

การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีคำนวณเส้นทางกำลังไฟฟ้าวิกฤตเทียบกับวิธีการ คำนวณกำลังไฟฟ้าวิกฤตของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

Voltage Stability Problem Detection: Comparison between the Critical Power Flow Paths and the Continuation Power Flow Methodologies

ณัฐพล ศิลปชัย (Nuttapol Sinlapachai)* ดร.คมสันต์ คาโรจน์ (Dr.Komson Daroj)**

บทคัดย่อ

ความสามารถในการรับโหลดสูงสุดของระบบโดยทั่วไปจะถูกกำหนดให้เป็นโหลดสูงสุดของระบบที่ระบบสามารถควบคุมได้โดยปราศจากเสถียรภาพของโหลด เหล่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับขั้นตอนการวางแผนและกระบวนการผลิตไฟฟ้าในทางทฤษฎีโหลดสูงสุดของระบบจะถูกจำกัดด้วยเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเสมอ เพื่อให้ได้โหลดสูงสุดของระบบต้องใช้การจำลองการเพิ่มขึ้นของความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดกับประสิทธิภาพการคำนวณ บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังโดยเปรียบเทียบ 2 วิธีระหว่างวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถคำนวณจุดที่เกิดสภาวะแรงดันพังทลายได้ นอกจากนี้ยังสามารถเขียนกราฟการเพิ่มขึ้นของโหลดกับแรงดันไฟฟ้าของโหลดบัสทำให้ทราบบัสที่อ่อนแอที่สุดในระบบ เทียบกับวิธีวิเคราะห์เส้นทางกำลังไฟฟ้าวิกฤตของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบผลทั้งสองวิธีจะนำไปสู่ความเข้าใจต่อปัญหานี้ในเชิงลึก โดยในบทความนี้จะจำลองผลโดยใช้ระบบทดสอบ 5 บัส เพื่อให้สามารถเริ่มต้นการวิเคราะห์ผลได้อย่างรวดเร็ว

ABSTRACT

Maximum loadability of a system is basically defined as the maximum of system load that the system can be controlled without load of stability. This is necessary for both planning and generating stages. In theory, the maximum loading of a system is always limit by the voltage stability constraint. To obtain the maximum loading point of a system, the scenario of increasing generations and loads are required in association with efficient calculation approach. This paper presented the analysis of the voltage stability problem in a power system by comparing 2 methods i.e, the Continuation Power Flow (CPF) and the critical power flow path. The CPF is the most popular methodology due to the capability of tracing P-V curve. Thus, the voltage collapse point and the weakest bus of a system can be obtained. The obtained result of comparing there two methods can enhance for understanding the voltage stability problem in transmission system. A 5-bus system is used as a tested case to ease visualizing.

คำสำคัญ: เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง วิเคราะห์เส้นทางกำลังไฟฟ้าวิกฤต

Keywords: Voltage stability, Continuation power flow, Critical power flow path

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้าในมီอัตรที่สูงขึ้นตามการเติบโตทางเศรษฐกิจ ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (voltage stability) เป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจนอกเหนือจากการควบคุมระบบไฟฟ้าในสภาวะปกติ ปัญหานี้เกิดขึ้นจากการทรูปต่อเนื่องของสายส่งและโรงไฟฟ้า เหตุการณ์เหล่านี้ทำให้รูปแบบการไหลของกำลังไฟฟ้าไหลผิดปกติไปจากเดิมจนท้ายที่สุดอาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งระบบ (blackout) หรือแค่บางส่วน (browout) เช่น เหตุการณ์ไฟฟ้าดับครั้งใหญ่ที่สหรัฐอเมริกาเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม 2003 (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2005) เหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งระบบที่ประเทศอิตาลีเมื่อวันที่ 28 กันยายน 2003 (OECD, 2005) เป็นต้น

แม้ในทางปฏิบัติจริงมีประเด็นการควบคุมและการทำงานของระบบป้องกันไฟฟ้ากำลังเข้ามาเกี่ยวข้องในปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า แต่ในทางทฤษฎีประเด็นเกี่ยวกับขีดจำกัดการจ่ายโหลดให้ได้สูงสุดของระบบยังได้รับความสนใจเสมอมา วิธีการที่นิยมใช้หาค่าตอบขีดจำกัดการจ่ายโหลดของระบบจะใช้การสมมุติให้โหลดมีการเพิ่มขึ้นโดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารองรับการเพิ่มขึ้นของโหลด

