

การประเมินผลกระทบของ UPFC ที่มีต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

Evaluation of UPFC Impact on Power System Reliability

วิทยา สุริยาสกุล¹ และ กุลยศ อุดมวงศ์เสรี²

บทคัดย่อ

Unified power flow controller (UPFC) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภทหนึ่งที่สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และควบคุมระดับแรงดันที่บัสได้ จากคุณสมบัติที่ดีในการควบคุมดังกล่าวข้างต้น จึงมีแนวคิดที่จะนำอุปกรณ์ UPFC มาติดตั้งในระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบไฟฟ้ากำลัง อย่างไรก็ตามผลการปรับปรุงคุณสมบัติของระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งอาจจะทำให้ดีขึ้นหรือแย่ลงก็ได้

งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการประเมินผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่มีต่อความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล พร้อมทั้งพิจารณาวิธีการแก้ปัญหาเมื่อเกิดปัญหาขึ้นในระบบโดยการเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตประกอบกับการตัดโหลดอย่างเหมาะสม สำหรับแบบจำลองของ UPFC ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้อาศัยแบบจำลองแบบ voltage source converter (VSC) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ Newton-Raphson ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลของดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

คำสำคัญ : อุปกรณ์ UPFC, ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง, การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

1. บทนำ

UPFC เป็นที่สามารถควบคุมการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ควบคุมขนาดแรงดันที่บัส หรือควบคุมตัวแปรทั้งสามอย่างพร้อมกันได้ ซึ่งความสามารถดังกล่าวของ UPFC นั้นส่งผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบ

ไฟฟ้ากำลัง ซึ่งอาจจะทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบดีขึ้นหรือแย่ลงก็ได้ ดังนั้นการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าโดยพิจารณาผลกระทบของการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเพื่อให้เกิดความชัดเจนและสร้างความมั่นใจในการติดตั้งอุปกรณ์ชนิดนี้ต่อไปในอนาคต

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย e-mail: theskyliner@hotmail.com

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย e-mail: kulyos.a@eng.chula.ac.th

2. ทฤษฎีและแนวความคิดที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์สภาวะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1.1 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า [1,2]

วิธีการที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย วิธีเกาส์-ไซเดล และวิธีนิวตัน-ราฟสัน อย่างไรก็ตามวิธีนิวตัน-ราฟสัน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.1.2 การจัดสรรกำลังการผลิตอย่างเหมาะสม [3]

เนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเราจำเป็นต้องทราบค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องจ่ายออกมา ซึ่งจะต้องอาศัยหลักการของการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างเหมาะสม ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธี Lamda iteration โดยจะประมาณผลของกำลังสูญเสียในสายส่งเป็นค่าคงที่ตามสัดส่วนของโหลด วิธีนี้มีจุดเด่นคือ ง่ายและรวดเร็ว

2.2 การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้อง [4]

วิธีการจัดสรรกำลังการผลิตและการตัดโหลดจะถูกนำมาใช้แก้ไขปัญหา โดยอาศัยเทคนิคการประเมินปัญหาแบบค่าขีดสุด ซึ่งปัญหาที่จะพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ

1. ปัญหาสายส่งรับกำลังเกิน (transmission line overload problem)

2. ปัญหาทางด้านแรงดัน (over/under voltage problem)

เราสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดเหตุขัดข้องได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= c_p^+ \Delta P_G^+ + c_p^- \Delta P_G^- + c_L L \\ \text{Subject to} \\ [T_G \quad -T_G \quad T_L] \underline{X} &= [\Delta S_{ij}] \\ [R_G \quad -R_G \quad R_L] \underline{X} &= [\Delta V^{pq}] \\ [\underline{1} \quad -\underline{1} \quad \underline{1}] \underline{X} &= [0] \\ \underline{X} &= [\Delta P_G^+ \quad \Delta P_G^- \quad L]^T \end{aligned} \quad (1)$$

โดย c_p^+ คือ ผลกระทบของการเพิ่มกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

c_p^- คือ ผลกระทบของการลดกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

c_L คือ ผลกระทบของการตัดโหลด

ΔP^{G+} คือ กำลังจริงที่จ่ายเพิ่มขึ้นที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

ΔP^{G-} คือ กำลังจริงที่ลดลงที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

L คือ โหลดที่ได้รับการตัด

T_G คือ เมตริกซ์ของ T_p ที่เลือกเฉพาะแถวที่มีความสัมพันธ์กับบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

T_L คือ เมตริกซ์ของ T_p และ T_q ที่เลือกเฉพาะแถวที่มีความสัมพันธ์กับบัสที่มีโหลด โดย

$$T_L = T_p + \alpha T_q$$

α คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ ณ บัสที่เราสนใจ

R_G คือ เมตริกซ์ของ R_p ที่เลือกเฉพาะแถวที่มีความสัมพันธ์กับบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่

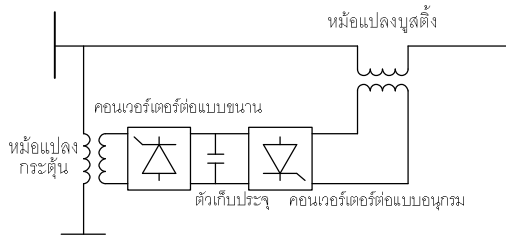
R_L คือ เมตริกซ์ของ R_p และ R_q ที่เลือกเฉพาะแถวที่มีความสัมพันธ์กับบัสที่มีโหลด โดยที่

$$R_L = R_p + \alpha R_q$$

ในงานวิจัยฉบับนี้จะกำหนดให้ค่า c_p^+ , c_p^- และ c_L มีค่าเท่ากับ 2, 1 และ 10 ตามลำดับ เนื่องจากผู้จัดทำต้องการให้ระบบพิจารณาโดยการลดกำลังการผลิตเป็นอันดับแรก และเพิ่มกำลังผลิตเป็นอันดับต่อมา และการตัดโหลดเป็นลำดับสุดท้าย ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่า c_L มีค่ามากเมื่อเทียบกับ c_p^+ และ c_p^- การกำหนดค่าดังกล่าวหากเป็นในรูปแบบนี้แล้ว คำตอบจะเท่ากับการกำหนดค่าเป็น 3, 1 และ 20 ตามลำดับ

2.3 อุปกรณ์ UPFC และการประยุกต์ใช้งาน

2.3.1 อุปกรณ์ UPFC [5]



รูปที่ 1 โครงสร้างของอุปกรณ์ UPFC

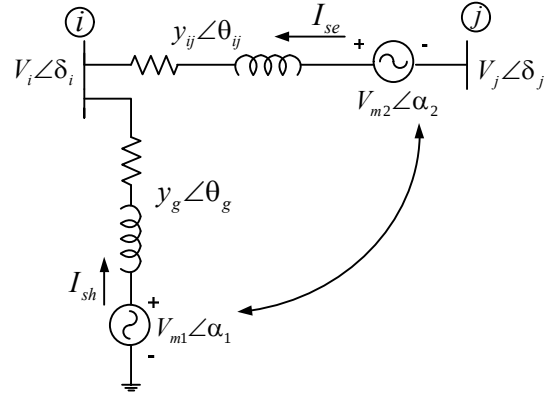
จากโครงสร้างของอุปกรณ์ UPFC ที่แสดงดังรูปที่ 1 เราสามารถสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC โดยอ้างอิงจากแบบจำลอง VSC

1. สมการกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากอุปกรณ์ UPFC

$$P_{se} = |V_{m2}|^2 |y_{ij}| \cos \theta_{ij} + |V_{m2}| |V_j| |y_{ij}| \cos(\alpha_2 - \delta_j - \theta_{ij}) - |V_{m2}| |V_i| |y_{ij}| \cos(\alpha_2 - \delta_i - \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$P_{sh} = |V_{m1}|^2 |y_g| \cos \theta_g - |V_{m1}| |V_i| |y_g| \cos(\alpha_1 - \delta_i - \theta_g) \quad (3)$$

