

ขั้นตอนวิธีสำหรับกำหนดจุดเสถียรภาพแรงดันวิกฤติเพื่อแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก  
ออกจากระบบไฟฟ้าหลัก



นายชนพล เจนสุทธิเวชกุล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

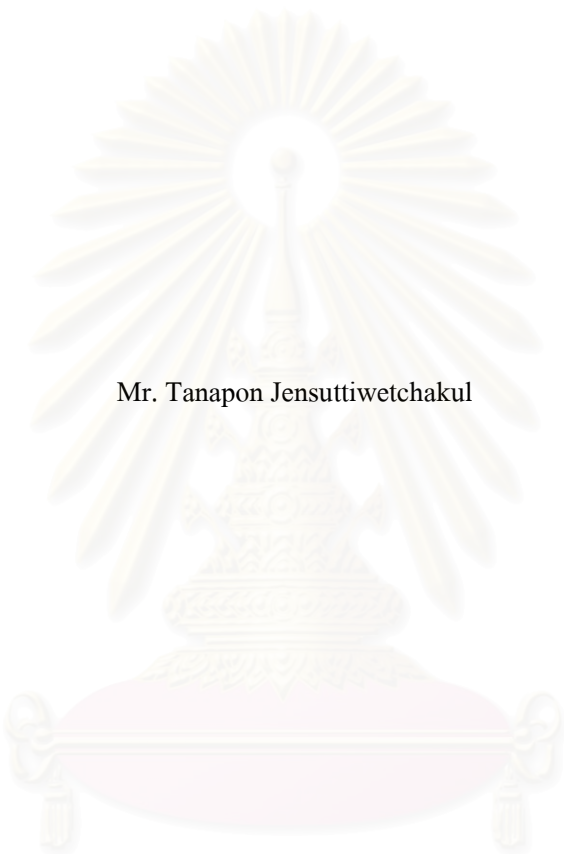
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ALGORITHM FOR DETERMINING CRITICAL VOLTAGE STABILITY POINT TO ISOLATE POWER  
SYSTEMS OF SMALL POWER PRODUCERS FROM THE MAIN POWER GRID



Mr. Tanapon Jensuttiwetchakul

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ขั้นตอนวิธีสำหรับกำหนดจุดเสถียรภาพแรงดันวิกฤติเพื่อแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบไฟฟ้าหลัก
โดย	นายชนพล เจริญสุข
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ

---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

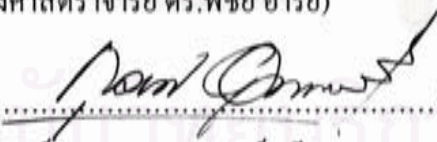
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อารีย์)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)

สถาบันวิศวกรรม  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนพล เจริญธรรม : ขั้นตอนวิธีสำหรับกำหนดจุดเสถียรภาพแรงดันวิกฤติเพื่อแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบไฟฟ้าหลัก. (AN ALGORITHM FOR DETERMINING CRITICAL VOLTAGE STABILITY POINT TO ISOLATE POWER SYSTEMS OF SMALL POWER PRODUCERS FROM THE MAIN POWER GRID)

อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ, 126 หน้า.

การศึกษาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากมีสาเหตุการเกิดปัญหาหาค่อนข้างซับซ้อน และสามารถส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างได้ ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจำนวนหนึ่ง นอกจากจะทำธุรกิจขายไฟฟ้าให้กับระบบส่งไฟฟ้าหลักแล้ว ยังประกอบธุรกิจอื่นที่จำเป็นต้องอาศัยระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพสูงภายใน ดังนั้น หากมีการรบกวนเกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าหลักที่นำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอาจก่อให้เกิดความเสียหายที่มีมูลค่าสูงได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พัฒนาขั้นตอนวิธีเพื่อคำนวณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันแบบเวลาจริงที่ใช้หลักการตรวจวัดอิมพีแดนซ์เฉพาะจุด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการป้องกันระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก โดยทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่นำเสนอกับระบบทดสอบเชิงพลวัตจำนวน 4 ระบบ ได้แก่ ระบบทดสอบที่ประกอบด้วยโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสอนันต์ ระบบทดสอบ 6 บัสที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำและหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลดระบบไฟฟ้าจำลองของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย และระบบไฟฟ้าจำลองโดยละเอียดของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนวิธีที่นำเสนอสามารถคำนวณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันได้อย่างถูกต้อง และสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของระบบที่อาจนำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันได้อย่างรวดเร็ว เช่น เมื่อเกิดการเข้าสู่ขีดจำกัดของความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบกระตุ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเมื่อสายส่งเส้นสำคัญถูกปลดออกจากวงจร เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการระบุเอกลักษณ์ของระบบแบบเวลาจริงไปใช้ประเมินความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดก่อนเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าสามารถนำขั้นตอนวิธีดังกล่าวไปใช้งานเพื่อป้องกันปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันอันเนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอกให้กับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิติศ..... 1 นว ๒๕๖๕.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา..... 2550.....

## 4970337021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : VOLTAGE STABILITY / IMPEDANCE STABILITY INDEX / SMALL POWER PRODUCER

TANAPON JENSUTTIWETCHAKUL : AN ALGORITHM FOR DETERMINING CRITICAL VOLTAGE STABILITY POINT TO ISOLATE POWER SYSTEMS OF SMALL POWER PRODUCERS FROM THE MAIN POWER GRID. THESIS ADVISOR : NAEBBOON HOONCHAREON, Ph.D., 126 pp.

Presently, the study of voltage stability problems has widely received attention from many concerned parties due to the fact that the causes of the problem are rather complex, and could eventually bring in black out of the entire system. Some small power producers (SPP) not only sell electrical energy to the main grid, but also conduct other businesses which highly depend on stability of an internal power system. Hence, any disturbance from outside that affects voltage stability of the power system inside may incur severe damage and considerable economical loss to such SPP.

In this thesis an algorithm to estimate voltage stability index in real time by employing the principle of local impedance measurement has been developed for the protection of an SPP's system. The performance of the algorithm has been verified using 4 test systems, that is a test system consisting of a constant power load connected to an infinite bus, a 6-bus test system consisting of a synchronous generator, an induction motor and an under load tap changing (ULTC) transformer, a test system for a simplified SPP model, and a test system for a detailed SPP model. The test results confirm that the proposed algorithm can identify voltage stability point correctly, and can effectively track changes in system conditions leading to voltage stability problem such as an excitation system within a synchronous generator hit its reactive power support limit, or major transmission line tripped off. Additionally, the resultant parameters from the proposed on-line identification technique can be used to calculate real time Available Transfer Capability (ATC) of an SPP pertinent to voltage stability problem, correctly, and corresponding well with the identified Impedance Stability Index. Therefore, it can be concluded that the algorithm can be implemented to protect an internal power system of an SPP from voltage stability problem due to remote disturbance, effectively.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature *Tanapon Jentsuttiwetchakul*  
Field of study...Electrical Engineering..... Advisor's signature *Naebboon Hoonchareon*  
Academic year .....2007.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.เนบบุญ หุนเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงษ์ชัย รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อารีชัย และอาจารย์ ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำ วิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆ ที่จำเป็นต่อการศึกษาค้นคว้า ตลอดจนครอบครัวอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้อันเป็น ประโยชน์แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และคุณตา ที่ให้โอกาสทางการศึกษา อบรมเลี้ยงดู และคอยให้ กำลังใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการศึกษา “ทุนศิษย์ก้นกุฏิ” เป็นทุนการศึกษาในการเรียนต่อในระดับปริญญาโทมาจนถึงตลอดระยะเวลา 2 ปี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	5
2. เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	6
2.1 นิยามและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	6
2.1.1 เสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	6
2.1.2 การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	6
2.1.3 ปัจจัยสำคัญที่ส่งกระทบต่อการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	6
2.1.4 แนวทางการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	7
2.2 การจำแนกประเภทการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	7
2.2.1 เสถียรภาพเชิงแรงดันในสภาวะชั่วคราว.....	8
2.2.2 เสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลาปานกลาง.....	8
2.2.3 เสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลายาว.....	9
2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	10
2.3.1 การวิเคราะห์เชิงสภาวะอยู่ตัว.....	11
2.3.2 การวิเคราะห์เชิงพลวัต.....	11
2.4 ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	12

บทที่	ช หน้า
2.4.1	ดัชนีประเภทที่ต้องการข้อมูลป้อนเข้าของทั้งระบบ..... 12
2.4.1.1	การวิเคราะห์ความไวในการเปลี่ยนแปลงระหว่างขนาด แรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ..... 13
2.4.1.2	การวิเคราะห์เชิงโหมด..... 14
2.4.2	ประเภทที่ต้องการข้อมูลป้อนเข้าเฉพาะตำแหน่ง..... 16
2.4.2.1	การหาขอบเขตเสถียรภาพแรงดันเชิงสถิตของสายส่ง..... 16
2.4.2.2	การหาดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน..... 19
2.5	ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์..... 21
2.5.1	เหตุผลในการเลือกใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์..... 21
2.5.2	ทฤษฎีและหลักการของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์..... 22
2.5.3	เทคนิคการประมาณค่าเทวินิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า..... 24
2.5.4	การประยุกต์เพื่อใช้งานกับรีเลย์ป้องกัน..... 25
3.	แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบทดสอบ..... 26
3.1	แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า..... 26
3.2	แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้า..... 30
3.3	แบบจำลองของโหลด..... 31
3.3.1	แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ..... 31
3.3.2	แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่..... 33
3.4	แบบจำลองหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินขณะมีโหลด..... 34
3.5	การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... 36
3.5.1	กรณีที่ 1 เกิดการลัดวงจร และปลดสายส่งออก 1 เส้น..... 37
3.5.2	กรณีที่ 2 เกิดการลัดวงจร และปลดสายส่งออก 2 เส้น..... 38
3.5.3	กรณีที่ 3 เกิดการลัดวงจร และปลดสายส่งออก 3 เส้น..... 40
4.	ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์..... 42
4.1	ขั้นตอนในการคำนวณ โหลดอิมพีแดนซ์..... 44
4.2	ขั้นตอนในการคำนวณเทวินิมพีแดนซ์..... 44
4.3	ขั้นตอนในการคำนวณดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์..... 47
4.4	การกำหนดค่าคงที่ที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการคำนวณหาค่าเทวินิมพีแดนซ์..... 47
5.	ระบบทดสอบ..... 51
5.1	ระบบทดสอบที่ 1: โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสอนันต์..... 51



5.2 ระบบทดสอบที่ 2: ระบบ 6 บัสที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำและหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลดเชื่อมต่ออยู่.....	52
5.3 ระบบทดสอบที่ 3: ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย.....	53
5.4 ระบบทดสอบที่ 4: ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย.....	54
6. ผลการทดสอบ.....	56
6.1 การเพิ่มโหลดโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ในระบบทดสอบที่ 1.....	56
6.2 การลัดวงจรบนสายส่งในระบบทดสอบที่ 2.....	64
6.3 การเพิ่มโหลดภายนอกระบบไฟฟ้า SPP ในระบบทดสอบที่ 3.....	69
6.4 การศึกษาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย.....	75
6.4.1 กรณีศึกษาที่ 1 ศึกษาการรบกวนด้วยการเพิ่มโหลดจากระบบส่งภายนอกในกรณีที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กเป็นปกติ.....	75
6.4.2 กรณีศึกษาที่ 1 ศึกษาการรบกวนด้วยการเพิ่มโหลดจากระบบส่งภายนอกในกรณีที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอ่อนแอลง.....	85
7. การวิเคราะห์ผลและการประยุกต์ใช้ในระบบจริง.....	87
7.1 การกำหนดช่วงเพื่อสำหรับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์.....	87
7.1.1 การวิเคราะห์เพื่อหาช่วงเพื่อของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์.....	87
7.1.2 ตัวอย่างการนำช่วงเพื่อไปประยุกต์ใช้ในการแยกตัวของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	92
7.1.2.1 การแยกตัวเป็นอิสระในสถานะที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยเป็นปกติ.....	92
7.1.2.2 การแยกตัวเป็นอิสระในสถานะที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยอ่อนแอลง.....	96
7.2 กำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งได้ของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลักในเชิงพลวัต.....	99
7.2.1 การประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก.....	99
7.2.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้.....	102
7.2.2.1 ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย.....	102
7.2.2.2 ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงเชื่อมโยงกับระบบส่งไฟฟ้าหลักในประเทศไทย.....	106

บทที่	ญ หน้า
7.3 ช่วงเวลาในการส้อม.....	109
7.3.1 กรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากความผิดพลาด.....	109
7.3.2 กรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากการเพิ่มโหลด.....	110
8. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	113
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	113
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	115
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	121
ภาคผนวก ค.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบที่ 2.....	118
ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกระตุ้นในระบบทดสอบที่ 2.....	118
ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบที่ 2.....	119
ก.4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบที่ 3.....	119
ก.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกระตุ้นในระบบทดสอบที่ 3.....	119
ก.6 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบที่ 3.....	120
ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบทดสอบที่ 2.....	121
ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบทดสอบที่ 3.....	121
ค.1 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัวในระบบทดสอบที่ 1.....	122
ค.2 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 1.....	122
ค.3 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ในระบบทดสอบที่ 1.....	122
ค.4 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัวในระบบทดสอบที่ 2.....	123
ค.5 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 2.....	123
ค.6 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ในระบบทดสอบที่ 2.....	123
ค.7 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัวในระบบทดสอบที่ 3.....	124
ค.8 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 3.....	124
ค.9 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ในระบบทดสอบที่ 3.....	124

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ตัวอย่างวงจรการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในสถานะชั่วครู่.....	8
2.2 ตัวอย่างวงจรการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลาปานกลาง.....	9
2.3 ตัวอย่างวงจรการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลายาว.....	9
2.4 กราฟขนาดแรงดันกับความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง (P-V Curve).....	10
2.5 แบบจำลองของสายส่งแบบ $\pi$ model.....	16
2.6 วิธีการคำนวณแบบ Prediction-Correction เพื่อหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	19
2.7 โหลดบัสและวงจรสมมูลเทวินินของระบบไฟฟ้า.....	22
2.8 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงค่า $\bar{Z}_{app}$ และ $\bar{Z}_{Thev}$ บนระนาบ r-x.....	24
3.1 แผนภาพของระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	29
3.2 แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	30
3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะชั่วครู่.....	32
3.4 วงจรสมมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่.....	33
3.5 แผนภาพของแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว.....	33
3.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินี้มีโหลด.....	34
3.7 วงจรสมมูลแบบ $\pi$ ของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินี้มีโหลด.....	34
3.8 แบบจำลองระบบควบคุมเชิงพลวัตของหม้อแปลง ULTC.....	35
3.9 ระบบที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	36
3.10 ผลตอบสนองของแรงดันที่บัสต่างๆ ในกรณีที่ 1.....	37
3.11 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ 1.....	38
3.12 ผลตอบสนองของแรงดันที่บัสต่างๆ ในกรณีที่ 2.....	39
3.13 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ 2.....	39
3.14 ผลตอบสนองของแรงดันที่บัสต่างๆ ในกรณีที่ 3.....	40
3.15 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ 3.....	41
4.1 แผนภูมิขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ เชิงอิมพีแดนซ์.....	43
4.2 เฟสเซอร์กระแสและแรงดัน.....	44
4.3 การตั้งค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ในขั้นตอนการคำนวณเทวินินอิมพีแดนซ์.....	45
4.4 แนวคิดในการเก็บและการกรองข้อมูล.....	46

	หน้า
ภาพประกอบ	หน้า
5.1 ระบบทดสอบที่ 1.....	51
5.2 ระบบทดสอบที่ 2.....	52
5.3 ระบบทดสอบที่ 3.....	53
5.4 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย เชื่อมโยงกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก.....	54
6.1 ระบบทดสอบที่ 1.....	56
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่โหลดบัสกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่โหลด.....	57
6.3 ตำแหน่งที่หยุดการเพิ่มโหลดในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ.....	58
6.4 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัส 2 และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	59
6.5 ผลตอบสนองของขนาดเทวินินอิมพีแดนซ์และขนาดโหลดอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	59
6.6 ผลตอบสนองของขนาดและมุมของแหล่งจ่ายสมมูลเทวินิน ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	60
6.7 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัส 2 และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	61
6.8 ผลตอบสนองของขนาดเทวินินอิมพีแดนซ์และขนาดโหลดอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	62
6.9 ผลตอบสนองของขนาดและมุมของแหล่งจ่ายสมมูลเทวินิน ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	62
6.10 ระบบทดสอบที่ 2.....	64
6.11 ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรในระบบในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2.....	65
6.12 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่าง ๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	67
6.13 เปรียบเทียบผลตอบสนองของขนาดแรงดันกับค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ เชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	67
6.14 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่าง ๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	68
6.15 เปรียบเทียบผลตอบสนองของขนาดแรงดันกับค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ เชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	68
6.16 ระบบทดสอบที่ 3.....	69

## ภาพประกอบ

หน้า

6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่บัสเชื่อมต่อกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจาก ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก.....	70
6.18 ตำแหน่งที่หยุดการเพิ่มโหลดบริเวณภายนอกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน รายเล็กในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ.....	71
6.19 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	72
6.20 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ เชิงอิมพีแดนซ์ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	72
6.21 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	73
6.22 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ เชิงอิมพีแดนซ์ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	73
6.23 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ เชิงอิมพีแดนซ์ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2 ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	74
6.24 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริง ในประเทศไทยในกรณีปกติ.....	76
6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจาก ระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทย.....	77
6.26 ผลตอบสนองของการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ออกสู่ภายนอกอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดภายนอกระบบไฟฟ้า ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก.....	78
6.27 ตำแหน่งที่หยุดการเพิ่มโหลดจากภายนอกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริง ในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ.....	79
6.28 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน รายเล็กจริงในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 1.....	80
6.29 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบระบบผลิตไฟฟ้าเอกชน รายเล็กจริงในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 1 (ต่อ).....	80
6.30 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 1.....	81
6.31 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ เชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1.....	81