โดยพื้นฐานการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้ามีหลายวิธีดังนี้ วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Power Flow ; NRPF) (Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, 2013) เป็นการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งโดยหาแรงดันไฟฟ้า และมุมเฟสที่บัสต่างๆ ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง ณ สภาวะโหลดที่ใช้คำนวณ วิธีนี้จะไม่สามารถหาค่าตอบได้ ณ สภาวะวิกฤตเนื่องจากคุณสมบัติความเป็นเอกพจน์ของจาโคเบียนเมตริกซ์ วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (continuation power flow) (C. W. Taylor, 1994) เป็นวิธีคำนวณหาค่าตอบที่ประยุกต์จากวิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อให้คำนวณค่าตอบ ณ สภาวะวิกฤตของระบบได้ วิธีอื่นๆ ที่วิเคราะห์โดยใช้จาโคเบียนเมตริกซ์ ได้แก่ วิธีการวิเคราะห์แบบโหมดอล (modal analysis) (B. Gao et al., 1992) วิธีนี้จะใช้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับความไม่เป็นเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า เป็นปัจจัยในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้จาโคเบียนเมตริกซ์ วิธีค่าเอกพจน์ต่ำสุด (minimum singular value method) (P.A. Lof et al., 1993) เอกพจน์ต่ำสุดของจาโคเบียนเมตริกซ์สามารถใช้เป็นดัชนีประเมินเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ในการวิเคราะห์ จะทำการเพิ่มระดับของโหลดเพื่อคำนวณการลดลงของจาโคเบียนเมตริกซ์ของระบบ (J_R) เมื่อค่าเอกพจน์ที่น้อยที่สุดของเมตริกซ์ J_R มีค่าใกล้ศูนย์ พบว่าเมตริกซ์จาโคเบียนจะเป็นเมตริกซ์เอกฐาน (singular matrix) และใช้เป็นเงื่อนไขประเมินค่าโหลดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นในระบบได้ (maximum load capacity) วิธีวิเคราะห์เส้นทางไหลวิกฤต (critical power flow paths) (Komson D. et al., 2011) วิธีการนี้จะเป็นการวิเคราะห์เส้นทางไหลของกำลังไฟฟ้าจากตั้งแต่แหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปจนถึงโหลดบัสสุดท้าย โดยรายละเอียดที่วิเคราะห์ได้จากเส้นทางไหลของกำลังไฟฟ้าวิกฤตนี้จะช่วยขยายขอบเขตความเข้าใจปัญหาที่ระบบส่งไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้น

บทความฉบับนี้จะศึกษาปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยการเปรียบเทียบสองวิธีคือ วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์เส้นทางไหลวิกฤตโดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐาน 5 บัส ผลที่คาดว่าจะได้รับจะนำไปสู่ความเข้าใจปัญหานี้เพิ่มเติมและสามารถวางแผนหรือควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ได้อย่างเป็นรูปธรรม

วัตถุประสงค์

วิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องกับวิธีการวิเคราะห์เส้นทางการไหลวิกฤตเพื่อให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแนวทางการวิเคราะห์ปัญหาทั้งสองวิธี ซึ่งจะนำไปสู่การเข้าใจปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น

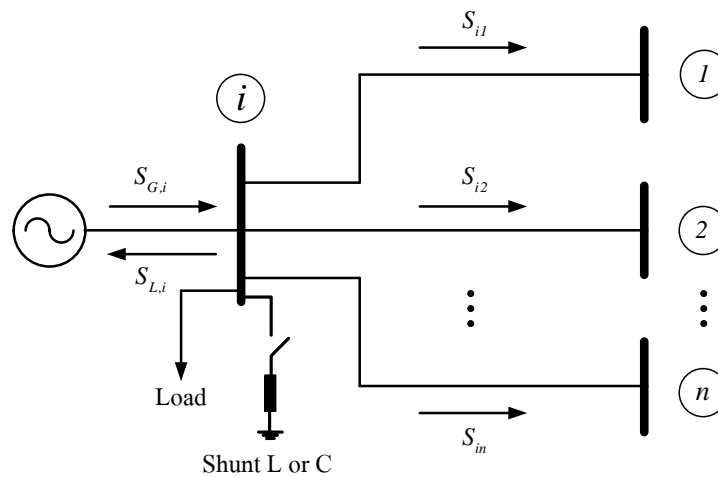
วิธีการวิจัย

- การหาคำตอบของระบบโดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องเพื่อหาคำตอบ ณ สภาวะวิกฤตของระบบ
- การหาคำตอบของระบบโดยการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี NRPF โดยสมมุติให้โหลดมีการเพิ่มขึ้นและมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารองรับการเพิ่มขึ้นของโหลด รอบละ 1% จนกว่าจะคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าหาคำตอบไม่ได้
- วิธีวิเคราะห์เส้นทางการไหลวิกฤตของระบบทดสอบ
- เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ของทั้งสองวิธีเพื่อนำไปสู่ความเข้าใจปัญหาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเติม

โดยมีละเอียดดังนี้

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Power Flow ; NRPF)

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ NRPF เป็นการคำนวณเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสที่บัสต่างๆ โดยปกติกำลังไฟฟ้า ณ บัส i ที่มี เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โหลด และสายส่งต่ออยู่ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้า ณ บัส i