โดยการแทนหม้อแปลงแบบขนานและอนุกรมของอุปกรณ์ UPFC ด้วยอิมพีแดนซ์สมมูลต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดันดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC ในสภาวะการทำงานปกติ

2.3.2 การควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์ UPFC

การควบคุมระบบกำลังไฟฟ้าโดยอาศัยอุปกรณ์ UPFC ทำได้โดยการการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง และควบคุมแรงดันที่บัสต้นทางที่มีอุปกรณ์ UPFC ต่ออยู่ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ โดยค่านี้ต้องอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อไม่มีอุปกรณ์ UPFC ต่ออยู่แล้ว คำนวณหาค่าปรับตั้งของพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ UPFC โดยอาศัยสมการพื้นฐานดังนี้

2. สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลผ่านสายส่ง

$$P_{ij} = |V_i|^2 |y_{ij}| \cos \theta_{ij} - |V_i| |V_{m2}| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \alpha_2 - \theta_{ij}) - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_{ij} = -|V_i|^2 |y_{ij}| \sin \theta_{ij} - |V_i| |V_{m2}| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \alpha_2 - \theta_{ij}) - |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5)$$

เนื่องจากในการวิเคราะห์การทำงานของ UPFC ร่วมกับสมการของระบบไฟฟ้ากำลังจะทำให้จำนวนตัวแปรสถานะของระบบเพิ่มขึ้นมา 4 ตัวแปร คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันของ VSC ทั้ง 2 ตัว (V_m, α) ดังนั้นเราจึงต้องเพิ่มสมการควบคุมเพื่อให้สามารถหาคำตอบของสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

1. P_{ij} หรือ $P_{ji} = P_d$: สมการควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายที่มีอุปกรณ์ UPFC ต่ออยู่
2. Q_{ij} หรือ $Q_{ji} = Q_d$: สมการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายที่มีอุปกรณ์ UPFC ต่ออยู่
3. $V_i = V_d$: สมการควบคุมแรงดันที่บัสต้นทางที่มีอุปกรณ์ UPFC ต่ออยู่

4. $P_{se} + P_{sh} = 0$: ผลรวมของกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดจากอุปกรณ์ UPFC จะต้องเท่ากับ 0

เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบจะทำให้บัสที่มี VSC เชื่อมต่ออยู่เสมือนมีแหล่งจ่ายพลังงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นเราจำเป็นต้องปรับปรุงสภาพกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าสู่บัสที่ทำการติดตั้ง UPFC ดังนี้

พิจารณาที่บัส i จะพบว่า $S_{sch} + S_{se} + S_{sh} = S_{cal}$

พิจารณาที่บัส j จะพบว่า $S_{sch} - S_{se} = S_{cal}$

นั่นคือ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของบัสที่เชื่อมต่อกับสายส่งที่มีการติดตั้ง UPFC สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ที่บัส } i; \quad P_i &= \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) - |V_i| |V_{m2}| |y_{ij}| \cos(\delta_i - \theta_{ij} - \alpha_2) \\ &\quad + |V_i|^2 |y_g| \cos(\theta_g) - |V_i| |V_{m1}| |y_g| \cos(\alpha_1 - \delta_i - \theta_g) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q_i &= -\sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) - |V_i| |V_{m2}| |y_{ij}| \sin(\delta_i - \theta_{ij} - \alpha_2) \\ &\quad - |V_i|^2 |y_g| \sin(\theta_g) - |V_i| |V_{m1}| |y_g| \sin(\alpha_1 - \delta_i - \theta_g) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{ที่บัส } j; \quad P_j = \sum_{k=1}^n |V_j| |V_k| |Y_{jk}| \cos(\theta_{jk} - \delta_j + \delta_k) + |V_j| |V_{m2}| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \theta_{ij} - \alpha_2) \quad (8)$$

$$Q_j = -\sum_{k=1}^n |V_j| |V_k| |Y_{jk}| \sin(\theta_{jk} - \delta_j + \delta_k) + |V_j| |V_{m2}| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \theta_{ij} - \alpha_2) \quad (9)$$

ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า จะทำการคำนวณพารามิเตอร์ของ UPFC จะเห็นได้ว่าสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นกับขนาดของแรงดันและมุมเฟสของแรงดันบัสเพียงเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับขนาดของแรงดันและมุมเฟส

ของแรงดัน VSC อีกด้วย เป็นผลให้ Jacobian มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนี้

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_p}{\partial V} & \frac{\partial f_p}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial f_p}{\partial V_m} & \frac{\partial f_p}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial f_q}{\partial V} & \frac{\partial f_q}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial f_q}{\partial V_m} & \frac{\partial f_q}{\partial \alpha} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{VSC}}{\partial V} & \frac{\partial f_{VSC}}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial f_{VSC}}{\partial V_m} & \frac{\partial f_{VSC}}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \quad (10)$$

โดย f_p คือ สมการของกำลังไฟฟ้าจริงที่ฉีดเข้าสู่บัส

f_q คือ สมการของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ฉีดเข้าสู่บัส

f_{VSC} คือ ชุดของสมการที่ต้องการควบคุม

2.3.3 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ระบบในสถานะก่อนติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เพื่อหาข้อและสายส่งที่เกิดปัญหาทางด้านแรงดันและรับโหลดเกินตามลำดับ ดังนั้นในเบื้องต้นเรานำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์เพื่อที่จะเลือกตำแหน่งที่จะติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ต่อไป

2.4 การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งเป็น 2 วิธีหลัก คือ วิธีการวิเคราะห์ และวิธีการจำลองเหตุการณ์ โดยวิธีการวิเคราะห์มีจุดด้อยเนื่องจากมีความซับซ้อน หากระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่วนวิธีการจำลองเหตุการณ์แม้ว่าจะต้องการเวลาในการคำนวณสูงแต่สามารถจัดการกับปัญหาที่ซับซ้อนได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะอาศัยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แม้ว่าขนาดของระบบจะใหญ่หรือไม่ก็ตาม

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการสุ่มช่วงเวลาการทำงานซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการสุ่มที่มีความเกี่ยวเนื่องกันเป็นหลัก [6,7]

2.4.1 การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

สมมติให้ช่วงเวลาการทำงานที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะดี T_{ON} มีการกระจายแบบเอ็กโพเนนเชียล ซึ่งมีรูปแบบของฟังก์ชันความหนาแน่นดังสมการที่ 11

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (11)$$

โดยที่ λ คือ อัตราความล้มเหลว (failure time)

t คือ เวลา

ดังนั้น ค่าความไม่พร้อมมูล (U) ที่เวลา T_{ON} คำนวณได้จาก

$$U = F_T(T) = \int_0^T \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda T} \quad (12)$$

$$T_{ON} = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-U) \quad (13)$$

ในทำนองเดียวกัน หากเราสมมติให้ช่วงเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์โดยเริ่มตั้งแต่อุปกรณ์เสียหายกลับมาใช้งานได้ (T_{OFF}) มีการกระจายแบบปกติ (T_{OFF}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 14

$$T_{OFF} = r + Z \times \sigma_r \quad (14)$$

โดยที่ U คือ uniformly distributed random numbers

Z คือ normally uniform distributed random numbers

r คือ ระยะเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซมอุปกรณ์ มีค่าเท่ากับ $1/\mu$

μ คือ อัตราซ่อมแซม (repair time)

σ_r คือ ความแปรปรวนของระยะเวลาซ่อมแซม โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ $0.1 \times r$

การจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โลแบบ การสุ่มช่วงเวลา จะทำการจำลองวัฏจักรการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ในระบบโดยอาศัย สมการที่ 13 และ 14 ต่อเนื่องกันไป จนกว่าการ คำนวณจะมีจำนวนมากเพียงพอและดัชนีที่ คำนวณได้เข้าสู่ค่าตอบของระบบ

2.4.2 การคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้

ดัชนีความเชื่อถือได้ที่นิยมใช้ในการ ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังมี 4 ตัว โดยแต่ละตัวมีนิยามดังนี้