ภาพประกอบ

6.32 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริง ในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 2.....	82
6.33 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริง ในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 2 (ต่อ).....	82
6.34 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 2.....	83
6.35 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	83
6.36 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2.....	84
6.37 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยในกรณีระบบภายในอ่อนแอ.....	85
6.38 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์.....	86
7.1 โหลดบัสและวงจรสมมูลเทวินินของระบบไฟฟ้า.....	87
7.2 ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดัน.....	89
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับเวลา.....	90
7.4 ความแตกต่างระหว่างมุมที่นำมาใช้ในการกำหนดช่วงเพื่อ.....	92
7.5 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยในกรณีแยกตัวเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าภายนอก.....	93
7.6 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อนและหลัง การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก.....	94
7.7 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อน และ หลัง การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก (ต่อ).....	94
7.8 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ก่อน และ หลังจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยแยกตัวเป็นอิสระ.....	95
7.9 ขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ก่อน และ หลังการแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก.....	95

ภาพประกอบ

7.10 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ในกรณีที่ระบบภายในอ่อนแอลงก่อนแยกตัวเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าภายนอก.....	96
7.11 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อน และหลังการแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก.....	97
7.12 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อน และหลังการแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก (ต่อ) .....	97
7.13 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ก่อน และหลังจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้า เอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยแยกตัวเป็นอิสระ.....	98
7.14 ขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ก่อน และหลังการแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก.....	98
7.15 โหลดบัสและวงจรสมมูลเทวินินของระบบไฟฟ้า.....	99
7.16 แผนภาพแสดงขั้นตอนวิธีในการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งได้ของ ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตเอกชนรายเล็ก.....	101
7.17 แผนภาพเส้นเดียวระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตเอกชนรายเล็กอย่างง่าย.....	102
7.18 ลักษณะผลตอบแทนของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท.....	103
7.19 ลักษณะผลตอบแทนของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	103
7.20 วิธีของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลาย.....	104
7.21 วิธีของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลาย (ต่อ).....	105
7.22 แผนภาพเส้นเดียวระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทย เชื่อมโยงกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก.....	106
7.23 ลักษณะผลตอบแทนของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท.....	107
7.24 ลักษณะผลตอบแทนของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน.....	107
7.25 วิธีของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลาย.....	108
7.26 ระบบที่ใช้ในการพิจารณากรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากความผิดพลาด.....	109
7.27 เปรียบเทียบผลตอบแทนของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ โดยใช้ช่วงเวลาในการสุ่มแตกต่างกัน.....	110
7.28 ระบบที่ใช้ในการพิจารณากรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากการเพิ่มโหลด.....	111



ภาพประกอบ

7.29 เปรียบเทียบผลตอบแทนของคำดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

โดยใช้ช่วงเวลาในการสุ่มแตกต่างกัน..... 111



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

ในบทนี้นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตและข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ส่วนในหัวข้อสุดท้ายของบทนี้เป็นการกล่าวถึงเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทที่จะนำเสนอต่อไป

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก คือ ปัญหาเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์ (Rotor Angle Stability) และปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน (Voltage Stability) โดยปัญหาเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์เกิดจากความไม่สมดุลระหว่างกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และความต้องการไฟฟ้าในระบบ (Load) จากความไม่สมดุลดังกล่าวส่งผลให้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวหมุนด้วยความเร็วที่เปลี่ยนไป หากไม่สามารถแก้ไขเหตุการณ์ดังกล่าวได้ทันท่วงทีจะทำให้โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกันและสูญเสียซิงโครไนส์ในที่สุด ส่วนปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความสามารถการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง ขีดจำกัดของระบบควบคุมแรงดันในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Excitation Limit) ลักษณะโหลด (Load Characteristics) เป็นต้น เมื่อเกิดปัญหาในระบบไฟฟ้ากำลังที่ส่งผลต่อปัจจัยข้างต้นอาจส่งผลให้เกิดแรงดันตกอย่างต่อเนื่องและนำไปสู่แรงดันพังทลาย (Voltage Collapse) ในที่สุด [1]

ในอดีตปัญหาเสถียรภาพเชิงมุมโรเตอร์ ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยและเมื่อเกิดขึ้นแล้วหากไม่สามารถแก้ไขเหตุการณ์ดังกล่าวได้ทันท่วงทีนอกจากจะทำให้เกิดไฟฟ้าดับแล้วยังอาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหายอีกด้วย ต่อมาจึงมีการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการติดตั้งโพล์-สลิปรีเลย์ (Pole-Slip Relay) ไว้ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อป้องกันการสูญเสียซิงโครไนส์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในประเทศไทยมีการติดตั้งรีเลย์ป้องกันดังกล่าวเช่นกัน

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีเหตุการณ์ไฟฟ้าดับจำนวนมากที่เกิดขึ้นในหลายประเทศเป็นผลมาจากการสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน [2], [3] จึงทำให้มีการนำเสนอดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน (Voltage Stability Indices) ขึ้นเป็นจำนวนมาก เช่น การวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal Analysis) [1] ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพสายส่ง (Line Stability Index) [4] ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ (Impedance Stability Index) [5] เป็นต้น ซึ่งดัชนีแต่ละตัวจะเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป

สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการนำดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันมาใช้ในการป้องกันปัญหาเสถียรภาพแรงดัน แต่ป้องกันโดยการติดตั้งรีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำ (Under-Voltage Relay) เพื่อป้องกันปัญหาแรงดันตก อย่างไรก็ตามการใช้รีเลย์ป้องกันแรงดันต่ำดังกล่าวในบางกรณีอาจไม่เพียงพอต่อการป้องกันปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันหรือบางกรณีอาจทำให้เกิดการปลดอุปกรณ์ออกจากระบบไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น [6] อีกทั้งในปัจจุบันระบบไฟฟ้าของประเทศไทยมีความซับซ้อนมากขึ้น กล่าวคือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) มิได้เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบส่งไฟฟ้าหลักของประเทศแต่เพียงรายเดียวอีกต่อไป แต่ยังรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่ (Independent Power Producers: IPP) และรายเล็ก (Small Power Producers: SPP) อีกด้วย โดยเชื่อมต่อกำลังการผลิตจากบริษัทเอกชนดังกล่าวเข้ากับระบบส่งไฟฟ้าหลักของ กฟผ. ดังนั้น ในกรณีที่มีเหตุการณ์การรบกวนใดๆ เกิดขึ้นในระบบส่งไฟฟ้าของ กฟผ. จะส่งผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมถึงระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนดังกล่าวด้วย โดยความรุนแรงของผลกระทบขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณลักษณะทางไฟฟ้าของจุดเชื่อมต่อ กำลังการผลิตจริง (Real Power) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่ไหลในสายส่งเชื่อมโยง (Tie Line) ในขณะนั้น รวมถึงลักษณะการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่และขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น

ปัจจุบัน ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่ขายไฟฟ้าให้กับ กฟผ. มีแนวโน้มที่จะเพิ่มจำนวนและกำลังการผลิตสูงขึ้น โดยผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กนอกจากจะขายไฟฟ้าให้กับ กฟผ. แล้วยังอาจมีการดำเนินธุรกิจอื่นภายในระบบไฟฟ้าของตนอีกด้วย ซึ่งธุรกิจดังกล่าวอาจเป็นธุรกิจที่มีความสำคัญ เช่น ธุรกิจทางด้านปิโตรเคมี เป็นต้น ดังนั้น หากเกิดการผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าของ กฟผ. ในบริเวณใกล้เคียง หรือแม้กระทั่งจุดที่ห่างไกลออกไป ก็อาจจะส่งผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กนั้นได้ อีกทั้งโครงสร้างภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กเป็นระบบขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับระบบไฟฟ้าของ กฟผ. จึงมีความเป็นไปได้สูงที่ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจะมีโอกาสสูญเสียเสถียรภาพก่อนระบบส่งหลัก จากเหตุการณ์ดังกล่าวอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายที่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พัฒนาขั้นตอนวิธี (Algorithm) เพื่อคำนวณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันแบบเวลาจริงที่ใช้หลักการตรวจวัดอิมพีแดนซ์เฉพาะจุด เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการป้องกันระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาวิเคราะห์เพื่อกำหนดดัชนีชี้วัดจุดวิกฤติเสถียรภาพแรงดันที่เหมาะสม สำหรับใช้ตรวจสอบและป้องกันระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก ภายใต้การรบกวนจากภายนอก
- 2) พัฒนาระบบวิธีในการชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก แบบเวลาจริง ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรีเลย์ป้องกันสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กกับระบบส่งไฟฟ้าหลักต่อไป

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาปัญหา และสาเหตุในการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก
- 2) กำหนดตัวชี้วัดที่ใช้ในการแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบส่งไฟฟ้าหลัก ในกรณีที่เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันอันเนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอก
- 3) พัฒนาระบบวิธีที่สามารถระบุค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์แบบเวลาจริง เพื่อให้สามารถประยุกต์ในรีเลย์ป้องกันได้
- 4) ทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นกับกับระบบทดสอบอย่างง่าย และระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น รวมถึงระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงโดยการจำลองแบบเชิงพลวัต
- 5) แทนระบบส่งไฟฟ้าหลักส่วนอื่นๆ ที่ไม่พิจารณารายละเอียดด้วยแบบจำลองบัสอนันต์ (Infinite Bus)

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาปัญหา สาเหตุ และปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) ศึกษาหลักการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดัน และตัวชี้วัดเสถียรภาพแรงดันแบบต่าง ๆ
- 3) ศึกษาแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) และหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลด (ULTC) และแบบจำลองของโหลดในลักษณะต่างๆ กัน
- 4) สร้างแบบจำลองระบบทดสอบ 2 บัสอย่างง่ายที่ประกอบไปด้วย บัสอ้างอิง สายส่ง และโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ เพื่อทำการศึกษาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ เมื่อมีการเพิ่มโหลด

- 5) สร้างแบบจำลองระบบทดสอบ 6 บัส ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลงปรับระดับแรงดัน ได้อัตโนมัติขณะมีโหลด และ โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อทำการศึกษาผลของอุปกรณ์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังต่อเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ เมื่อระบบมีความผิดปกติเกิดขึ้น
- 6) สร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่ายที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก เพื่อทำการศึกษาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย เมื่อโหลดในระบบส่งหลักเพิ่มสูงขึ้น
- 7) กำหนดตัวชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันที่ใช้ในการศึกษาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาต่างๆ ได้อย่างเหมาะสม
- 8) พัฒนาขั้นตอนวิธีสำหรับตรวจสอบเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง
- 9) ทดสอบขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้น โดยใช้ระบบทดสอบที่ 1-3 ตามที่กล่าวไว้ในข้อ 4-8 ข้างต้น
- 10) ศึกษาพฤติกรรมของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน รวมทั้งหาช่วงเผื่อ (Margin) ที่เหมาะสมของดัชนีชี้วัดดังกล่าว ในการป้องกันการเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันในแบบจำลองระบบที่ได้ทำการสร้างมาทั้ง 3 ระบบ
- 11) สร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลักในประเทศไทย
- 12) นำดัชนีชี้วัดไปประยุกต์ใช้กับแบบจำลองระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลักในประเทศไทย
- 13) วิเคราะห์ความถูกต้องในการประมาณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ และลักษณะการตอบสนองเชิงพลวัตของดัชนีชี้วัดดังกล่าว
- 14) สรุปผลที่ได้จากการศึกษาในระบบทดสอบต่างๆ
- 15) เรียบเรียง พิมพ์ผลงานการวิจัย และจัดเข้ารูปเล่มเพื่อนำเสนอต่อคณะกรรมการพิจารณาต่อไป

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำขั้นตอนวิธีที่ได้ไปใช้ในการพิจารณาเพื่อแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบส่งไฟฟ้าหลัก ในกรณีที่เป็น เพื่อรักษาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก
- 2) สามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้า รวมถึงความเสียหายต่อกระบวนการผลิตและธุรกิจอื่นๆ ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอันเนื่องมาจากปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ซึ่งเป็นผลมาจากการรบกวนของระบบส่งไฟฟ้าหลัก

- 3) ช่วยในการป้องกันและลดผลกระทบของการแยกตัวของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบส่งไฟฟ้าหลักโดยไม่จำเป็น

## 1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอในที่นี้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึง เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง รวมถึงการจำแนกปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึง ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันบางประเภทที่ใช้สำหรับวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง ทั้งในสภาวะอยู่ตัว (Steady State) และในเชิงพลวัต (Dynamic) รวมถึงเหตุผลที่ใช้ในการเลือกดัชนีชี้วัดที่นำมาวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดันในวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 อธิบายการสร้างแบบจำลองเชิงพลวัตของอุปกรณ์ในระบบทดสอบ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generators) มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motors) หม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลด (ULTC) และ โหลดกำลังคงที่ (Constant Power Loads)

บทที่ 4 แสดงขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ เพื่อใช้เป็นค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันที่นำไปใช้กับระบบทดสอบต่างๆ ต่อไป

บทที่ 5 กล่าวถึง ระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีด้วยกันทั้งสิ้น 4 ระบบ

บทที่ 6 แสดงถึง ผลการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ กับระบบทดสอบต่างๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

บทที่ 7 อธิบายการวิเคราะห์ผลและการประยุกต์ใช้ในระบบจริง โดยรวมถึงการวิเคราะห์เพื่อหาค่าช่วงเพื่อสำหรับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก นอกจากนี้ ยังได้ประยุกต์ใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันอีกชนิดหนึ่งเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ (Available Transfer Capability; ATC) ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลักอีกด้วย

บทที่ 8 กล่าวถึง บทสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะเพิ่มเติมต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

### เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน การจำแนกประเภทของการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดันในแบบต่างๆ นอกจากนี้ ยังได้กล่าวถึงประเภทของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน รวมถึงลักษณะการใช้งาน และข้อดี ข้อเสีย ของดัชนีชี้วัดในแต่ละประเภท รวมถึงเหตุผลในการเลือกดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักอีกด้วย

#### 2.1 นิยาม และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน

##### 2.1.1 เสถียรภาพเชิงแรงดัน (Voltage Stability)

เสถียรภาพเชิงแรงดัน หมายถึง ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่จะรักษาขนาดแรงดันในสถานะอยู่ตัวของบัสทุกบัสในระบบให้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เช่น ให้มีค่าแตกต่างจากแรงดันมาตรฐานไม่เกิน  $\pm 5\%$  เป็นต้น ทั้งภายใต้ภาวะปกติ และภายหลังจากมีการรบกวนเกิดขึ้น

##### 2.1.2 การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน (Voltage Instability)

การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน เกิดจากการที่ระบบไฟฟ้าภายใต้การรบกวนที่เกิดขึ้น ไม่ที่จะเป็นการเพิ่มขึ้นของโหลดอย่างต่อเนื่อง หรือเกิดลัดวงจรขึ้นในระบบ ส่งผลให้ขนาดแรงดันที่บัสใดๆ มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยไม่สามารถควบคุมหรือหยุดยั้งได้ ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าสาเหตุเกิดจากการที่ระบบไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เพียงพอต่อความต้องการโดยรวมภายในระบบ โดยเฉพาะเมื่อมีกระแสปริมาณสูงไหลผ่านสายส่งเป็นระยะทางไกล การสูญเสียเสถียรภาพของบัสใดบัสหนึ่งในระบบอาจแพร่กระจายไปสู่บัสอื่นๆ ได้อย่างรวดเร็ว ในลักษณะที่เรียกว่า “การเกิดการพังทลายของแรงดัน” (Voltage Collapse) ขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง (Blackout) ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่เคยเกิดขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกา ปี ค.ศ.2003 [3] เป็นต้น

##### 2.1.3 ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบ ได้แก่ การที่ปริมาณโหลดบริเวณใดบริเวณหนึ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนเข้าใกล้ขีดจำกัดเสถียรภาพเชิง

แรงดัน (Stability Limit) ของบัสนั้น นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณโหลดอาจทำให้สายส่งบางเส้นมีปริมาณกำลังไฟฟ้าไหลผ่านเกินขีดจำกัด และถูกปลดออกจากระบบโดยการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันสายส่ง ทำให้ระบบโดยรวมที่เหลือยิ่งมีความอ่อนแอลง หรือระยะทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไปสู่โหลด มีระยะทางไกลยิ่งขึ้นอีก ส่งผลให้เกิดแรงดันตกอย่างต่อเนื่อง และปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีก ตามลำดับจนทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบ เช่น ระบบกระตุ้น (Excitation Systems) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เข้าสู่ขีดจำกัดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้นนี้ อาจเกิดขึ้นพร้อมกัน หรือต่อเนื่องกันเป็นลำดับ และนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบในที่สุด หากผู้ดูแลระบบไม่สามารถแก้ไขสถานการณ์ได้ทันเวลา

ปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันอีกประการหนึ่งได้แก่ ลักษณะโหลดบางประเภท หรืออุปกรณ์ควบคุมที่ตอบสนองไวต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ หรือหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลด เป็นต้น ซึ่งในภาวะชั่วขณะที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบและส่งผลให้แรงดัน ณ จุดต่างๆ ตกลง การตอบสนองเชิงพลวัตต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของโหลด หรืออุปกรณ์ควบคุมเหล่านี้ อาจเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพดังที่เรียกว่า “เสถียรภาพโหลด” หรืออาจช่วยเร่งให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพของแรงดันในระบบเร็วขึ้นได้

#### 2.1.4 แนวทางการแก้ไขปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน

แนวทางการแก้ไขปัญหาลักษณะตรวจพบว่ากำลังจะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้นในระบบ โดยทั่วไป จะใช้วิธีการปลดโหลดบางส่วนออกจากระบบ (Load Shedding) หรือการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยอุปกรณ์ควบคุม เช่น SVC (Static VAR Compensator) Shunt Capacitor เป็นต้น นอกจากนี้ ยังอาจทำได้โดยการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ (Generation Re-dispatch) โดยคำนึงถึงเงื่อนไขความสามารถในการมีโหลดได้ (Loadability) ณ บัสต่าง ๆ ในระบบ หรือ ทำการเปลี่ยนโครงสร้างระบบใหม่ (Network Reconfiguration) เพื่อปรับเปลี่ยนเส้นทางและปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้า ในสายส่งเส้นต่างๆ ได้ด้วย