กำลังไฟฟ้า ณ บัส i สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$S_{sch,i} = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) สามารถแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้เป็น สมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$P_{sch,i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2)$$

$$Q_{sch,i} = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3)$$

เมื่อ V_i คือ ค่าแรงดัน ณ บัส i

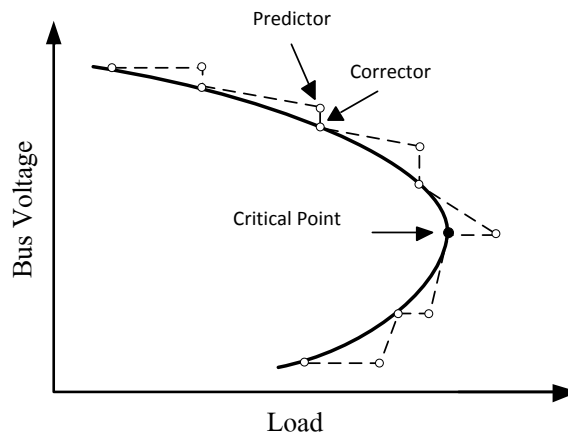
V_j คือ ค่าแรงดัน ณ บัส j

$|Y_{ij}|$ คือ ขนาดของค่าแอดมิตแตนซ์ ที่แถว i และหลัก j ของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์

ในบทความฉบับนี้จะทำการเพิ่ม P และ Q ที่โหลดบัส และ Q ที่บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขึ้นรอบละ 1% จนกว่าจะคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าหาคำตอบไม่ได้

การคำนวณค่าจุดวิกฤตโดยใช้วิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (Continuation Power Flow; CPF)

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องเป็นวิธีการหาคำตอบของระบบที่ปรับปรุงมาจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบปกติเพื่อให้สามารถคำนวณหาคำตอบของระบบไฟฟ้าได้ ณ สภาวะวิกฤต ตามรูปแบบการเพิ่มโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (loading scenario) โดยใช้เทคนิคเพิ่มค่าตัวแปรเพื่อหลีกเลี่ยงสภาวะเอกฐานของระบบ (local parameterization) ดังแสดงรูปแบบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่องดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงรูปแบบการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

เพิ่มตัวคูณกำลังไฟฟ้าที่บัส λ เข้าไปในสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบปกติ ดังสมการ

$$F(\delta, V, \lambda) = 0, 1 \leq \lambda \leq \lambda_{\max} \quad (4)$$

โดย δ และ V คือค่ามุมเฟสและขนาดของแรงดันที่บัส ตามลำดับ ในกรณีโหลดพื้นฐานในตอนเริ่มคำนวณตัวแปร λ มีค่าเป็นหนึ่งเพื่อให้การคำนวณรวดเร็วขึ้นจะใช้เทคนิคการคาดการณ์และปรับผลตาม(predictor and corrector) ดังนี้

$$dF(\delta, V, \lambda) = \frac{\partial F}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial F}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Delta\lambda = 0 \quad (5)$$

ตัวแปร λ ที่เพิ่มขึ้นเข้ามาในสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าปกติทำให้ต้องแปลงสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าไปจากเดิม ดังนี้

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial \delta} & \frac{\partial F}{\partial V} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \\ e_k \end{pmatrix} (T) = \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

เมตริก T คือเมตริกหลัก (column matrix) ที่แสดงทิศทางเคลื่อนที่ของตัวแปร ณ จุดทำงานนั้น (tangent matrix) ค่าในแถวสุดท้ายมีขนาดเป็นบวกหรือลบหนึ่งทำให้ e_k เป็นเมตริกแถว (row matrix) มีค่าเป็นศูนย์ยกเว้นหลักที่ k จะมีค่าบวกหนึ่งจากคุณสมบัติของเมตริก T ทำให้สมการที่ดัดแปลงไปสามารถหาคำตอบได้ ณ จุดวิกฤต เมื่อแก้สมการ (6) จะได้ทิศทางปรับค่าตัวแปร δ, V และ λ จุดทำงานต่อไปสามารถคาดการณ์ได้จากสมการที่ (7)

$$\begin{pmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_i \\ V_i \\ \lambda_i \end{pmatrix} + \sigma \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} \quad (7)$$

โดย σ คือระยะห่างที่เคลื่อนที่ในแต่ละช่วงโหลดที่เพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนตัวแปรและปรับค่า ณ สภาวะใกล้จุดวิกฤตมีความสำคัญต่อการคำนวณ (parameterization and the corrector) โดยในขั้นตอนนี้จะต้องมีการกำหนดตัวแปรในสมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่แปลงไปแล้วใหม่ (local parameterization) ดังสมการ (8)

$$x = \begin{pmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{pmatrix}, \text{ let } x_k = \eta \quad (8)$$

