Ragab, A. El-S. (2019). Application of multi-verse optimizer for transmission network expansion planning in power systems. 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE). 10.1109/ITCE.2019.8646329
- [6] Papon, N., Nattachote, R., & Sakhon, W. (2019). Application Improvement of Voltage Profile by Photovoltaic Farm on Distribution System. 2019 International Conference on Power, Energy and Innovations. 98-101, 10.1109/ICPEI47862.2019.8944997
- [7] Pitambar, J., Hilary, C., Victor, A., David, O., & Charles, T. G. (2020). Transformer models and meters in MATLAB and PSCAD for GIC and leakage dc studies. 2020 International SAUPEC/ RobMech/ PRASA Conference, 10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041060
- [8] Huang, X., & Cheng, R. (2008). Theoretical Study on Dynamic Capacity-increase of Transmission Lines. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 10.1109/CMD.2008.4580387

- [9] Gang, Q., Haozhong, C., Liangzhong, Y., Zeliang, M., Zhonglie, Z., Xiaohui, W., & Jianzhong, L., (2008). Transmission Surplus Capacity Based Power Transmission Expansion Planning Using Chaos Optimization Algorithm. 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 1446-1452. 10.1109/DRPT.2008.4523633
- [10] Christoph, B., Mahbubur, R., & Valentina, C. (2017). A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance. 2017 North American Power Symposium (NAPS), 10.1109/NAPS.2017.8107223

8. ภาคผนวก

ตารางที่ ก 1 ข้อมูลบัสของระบบไฟฟ้ากำลัง 7 บัส

บัส	แรงดันไฟฟ้า (p.u.)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.050	-	-
2	1.045	40	20
3	1.030	40	20
4	1.000	70	40
5	1.000	80	40
6	1.000	20	10
7	1.000	30	15

ตารางที่ ก 2 ข้อมูลสายส่งกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลัง 7 บัส

ลำดับ	จากบัส	สู่อับ	R (p.u.)	X _L (p.u.)
1	1	2	0.08	0.24
2	1	3	0.02	0.06
3	2	3	0.06	0.18
4	2	4	0.01	0.03
5	3	5	0.04	0.12
6	3	7	0.04	0.06
7	4	5	0.08	0.24
8	5	7	0.02	0.45
9	6	7	0.01	0.04