1) LOLP คือ ความน่าจะเป็นที่ระบบเกิด การล้มเหลว

2) LOLE คือ ความถี่ที่ระบบเกิดการ เปลี่ยนสถานะจากดีไปล้มเหลว

3) EPNS คือ โหลดในระบบที่คาดว่าจะ ไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า

4) LOLD คือ ระยะเวลาที่ระบบจะอยู่ใน สถานะล้มเหลวแต่ละครั้ง

2.4.3 เกณฑ์การหยุดคำนวณ (Stopping criteria) [3]

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าความคลาดเคลื่อน สัมพัทธ์เป็นเกณฑ์การหยุดการคำนวณและ ระยะเวลาของการจำลองเหตุการณ์ในงานวิจัยนี้ จะกำหนดที่ 5 ปีเป็นเกณฑ์ในการหยุดคำนวณ ควบคู่กันไป

$$\text{ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์} = \frac{S}{\bar{X}\sqrt{n}} \quad (15)$$

โดยที่ S คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของดัชนี

$\bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของดัชนี

n คือ จำนวนครั้งของการสุ่ม

3. การประเมินผลกระทบของ UPFC ที่มีต่อ ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

การประเมินผลความเชื่อถือได้ของระบบ ไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ UPFC เพื่อแก้ไข ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง และการ ประยุกต์ใช้อุปกรณ์ UPFC เพื่อควบคุมทิศทาง การไหลของกำลังไฟฟ้า ในกรณีที่มีการซื้อขาย พลังงานไฟฟ้าระหว่างเขตการไฟฟ้า โดยทั้ง 2 ส่วน จะทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้ง อุปกรณ์ UPFC ที่มีต่อดัชนีความเชื่อถือได้ของ ระบบไฟฟ้ากำลัง

3.1 กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ UPFC เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอคุณสมบัติใน การควบคุมของอุปกรณ์ UPFC มาจัดการกับ เหตุขัดข้องที่เกิดขึ้น โดยจะทำการควบคุมเฉพาะ สถานะที่ตำแหน่งติดตั้งเกิดปัญหาที่ทางสายส่ง และ/หรือปัญหาทางด้านแรงดันเท่านั้น ซึ่งตำแหน่ง ที่ติดตั้งอุปกรณ์นั้นจะพิจารณาจากข้อมูลการเกิด ปัญหาในสถานะปกติ โดยจะทดสอบกับระบบ ทดสอบ RTS-79 [3] ซึ่งมีขั้นตอนการประเมิน ความเชื่อถือได้ของระบบทดสอบในสถานะก่อน การติดตั้งอุปกรณ์ UPFC แสดงดังรูปที่ 3

ในส่วนของการประเมินความเชื่อถือได้ ของระบบทดสอบในสถานะหลังการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จะเพิ่มการตรวจสอบตำแหน่งการเกิด เหตุขัดข้อง โดยหากตำแหน่งที่เกิดตรงกับตำแหน่ง ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC จะทำการควบคุมเพื่อแก้ไข เหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นต่อไป

ตารางที่ 1 บันทึกเหตุขัดข้องขณะจำลองเหตุการณ์ของระบบ RTS-79 ในสภาวะก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

ประเภทของเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้น	จำนวนเหตุขัดข้อง
สายส่งรับกำลังเกิน	18
ปัญหาทางด้านแรงดันตก	12
ระบบเกิดสภาวะ isolation	2
กำลังการผลิตไม่มีเพียงพอ	783

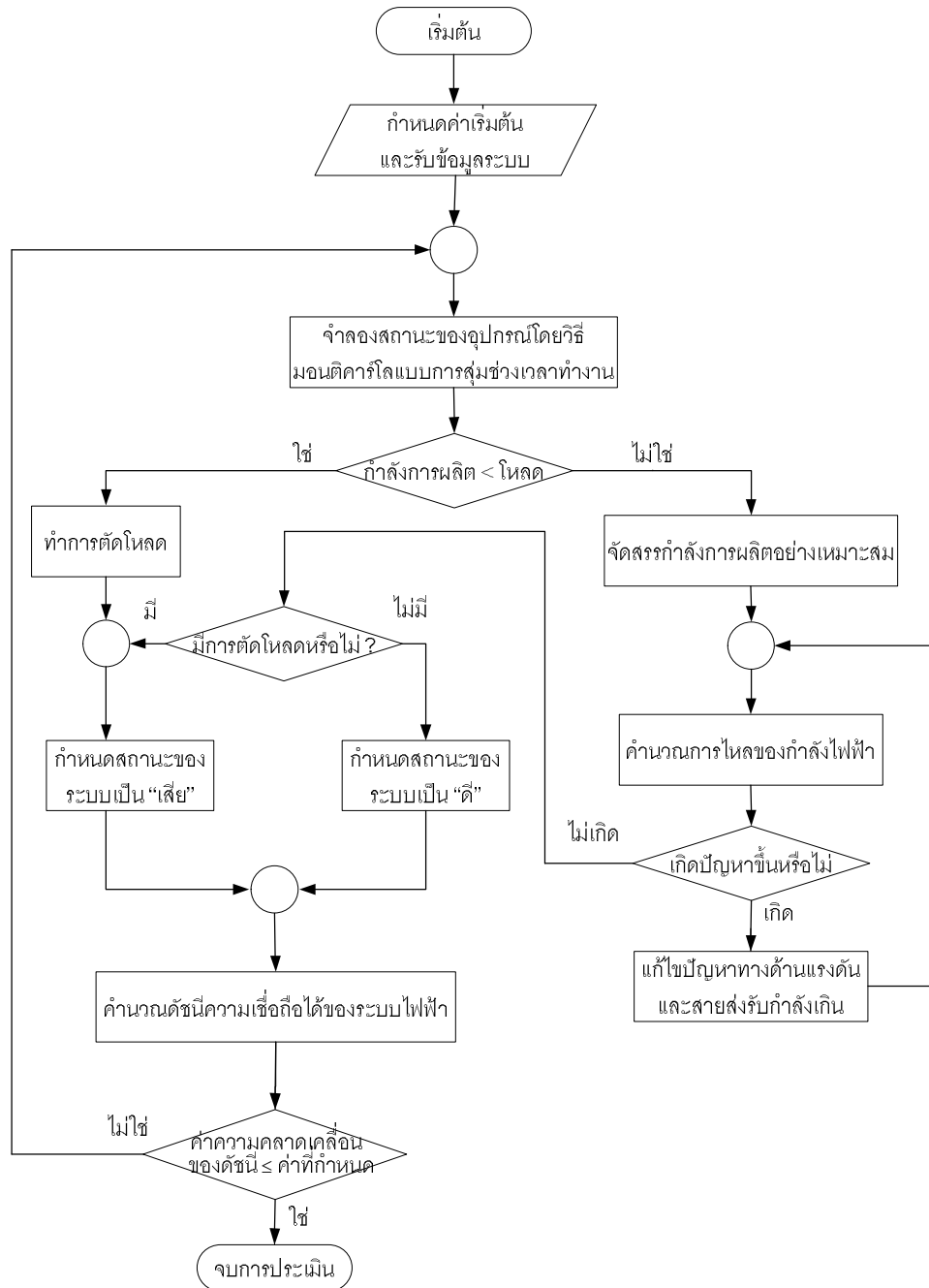
ผลจากการประเมินผลความเชื่อถือได้ของระบบในสภาวะก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เป็นจำนวน 4,905 เหตุการณ์ซึ่งเปรียบเทียบกับรอบการทำงานของระบบเป็นเวลา 10 ปี พบว่า ปัญหาแรงดันตกเกิดขึ้นที่บัส 6 ส่วนปัญหาสายส่งรับกำลังเกินทั้งหมดเกิดขึ้นที่สายส่ง 6-10 ดังนั้นเราจึงทำการทดลองติดตั้ง