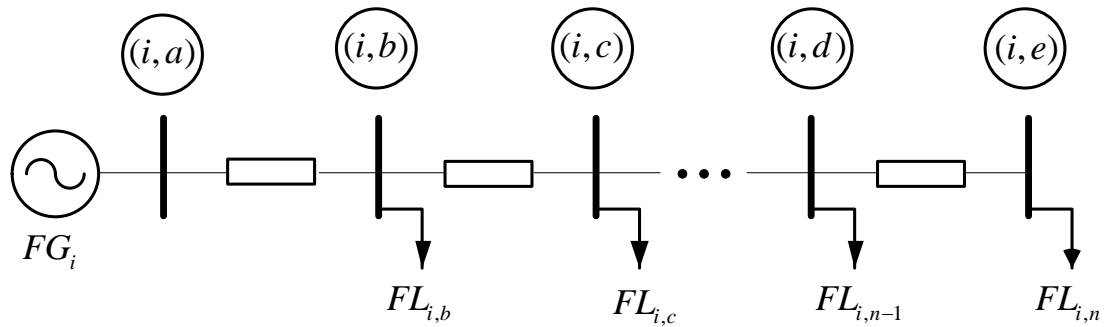
จากสมการที่ (8) การระบุตัวแปรในแถวที่ นิยมเลือกจากตัวแปร ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดในเมตริก T ท้ายสุดจะได้สมการของระบบ ณ สภาวะนี้คือ

$$\begin{pmatrix} F(x) \\ x_k - \eta \end{pmatrix} = [0] \quad (9)$$

คำตอบของสมการ (16) สามารถคำนวณโดยขั้นตอนตามสมการที่ (4)-(8) อีกครั้ง ผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละรอบนิยมนำมาเขียนกราฟการเพิ่มขึ้นของโหลดกับแรงดัน ในรูปกราฟ P-V กราฟ Q-V หรือ กราฟ λ -V

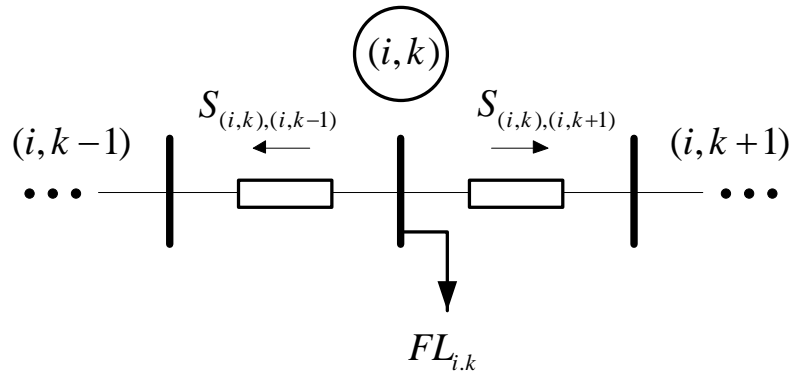
เส้นทางไหลแบบเสมือนเรเดียล (Equivalent Radial Flow Path; ERP)

นำผลการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี NRPF มาวิเคราะห์ ERP โดยพิจารณา ERP จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดปลายทาง โดยสมมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่แยกออกจากเส้นทางเสมือน คล้ายกับโหลดเสมือน (fictitious load) ดังแสดงในรูป 3



รูปที่ 3 Equivalent Radial Flow Path

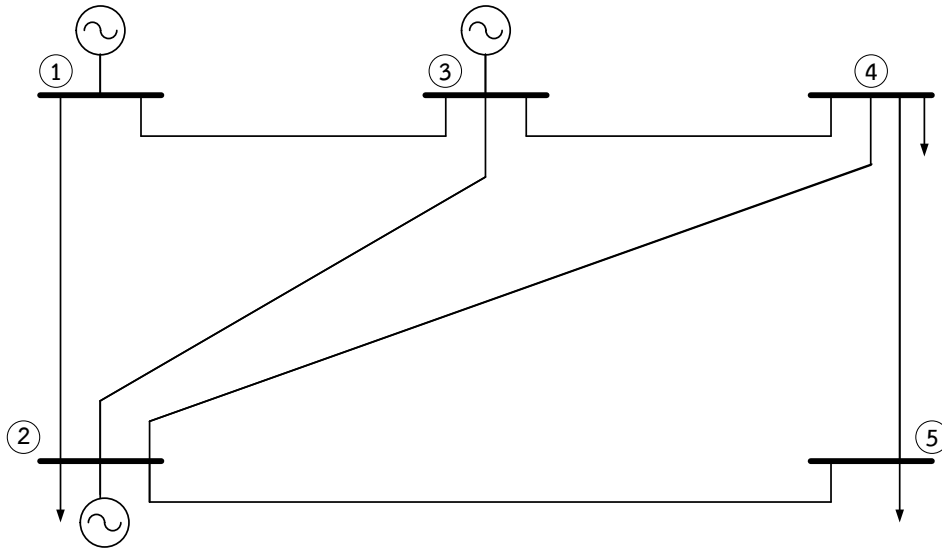
จากรูปที่ 3 แสดง ERP เส้นทาง i ที่มีทั้งหมด n บัสโดยทางต้นทางเสมือนมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ที่บัส (i, a) ไปยังบัส (i, b) และเพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลบนเส้นทางเสมือนนี้สมดุล จะต้องเพิ่มโหลดเสมือนที่คิดจากส่วนต่างของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไหลเข้าและออกในแต่ละบัส แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โหลดไฟฟ้าเสมือน ณ บัส k ของ ERP เส้นทางที่ i