### 2.2 การจำแนกประเภทการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน [5]

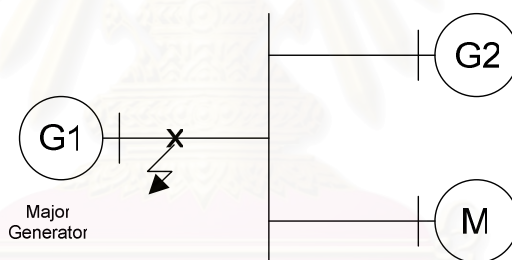
การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันและการเกิดการพังทลายของแรงดันจะมีพลวัตการเกิดหรือ ช่วงเวลาที่เกี่ยวข้อง ตั้งแต่ ภายในไม่กี่วินาที จนถึงหลายนาที ปัจจัยที่มีผลโดยตรงต่อช่วงเวลาดังกล่าว คือ คุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม จะมีอุปกรณ์เพียงไม่กี่ประเภทที่มีผลอย่างมากต่อการกำหนดพลวัตของเหตุการณ์ดังกล่าว ซึ่งสามารถจำแนกประเภท



ของปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน โดยแบ่งตามระยะเวลาที่จะนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุดได้ ดังนี้

### 2.2.1 เสถียรภาพเชิงแรงดันในสถานะชั่วครู่ (Transient Voltage Stability)

ระยะเวลาของการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันประเภทนี้จะอยู่ในหน่วยวินาที การพังทลายของแรงดันเกิดขึ้นเนื่องจากโหลดที่มีการฟื้นฟูแรงดันอย่างรวดเร็ว อาทิ มอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีกลไกในการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน ดังนี้ สาเหตุเริ่มจากการลัดวงจรเกิดขึ้นบนสายส่งในระบบ จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้มีการกำจัดความผิดพลาดโดยการปลดสายส่งที่มีปัญหาออก หากเหตุการณ์นั้นส่งผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำได้รับกำลังเสมือนน้อยลง แรงดันตก ทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพิ่มสูงขึ้น เพื่อที่จะทำให้มอเตอร์กลับสู่สภาวะการทำงานปกติ อย่างไรก็ตาม ในสภาวะดังกล่าว หากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบส่วนที่เหลือหลังจากสายส่งเส้นที่เกิดปัญหาถูกปลดออก ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เพียงพอต่อความต้องการของมอเตอร์ อาจทำให้แรงดันตกลงไปมากกว่าเดิม และนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุด ดังแสดงภาพประกอบในรูปที่ 2.1



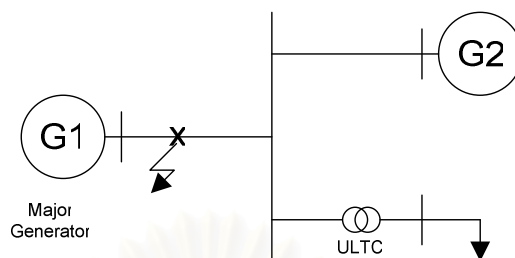
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างวงจรการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในสถานะชั่วครู่

### 2.2.2 เสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลาปานกลาง (Mid-Term Voltage Stability)

ระยะเวลาการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในประเภทนี้จะอยู่ในหลักนาที การพังทลายของแรงดันมักเกิดขึ้นเนื่องจากสภาวะโหลดที่เพิ่มสูงขึ้นในระบบ และการส่งกำลังไฟฟ้ามายังโหลดเป็นระยะทางไกล เช่น หลังเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรและบางส่วนของระบบ รวมถึงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าถูกปลดออก ซึ่งสาเหตุดังกล่าว ส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากขึ้นในสายส่ง และเกิดแรงดันตกขึ้นบริเวณโหลด

จากเหตุการณ์ข้างต้น ทำให้หม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลดพยายามที่จะควบคุมแรงดันโหลดให้กลับมาที่ค่าอ้างอิงตามเดิม แต่การกระทำดังกล่าวส่งผลให้ความไม่สมดุล

ของกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในระบบแย่งอีก ทำให้เกิดแรงดันตกมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง และนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุด ดังแสดงภาพประกอบในรูปที่ 2.2

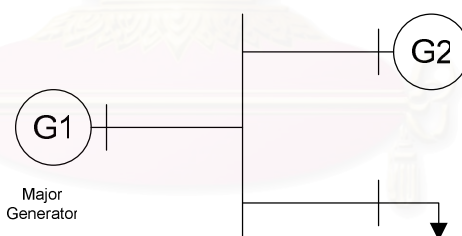


รูปที่ 2.2 ตัวอย่างวงจรการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลาปานกลาง

### 2.2.3 เสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลายาว (Longer-Term Voltage Stability)

ช่วงเวลาการเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในประเภทนี้จะอยู่ในหลักของนาที่เช่นกัน แต่พลวัตของเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องจะยาวนานกว่าเสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลายาว การพังทลายของแรงดันในกรณีนี้มักเกิดขึ้นเนื่องมาจากความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงภายในระบบ ณ จุดโหลดบางแห่ง มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่

2.3



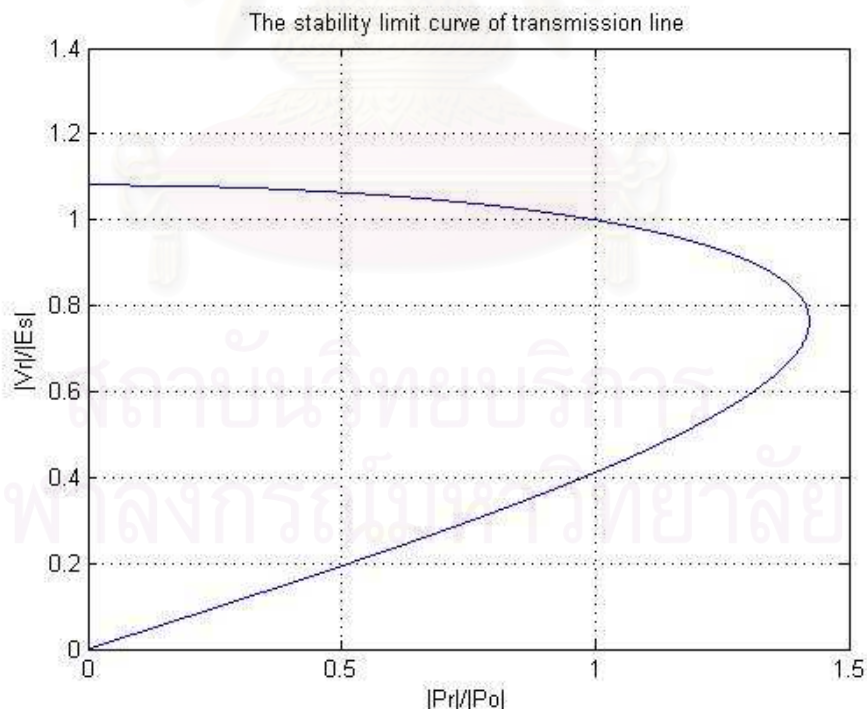
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวงจรการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระยะเวลายาว

ในรูปที่ 2.3 หากโหลดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงดันในระบบเริ่มตกลง และหากโหลดยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งสองในระบบไม่สามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้เพียงพอต่อความต้องการ หรือเข้าสู่ขีดจำกัดด้านเสถียรภาพของสายส่ง ซึ่งนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันของทั้งระบบได้ในที่สุด ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านความเข้มแข็งของระบบส่งไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดเป็นสำคัญด้วย

### 2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดัน (Voltage Stability Analysis)

หลักสำคัญในการพิจารณาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน คือ หากขนาดแรงดันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นขณะที่มีการจ่ายกำลังไฟฟัรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น ณ บัสดไฟฟาใดๆ แสดงว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพ แต่หากมีอย่างน้อย 1 บัสดที่ขนาดของแรงดันลดลงขณะที่กำลังไฟฟัรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าที่บัสนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าระบบกำลังสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพเชิงแรงดันก็ต่อเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟัรีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่ระบบ (V-Q sensitivity) มีค่าเป็นบวกทุกบัสด และจะสูญเสียเสถียรภาพทางแรงดันหากมีอย่างน้อย 1 บัสด ที่ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว มีค่าเป็นลบ [1]

นอกจากนี้ หากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟัจริงกับขนาดของแรงดัน ในช่วงการทำงานที่มีเสถียรภาพ ขณะที่ความต้องการโหลดเพิ่มขึ้น การไหลของกำลังไฟฟัจริงในสายส่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น และขนาดของแรงดัน ณ บัสดที่โหลดเชื่อมต่ออยู่จะมีขนาดลดลงอย่างช้าๆ จนเมื่อเข้าใกล้จุดวิกฤติเชิงแรงดัน (Critical Voltage Stability Point) หากความต้องการไฟฟัยังคงเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่าค่าที่จุดวิกฤตินี้ กำลังไฟฟัจริงและขนาดของแรงดันจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นย่านการทำงานที่ระบบสูญเสียเสถียรภาพแล้วนั่นเอง [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟขนาดแรงดันกับความต้อการกำลังไฟฟัจริง (P-V Curve)

การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันมีเทคนิคในการวิเคราะห์หลักแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การวิเคราะห์เชิงภาวะอยู่ตัว (Steady-state Analysis) และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา หรือ เชิงพลวัต (Time-domain Analysis) แต่เนื่องจากปกติแล้ว พลวัตของระบบที่มีผลต่อปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันจะดำเนินไปอย่างช้าๆ ดังนั้น หลายส่วนของปัญหาจึงสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงภาวะอยู่ตัว เพื่อตรวจสอบความสามารถในการดำรงอยู่ได้ของระบบ ณ จุดทำงานที่ภาวะอยู่ตัว ที่พิจารณานั้น

เทคนิคการวิเคราะห์เชิงภาวะอยู่ตัว มีประโยชน์ในด้านการตรวจสอบขอบเขตการทำงานที่มีเสถียรภาพของระบบ และสามารถให้ความเข้าใจที่ลึกซึ้งมากขึ้นในลักษณะทั่วไปของปัญหารวมถึงระบุปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความรุนแรงของปัญหา

เทคนิคการวิเคราะห์เชิงพลวัต มีประโยชน์สำหรับการศึกษารายละเอียดของเหตุการณ์แต่ละเหตุการณ์ซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่อง และเชื่อมโยงกัน พฤติกรรมขณะเกิดการพังทลายของแรงดันทั้งระบบ (Voltage Collapse) การวิเคราะห์การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันและระบบควบคุม รวมถึงการทดสอบหาวิธีการป้องกันและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

### 2.3.1 การวิเคราะห์เชิงภาวะอยู่ตัว

โดยทั่วไป การวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันจะวิเคราะห์ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันกับความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง (P-V Curve) และความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่กับขนาดแรงดัน (V-Q Curve) ณ โหลดบัสใดๆ ที่พิจารณา ซึ่งข้อมูลดังกล่าวที่แสดงในรูปกราฟ จะได้จากวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานต่างๆ กันไป ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่ได้ให้ข้อมูลที่ระบุถึงสาเหตุของปัญหาเสถียรภาพโดยภาพรวมของทั้งระบบ ได้โดยชัดเจน

ดังนั้น เพื่อให้เข้าใจถึงสาเหตุของการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของทั้งระบบโดยชัดเจนขึ้น จึงนำเอาการศึกษาวิเคราะห์ความไวในการเปลี่ยนแปลงระหว่างขนาดแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (V-Q Sensitivity) และการวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal Analysis) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ ข้อดีของวิธีการดังกล่าวคือ จะให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน โดยการมองภาพรวมทั้งระบบ และสามารถระบุพื้นที่กลุ่มของบัสและสายส่งที่มีปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดของการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบในหัวข้อ 2.4.1

### 2.3.2 การวิเคราะห์เชิงพลวัต

สำหรับการวิเคราะห์เชิงพลวัตนั้น ใช้เทคนิคการจำลองแบบเชิงเวลา (Time-domain Simulation) มาช่วยในการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลวัตของระบบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ใน

ลักษณะนี้จำเป็นจะต้องสร้างแบบจำลองขององค์ประกอบต่าง ๆ ในระบบ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบควบคุมแรงดัน รวมถึงแบบจำลองลักษณะ โหลด และแบบจำลองการทำงานของหม้อแปลง ปรับระดับแรงดันอัตโนมัติลักษณะมีโหลดที่เหมาะสม เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันด้วยวิธีดังกล่าว มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ

หลังจากนั้นจะทำการทดสอบกลไกการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันผ่านแบบจำลองดังกล่าว โดยอาจจำลองโดยการเพิ่มโหลด หรือมีความผิดพลาดเกิดขึ้นบนสายส่งแล้วกำจัดความผิดพลาดนั้น โดยการปลดสายส่งเส้นนั้นออก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.2 สำหรับการวิเคราะห์ในลักษณะนี้จะทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของลักษณะแรงดันในขณะที่กำลังจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันได้อย่างชัดเจน และยังสามารถใช้ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันอีกด้วย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์เชิงพลวัตในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ โดยแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แสดงไว้ในบทที่ 3

## 2.4 ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน

ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันเป็นปัญหาที่ได้รับความศึกษากันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากระบบส่งไฟฟ้าส่วนใหญ่ถูกใช้งานในสถานะที่เข้าใกล้ความสามารถในการมีโหลดได้ (Loading Capability) ของระบบบ่อยขึ้น เนื่องจากเหตุผลในเชิงเศรษฐศาสตร์ และข้อจำกัดของสภาพภูมิประเทศในการสร้างสายส่งเพิ่มเติม และหากเกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้น อาจส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง และก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมาก ดังนั้น ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาจึงได้มีการนำเสนอดัชนีชี้วัดเกี่ยวกับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดันเป็นจำนวนมาก โดยดัชนีแต่ละแบบสามารถนำไปประยุกต์ในลักษณะต่างๆ กันไป [4] อย่างไรก็ตามก็สามารถแบ่งประเภทของดัชนีดังกล่าวออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ดัชนีประเภทที่ต้องการข้อมูลป้อนเข้าของทั้งระบบ (Global Measurement) และประเภทที่ต้องการข้อมูลป้อนเข้าเฉพาะตำแหน่ง (Local Measurement) ซึ่งแต่ละประเภท มีข้อดี-ข้อเสีย ต่างกัน ดังนี้

### 2.4.1 ดัชนีประเภทที่ต้องการข้อมูลป้อนเข้าของทั้งระบบ (Global Measurement)

การคำนวณหาค่าดัชนีประเภทนี้ ต้องการข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ และขนาดแรงดันควบคุม ของทุกบัสในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา โดยมากใช้วิธีการคำนวณที่อ้างอิงจากการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) เป็นหลัก เช่น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง (Continued Power Flow) ซึ่งสามารถระบุถึงเสถียรภาพเชิงแรงดันของทั้งระบบที่พิจารณาได้

อย่างไรก็ดี การวิเคราะห์หาค่าดัชนีประเภทนี้มักต้องใช้เวลาในการประมวลผล จึงยังไม่เหมาะแก่การประยุกต์ใช้แบบเวลาจริง (Real-time) ส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์แบบออฟไลน์

(Off-line Analysis) ในกรณีที่มีข้อมูลระบบอย่างครบถ้วน หรือเกือบครบถ้วน เพื่อใช้ในการวางแผน หรือการฝึกอบรมผู้ดูแลระบบ เป็นหลัก

ตัวอย่างการหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน โดยใช้ข้อมูลป้อนเข้าของทั้งระบบด้วยหลักการวิเคราะห์เชิงภาวะอยู่ตัว เพื่อระบุถึงความใกล้เคียงของจุดทำงานที่พิจารณาจากจุดวิกฤติเสถียรภาพ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ความสามารถในการมีโหลดได้เพิ่มขึ้นของระบบ ณ จุดทำงานของระบบขณะนั้น ได้แสดงไว้ข้างล่างนี้

#### 2.4.1.1 การวิเคราะห์ความไวในการเปลี่ยนแปลงระหว่างขนาดแรงดันและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (V-Q Sensitivity) [1]

จากสมการการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ทำให้เป็นเชิงเส้น แสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ณ จุดทำงานที่พิจารณา หากกำหนดให้กำลังไฟฟ้าจริงมีค่าคงที่ ( $\Delta P = 0$ ) จะได้ว่า

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (2.2)$$

โดยที่  $J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}]$

จากสมการ (2.2) อาจเขียนใหม่ได้ในรูป

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.3)$$

องค์ประกอบภายในเมทริกซ์  $J_R^{-1}$  แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่ระบบ (V-Q Sensitivity) ณ บัสคู่ใดๆ หากองค์ประกอบดังกล่าวมีค่าเป็นบวก แสดงว่าจุดทำงานที่พิจารณามีเสถียรภาพ และหากค่าสัมบูรณ์ขององค์ประกอบมีค่าน้อย แสดงว่าระบบยิ่งมีความมั่นคงมาก

### 2.4.1.2 การวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal Analysis) [1]

ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบยังสามารถวิเคราะห์ได้จากการคำนวณหาค่า Eigenvalues และ Eigenvectors ของจาโคเบียนเมทริกซ์  $J_R$  ดังนี้

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (2.4)$$

โดยที่  $\xi$  คือ เมทริกซ์ที่ประกอบด้วย Right eigenvectors ของ  $J_R$

$\eta$  คือ เมทริกซ์ที่ประกอบด้วย Left eigenvectors ของ  $J_R$

$\Lambda$  คือ เมทริกซ์ทแยงมุมที่ประกอบด้วย Eigenvalues ของ  $J_R$

จากสมการ (2.4)

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (2.5)$$

แทนค่า (2.5) ลงในสมการ (2.3)

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (2.6)$$

$$\Delta V = \sum_i \frac{1}{\lambda_i} \cdot \xi_i \cdot \eta_i^T \Delta Q \quad (2.7)$$

โดยที่  $\xi_i$  คือ หลักที่  $i$  ของ Right eigenvector matrix

$\eta_i^T$  คือ แถวที่  $i$  ของ Left eigenvector matrix

ค่า eigenvalue ( $\lambda_i$ ) แต่ละค่ารวมถึง right และ left eigenvector ที่สอดคล้องกันเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของโหมดที่  $i$  ของผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่ระบบ

เนื่องจาก  $\xi^{-1} = \eta$  สมการ (2.6) สามารถเขียนในรูปของ Modal Analysis ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \eta \Delta V &= \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \\ v &= \Lambda^{-1} q \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยที่