อุปกรณ์ UPFC เข้าที่สายส่งเส้นดังกล่าว ซึ่งผลของดัชนีความเชื่อถือได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบ RTS-79 ในสภาวะต่าง ๆ

ชนิดของระบบ	LOLP	LOLF (f/yr)	EPNS (MW)
ก่อนการติดตั้ง UPFC*	0.1163	27.1190	27.8864
หลังการติดตั้ง UPFC*	0.1150	26.8202	27.8830
เพิ่มขนาดสายส่ง**	0.1146	26.6972	27.7925

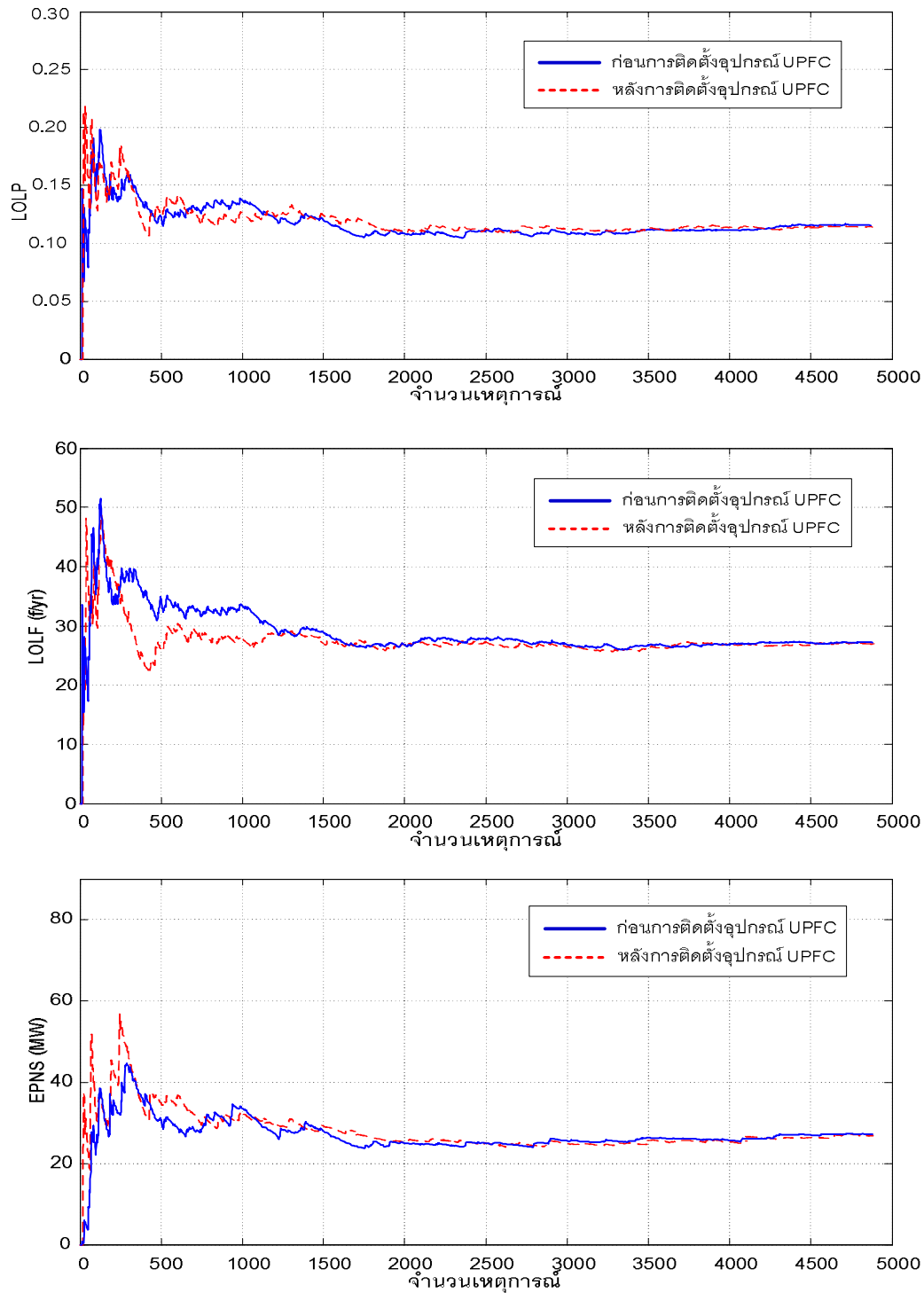
* ติดตั้ง UPFC ที่สายส่ง 6-10, ** เพิ่มพิกัดกำลังของสายส่ง 6-10 จากเดิม 175 MVA เป็น 200 MVA



รูปที่ 3 ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบ RTS-79 ในสภาวะก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

ผลการประเมินความเชื่อถือได้ในสภาวะหลังการติดตั้ง UPFC พบว่าดัชนีความเชื่อถือได้มีค่าต่ำกว่าค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในสภาวะก่อนการติดตั้งเล็กน้อย จากการตรวจสอบพบว่า การติดตั้งอุปกรณ์ UPFC สามารถแก้ปัญหาค่าโหลด

ของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 6-10 ได้เพียงบางส่วน แต่สำหรับเหตุขัดข้องทางด้านแรงดันนั้นพบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่สายส่งเส้นดังกล่าวไม่สามารถแก้ปัญหาระดับแรงดันที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบได้ โดยสาเหตุจากอธิบายในย่อหน้าถัดไป



รูปที่ 4 การลู่เข้าของดัชนี ของระบบ RTS -79 ในสภาวะก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

เมื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุของเหตุขัดข้องทางด้านแรงดันที่เกิดขึ้น พบว่าเกิดจากสายส่ง 6-10 ถูกปลดออกจากระบบ ซึ่งสายส่งดังกล่าวเป็น

สายส่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC อยู่ ดังนั้นที่สภาวะดังกล่าวอุปกรณ์ UPFC จะถูกปลดออกจากระบบ

ด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการควบคุมแรงดันที่ บัส 6 ได้

เพื่อให้การศึกษาเปรียบเทียบผลของการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC กับการแก้ไขปัญหา ระบบส่งด้วยวิธีการเปลี่ยนขนาดของสายส่งที่มีต่อดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังทาง ผู้วิจัยจึงทำการปรับเปลี่ยนขนาดของสายส่งให้มีขนาดรองรับการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าในสถานะเกิดเหตุขัดข้องได้ โดยเปลี่ยนขนาดเดิมจากที่รองรับได้ 175 MVA เป็น 200 MVA ซึ่งผลทดสอบพบว่า ปัญหาทางด้านสายส่งได้รับการแก้ไขให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการประเมินพบว่าดัชนีความเชื่อถือได้ของทั้งสองกรณีมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งผลการประเมินในสถานะที่ระบบมีการเปลี่ยนขนาดสายส่งแสดงดังตารางที่ 2

ในส่วนต่อไปจะแสดงการวิเคราะห์ผลของการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่มีต่อความเชื่อถือ

ได้ต่อขนาดโหลด (load sensitivity analysis) การพิจารณาการเติบโตของโหลด (load growth) ในอัตรา 3 % ต่อปี โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3 และ 4

ผลการทดสอบการในตารางที่ 3 และ 4 พบว่าอุปกรณ์ UPFC สามารถปรับปรุงให้ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบให้ดีขึ้นได้ในระดับหนึ่งขึ้นกับระบบว่ามีจำนวนเหตุขัดข้องเกิดขึ้นในระบบมากน้อยเพียงใด หากระบบที่นำมาทดสอบมีเหตุขัดข้องที่ตำแหน่งติดตั้งมากขึ้น อุปกรณ์ UPFC จะสามารถปรับปรุงได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามในการที่จะสรุปว่า การติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เข้าไปในระบบมีคุ้มค่าหรือไม่เราจะต้องพิจารณาผลของคุณค่าของความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง (reliability worth) ต่อมูลค่าการลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ UPFC (investment cost)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความไวของดัชนีความเชื่อถือได้ต่อขนาดโหลด