ระบบทดสอบ

ใช้ระบบทดสอบ 5 บัส (Hadi Saadat) โดยบัสที่ 1 เป็นอ้างอิง (slack bus) บัสที่ 2 และ 3 เป็นบัสเครื่องกำเนิด (PV bus) บัสที่ 4 และ 5 เป็นโหลดบัส (PQ bus) แสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบทดสอบ 5 บัส (Hadi Saadat)

ตารางที่ 1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ 5 บัส

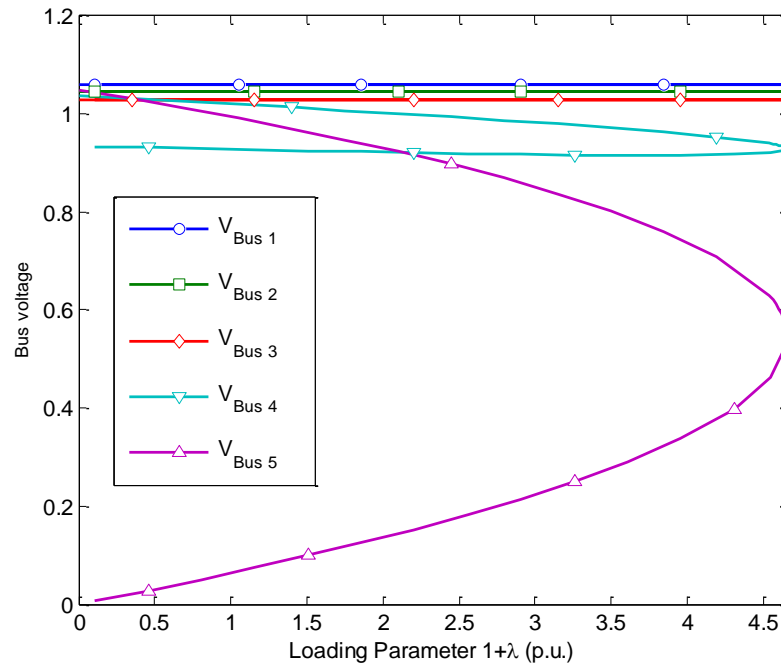
Bus	Bus Type	Load		Generation					Voltage (pu)
		P (MW)	Q (Mvar)	P_g (MW)	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)	Q_{max} (Mvar)	Q_{min} (Mvar)	
1	Slack	0	0	0	85	0	50	-10	1.060
2	PV	20	10	30	80	0	50	-10	1.045
3	PV	20	15	40	70	0	40	-10	1.030
4	PQ	50	30	0	0	0	0	0	1.000
5	PQ	60	40	0	0	0	0	0	1.000

ตารางที่ 2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ 5 บัส

Line	Buses		Impedance (pu)		
	From	To	R	X	B/2
1	1	2	0.02	0.06	0.06
2	1	3	0.08	0.24	0.05
3	2	3	0.06	0.18	0.04
4	2	4	0.06	0.18	0.04
5	2	5	0.04	0.12	0.03
6	3	4	0.01	0.03	0.02
7	4	5	0.08	0.24	0.05