$v = \eta \Delta V$  คือ เวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ถูกแปลงค่าสำหรับการวิเคราะห์เชิงโหมด

$q = \eta \Delta Q$  คือ เวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ถูกแปลงค่าสำหรับการวิเคราะห์เชิงโหมด

ดังนั้น สำหรับโหมดที่  $i$  จะได้ว่า

$$v_i = \frac{1}{\lambda_i} q_i \quad (2.9)$$

- หาก  $\lambda_i > 0$  การเปลี่ยนแปลงแรงดันโหมด  $i$  และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโหมด  $i$  อยู่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโหมดดังกล่าวมีเสถียรภาพเชิงแรงดัน
- หาก  $\lambda_i < 0$  การเปลี่ยนแปลงแรงดันโหมด  $i$  และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโหมด  $i$  อยู่ในทิศตรงข้ามกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโหมดดังกล่าวไม่มีเสถียรภาพเชิงแรงดัน

นอกจากนั้น ขนาดของ  $\lambda_i$  ยังบ่งบอกถึงระดับความมีเสถียรภาพเชิงแรงดันของโหมด  $i$  โดยหากขนาดของ  $\lambda_i$  มีค่าน้อย แสดงว่าแรงดันโหมด  $i$  เข้าใกล้การสูญเสียเสถียรภาพมาก และที่  $\lambda_i = 0$  แรงดันโหมด  $i$  จะเข้าสู่จุดวิกฤติเสถียรภาพพอดี เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ จะส่งผลให้แรงดันเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไม่มีขีดจำกัด

ปกติแล้วการวิเคราะห์เชิงโหมดจะใช้ในการช่วยหาคำตอบว่าระบบยังคงมีเสถียรภาพเชิงแรงดันอยู่หรือไม่ และจะสามารถรองรับโหลดเพิ่มขึ้นได้อีกมากน้อยเพียงใด อีกทั้งในกรณีที่ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติ หรือกำลังจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน การวิเคราะห์เชิงโหมดยังสามารถระบุกลุ่มของบัสที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียเสถียรภาพในโหมดนั้น ๆ ได้ โดยการคำนวณค่าปัจจัยของบัสที่มีส่วนเกี่ยวข้อง (Bus participation factors) ดังนี้

บัสที่  $k$  มีความสัมพันธ์กับการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในโหมดที่  $i$  มากน้อยเพียงใด หาได้จากการคำนวณค่าปัจจัยของบัสที่มีส่วนเกี่ยวข้องตามสมการ (2.10) โดยยิ่งขนาดของ  $P_{ki}$  มีค่ามาก (เข้าใกล้ 1) แสดงว่าพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายให้กับบัส  $k$  มีผลต่อเสถียรภาพเชิงแรงดันโหมดที่  $i$  มาก นั่นเอง

$$P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ik} \quad (2.10)$$



## 2.4.2 ดัชนีประเภทที่ต้องการข้อมูลป้อนเข้าเฉพาะตำแหน่ง (Local Measurement)

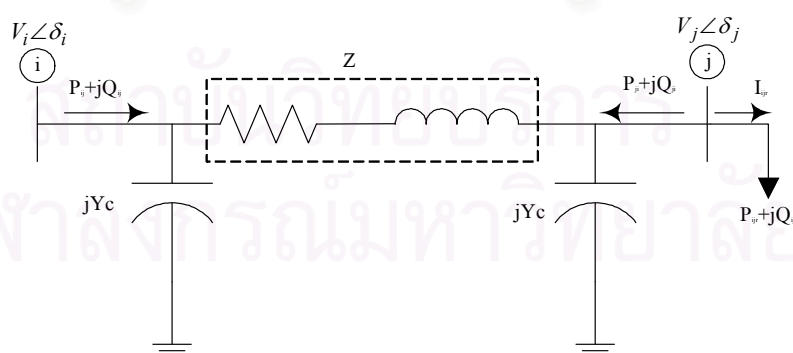
การคำนวณค่าดัชนีประเภทนี้ ต้องการข้อมูลเฉพาะตำแหน่งของโหนดบัสที่พิจารณา เช่น ขนาดของแรงดัน ขนาดกระแส และค่าตัวประกอบกำลัง ที่จุดตรวจวัดเท่านั้น ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลประเภทเดียวกันกับที่ใช้ในการประมวลผลของรีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) ทั่วไป ซึ่งสามารถเข้าถึงได้สะดวกและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังต้องการความสามารถในการประมวลผลค่า และใช้เวลาในการประมวลผลรวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้แบบเวลาจริง หรือการตรวจวัดแบบออนไลน์ (On-line Monitoring)

ส่วนข้อดีของดัชนีประเภทนี้ คือ สามารถระบุถึงปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันได้เฉพาะตำแหน่งนั้นๆ ที่พิจารณา ไม่สามารถยืนยันการรักษาสถียรภาพเชิงแรงดันของทั้งระบบได้เหมือนในกรณีของดัชนีประเภทแรก

ตัวอย่างการหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน โดยใช้ข้อมูลป้อนเข้าเฉพาะตำแหน่ง ด้วยหลักการวิเคราะห์เชิงภาวะอยู่ตัว เพื่อระบุถึงความใกล้ไกลของจุดทำงานที่พิจารณาจากจุดวิกฤติเสถียรภาพ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือความสามารถในการมีโหนดได้เพิ่มขึ้นของระบบ ณ จุดทำงานของระบบ ขณะนั้น โดยอ้างอิงจากระนาบ P-Q แสดงไว้ข้างล่างนี้

### 2.4.2.1 การหาขอบเขตเสถียรภาพแรงดันเชิงสถิตของสายส่ง [7]

ขีดจำกัดเสถียรภาพเชิงแรงดันของสายส่งพิจารณาได้จากแบบจำลองสมมูลแบบ  $\pi$  ของสายส่งเส้นหนึ่ง ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างบัส  $i$  และบัส  $j$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยกำหนดให้  $V_i \angle \delta_i$  และ  $V_j \angle \delta_j$  เป็นเฟสเซอร์แรงดันที่บัส  $i$  และบัส  $j$  ตามลำดับ  $Z$  เป็นอิมพีแดนซ์อนุกรม และ  $Y_c$  เป็นครึ่งหนึ่งของแอดมิตแดนซ์ขนาน ของสายส่งเส้นนั้นๆ



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของสายส่งแบบ  $\pi$  model

จะได้ว่า

$$V_i \angle \delta_i = AV_j \angle \delta_j + BI_{ijr} \quad (2.11)$$

โดยที่  $A = 1 + ZY_c$  และ  $B = Z$  ซึ่งสามารถแทนในรูปเลขเชิงซ้อนได้ ดังนี้

$$A = a_1 + ja_2 \text{ และ } B = b_1 + jb_2 \quad (2.12)$$

และจาก  $I_{ijr} = \frac{(P_{ijr} - jQ_{ijr})}{V_j \angle -\delta_j}$  แทนค่าลงในสมการ (2.11) จะได้

$$V_i \angle \delta_i = (a_1 + ja_2)V_j \angle \delta_j + \frac{(b_1 + jb_2)(P_{ijr} - jQ_{ijr})}{V_j \angle -\delta_j} \quad (2.13)$$

จาก (2.13) ทำการจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} V_i V_j \angle (\delta_i - \delta_j) &= (a_1 + ja_2)V_j^2 + (b_1 + jb_2)(P_{ijr} - jQ_{ijr}) \\ V_i V_j \angle (\delta_i - \delta_j) &= (a_1 V_j^2 + b_1 P_{ijr} + b_2 Q_{ijr}) + j(a_2 V_j^2 + b_2 P_{ijr} - b_1 Q_{ijr}) \end{aligned}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการที่กระชับได้ ดังนี้

$$c_1 V_j^4 + (c_2 P_{ijr} + c_3 Q_{ijr} - V_i^2) V_j^2 + c_4 (P_{ijr}^2 + Q_{ijr}^2) = 0 \quad (2.14)$$

โดยที่  $c_1 = a_1^2 + a_2^2, c_2 = 2(a_1 b_1 + a_2 b_2), c_3 = 2(a_1 b_2 - a_2 b_1), c_4 = b_1^2 + b_2^2$

จากสมการ (2.14) สามารถเขียนในรูปของสมการกำลังสองได้ ดังนี้

$$a(V_j^2)^2 + b(V_j^2) + c = 0 \quad (2.15)$$

โดยที่  $a = c_1, b = c_2 P_{ijr} + c_3 Q_{ijr} - V_i^2, c = c_4 (P_{ijr}^2 + Q_{ijr}^2)$

จากสมการ (2.15) ขนาดของแรงดันที่บัส  $j$  สามารถหาได้จาก

$$V_j = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (2.16)$$

จะเห็นว่าคำตอบสำหรับสมการ (2.16) มีได้สองคำตอบ แต่คำตอบที่มีเสถียรภาพจะต้องมีค่าอยู่  
ครึ่งบนของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (P-V Curve) นั่นคือ

$$V_j = \sqrt{\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (2.17)$$

ที่จุดวิกฤติ ซึ่งเป็นจุดที่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงได้สูงสุด จะเป็นไปตามเงื่อนไข ดังนี้

$$b^2 - 4ac = 0 \quad (2.18)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ จากสมการ (2.15) ลงในสมการ (2.18) จะได้สมการของเส้นขอบเขตบนระนาบ P-  
Q ดังนี้

$$E_1(P_{ijr}^c)^2 + E_2(Q_{ijr}^c)^2 + E_3P_{ijr}^c + E_4Q_{ijr}^c + E_5P_{ijr}^cQ_{ijr}^c + E_6 = 0 \quad (2.19)$$

โดยที่  $E_1 = (c_2^2 - 4c_1c_4)$ ,  $E_2 = (c_3^2 - 4c_1c_4)$ ,  $E_3 = -2c_2V_i^2$ ,  $E_4 = -2c_3V_i^2$ ,  $E_5 = 2c_2c_3$ ,  $E_6 = V_i^4$

ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P_{ijr}^c$  และ  $Q_{ijr}^c$  ในสมการ (2.19) คือ ขอบเขตฟังก์ชันของระบบ แสดงบน  
ระนาบ P-Q ซึ่งแบ่งแยกระหว่างความสามารถในการมีโหลดได้ ณ บัสนั้นๆ ที่เป็นไปได้และเป็นไป  
ไม่ได้ ในกรณีที่เรารู้ค่า  $P_{ijr}^c$  จะสามารถคำนวณหาค่า  $Q_{ijr}^c$  หรือในทางกลับกัน โดยใช้สมการ  
(2.20) และ (2.21) ตามลำดับ

$$c_5(Q_{ijr}^c)^2 + c_6Q_{ijr}^c + c_7 = 0 \quad (2.20)$$

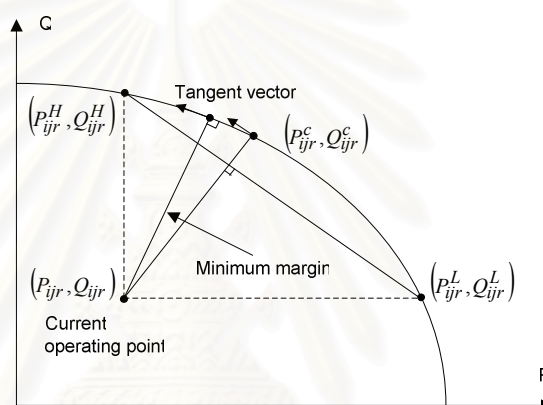
$$c_8(P_{ijr}^c)^2 + c_9P_{ijr}^c + c_{10} = 0 \quad (2.21)$$

โดยที่  $c_5 = E_2$ ,  $c_6 = E_4 + E_5P_{ijr}^c$ ,  $c_7 = E_1(P_{ijr}^c)^2 + E_3P_{ijr}^c + E_6$   
 $c_8 = E_1$ ,  $c_9 = E_3 + E_5Q_{ijr}^c$ ,  $c_{10} = E_2(Q_{ijr}^c)^2 + E_4Q_{ijr}^c + E_6$

### 2.4.2.2 การหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน [7]

วิธีคำนวณแบบทำนายและแก้ไข (Prediction-Correction) ได้ถูกนำมาใช้ในการหา ระยะทางสั้นที่สุด (Shortest Distance) จากจุดทำงานของระบบที่พิจารณา ณ ใดๆ ไปยังจุดวิกฤติบนเส้นขอบเขตที่แสดงในระนาบ P-Q ดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งจะใช้เป็นดัชนีที่สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการมีโหลดเพิ่มขึ้นได้ก่อนที่ระบบจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน

จุดวิกฤติที่สอดคล้องกับระยะทางสั้นที่สุดจะถูกทำนาย (Prediction) ในลำดับแรก จากนั้นทำการแก้ไข (Correction) ตำแหน่งของจุดวิกฤติ ในการวนซ้ำแต่ละรอบ จนกระทั่งเวกเตอร์เส้นสัมผัสกับเส้นขอบเขตบนระนาบ P-Q ณ จุดวิกฤตินั้น ตั้งฉากกับเวกเตอร์ที่ลากจากจุดทำงานระบบปัจจุบันไปยังจุดวิกฤติดังกล่าว จึงหยุดการคำนวณ แสดงภาพประกอบได้ดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วิธีการคำนวณแบบ Prediction-Correction เพื่อหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน

รายละเอียดในการคำนวณแต่ละขั้นตอน บรรยายโดยสรุปไว้ด้านล่างนี้

**ขั้นตอนที่ 1** คำนวณหาจุดทำงาน  $(P_{ijr}^H, Q_{ijr}^H)$  และ  $(P_{ijr}^L, Q_{ijr}^L)$  ซึ่งเป็นจุดวิกฤติบนเส้นขอบเขต ในทิศทางของแกน Q และแกน P ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยใช้สมการ (2.20) และ (2.21) ตามลำดับ

**ขั้นตอนที่ 2** คำนวณค่าความชันของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดทำงาน  $(P_{ijr}^H, Q_{ijr}^H)$  และ  $(P_{ijr}^L, Q_{ijr}^L)$

$$M_o = \frac{(Q_{ijr}^H - Q_{ijr}^L)}{(P_{ijr}^H - P_{ijr}^L)} \quad (2.22)$$

**ขั้นตอนที่ 3** คำนวณหาจุดทำงานทำนาย  $(P_{ijr}^c, Q_{ijr}^c)$  ซึ่งเป็นจุดวิกฤติบนเส้นขอบเขตในทิศทางตั้งฉากกับเส้นตรงที่เชื่อมต่อจุดสองจุดในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งมีค่าความชันเท่ากับ  $-1/M_o$  โดยใช้สมการด้านล่าง

$$Q_{ijr}^c = \left( \frac{\Delta Q_{ijr}}{\Delta P_{ijr}} \right) P_{ijr}^c + \left( Q_{ijr} - \frac{\Delta Q_{ijr}}{\Delta P_{ijr}} P_{ijr} \right) \quad (2.23)$$

$$Q_{ijr}^c = MP_{ijr}^c + C \quad (2.24)$$

โดยที่  $M = -\frac{1}{M_o} = \frac{\Delta Q_{ijr}}{\Delta P_{ijr}}$  และ  $C = Q_{ijr} - \frac{\Delta Q_{ijr}}{\Delta P_{ijr}} P_{ijr}$

แทนสมการ (2.24) ลงในสมการ (2.19) จะได้

$$F_1(P_{ijr}^c)^2 + F_2 P_{ijr}^c + F_3 = 0 \quad (2.25)$$

โดยที่  $F_1 = E_1 + E_2 M^2 + E_5 M$ ,  $F_2 = 2E_2 M C + E_3 + E_4 M + E_5 C$   $F_3 = E_2 C^2 + E_4 C + E_6$

**ขั้นตอนที่ 4** คำนวณหาค่าความชันของ P-Q curve ที่จุดทำงาน  $(P_{ijr}^c, Q_{ijr}^c)$  จากขั้นตอนที่ 3 โดยใช้สมการ (2.26) ข้างล่างนี้

$$F(P, Q) = E_1 P^2 + E_2 Q^2 + E_3 P + E_4 Q + E_5 PQ + E_6 = 0$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{\partial F / \partial P}{\partial F / \partial Q} = -\frac{2E_1 P_{ijr}^c + E_5 Q_{ijr}^c + E_3}{2E_2 Q_{ijr}^c + E_5 P_{ijr}^c + E_4} \quad (2.26)$$

**ขั้นตอนที่ 5** กำหนดเวกเตอร์เส้นสัมผัสตามความชันในสมการ (2.26) ดังนี้

$$\vec{T} = [x \quad y]^T = [2E_2 Q_{ijr}^c + E_5 P_{ijr}^c + E_4 \quad -(2E_1 P_{ijr}^c + E_5 Q_{ijr}^c + E_3)]^T$$

**ขั้นตอนที่ 6** คำนวณหาค่า Dot product ระหว่างเวกเตอร์  $\vec{T}$  และเวกเตอร์ที่ลากจากจุดทำงานของระบบ ณ ปัจจุบันไปยังจุดทำงาน  $(P_{ijr}^c, Q_{ijr}^c)$

**ขั้นตอนที่ 7** หากค่า Dot product เป็นลบให้แทน  $(P_{ijr}^L, Q_{ijr}^L)$  ด้วย  $(P_{ijr}^c, Q_{ijr}^c)$  แต่หากค่า Dot product เป็นบวกให้แทน  $(P_{ijr}^H, Q_{ijr}^H)$  ด้วย  $(P_{ijr}^c, Q_{ijr}^c)$

**ขั้นตอนที่ 8** ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง 7 จนกระทั่งค่า Dot product ที่ได้ในขั้นตอนที่ 7 เข้าใกล้ค่าศูนย์ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ยอมรับได้ว่าเป็นระยะทางสั้นที่สุดระหว่างจุดทำงานปัจจุบันกับขอบเขตเสถียรภาพเชิงแรงดันบนระนาบ P-Q

**ขั้นตอนที่ 9** คำนวณหาระยะสั้นที่สุดเพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการรองรับโหลดเพิ่มขึ้นได้ ตามสมการ (2.27)

$$LLM_{ij} = \left\| [P_{ijr}^c - P_{ijr} \quad Q_{ijr}^c - Q_{ijr}]^T \right\| \quad (2.27)$$