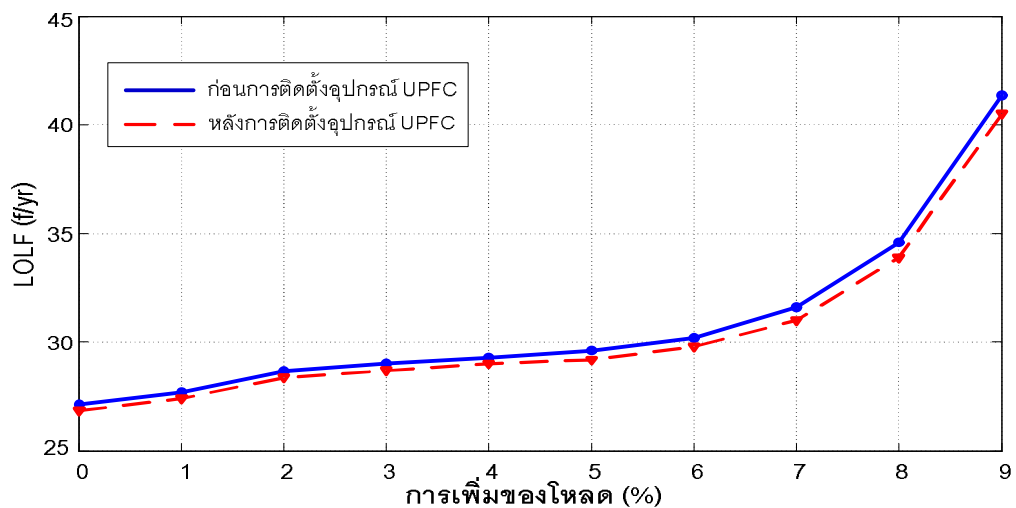
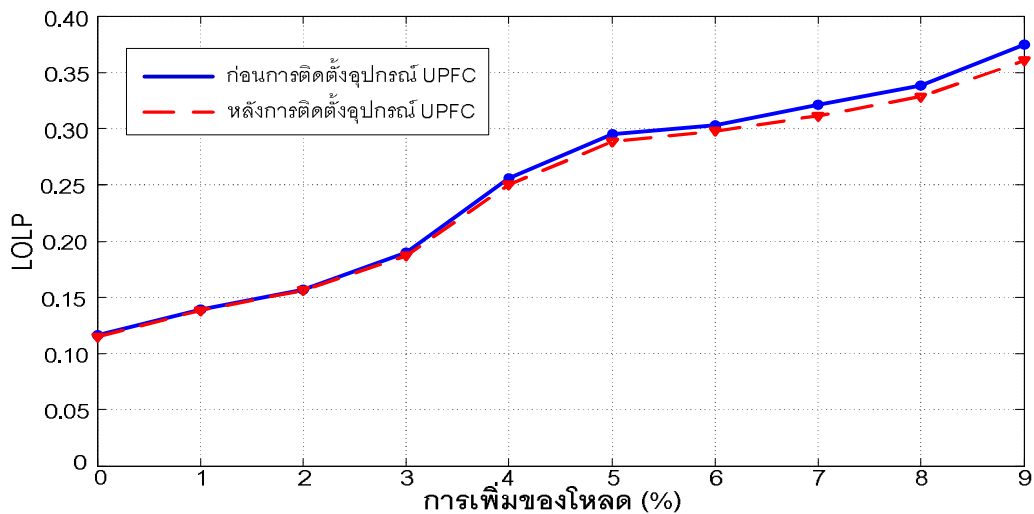
อัตราการเพิ่มโหลด (%)		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ก่อนการติดตั้ง UPFC*	LOLP	0.1393	0.1571	0.1896	0.2556	0.2951	0.3028	0.3211	0.3384	0.3749
	LOLF (f/yr)	27.6927	28.6573	28.9946	29.2833	29.5973	30.191	31.5974	34.5957	41.3478
	EPNS (MW)	28.4902	29.4641	33.0017	39.3978	50.1112	58.0584	66.7791	78.2024	87.1035
หลังการติดตั้ง UPFC*	LOLP	0.1382	0.1562	0.1870	0.2503	0.2889	0.2977	0.3112	0.3285	0.3607
	LOLF (f/yr)	27.3937	28.3562	28.6877	29.0014	29.1941	29.7951	30.9854	33.8868	40.4986
	EPNS (MW)	28.485	29.458	32.5601	38.7301	49.3063	57.1864	65.4864	76.7761	85.5031

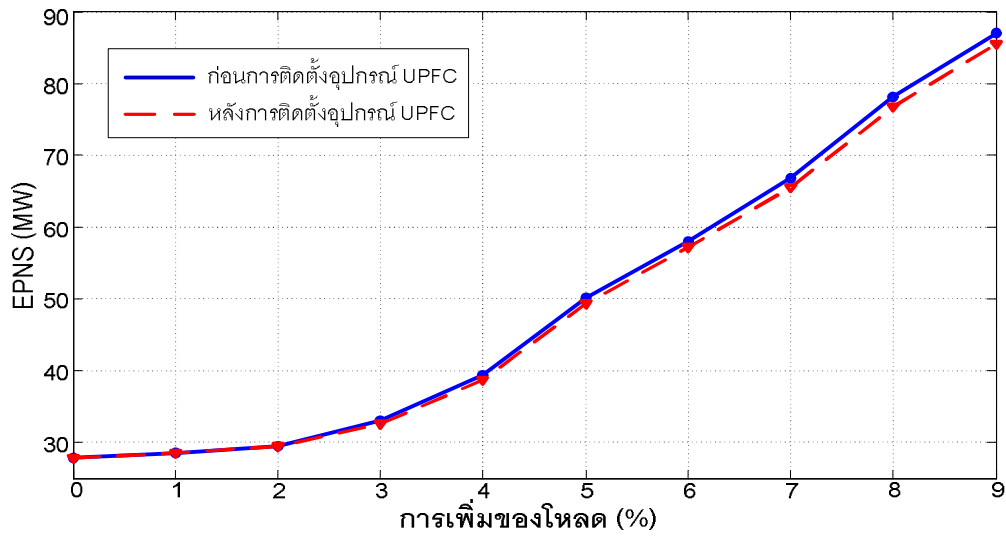
*ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่สายส่ง 6-10

ตารางที่ 4 ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบ RTS-79 เมื่อพิจารณาการเติบโตของโหลดในอัตรา 3 % ต่อปี