ผลการทดสอบ

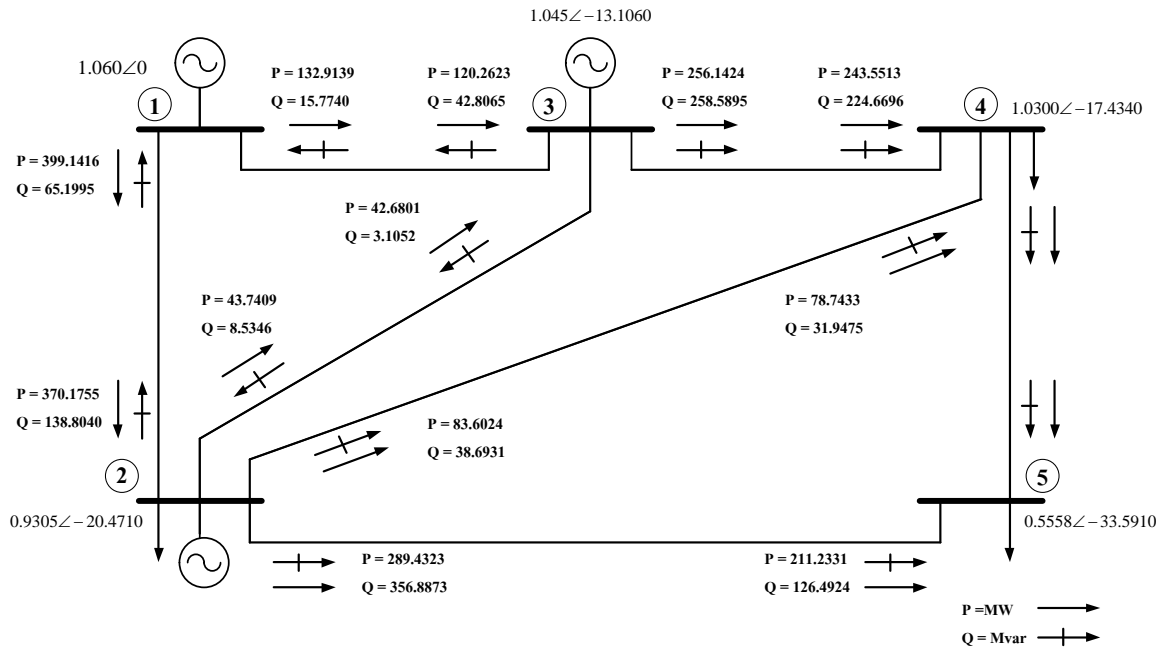
ผลการคำนวณ CPF จากระบบทดสอบ 5 บัส พบว่า ณ สภาวะสุดท้ายก่อนเกิดการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า ระบบสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ณ ค่าโหลดเป็น 4.6621 เท่าของกรณีฐาน สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของระบบทดสอบ 5 บัส

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าพบว่าบัสที่มีแรงดันต่ำที่สุดคือบัสที่ 5 ณ ค่าโหลดเป็น 4.6621 เท่าของกรณีฐาน

ผลคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยวิธี NRPF พบว่าระบบสามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของโหลดได้เป็น 4.6600 เท่าของค่าฐาน สามารถแสดงผลการไหลของกำลังไฟฟ้าได้ดัง รูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงเส้นทางการไหลของ P และ Q ณ ระดับการเพิ่มขึ้นของโหลดเป็น 4.6600 เท่าของค่าฐาน

จากรูปที่ 7 สามารถพบเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าดังนี้

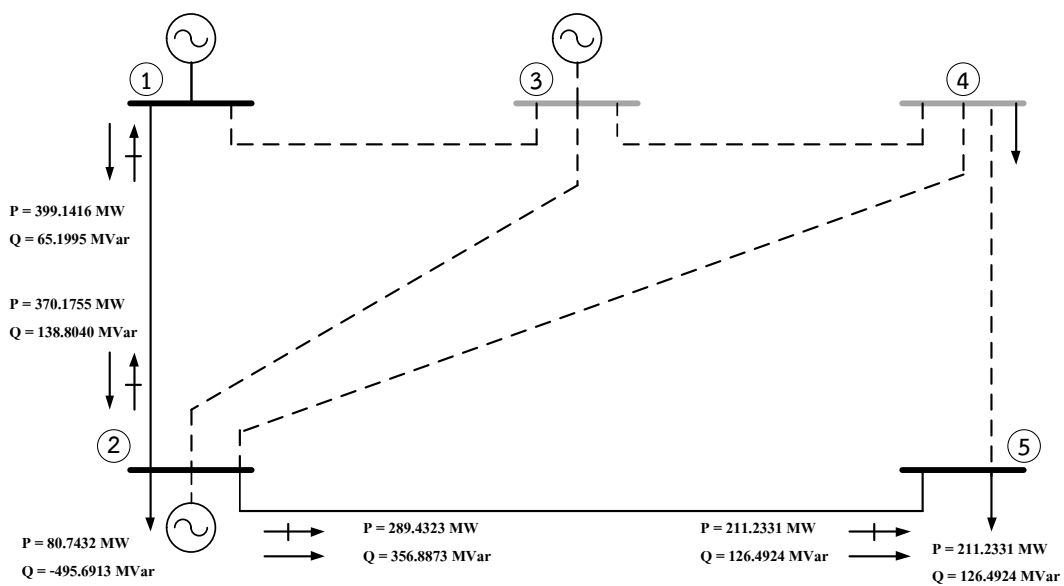
เส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 1 ไหลจากบัส 1-2-5