## 2.5 ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

วิทยานิพนธ์นี้ เลือกใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ (Impedance Stability Index; ISI) [5] มาพัฒนาเป็นขั้นตอนวิธีสำหรับกำหนดจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน เพื่อการแยกระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบส่งไฟฟ้าหลักชั่วคราว โดยมีเหตุผล แนวคิดและทฤษฎี รวมถึงการประยุกต์ใช้ แสดงรายละเอียดไว้ในส่วนนี้

### 2.5.1 เหตุผลในการเลือกใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

การพิจารณาเลือกใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันสำหรับวิทยานิพนธ์นี้อาศัยแนวเหตุผลหลัก (Rationale) 3 ประการ กล่าวคือ

- สามารถประยุกต์ใช้งานในลักษณะการตรวจวัดแบบเวลาจริง (On-line Monitoring) ได้อย่างต่อเนื่องสำหรับกรณีที่มีการรบกวนจากภายนอกอาจส่งผลต่อเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กโดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดที่เข้าถึงได้อย่างจำกัด กล่าวคือ ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณทางไฟฟ้าของระบบส่งภายนอก เช่น แรงดันกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ บริเวณบัสต่างๆ ในระบบส่งหลัก เป็นต้น นอกเหนือจากจุดเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กกับระบบส่งหลักได้
- ในกรณีที่การรบกวนจากภายนอกส่งผลให้ระบบไฟฟ้าภายในเข้าสู่จุดสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน จะใช้วิธีการแยกระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กเป็นอิสระจากระบบ

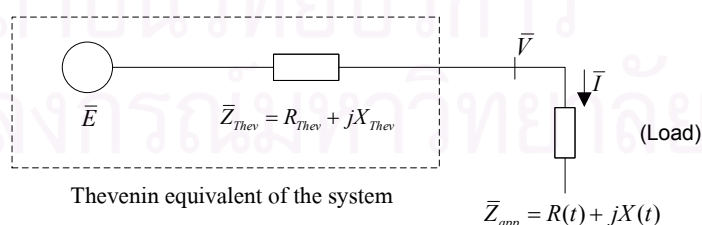
ส่งไฟฟ้าหลักชั่วคราว เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กไว้ได้

- การตัดสินใจแยกระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กเป็นอิสระจากระบบส่งไฟฟ้าหลัก จะกระทำในกรณีที่น่าจะเป็นอย่างยิ่ง อันเนื่องมาจากความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ มิใช่เพียงแต่ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวเท่านั้น

ทั้งนี้ ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันที่เลือกใช้ในที่นี้ ต้องการข้อมูลในการประมวลผลเพียงแค่ขนาดของ แรงดัน กระแส และมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแส ณ จุดตรวจวัด เท่านั้น ซึ่งเป็นข้อมูลชุดเดียวกับที่ใช้สำหรับรีเลย์ป้องกันประเภทรีเลย์ระยะทางที่ใช้งานอยู่โดยทั่วไป ต้องการความสามารถในการประมวลผลไม่สูงมากนัก จึงทำให้สามารถนำมาใช้กับการวิเคราะห์สถานการณ์แบบเวลาจริง (Real-time Analysis) และสามารถประยุกต์ใช้กับรีเลย์แบบเชิงเลข (Numerical Relay) ได้ โดยดัชนีชี้วัดดังกล่าวอาศัยหลักการพิจารณาความสามารถในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบไปยังโหลดได้ จนกระทั่งถึงจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ จุดที่โหลดของระบบเชื่อมต่ออยู่ นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวไม่จำเป็นต้องมีสมมุติฐานใดๆ เกี่ยวกับคุณลักษณะของโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ ดังนั้น จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับรีเลย์ป้องกัน ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กกับระบบส่งไฟฟ้าหลักได้ โดยพิจารณาให้ความต้องการไฟฟ้าของระบบส่งภายนอกเป็น โหลดของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กซึ่งรายละเอียดนำเสนอไว้ด้านล่าง ดังนี้

### 2.5.2 ทฤษฎีและหลักการของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

เมื่อพิจารณาที่บัสไฟฟ้าใด ๆ ในระบบไฟฟ้า ที่มีโหลดเชื่อมต่ออยู่ สามารถแทนระบบไฟฟ้าด้วยวงจรสมมูลเทวินิน และแทนโหลดด้วยค่าอิมพีแดนซ์สมมูล ( $\bar{Z}_{app}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โหลดบัสและวงจรสมมูลเทวินินของระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.7 สามารถคำนวณหาค่ากระแสที่ไหลจากระบบไฟฟ้าไปยังโหลดได้ ดังนี้

$$\frac{P + jQ}{\bar{V}} = \bar{I}^* = \left( \frac{\bar{E} - \bar{V}}{\bar{Z}_{Thev}} \right)^*$$

$$(P + jQ)\bar{Z}_{Thev}^* = \bar{V}(\bar{E} - \bar{V})^* \quad (2.28)$$

จากสมการ (2.28) ซึ่งเป็นสมการกำลังสอง สามารถหาผลตอบของขนาดแรงดันได้สองค่า โดยค่าขนาดแรงดันทั้งสองจะมีค่าคู่เข้าหากันเมื่อจุดทำงานระบบเข้าสู่ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Transfer) หรือพิจารณาได้เป็นจุด Saddle-node Bifurcation นั่นเอง หากโหลดกำลังไฟฟ้ามีค่ามากกว่าค่าที่จุดดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน โดยจากสมการ (2.28) จะพบว่า การส่งกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดได้สูงสุดก่อนที่บัสไฟฟ้านั้นจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน มีเงื่อนไขประมาณได้เป็นดังนี้ [6]

$$\begin{aligned} \bar{V} &= (\bar{E} - \bar{V})^* \\ \bar{Z}_{app}\bar{I} &= (\bar{Z}_{Thev}\bar{I})^* \\ |\bar{Z}_{app}| &= |\bar{Z}_{Thev}| \end{aligned} \quad (2.29)$$

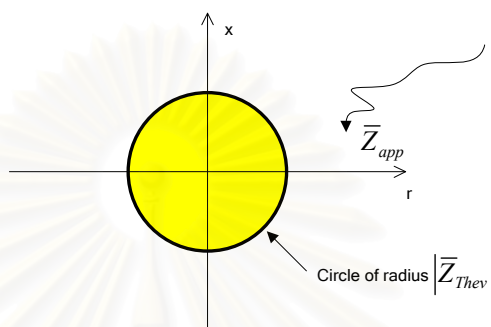
จากสมการ (2.29) เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่  $|\bar{Z}_{app}| = |\bar{Z}_{Thev}|$  โดยค่า  $\bar{Z}_{app}$  สามารถหาได้จากการตรวจวัดเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแสโหลด ณ บัสที่พิจารณา ดังสมการ (2.30)

$$|\bar{Z}_{app}| = \left| \frac{\bar{V}}{\bar{I}} \right| \quad (2.30)$$

รูปที่ 2.8 แสดงเส้นทางการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $\bar{Z}_{app}$  และ  $\bar{Z}_{Thev}$  บนระนาบ r-x ขณะที่โหลดและเงื่อนไขจุดทำงานของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป ในกรณีที่มีแนวโน้มที่จะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้น ณ บัสไฟฟ้าที่พิจารณา รัศมีของวงกลมซึ่งมีค่าเท่ากับขนาดของ  $\bar{Z}_{Thev}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น สะท้อนให้เห็นถึงความอ่อนแอของบัสไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการทำงานของระบบกระตุ้น (Excitation Systems) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสเข้าสู่ค่าขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Over-excitation Limit) หรือการที่สายส่งเส้นสำคัญบางเส้นรับภาระเกินขีดจำกัดการไหลของกำลังไฟฟ้าของสายส่งเส้นนั้นๆ และถูกปลดออกจากระบบโดยอุปกรณ์ป้องกันสายส่ง เป็นต้น



ขณะเดียวกัน เมื่อความต้องการไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้น  $\bar{Z}_{app}$  จะวิ่งเข้าใกล้ขอบเขตของวงกลมยิ่งขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากแรงดันที่โหลดบัสดังกล่าวมีค่าลดลง และกระแสโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น จุดวิกฤติของระบบเกิดขึ้นที่จุดตัดกันของเส้นขอบเขตวงกลมกับเส้นทางการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $\bar{Z}_{app}$  กล่าวคือ ที่  $|\bar{Z}_{app}| = |\bar{Z}_{Thev}|$  จากนั้นระบบจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันเมื่อ  $\bar{Z}_{app}$  ตัดผ่านเข้าไปในวงกลมเทวินิน ดังกล่าว



รูปที่ 2.8 เส้นทางการเปลี่ยนแปลงค่า  $\bar{Z}_{app}$  และ  $\bar{Z}_{Thev}$  บนระนาบ r-x [6]

ดังนั้น เราจึงสามารถใช้ระยะห่างที่คำนวณจากขนาดของ  $|\bar{Z}_{app}| - |\bar{Z}_{Thev}|$  ณ ขณะใดๆ เป็นดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ บัสไฟฟ้านั้นๆ ของระบบได้ โดยศึกษาหาค่าช่วงเผื่อ (Stability Margin) ของระยะห่างดังกล่าวที่เหมาะสมก่อนเข้าสู่ศูนย์ เพื่อใช้ในการตัดสินใจปลดโหลดบางส่วนออกจากระบบ เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าส่วนที่เหลือไว้ได้ โดยเทคนิคการประมาณค่า  $|\bar{Z}_{Thev}|$  จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

### 2.5.3 เทคนิคการประมาณค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า

การประมาณค่า  $|\bar{Z}_{Thev}|$  ของระบบไฟฟ้า ณ ขณะใดๆ สามารถทำได้จากการตรวจวัดค่าเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแสโหลด ณ บัสที่พิจารณา เช่นเดียวกับการหาค่า  $|\bar{Z}_{app}|$  โดยประยุกต์ใช้เทคนิคมาตรฐานในการระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น Recursive Least Square และการจัดรูปแบบของสมการระบบ ดังนี้

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.7 เขียนสมการ ได้ว่า

$$\bar{E} = \bar{V} + \bar{Z}_{Thev} \bar{I} \quad (2.31)$$

โดยที่  $\bar{E} = E_r + jE_i$ ,  $\bar{V} = u + jw$  และ  $\bar{I} = g + jh$

จัดรูปสมการ (2.31) ใหม่ในรูปของสมการเมตริกซ์ โดยแยกส่วนจริงและส่วนจินตภาพ ออกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -g & h \\ 0 & 1 & -h & -g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.32) พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่ต้องการจะประมาณค่า ได้แก่  $R_{Thev}$ ,  $X_{Thev}$ ,  $E_r$  และ  $E_i$  ซึ่งสามารถประมาณค่าได้ โดยอาศัยข้อมูลเฟสเซอร์ของแรงดันและกระแสโหนดที่จุดตรวจวัด เพียง 2 จุดทำงานในภาวะอยู่ตัวที่แตกต่างกัน และค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปได้ เมื่อปริมาณที่ตรวจวัดได้ ณ เวลาจริง มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

#### 2.5.4 การประยุกต์เพื่อใช้งานกับรีเลย์ป้องกัน

การนำไปประยุกต์ใช้กับรีเลย์ป้องกันอาศัยหลักการและทฤษฎีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.2 ข้างต้น นอกจากนี้ เพื่อให้การตรวจสอบและการแปลข้อมูลของค่าดัชนีดังกล่าวสะดวกและมีประสิทธิผล จึงเลือกประยุกต์ใช้โดยอ้างอิงจากนิยามของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ (Impedance Stability Index: ISI) [9] ดังแสดงในสมการ (2.33)

$$ISI = \frac{(|\bar{Z}_{app}| - |\bar{Z}_{Thev}|)}{|\bar{Z}_{app}|} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) ในภาวะปกติ ค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ควรมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งแสดงว่าระบบมีเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ปกติ และในขณะที่ระบบถูกรบกวน ทำให้ขนาดแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลง หากเหตุการณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพของแรงดันที่จุดโหนดนั้น ค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง และมีค่าเข้าสู่ศูนย์เมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน โดยขั้นตอนวิธีในการนำดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ไปประยุกต์ใช้ได้แสดงไว้ในบทที่ 4

### บทที่ 3

#### แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบทดสอบ

ในการพิจารณาปัญหาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังในเชิงพลวัตนั้นแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากหากแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบมีความสอดคล้องกับการทำงานจริงของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบแล้ว ผลจากการทดสอบที่ได้ก็จะสอดคล้องกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองเชิงพลวัตของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบที่ได้พัฒนาขึ้นผ่านโปรแกรม MATLAB/SIMULINK [8] อาทิ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์เหนี่ยวนำ และหม้อแปลงปรับระดับแรงดัน ได้อัตโนมัตินี้จะมีโพล เป็นต้น นอกจากนี้ในหัวข้อสุดท้ายยังได้มีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วย

#### 3.1 แบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Model) [1]

แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองซึ่งละเลยผลของขดลวดหน่วง (Damper winding) ช่วงชั้บทรานเซียนต์ ซึ่งการละเลยดังกล่าวไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตในสถานะชั่วคราว (Transient) ของระบบ สมการสำหรับแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงได้ ดังนี้

- สมการฟลักซ์เชื่อมโยง (Flux Linkage Equations)

$$\begin{aligned}\psi_d &= -L_d i_d + L_{ad} i_{fd} \\ \psi_{fd} &= -L_{ad} i_d + L_{ffd} i_{fd} \\ \psi_q &= -L_q i_q + L_{aq} i_{kq} \\ \psi_{kq} &= -L_{aq} i_q + L_{kkq} i_{kq}\end{aligned}\tag{3.1}$$

โดยที่

$\psi_d, \psi_q$	คือ	ฟลักซ์เชื่อมโยงของขดลวดสเตเตอร์ในแกน d และแกน q
$\psi_{fd}, \psi_{kq}$	คือ	ฟลักซ์เชื่อมโยงของขดลวดสนามในแกน d และขดลวดหน่วงในแกน q
$L_d, L_q$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำในแกน d และแกน q ของขดลวดสเตเตอร์
$L_{ad}, L_{aq}$	คือ	ตัวเหนี่ยวนำร่วม (Mutual-inductance) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ในแกน d และแกน q
$i_d, i_q$	คือ	กระแสที่ไหลในขดลวดสเตเตอร์แกน d และแกน q

- $i_{fd}, i_{kq}$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสนามแกน d และขดลวดหน่วงแกน q  
 $L_{ffd}, L_{kkq}$  คือ ตัวเหนี่ยวนำของขดลวดสนามในแกน d และตัวเหนี่ยวนำของขดลวดหน่วงในแกน q

- สมการแรงดันของขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned} e_d &= -R_s i_d + X'_d i_q + E'_d \\ e_q &= -R_s i_q - X'_q i_d + E'_q \\ e_{fd} &= R_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \\ 0 &= R_{kq} i_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt} \end{aligned} \quad (3.2)$$

ค่า  $E'_d, E'_q$  ในสมการ (3.2) สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} E'_d &= -\frac{L'_{MQ}}{L_{kq}} \psi_{kq} \\ E'_q &= \frac{L'_{MD}}{L_{fd}} \psi_{fd} \\ L'_{MQ} &= L_{aq} // L_{kq} = L'_q - L_l \\ L'_{MD} &= L_{ad} // L_{fd} = L'_d - L_l \end{aligned}$$

โดยที่

- $R_s, L_l$  คือ ตัวต้านทานอาร์เมเจอร์บนสเตเตอร์ และตัวเหนี่ยวนำรั่วบนสเตเตอร์  
 $X'_d, X'_q$  คือ รีแอกแตนซ์ชั่วคราว (Transient Reactance) ในแกน d และแกน q  
 $L'_d, L'_q$  คือ ตัวเหนี่ยวนำชั่วคราวในแกน d และแกน q

- สมการสถานะในส่วนของขดลวดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \frac{dE'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_{do}} \left( -E'_q - (X_d - X'_d) i_d + E_{fd} \right) \\ \frac{dE'_d}{dt} &= \frac{1}{T'_{qo}} \left( -E'_d + (X_q - X'_q) i_q \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

ค่า  $E_{fd}$  ในสมการ (3.3) สามารถหาได้จาก

$$E_{fd} = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} e_{fd}$$

โดยที่

$T'_{do}, T'_{qo}$  คือ ค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจรที่ภาวะชั่วครู่ (Transient Open-circuit Time Constant) ในแกน d และแกน q

$e_{fd}$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าสนาม

$R_{fd}$  คือ ความต้านทานบนขดลวดสนามในแกน d

- สมการแรงบิด

$$T_{em} = E'_q i_q + E'_d i_d + (X'_q - X'_d) i_d i_q \quad (3.4)$$

- สมการสถานะแสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega}_r &= \frac{1}{2H} (T_{mech} - T_{em} - D \Delta \omega_r) \\ \delta &= \omega_b \Delta \omega_r \end{aligned} \quad (3.5)$$

โดยที่

$T_{mech}$  คือ แรงบิดทางกล

$T_{em}$  คือ โหลดแรงบิดทางไฟฟ้า

$D$  คือ ค่าคงที่การหน่วงการแกว่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$\Delta \omega_r$  คือ การเปลี่ยนแปลงของความเร็วโรเตอร์

$\omega_b$  คือ ค่าฐานของความเร็วโรเตอร์

$\delta$  คือ มุมของโรเตอร์

$H$  คือ ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

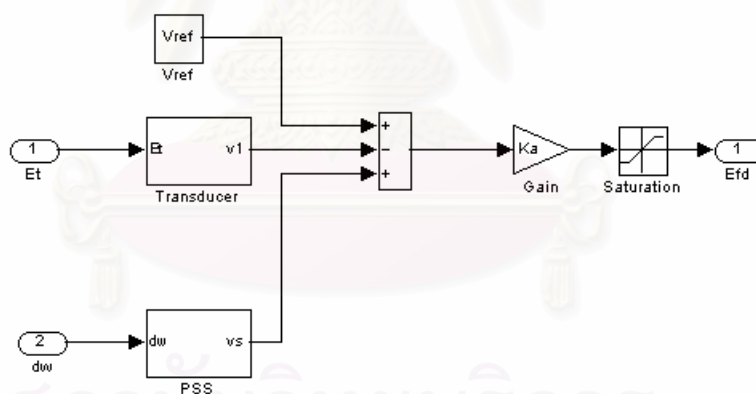
- สมการระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Excitation System Equations)