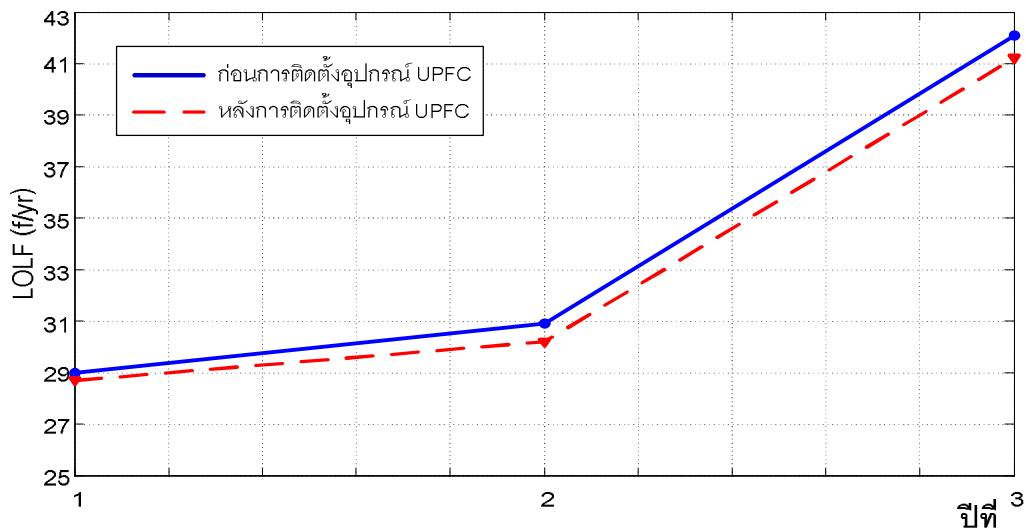
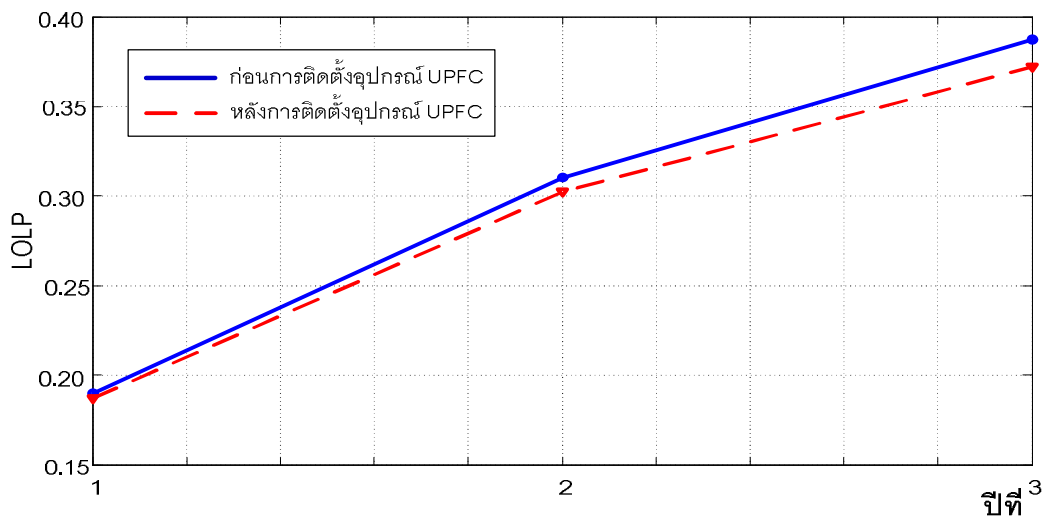
ปี (yr)		1	2	3
ก่อนการติดตั้ง UPFC*	LOLP	0.1896	0.3102	0.3872
	LOLF (f/yr)	28.9946	30.9000	42.0811
	EPNS (MW)	33.0017	61.2421	87.9659
หลังการติดตั้ง UPFC*	LOLP	0.1870	0.3023	0.3722
	LOLF (f/yr)	28.6877	30.1950	41.223
	EPNS (MW)	32.5601	60.0339	85.9661

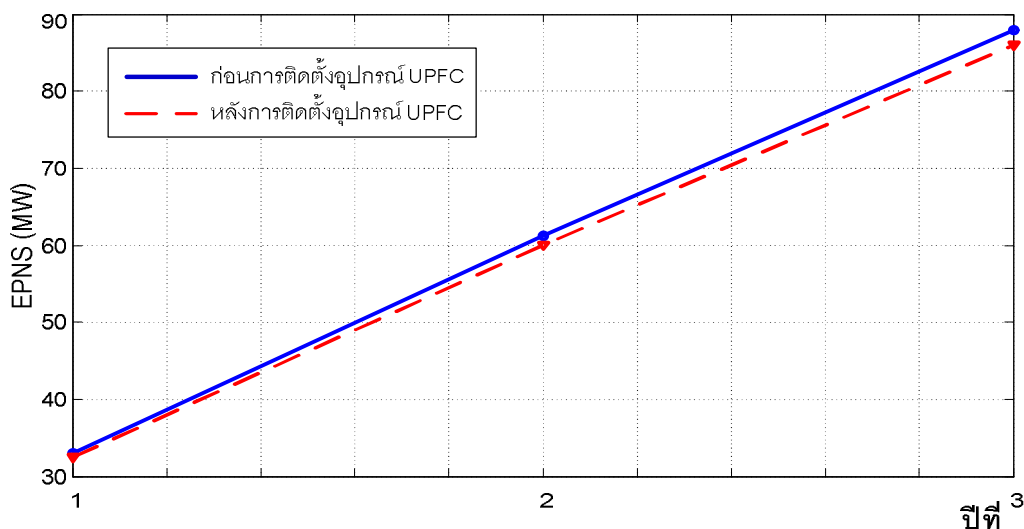
*ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ที่สายส่ง 6-10





รูปที่ 5 ความไวของดัชนีความเชื่อถือได้ต่อขนาดโหลดในสภาวะก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC





รูปที่ 6 ดัชนีความเชื่อถือได้ เมื่อพิจารณาการเติบโตของโหลดในอัตรา 3 % ต่อปี ในสถานะ ก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

3.2 กรณีศึกษาการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ UPFC เพื่อควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ในกรณีที่มีการซื้อขายพลังงานไฟฟ้าระหว่างเขตการไฟฟ้า

ในกรณีทดสอบนี้จะเป็นการจำลองเหตุการณ์เพื่อประยุกต์ใช้อุปกรณ์ UPFC ในการควบคุมปริมาณและทิศการไหลของกำลังไฟฟ้า และแรงดันที่บัสติดตั้ง ซึ่งจะทำให้การทดสอบกับระบบ RTS-96 [3] สำหรับการทดสอบในส่วนนี้ ผู้วิจัยจะทำการกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมเพื่อจำลองการรับส่งพลังงานระหว่างเขตการไฟฟ้าทั้งสาม โดยมีรายละเอียดดังนี้

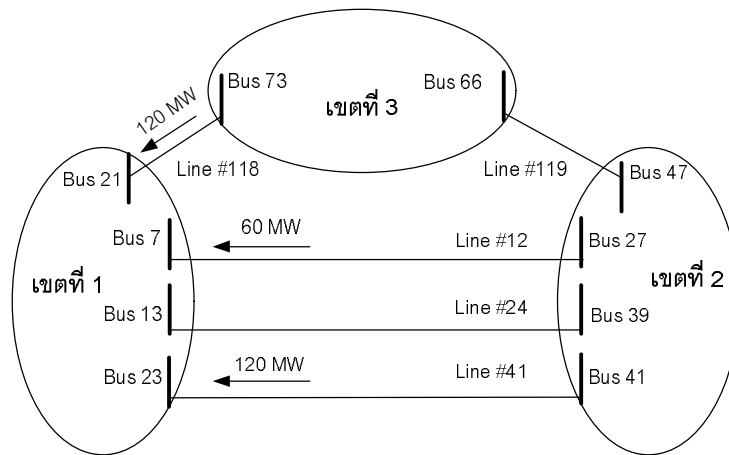
1. ปรับปริมาณโหลดในเขตไฟฟ้าที่ 1 ให้มีค่าเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้เขตการไฟฟ้าที่ 1 ต้องการพลังงานเพิ่มเติมอีก 300 MW

2. ปรับเปลี่ยนขนาดของสายส่งบางเส้นเพื่อรองรับการรับส่งพลังงานไฟฟ้า ดังนี้

ปรับพิกัดกำลังของสายส่ง 6-10 สายส่ง 30-34 สายส่ง 54-58 สายส่ง 7-8 และสายส่ง 7-27 เป็น 300 MVA

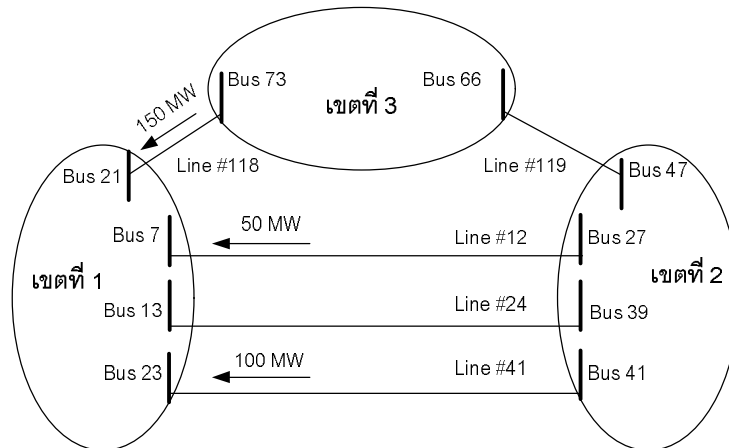
ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณีเพื่อเป็นตัวอย่างการประเมินผลดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