เส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 2 ไหลจากบัส 1-2-4-5

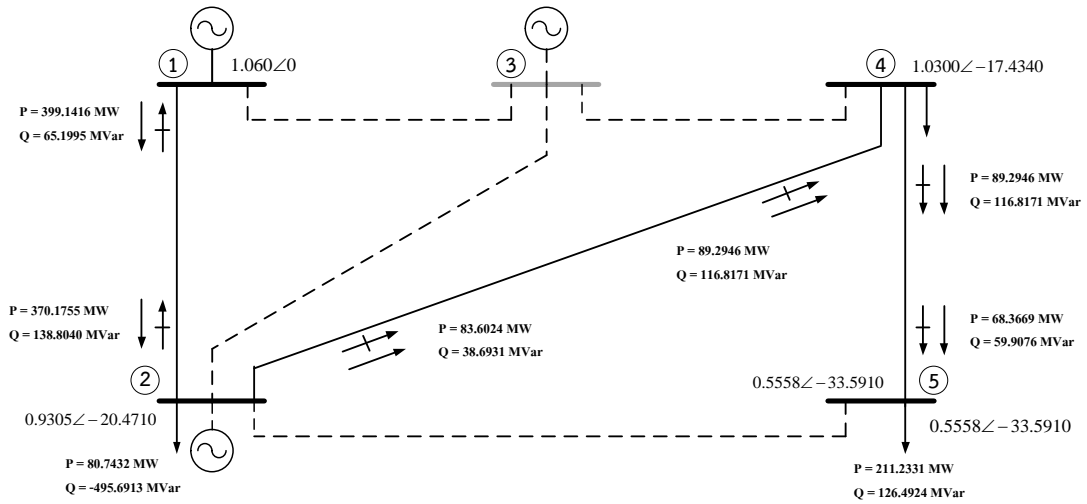
เส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 3 ไหลจากบัส 1-3-4-5

เส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 4 ไหลจากบัส 1-2-3-4-5

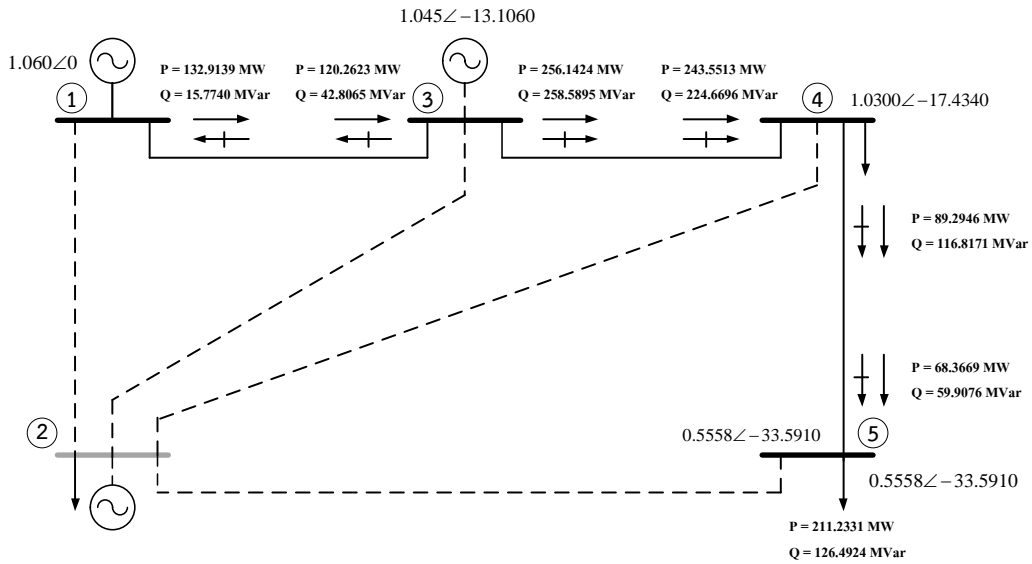
ผลการวิเคราะห์ ERP ของเส้นทางการไหลวิกฤตแต่ละเส้นทางแสดงในรูปที่ 8-11



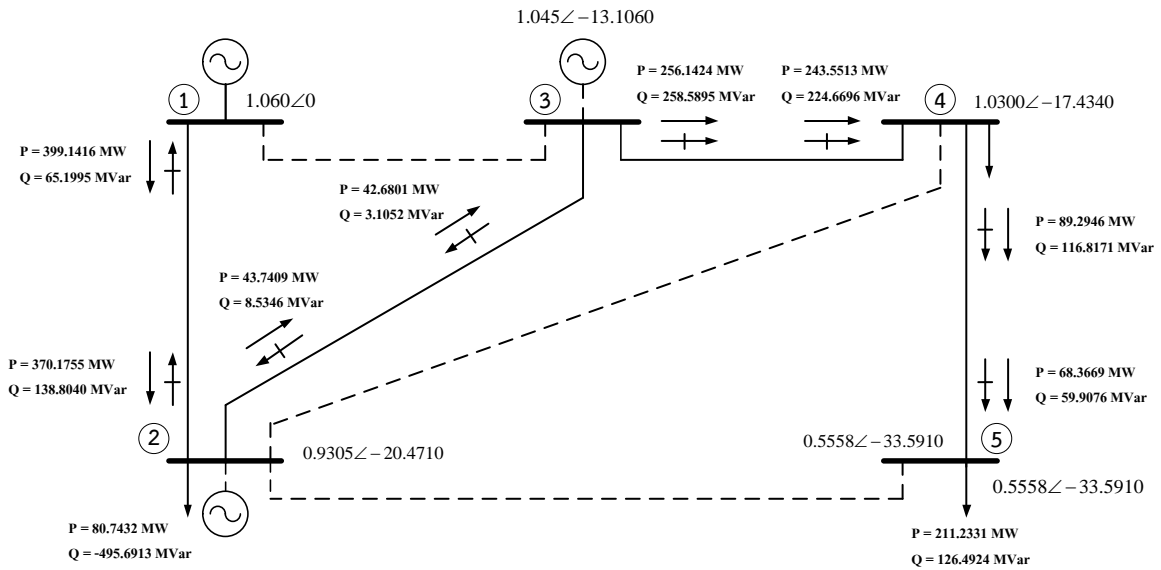
รูปที่ 8 แสดงเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 1 ไหลจากบัส 1-2-5