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= \frac{1}{T_R}(E_t - v_1) \\ E_{fd} &= K_A(V_{ref} - v_1 + v_s) \\ E_{F \max} &\geq E_{fd} \geq E_{F \min} \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่

$T_R$	คือ	ค่าคงตัวของทรานส์ดิวเซอร์
$E_t$	คือ	ขนาดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
$K_A$	คือ	อัตราขยายของระบบกระตุ้น
$V_{ref}$	คือ	ขนาดแรงดันอ้างอิง
$v_s$	คือ	ขนาดแรงดันขาออกของตัวเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) ให้กับระบบ

แผนภาพ (Block Diagram) ของระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงไว้ในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพของระบบกระตุ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

- สมการระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Governor System Equations )

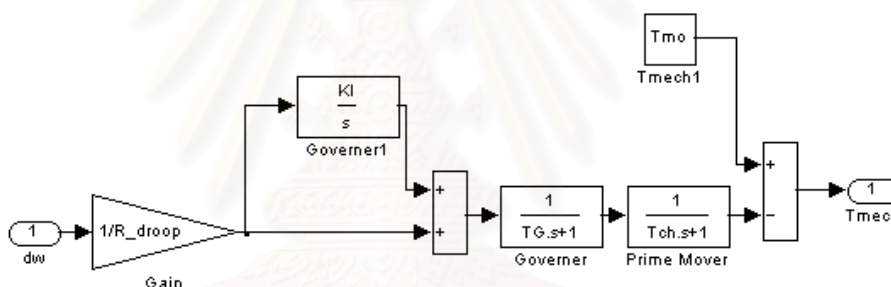
$$\Delta T_m = -\frac{\Delta \omega_r}{R} \left( \frac{1}{1+sT_G} \right) \left( \frac{1}{1+sT_{ch}} \right) \tag{3.7}$$

$$T_{mech} = T_{mo} + \Delta T_m$$

โดยที่

- $R$  คือ ค่าคงที่คูลงลักษณะรูป (Droop) ของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- $T_G$  คือ ค่าคงตัวเวลาของระบบควบคุมความเร็ว
- $T_{ch}$  คือ ค่าคงตัวเวลาของชุดขับเคลื่อน (Prime Mover)

แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแสดงไว้ในรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพของระบบควบคุมความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยที่ KI คือ อัตราขยายเชิงอินทิกรัล ซึ่งในที่นี้ให้มีค่าเป็น 0

### 3.2 แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้า (Network Model)

แบบจำลองของระบบส่งไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้แบบจำลองที่ละเลยผลของสถานะชั่วขณะในสายส่ง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวอยู่ในรูปของเมตริกซ์แบบผสม (Hybrid Matrix) ซึ่งเขียนได้ตามสมการ (3.8)

$$\begin{bmatrix} i_{d1} + ji_{q1} \\ E'_{d2} + jE'_{q2} \\ \vdots \\ i_{dn} + ji_{qn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & \ddots & & H_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{d1} + jE'_{q1} \\ i_{d2} + ji_{q2} \\ \vdots \\ E'_{dn} + jE'_{qn} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

แบบจำลองระบบส่งไฟฟ้าด้วยนี้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น กล่าวคือ สัญญาณขาเข้าเป็นกระแส หรือแรงดันก็ได้ ส่วนทางด้านสัญญาณขาออกนั้นจะให้ออกมาในรูปแบบกระแส หรือแรงดันเช่นเดียวกัน ในลักษณะดังกล่าวจะทำให้ง่ายต่อการจำลองการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในระบบเข้ากับแบบจำลองระบบส่งไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ กัน

### 3.3 แบบจำลองของโหลด (Load Model)

เนื่องจากปัญหาเสถียรภาพแรงดันมีความสัมพันธ์กับลักษณะโหลดของระบบ ซึ่งโดยทั่วไปจะเรียกกันว่า “เสถียรภาพโหลด” [1], [5] ดังนั้น แบบจำลองของโหลดจึงเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องทำการพิจารณาเพื่อให้การวิเคราะห์เสถียรภาพแรงดันโดยวิธีจำลองแบบมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาโหลดที่มีผลต่อเสถียรภาพแรงดัน 2 ชนิด คือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ และ โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

#### 3.3.1 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor Model)

การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำส่งผลสำคัญต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นโหลดที่มีการฟื้นตัวเร็ว (Fast Restoring) ต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟในปริมาณมาก และมีแนวโน้มที่จะหยุดทำงานหากขนาดแรงดันมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดหนึ่ง [9]

แบบจำลองเชิงพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในที่นี้ แสดงในระบบแกนอ้างอิง dq อธิบายพฤติกรรมเชิงพลวัตด้วยสมการสถานะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ และการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กค้ำของขดลวดโรเตอร์ ทั้งในแกน d และแกน q โดยละเอียดของภาวะชั่วคราวฝั่งขดลวดสเตเตอร์ ชุดสมการพื้นฐานสำหรับแบบจำลองเชิงพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงได้ ดังนี้ ส่วนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 [10]

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\omega_o s E'_d - \frac{1}{T'_o} E'_q + \frac{X - X'}{T'_o} i_d \quad (3.9)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \omega_o s E'_q - \frac{1}{T'_o} E'_d - \frac{X - X'}{T'_o} i_q \quad (3.10)$$

$$i_d = \frac{1}{R_s + X'^2} [R_s (v_d - E'_d) - X' (v_q - E'_q)] \quad (3.11)$$



$$i_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [-X'(v_d - E'_d) + R_s(v_q - E'_q)] \quad (3.12)$$

$$T_e = E'_d i_d + E'_q i_q \quad (3.13)$$

$$T_m = T_{mo} (A\omega_m^2 + B\omega_m + C) \quad (3.14)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \quad (3.15)$$

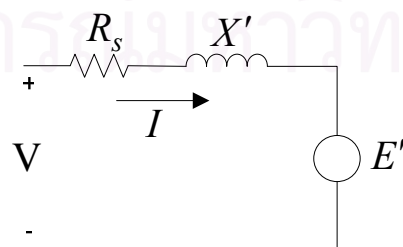
$$T'_o = \frac{X_r + X_m}{\omega_o R_r} \quad (3.16)$$

$$X = X_s + X_m \quad (3.17)$$

$$X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r} \quad (3.18)$$

โดยที่

$E'_d, E'_q$	คือ	ตัวแปรสถานะแรงดันของขดลวดโรเตอร์ในแกน d และ แกน q ตามลำดับ
$v_d, v_q$	คือ	แรงดันที่ขั้วของขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในแกน d และ แกน q ตามลำดับ
$i_d, i_q$	คือ	กระแสที่ไหลเข้าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ ในแกน d และ แกน q ตามลำดับ
$s, R_s$	คือ	ค่าสลิป และความต้านทานขดลวดสเตเตอร์ ตามลำดับ
$\omega_o$	คือ	ความเร็วเชิงโคโรนัส
$T'_o$	คือ	ค่าคงตัวเวลาขณะเปิดวงจรที่ภาวะชั่วคราว (Transient Open-circuit Time Constant)
$X, X'$	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ขณะเปิดวงจร (Rotor Open-circuit Reactance) และรีแอกแตนซ์ของขดลวดโรเตอร์ขณะลัดวงจร (Blocked Rotor Short-circuit Reactance) ตามลำดับ
$T_e$	คือ	แรงบิดทางไฟฟ้า
$T_m$	คือ	โหลดแรงบิดทางกล
$A, B, C$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการแรงบิดโหลด [11]

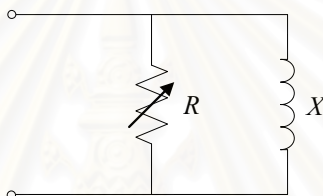


รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำในสภาวะชั่วคราว

### 3.3.2 แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Constant Power Model)

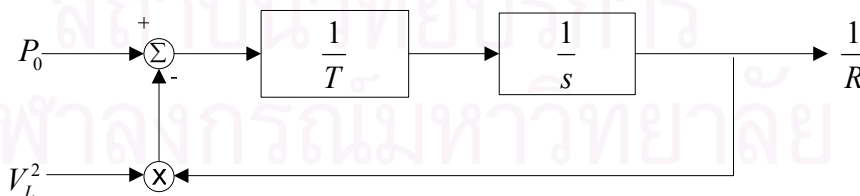
แบบจำลองโหลดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้อีกส่วนหนึ่ง คือ โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ ซึ่งโหลดดังกล่าวมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย อาทิ เครื่องทำความร้อน (Space Heating) เครื่องทำน้ำร้อน (Water Heating) กระบวนการทำความร้อนในโรงงาน (Industrial Process Heating) และเครื่องปรับอากาศ (Air Condition) เป็นต้น ซึ่งวงจรมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และสมการสถานะแสดงไว้ในสมการ (3.19)

$$T \frac{d\left(\frac{1}{R}\right)}{dt} = P_o - \frac{V_L^2}{R} \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.4 วงจรมูลของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่

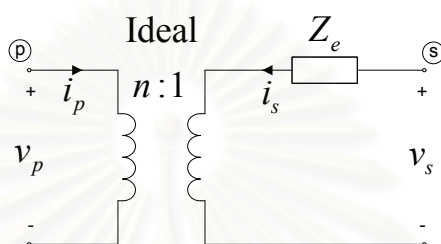
แบบจำลองโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว (Single Time Constant Model) [1], [10] โดยแบบจำลองดังกล่าวจะทำการปรับค่าเฉพาะโหลดความต้านทานเพื่อให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้ามีค่าคงที่ สามารถแสดงแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพของแบบจำลองชนิดค่าคงตัวเวลาค่าเดียว

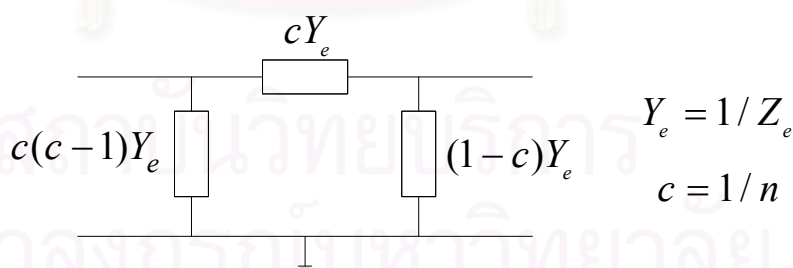
### 3.4 แบบจำลองหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินิยมมีโหลด (ULTC Model)

หม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินิยมมีโหลด (ULTC) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันที่บัสที่มีการควบคุม ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ดังนั้น จึงมีผลต่อเสถียรภาพแรงดันของระบบ [12] วงจรสมมูลของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินิยมมีโหลด สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 3.6 [1] โดยที่  $p$  และ  $s$  อ้างอิงถึงปริมาณด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ ตามลำดับ

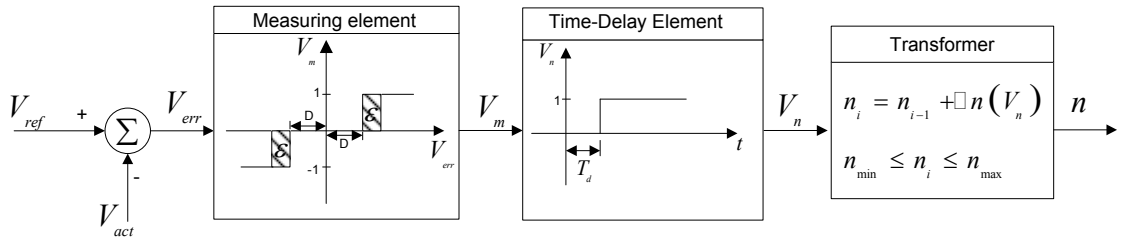


รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินิยมมีโหลด

ในการศึกษานี้ จะแทนแบบจำลองของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินิยมมีโหลด ในรูปของวงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ดังรูปที่ 3.7 นอกจากนี้ ระบบควบคุมการทำงานเชิงพลวัตของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินิยมมีโหลด แสดงในรูป 3.8 ซึ่งดัดแปลงมาจาก [1] โดยละเลยเวลาหน่วง (Delay Time) อันเนื่องมาจากกลไกการทำงานของมอเตอร์ในการเปลี่ยนแท็บ (Motor-Driven Unit and Tap-Changer Mechanism)



รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลแบบ  $\pi$  ของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัตินิยมมีโหลด



รูปที่ 3.8 แบบจำลองระบบควบคุมเชิงพลวัตของหม้อแปลง ULTC

การทำงานของระบบควบคุมมีสัญญาณป้อนเข้า คือ ความแตกต่างระหว่างขนาดแรงดันจริงกับขนาดแรงดันอ้างอิง  $V_{err} = V_{ref} - V_{act}$  และให้สัญญาณขาออกจากหน่วยการวัด (Measuring Element) เป็นสัญญาณ  $V_m$  ซึ่งจะมีค่าเป็น 0, 1 หรือ -1 โดยขึ้นอยู่กับสัญญาณขาเข้า ( $V_{err}$ ), แถบศูนย์ (Dead Band;  $D$ ) และแถบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Band;  $\varepsilon$ ) โดยเป็นไปตามเงื่อนไข ดังนี้

$$V_m = \begin{cases} 0 & \text{for } -D \leq V_{err} \leq +D \\ 0 & \text{for } D < V_{err} \leq D + \varepsilon; V_{err} \text{ increasing} \\ 0 & \text{for } -D - \varepsilon \leq V_{err} < -D; V_{err} \text{ decreasing} \\ 1 & \text{for } V_{err} > D + \varepsilon \\ 1 & \text{for } D < V_{err} \leq D + \varepsilon; V_{err} \text{ decreasing} \\ -1 & \text{for } V_{err} < -D - \varepsilon \\ -1 & \text{for } -D - \varepsilon \leq V_{err} \leq -D; V_{err} \text{ increasing} \end{cases} \quad (3.20)$$

ส่วนของการหน่วงเวลา (Time-delay Element) รับสัญญาณป้อนเข้า  $V_m$  และให้สัญญาณขาออกเป็น  $V_n$  ซึ่งมีค่าเป็น 0, 1 หรือ -1 เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการ (3.21)

$$V_n = \begin{cases} 0 & \text{for } t \leq T_d, V_m \text{ arbitrary} \\ 1 & \text{for } t > T_d, V_m = 1 \\ -1 & \text{for } t > T_d, V_m = -1 \end{cases} \quad (3.21)$$

นำสัญญาณ  $V_n$  ไปใช้คำนวณค่าแท็บปัจจุบัน,  $n_i$  ของหม้อแปลง ตามสมการ (3.22) ดังนี้

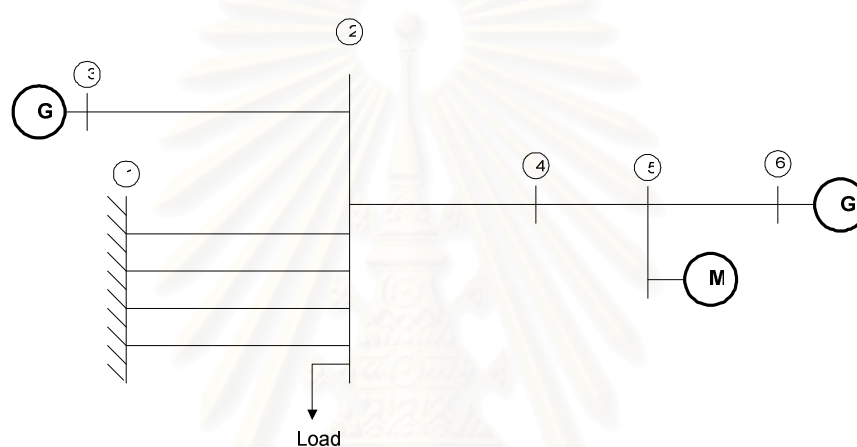
$$\begin{aligned} n_i &= n_{i-1} + \Delta n(V_n) \\ n_{\min} &\leq n_i \leq n_{\max} \end{aligned} \quad (3.22)$$

โดยที่

- $\Delta n$  คือ ขนาดการเปลี่ยนแปลงแท็บในแต่ละชั้นของหม้อแปลง
- $n_{\min}$  คือ แท็บล่างสุดของหม้อแปลง
- $n_{\max}$  คือ แท็บบนสุดของหม้อแปลง

### 3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ทำการจำลองขึ้นในส่วนนี้ได้ทำการจำลองเหตุการณ์ในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นและปลดสายส่งออกเพื่อดูลักษณะผลตอบแทนของแรงดันที่บัสต่างๆ รวมทั้งผลตอบแทนของมอเตอร์ โดยใช้แบบจำลองระบบ ดังรูปที่ 3.9



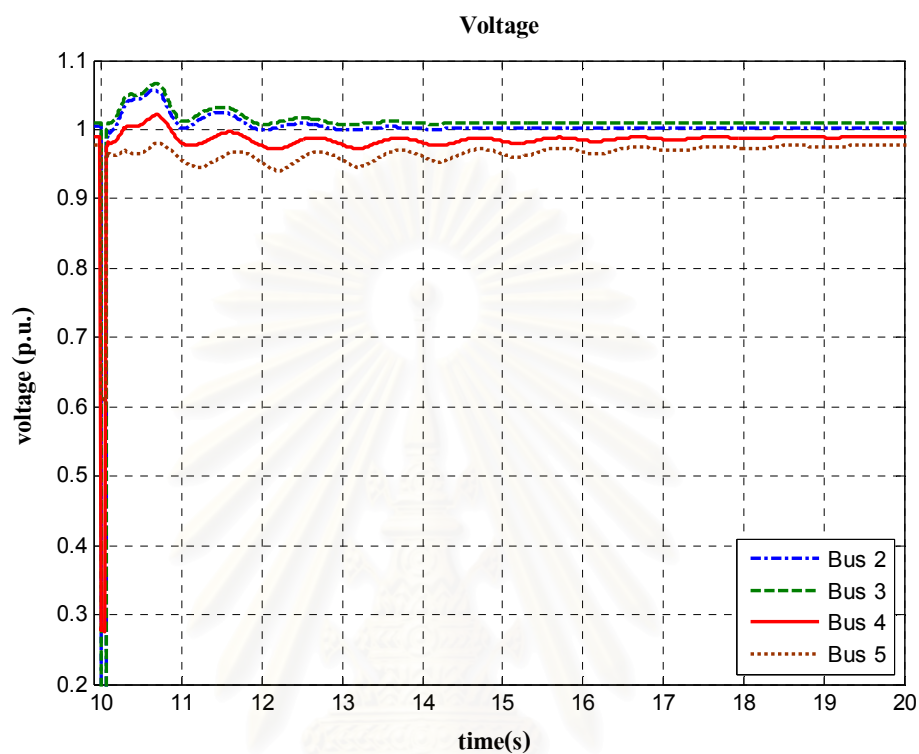
รูปที่ 3.9 ระบบที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการทดสอบความถูกต้องจะทำการลัดวงจรบนสายส่งระหว่างบัส 1 และบัส 2 ที่วินาทีที่ 10 ตั้งแต่ 1 เส้น ถึง 3 เส้น ทำการปลดสายส่งที่มีปัญหาออกภายใน 60 ms แล้วทำการพิจารณาผลตอบแทน ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5.1 กรณีที่ 1 เกิดการลัดวงจร และปลดสายส่งออก 1 เส้น