กรณีศึกษาที่ 1 การไฟฟ้าเขตที่ 2 ส่งพลังงานให้การไฟฟ้าเขตที่ 1 จำนวน 180 MW และ การไฟฟ้าเขตที่ 3 ส่งพลังงานให้การไฟฟ้าเขตที่ 1 จำนวน 120 MW แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัสติดตั้งโดยอุปกรณ์ UPFC
สำหรับกรณีศึกษาที่ 1

กรณีศึกษาที่ 2 การไฟฟ้าเขตที่ 2 และ 3 ส่งพลังงานให้การไฟฟ้าเขตที่ 1 อย่างเท่า ๆ กันคือ 150 MW แสดง
ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าและแรงดันที่บัสติดตั้งโดยอุปกรณ์ UPFC
สำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ในกรณีที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่อง
ในเขตการไฟฟ้าที่ 1 อยู่ในสภาวะ “ล้นเหลือ”
ส่งผลให้การไฟฟ้าเขตที่ 1 ต้องการกำลังไฟฟ้า
มากกว่า 300 MW ทางผู้วิจัยจะจัดสรรให้การ
ไฟฟ้าแต่ละเขตส่งกำลังไฟฟ้าเข้ามาช่วยเสริม

เพิ่มเติม แต่อย่างไรก็ตามการส่งพลังงานไฟฟ้า
จะต้องไม่ละเมิดเงื่อนไขดังต่อไปนี้

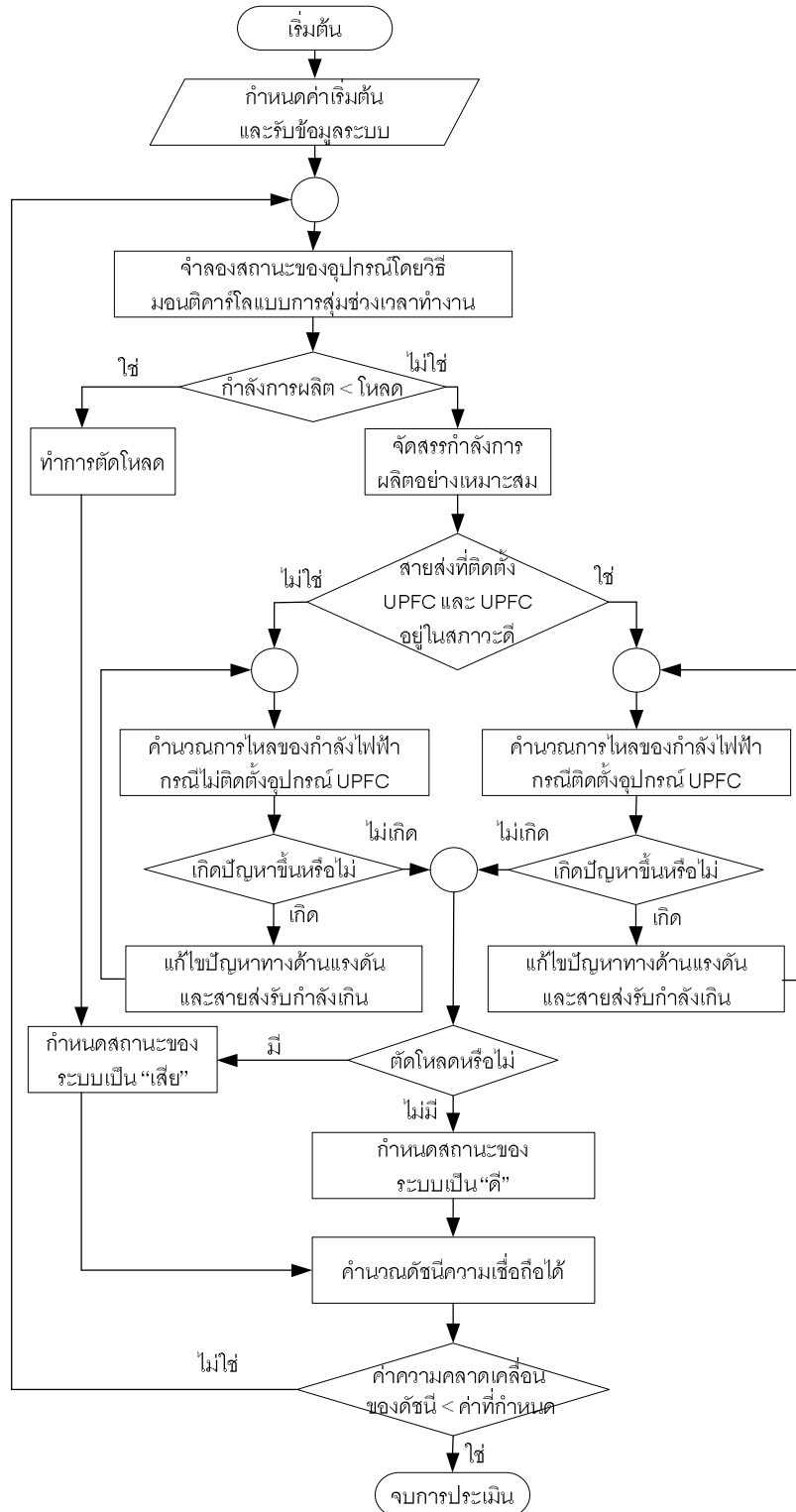
- สัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่จะส่ง
เพิ่มเติมมาจากแต่ละเขตจะขึ้นกับ
กำลังการผลิตสำรองที่เหลืออยู่ของ
การไฟฟ้านั้น ๆ

- ในกรณีที่สายส่งเชื่อมโยงระหว่าง
การไฟฟ้าไม่สามารถรองรับ
กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเพิ่มเติมได้ เราจะ
กำหนดให้การไฟฟ้าเขตนั่นส่ง
กำลังไฟฟ้าเพิ่มเติมมาช่วยการ
ไฟฟ้าเขต 1 ได้เท่ากับขีดจำกัดของ
สายส่ง จากนั้นกำลังไฟฟ้าที่เหลืออยู่
จะถูกส่งมาจากอีกเขตการไฟฟ้าผ่าน
ทางสายส่งเชื่อมโยงที่เหลืออยู่
ขั้นตอนการประเมินดัชนีความเชื่อถือได้
ของระบบไฟฟ้าสำหรับทั้ง 2 กรณีศึกษาแสดงได้
ดังรูปที่ 9

ตารางที่ 5 ดัชนีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบ RTS-96 ในสภาวะก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์
UPFC สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2

ระบบ RTS-96	LOLP	LOLF (f/yr)	EPNS (MW)	ระยะเวลาในประเมิน (ชั่วโมง : นาที : วินาที)
ระบบปกติ	0.3093	63.3880	93.8229	00:16:16
กรณีทดสอบที่ 1*	0.3106	64.1879	93.8971	07:13:31
กรณีทดสอบที่ 2*	0.3109	64.3856	93.9214	07:21:48

* ติดตั้ง UPFC ที่สายส่ง 27-7, 41-23 และ 73-21



รูปที่ 9 ขั้นตอนการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เพื่อควบคุมแรงดันที่ติดตั้งและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 6 บันทึกเหตุขัดข้องขณะจำลองเหตุการณ์ของระบบ RTS-96 ในสภาวะก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC

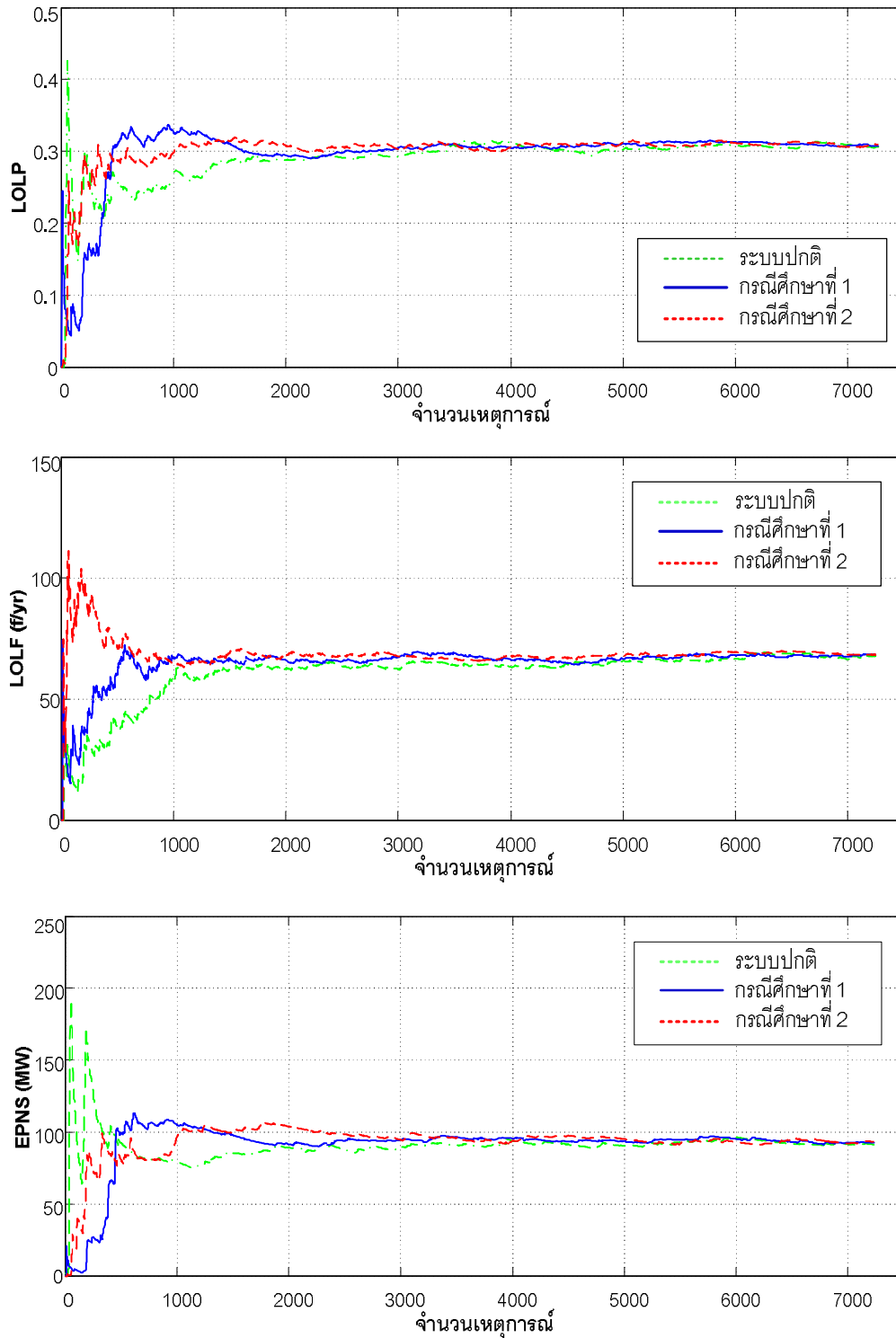
ประเภทของเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้น	จำนวนเหตุขัดข้อง
สายส่งรับกำลังเกิน	1
ปัญหาทางด้านแรงดัน	31
ปัญหาทางด้านสายส่งรับกำลังเกินและด้านแรงดัน	0
ระบบเกิดสภาวะ isolate	10
กำลังการผลิตไม่มีเพียงพอ	2,452

ตารางที่ 7 จำแนกเหตุการณ์ต่าง ๆ ของระบบทดสอบในสภาวะหลังการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2

ประเภทของเหตุการณ์เหตุการณ์	จำนวนเหตุขัดข้อง	
	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2
จำนวนเหตุการณ์ทั้งหมดของการจำลองเหตุการณ์	7,230	7,230
UPFC สามารถควบคุมได้	4,300	4,296
UPFC สามารถควบคุมได้ไม่เกิดปัญหา	4,265	4,258
UPFC สามารถควบคุมได้และเกิดปัญหา	35	38
เหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นในสภาวะ UPFC สามารถควบคุมได้		
- เหตุขัดข้องทางด้านสายส่งรับกำลังเกิน	8	8
- เหตุขัดข้องทางด้านแรงดัน	24	24
- เหตุขัดข้องทางด้านสายส่งรับกำลังเกินและแรงดัน	3	6
เหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นในสภาวะ UPFC ไม่สามารถควบคุมได้		
- เกิดปัญหาทางด้านสายส่งรับกำลังเกิน	0	0
- เกิดปัญหาทางด้านแรงดัน	10	10

จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 5 และ 7 สรุปได้ว่าเขตการไฟฟ้าที่ 3 เชื่อมต่อกับเขตการไฟฟ้าที่ 1 ด้วยสายเชื่อมโยงเพียงเส้นเดียวเมื่อมีการส่งพลังงานในสายส่งนี้มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดเหตุขัดข้องในบริเวณระหว่างเขตที่ 1 และเขตที่ 3 เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบในกรณีศึกษาที่ 2 จึงมีค่าที่สูงกว่าในกรณีศึกษาที่ 1 เนื่องจากระบบสายส่งระหว่างเขตที่ 1 และเขต 2 มีความยืดหยุ่นในการส่งผ่าน

กำลังไฟฟ้ามากกว่า อย่างไรก็ตามก็ดีผลของดัชนีความเชื่อถือได้ทั้ง 2 กรณีมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ UPFC ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าระหว่างเขตด้วยอุปกรณ์ UPFC ส่งผลให้ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าลดลงกว่ากรณีพิจารณาเขตการไฟฟ้าทั้ง 3 เป็นระบบเดียวกัน และมีการจัดสรรกำลังการผลิตมาจากส่วนกลาง (central dispatching)



รูปที่ 10 การลู่เข้าของดัชนีของระบบ RTS -96 ในสภาวะก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC สำหรับกรณีศึกษาที่ 1 และกรณีศึกษาที่ 2

4. สรุปผลการวิจัย

ในส่วนการประยุกต์ใช้งาน UPFC เพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ผลปรากฏว่าอุปกรณ์ UPFC สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ในระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามการจะสรุปผลว่าการติดตั้งอุปกรณ์ UPFC เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวมีความคุ้มค่าหรือไม่ จะต้องทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยการพิจารณาจากคุณค่าของความเชื่อถือได้ (reliability worth) และมูลค่าการลงทุนติดตั้งของอุปกรณ์ UPFC (investment cost) ในส่วนของการประยุกต์ใช้งาน UPFC เพื่อควบคุมแรงดันที่ติดตั้งและปริมาณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างเขต การควบคุมในบางสถานการณ์ทำให้เกิดปัญหาในระบบมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ามีค่าที่ลดลง

5. รายการอ้างอิง

- [1] Grainger, J.J., and Stevenson, D. W. Jr. Power system analysis. New York: McGraw- Hill, 1994.
- [2] Wood, A. J., and Wollenberg, B. F. Power generation operation and control. New York: John Wiley, 1984.
- [3] กุลยศ อุดมวงศ์เสรี. การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วย

วิธีการจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โลแบบ
สุ่มการเปลี่ยนสถานะของระบบ และการ
แบ่งแยกโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ , ภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

- [4] Audomvongseree, K. Transmission Reliability Assessment in the Deregulated Environment by means of Probabilistic Approaches. PhD dissertation, Department of Electrical Engineering, The University of Tokyo, 2004.
- [5] Enrique, A., Claudio, R. F., Hugo, A. P., and César, A. C. FACTS Modeling and Simulation in Power Networks. England: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [6] Billinton, R., and Allan, R. N. Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques. New York: Plenum Press, 1992.
- [7] Billinton, R., and Li, W. Composite System Reliability Assessment Using Monte Carlo Approach. Third international conference on probabilistic methods applied to electric power systems PMAPS: conf.proc.No.338.