รูปที่ 9 แสดงเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 2 ไหลจากบัส 1-2-4-5



รูปที่ 10 แสดงเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 3 ไหลจากบัส 1-3-4-5



รูปที่ 11 แสดงเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ 4 ไหลจากบัส 1-2-3-4-5

พิจารณาเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ ERP พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 5 มีค่าต่ำที่สุดคือ 0.0558 p.u. และการไหลของกำลังไฟฟ้าทุกเส้นทางไหลไปที่บัสที่ 5 ซึ่งเป็นบัสปลายทาง ทำให้ทราบว่าบัสวิกฤติ (critical bus) ในระบบคือบัสที่ 5

เมื่อนำเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าทุกเส้นทาง ณ ระดับโหลดเป็น 4.6600 เท่าของค่าฐาน มาทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี NRPF โดยทำการเพิ่มโหลดที่โหลดบัส เพิ่มขึ้นรอบละ 1% พบว่าเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเส้นทางที่ 1, 2, 3 และ 4 สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด ณ ค่าโหลดเป็น 1.0500, 1.0400, 1.0800 และ 1.0700 เท่าตามลำดับ ทำให้ทราบว่าเส้นทางการของกำลังไฟฟ้าทุกเส้นทางอยู่ในภาวะวิกฤติสามารถเพิ่มโหลดได้อีกเพียงเล็กน้อยเท่านั้นก่อนที่ระบบจะหาคำตอบไม่ได้

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี CPF พบว่า ระบบสามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของโหลดได้เป็น 4.6621 เท่าของค่าฐาน ณ สภาวะเกิดการพังทลายของแรงดันไฟฟ้า (critical point) ซึ่งมีค่าสูงกว่าการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี NRPF ซึ่งสามารถเพิ่มโหลดได้เป็น 4.6600 เท่าของกรณีสฐาน แสดงให้เห็นว่าวิธีคำนวณการไหลของกำลังของกำลังไฟฟ้าแบบ CPF สามารถคำนวณหาคำตอบของระบบ ณ สภาวะเกิดการพังทลายของแรงดันไฟฟ้าได้ เมื่อวิเคราะห์เส้นทางการไหลวิกฤติโดยทำการ ERP ของเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ สภาวะโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 4.6600 เท่าของค่าฐานพบว่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าแต่ละเส้นทางมีค่าเข้าใกล้จุดเกิดแรงดันพังทลายเช่นกันแต่การวิเคราะห์เส้นทางการไหลวิกฤติจะแสดงให้เห็นถึงเส้นทางการไหลของกำลังไฟฟ้าในทุกๆ เส้นทางของระบบทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ออกวิเคราะห์วางแผนหรือควบคุมระบบไฟฟ้าต่อไป



เอกสารอ้างอิง

Allen J. Wood, Bruce F.Wollenberg, Power Generation, Operation, and control , third edition, Hoboken, New Jersey,
A Wiley-Interscience publication, 2013

B. Gao, G. K. Morison, and P. Kundur, “Voltage stability evaluation using modal analysis,” IEEE Transactions on
Power System 1992;7(4): 1529-1542.

C. W. Taylor, Power System Voltage Stability, London, Mc Graw Hill, 1994.

Komson Daroj, Somneuk Wainwattanachai, Keerati Chayakulkheeree, Proposal of the Critical
Power Flow Paths Concept to Detect Voltage Instability in a Power System, World Congress on Engineering
and Technology Oct. 28, 2011, Shanghai, China, 2011

Oranisation for Economic Co-operation and Development. learning from the blackouts. International Energy
Agency (IEA), Paris, France, Head of Publications Service, 2005

P.A. Lof, G. Anderson, and D.J.Hill, “Voltage stability indices for stressed power systems,” IEEE Transaction on
Power System 1993 ;8(1): 326-335.