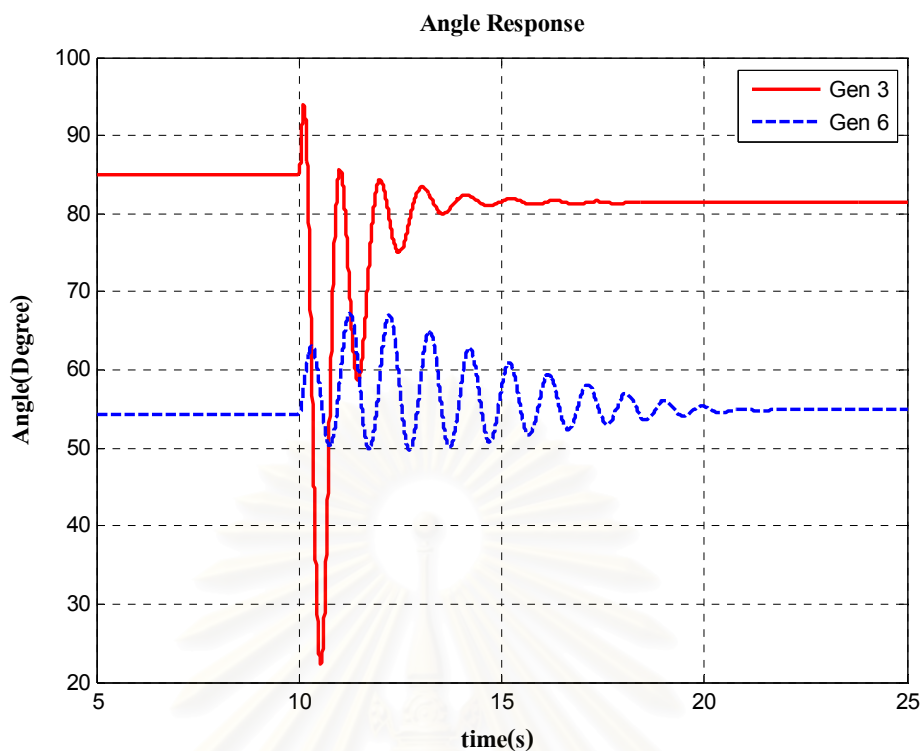
ลักษณะผลตอบของแรงดัน และมุมโรเตอร์ของในกรณีนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 ผลตอบสนองของแรงดันที่บัสต่างๆ ในกรณีที่ 1

จากรูปที่ 3.10 พบว่า เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นแรงดันของบัสต่างๆ จะตกลงมาชั่วขณะ จากนั้นเมื่อทำการปลดสายส่งเส้นที่มีปัญหาออก ผลตอบสนองของแรงดันทุกๆ บัสจะแกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



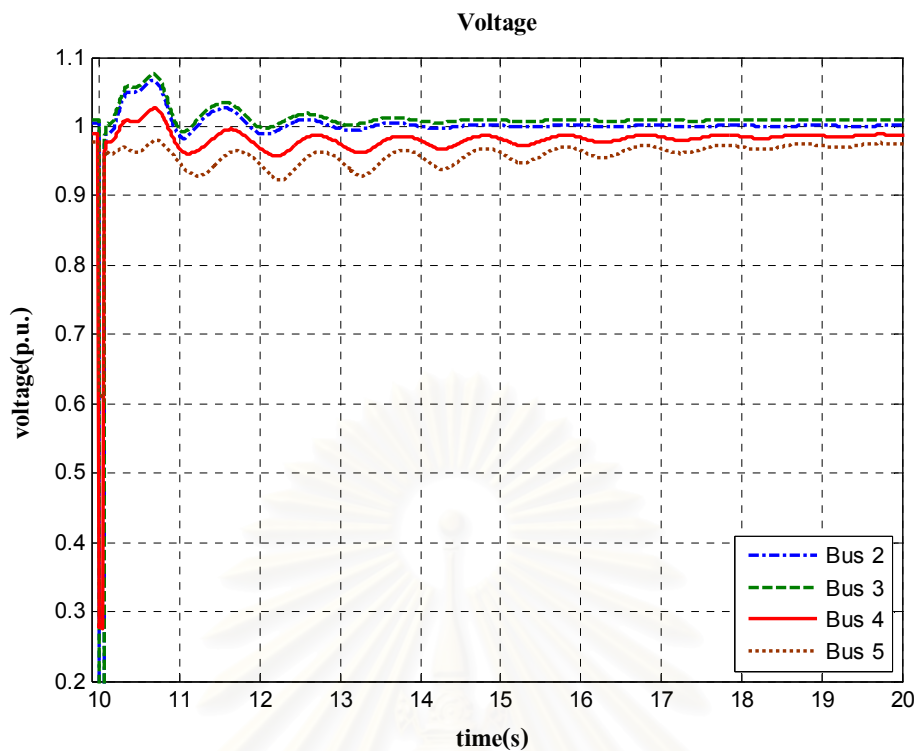
รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ 1

จากรูปที่ 3.11 พบว่า เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่องจะแกว่ง จากนั้นเมื่อทำการปลดสายส่งเส้นที่มีปัญหาออก ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่องจะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุด

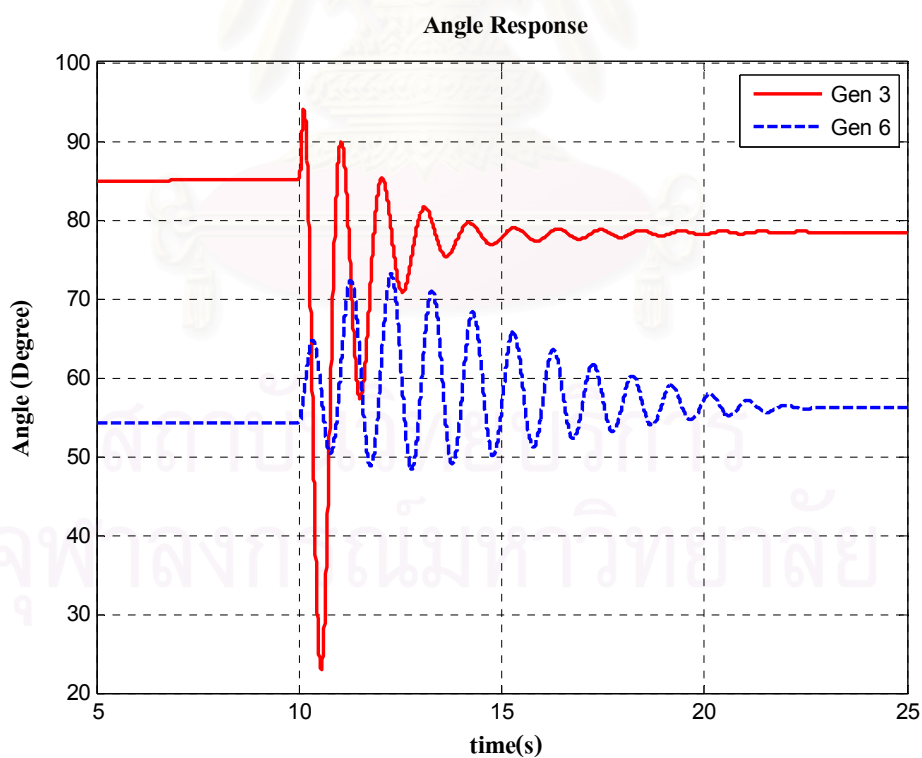
ซึ่งลักษณะผลตอบในรูปที่ 3.10 และ 3.11 จะมีลักษณะผลตอบคล้ายกับลักษณะผลตอบที่แสดงในหนังสือที่เกี่ยวข้องกับปัญหาเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังต่างๆ ไป

### 3.5.2 กรณีที่ 2 เกิดการลัดวงจร และปลดสายส่งออก 2 เส้น

ลักษณะผลตอบของแรงดัน และมุมโรเตอร์ของในกรณีนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองของแรงดันที่บัสต่างๆ ในกรณีที่ 2



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ 2

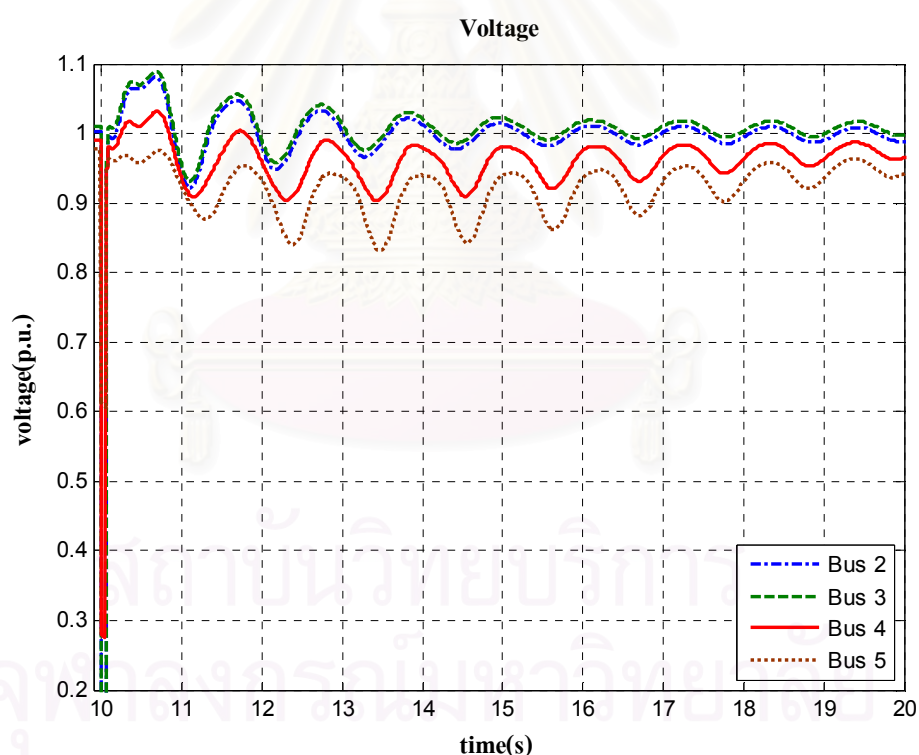


จากรูปที่ 3.12 พบว่า เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นแรงดันของบัสต่างๆ จะตกลงมาชั่วขณะเช่นกัน จากนั้นเมื่อทำการปลดสายส่งเส้นที่มีปัญหาออก ผลตอบสนองของแรงดันทุกๆ บัสจะแกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุด แต่จะพบว่าช่วงเวลาที่แกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวจะยาวนานกว่าในกรณีแรก

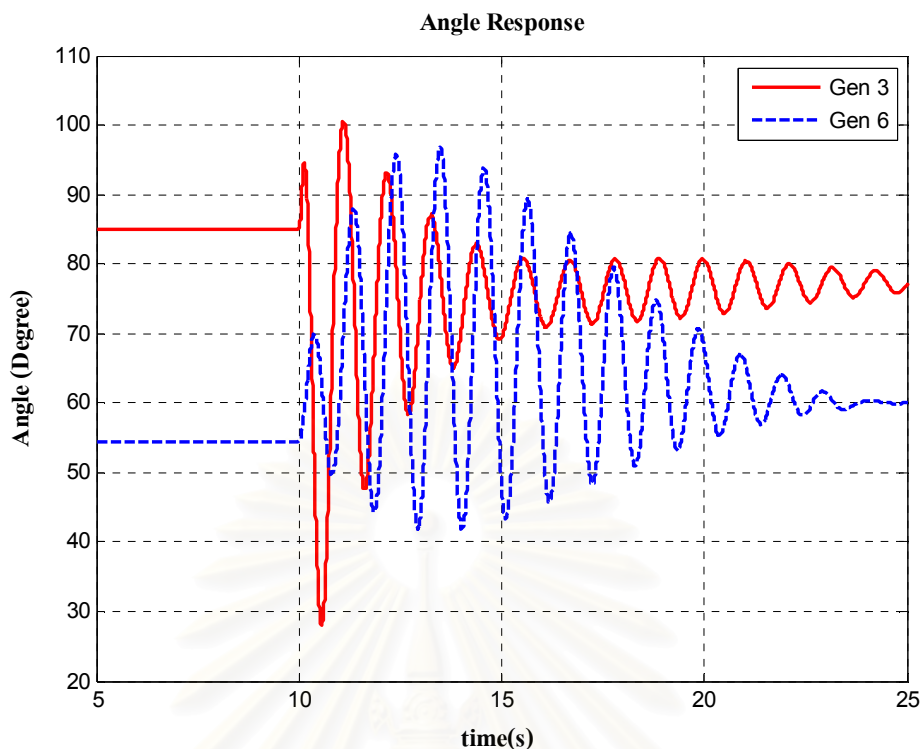
จากรูปที่ 3.13 พบว่า เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นผลตอบของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่องจะแกว่งเช่นกัน จากนั้นเมื่อทำการปลดสายส่งเส้นที่มีปัญหาออก ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่องจะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุด แต่จะพบว่าช่วงเวลาที่แกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวจะยาวนานกว่าในกรณีแรก

### 3.5.3 กรณีที่ 3 เกิดการลัดวงจร และปลดสายส่งออก 3 เส้น

ลักษณะผลตอบของแรงดัน และมุมโรเตอร์ของในกรณีนี้ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14 และ 3.15 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองของแรงดันที่บัสต่างๆ ในกรณีที่ 3



รูปที่ 3.15 ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ ในกรณีที่ 3

จากรูปที่ 3.14 พบว่า เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นแรงดันของบัสต่างๆ จะตกลงมาชั่วขณะเช่นกัน จากนั้นเมื่อทำการปลดสายส่งเส้นที่มีปัญหาออก ผลตอบสนองของแรงดันต่างๆ บัสจะแกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุด แต่จะพบว่าช่วงเวลาที่แกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวจะยาวนานกว่าใน 2 กรณีก่อนหน้า

จากรูปที่ 3.15 พบว่า เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นผลตอบของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่องจะแกว่งเช่นกัน โดยขนาดของการแกว่งมีค่าสูงกว่าใน 2 กรณีแรก จากนั้นเมื่อทำการปลดสายส่งเส้นที่มีปัญหาออก ผลตอบสนองของมุมโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 2 เครื่องจะเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวในที่สุด แต่จะพบว่าช่วงเวลาที่แกว่งก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวจะยาวนานกว่าใน 2 กรณีก่อนหน้า

จากผลตอบที่ผ่านมาพบว่า ทั้งลักษณะผลตอบของขนาดแรงดันและผลตอบของมุมโรเตอร์ มีลักษณะคล้ายกับผลตอบสนองต่างๆ ไปในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่จำลองขึ้นมีความถูกต้องในระดับหนึ่ง

## บทที่ 4

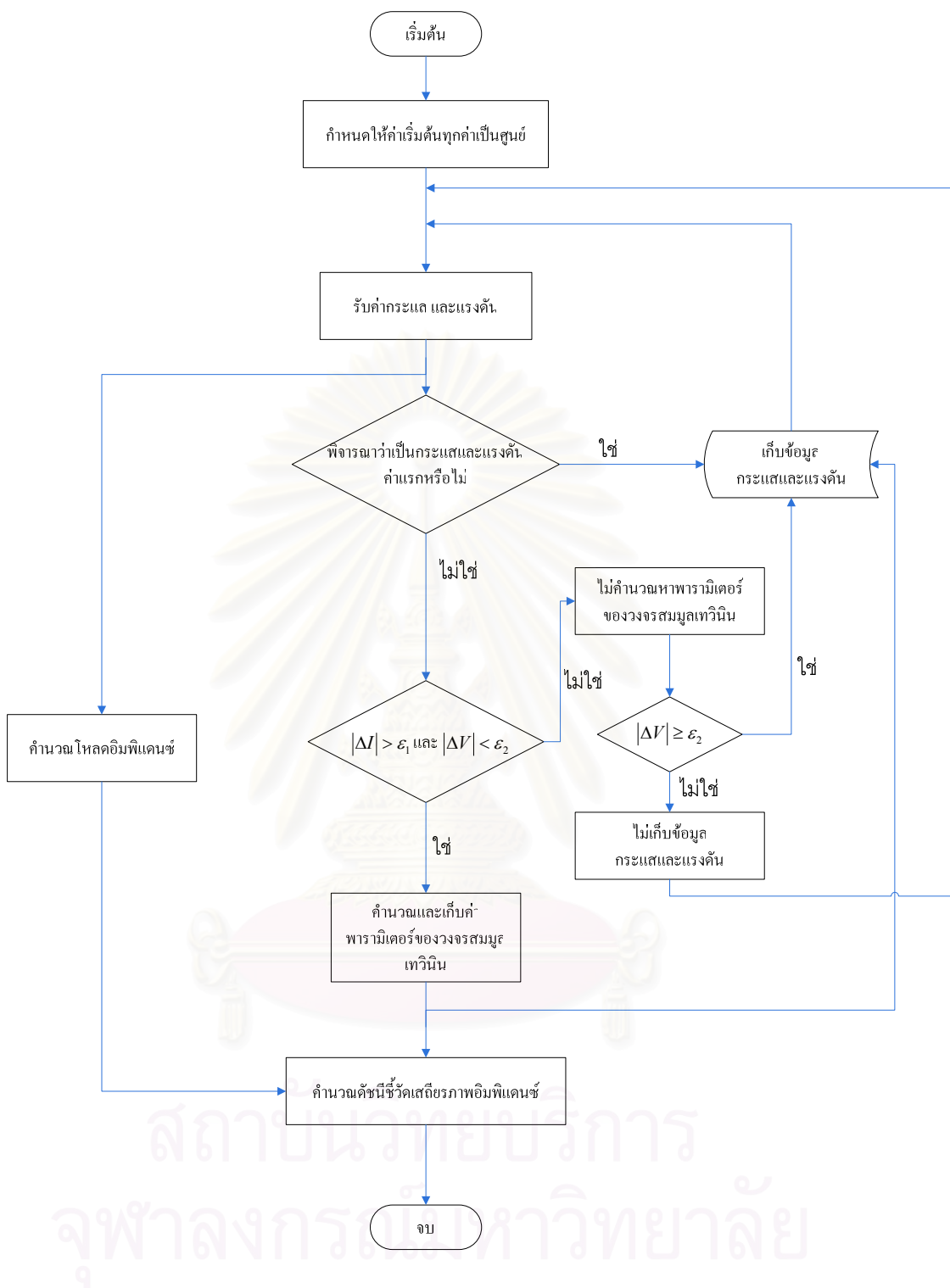
### ขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากดัชนีชี้วัดดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถนำไปใช้ในการตรวจวัดแบบเวลาจริงได้ ข้อมูลขาเข้าน้อย เวลาในการคำนวณเร็ว เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.5 ในบทที่ 2 สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

ในการพัฒนาโปรแกรมการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์นั้นได้คำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ เพื่อให้โปรแกรมมีสมรรถนะการทำงานที่ดี กล่าวคือ

- สามารถระบุจุดวิกฤติเสถียรภาพได้อย่างถูกต้องเมื่อเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้นในระบบ
- ไม่เกิดเหตุการณ์ที่ขั้นตอนวิธีระบุจุดวิกฤติผิดพลาด ในกรณีที่เกิดการรบกวนขึ้นในระบบแต่ไม่นำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน เช่น เกิดความผิดพลาดในระบบ (Fault) เป็นต้น
- ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน ณ จุดตรวจวัด เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสเข้าสู่ขีดจำกัดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบกรณีที่แรงดันตก หรือกรณีที่สายส่งบางเส้นถูกเปิดวงจรออกจากระบบ

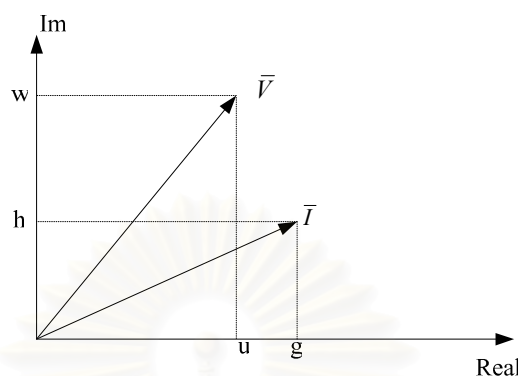
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีในวิทยานิพนธ์นี้เป็นไปตามที่แสดงไว้ในแผนภูมิขั้นตอน (Flowchart) ในรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักๆ ได้ 3 ส่วน คือ ขั้นตอนในการคำนวณโพลดิอิมพีแดนซ์ ขั้นตอนในการคำนวณอิมพีแดนซ์เทวินิน และการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 4.1 แผนภูมิขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

#### 4.1 ขั้นตอนในการคำนวณโพลดิสมิพีแดนซ์

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าโพลดิสมิพีแดนซ์นั้น เริ่มจากรับค่าเฟสเซอร์กระแสและแรงดัน จากจุดโพล ดึงแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เฟสเซอร์กระแสและแรงดัน

โดยเฟสเซอร์ดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงไปทุกๆ ช่วงเวลาที่ทำการสุ่ม (Time-Step) หลังจากนั้นก็ทำการคำนวณเพื่อหาค่าโพลดิสมิพีแดนซ์ ( $\bar{Z}_{app}$ ) โดยใช้สมการ (4.1)

$$\bar{Z}_{app} = \frac{u + jw}{g + jh} \quad (4.1)$$

จากขั้นตอนนี้ดังกล่าว ค่าโพลดิสมิพีแดนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ ช่วงเวลาที่ทำการสุ่ม ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของโพลได้อย่างทันท่วงทีหากใช้ช่วงเวลาที่ทำการสุ่มอย่างเหมาะสม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กรณีทั่วไปจะใช้ค่า 20 ms เป็นช่วงเวลาที่ทำการสุ่ม

หลังจากนั้นเมื่อคำนวณหาค่าโพลดิสมิพีแดนซ์ได้แล้ว ค่าดังกล่าวจะถูกส่งไปคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ต่อไป

#### 4.2 ขั้นตอนในการคำนวณเทวินินอิมพีแดนซ์

วิธีการในการคำนวณค่าเทวินินอิมพีแดนซ์มีหลายวิธี เช่น การใช้ Recursive Least Square หาระบุค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.5 เป็นต้น สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้อาศัยข้อมูลเฟสเซอร์ของกระแสและแรงดันที่จุดโพลเพียง 2 จุดทำงานที่แตกต่างกัน เพื่อใช้ในการระบุค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นของระบบ

ขั้นตอนวิธีการในการคำนวณหาค่าเทวินินอิมพีแดนซ์นั้นมีการเก็บข้อมูล 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเก็บเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินิน อีกส่วนหนึ่งเก็บเพื่อเป็นการ

กรองข้อมูลพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินที่คำนวณได้เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องและเหมาะสม โดยค่าที่จะทำการเก็บประกอบไปด้วยเฟสเซอร์กระแสและแรงดันในช่วงเวลาก่อนหน้า และค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินที่ระบุได้ โดยทำการตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่ 0 ทั้งหมด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3

$$\begin{array}{c} \overline{V} \quad \overline{I} \\ \underbrace{u \quad w \quad g \quad h} \\ \boxed{C} \quad \boxed{C} \quad \boxed{C} \quad \boxed{C} \end{array} \quad \begin{array}{c} \overline{E} \quad \overline{Z}_{Thev} \\ \underbrace{E_r \quad E_l \quad R_{Thev} \quad X_{Thev}} \\ \boxed{C} \quad \boxed{C} \quad \boxed{C} \quad \boxed{C} \end{array}$$

รูปที่ 4.3 การตั้งค่าเริ่มต้นเพื่อใช้ในขั้นตอนการคำนวณเทวินินอิมพีแดนซ์

จากนั้นรับค่าเฟสเซอร์กระแสและแรงดันจากจุดโหนดในลักษณะเดียวกับหัวข้อ 4.1 แล้วทำการพิจารณาว่าค่าเฟสเซอร์ดังกล่าวเป็นชุดแรกที่ได้รับหรือไม่ โดยพิจารณาจากผลรวมของ  $u$ ,  $w$ ,  $g$  และ  $h$  หากค่าดังกล่าวเป็น 0 แสดงว่าเป็นเฟสเซอร์ชุดแรก โปรแกรมจะทำการเก็บค่าดังกล่าวไว้แล้วรับข้อมูลเฟสเซอร์กระแสและแรงดันค่าใหม่เข้ามา

ข้อมูลเฟสเซอร์กระแสและแรงดันที่เข้ามาใหม่จะถูกพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ จะใช้ค่าดังกล่าวในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินหรือไม่ และจะเก็บค่าดังกล่าวไว้ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินในรอบต่อไปหรือไม่

หากข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่เหมาะสมจะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินิน และเก็บค่าดังกล่าวไว้ในส่วนที่ 2 โดยใช้สมการ (4.2) แต่หากไม่เหมาะสมโปรแกรมจะไม่คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -g_{old} & h_{old} \\ 0 & 1 & -h_{old} & -g_{old} \\ 1 & 0 & -g & h \\ 0 & 1 & -h & -g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_l \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{old} \\ w_{old} \\ u \\ w \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

โดยที่

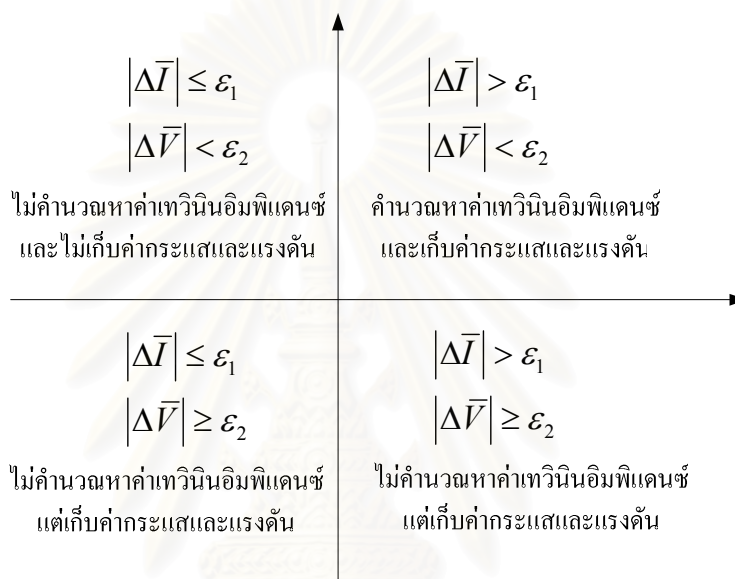
$g, h$  คือ เฟสเซอร์กระแสในแกนจริง และจินตภาพ ตามลำดับ

$u, w$  คือ เฟสเซอร์แรงดันในแกนจริง และจินตภาพ ตามลำดับ

ส่วนตัวห้อย  $old$  แสดงถึงจุดทำงานเดิมที่ถูกเก็บไว้

จากสมการ (4.2) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าจุดทำงานใหม่ที่เหมาะสม คือ จุดทำงานที่ทำให้เมทริกซ์ทางซ้ายมือของสมการ (4.2) ไม่เป็นเมทริกซ์เอกพจน์ (Singular Matrix) นั่นเอง

ส่วนหลักในการพิจารณาว่าควรเก็บค่าเฟสเซอร์กระแสและแรงดันที่เข้ามาใหม่แทนค่าจุดทำงานเดิมหรือไม่นั้น จะทำการพิจารณาในเงื่อนไขที่ว่าจุดทำงานดังกล่าวต้องแตกต่างจากจุดทำงานเดิม และต้องไม่ส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินใหม่ที่สามารถคำนวณได้ไม่ถูกต้อง โดยแนวคิดในการเก็บและการกรองข้อมูลได้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แนวคิดในการเก็บและการกรองข้อมูล

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าในการพิจารณาว่าควรทำการคำนวณหาค่าเทวินินอิมพีแดนซ์และควรเก็บค่ากระแสและแรงดันแทนที่เฟสเซอร์เดิมหรือไม่นั้น ทำการพิจารณาจากความแตกต่างของกระแส ( $|\Delta \bar{I}|$ ) และแรงดัน ( $|\Delta \bar{V}|$ ) เป็นหลัก โดยความแตกต่างของกระแสเป็นตัวบ่งบอกถึงจุดทำงานที่แตกต่างกัน 2 จุด เช่น หากกระแสแตกต่างจากค่าเดิมไม่มาก จุดทำงานดังกล่าวอาจเป็นจุดทำงานที่ซ้ำกับจุดทำงานเดิม เป็นต้น ส่วนความแตกต่างของแรงดันนั้นเป็นตัวบ่งบอกถึงโครงสร้างของระบบ คือ หากแรงดันมีความแตกต่างกันมากแสดงถึงจุดทำงานที่มาจากโครงสร้างที่แตกต่างกัน เช่น จุดทำงานแรกมาจากระบบก่อนเกิดความผิดปกติ ส่วนจุดทำงานหลังจากมาจากระบบหลังเกิดความผิดปกติ หรือจุดทำงานแรกมาจากระบบก่อนปรับแก้ของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลด ส่วนจุดทำงานหลังจากมาจากระบบหลังปรับแก้ของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลด เป็นต้น

ดังนั้น สรุปได้ว่าโปรแกรมจะคำนวณหาพารามิเตอร์ของวงจรเทวินิน ในกรณีที่ความแตกต่างของกระแสมีค่ามากกว่าค่าคงที่ค่าหนึ่ง ( $\varepsilon_1$ ) และความแตกต่างของแรงดันมีค่าน้อยกว่า

ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ( $\varepsilon_2$ ) เท่านั้น ส่วนกรณีอื่นจะไม่คำนวณ ในทางกลับกัน โปรแกรมจะไม่เก็บค่าเฟสเซอร์กระแสและแรงดันที่เข้ามาใหม่แทนค่าจุดทำงานเดิมในกรณีที่ความแตกต่างของกระแสมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง ( $\varepsilon_1$ ) และความแตกต่างของแรงดันมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่ค่าหนึ่ง ( $\varepsilon_2$ ) เท่านั้น ส่วนกรณีอื่นจะเก็บค่าทั้งหมด

หลังจากนั้นเมื่อคำนวณหาค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ได้แล้ว ค่าดังกล่าวจะถูกส่งไปคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ต่อไป

#### 4.3 ขั้นตอนในการคำนวณดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

หลังจากได้ค่าโหลดอิมพีแดนซ์ ( $\bar{Z}_{app}$ ) และค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ ( $\bar{Z}_{Thev}$ ) แล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ โดยใช้สมการ (4.3)

$$ISI = \frac{(|\bar{Z}_{app}| - |\bar{Z}_{Thev}|)}{|\bar{Z}_{app}|} \quad (4.3)$$

ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะถูกคำนวณทุกช่วงเวลาที่ทำกราสุ่ม โดยค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ ควรจะมีค่าใกล้เคียง 1 ในขณะที่ระบบมีเสถียรภาพอยู่ในเกณฑ์ปกติ และในขณะที่ระบบถูกรบกวนทำให้ขนาดแรงดันที่จุดเชื่อมต้อมีค่าลดลง หากเหตุการณ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพของแรงดันที่จุดโหลดนั้น ค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงลดลง และมีค่าเข้าสู่ศูนย์เมื่อเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน

ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำขั้นตอนวิธีดังกล่าวไปทดสอบสมรรถนะกับระบบทดสอบในบทที่ 5 และแสดงผลการทดสอบสมรรถนะที่ได้ในบทที่ 6 ต่อไป

#### 4.4 การกำหนดค่าคงที่ที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการคำนวณหาค่าเทวินินอิมพีแดนซ์

สำหรับค่าคงที่ที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการคำนวณหาค่าเทวินินอิมพีแดนซ์นั้นแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2 คือ ความแตกต่างของกระแส ( $\varepsilon_1$ ) และความแตกต่างของแรงดัน ( $\varepsilon_2$ ) ซึ่งหากทำการกำหนดค่าดังกล่าวได้อย่างเหมาะสมแล้วจะสามารถทำให้ขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะคำนวณค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ได้อย่างถูกต้อง และมีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้ทันต่อเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ รวมทั้งยังสามารถที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการแกว่งของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการคำนวณของขั้นตอนวิธีมีผลต่อการตัดสินใจที่ผิดพลาดของผู้ดูแลระบบ โดยค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ไม่ควรแกว่งลงมาต่ำเกินไปในขณะที่ระบบยังคงมีความแข็งแกร่งจนทำให้ผู้ดูแลระบบเข้าใจว่าเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน



เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ไม่ควรแกว่งมาต่ำกว่า 0.3 p.u. ในขณะที่ค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ยังคงมีค่ามากกว่า 0.5 p.u. เป็นต้น ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกใช้ในการหาค่าคงที่ทั้ง 2 ด้วย

จากสมการ (4.2) ที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินสามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -g_{old} & h_{old} \\ 0 & 1 & -h_{old} & -g_{old} \\ 1 & 0 & -g_{old} - \Delta g & h_{old} + \Delta h \\ 0 & 1 & -h_{old} - \Delta h & -g_{old} - \Delta g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{old} \\ w_{old} \\ u_{old} + \Delta u \\ w_{old} + \Delta w \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

โดยที่

$g, h$  คือ เฟสเซอร์กระแสในแกนจริง และจินตภาพ ตามลำดับ

$u, w$  คือ เฟสเซอร์แรงดันในแกนจริง และจินตภาพ ตามลำดับ

จากสมการ (4.4) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & -g_{old} & h_{old} \\ 0 & 1 & -h_{old} & -g_{old} \\ 1 & 0 & -g_{old} & h_{old} \\ 0 & 1 & -h_{old} & -g_{old} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\Delta g & \Delta h \\ 0 & 0 & -\Delta h & -\Delta g \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{old} \\ w_{old} \\ u_{old} \\ w_{old} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta u \\ \Delta w \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

เนื่องจาก

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -g_{old} & h_{old} \\ 0 & 1 & -h_{old} & -g_{old} \\ 1 & 0 & -g_{old} & h_{old} \\ 0 & 1 & -h_{old} & -g_{old} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{old} \\ w_{old} \\ u_{old} \\ w_{old} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

สมการ (4.5) จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} -\Delta g & \Delta h \\ -\Delta h & -\Delta g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{Thev} \\ X_{Thev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta w \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

จากสมการ (4.7) สามารถเขียนเป็นสมการเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$-(\Delta g + j\Delta h)(R_{Thev} + jX_{Thev}) = \Delta u + j\Delta w \quad (4.8)$$

จากสมการ (4.8) จะได้ว่า

$$|R_{Thev} + jX_{Thev}| = \left| \frac{\Delta u + j\Delta w}{-(\Delta g + j\Delta h)} \right| \quad (4.9)$$

$$\text{ดังนั้น } |\bar{Z}_{Thev}| = \left| \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|$$

ต่อไปจะทำการพิจารณาในเงื่อนไขที่ว่า ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ไม่ควรแกว่งมาต่ำกว่า 0.3 p.u. ในขณะที่ค่าเทวินนิมพีแดนซ์ยังคงมีค่ามากกว่า 0.5 p.u. ซึ่งเป็นสถานะที่ระบบไฟฟ้ายังคงแข็งแกร่งอยู่นั่นเอง

จาก  $ISI = 1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app}|}$  จะได้ว่า

$$1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app}|} > 0.3 \quad (4.10)$$

จากสมการ (4.10) จะได้ว่า

$$\frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app}|} < 0.7 \quad (4.11)$$

จากสมการ (4.11) จะได้ว่า

$$|\bar{Z}_{Thev}| < 0.7 |\bar{Z}_{app}| \quad (4.12)$$

แทนค่า  $|\bar{Z}_{app}| = 0.5$  ลงในสมการ (4.12) จะได้ว่า

$$|\bar{Z}_{Thev}| < 0.35 \quad (4.13)$$

จากสมการ (4.13) จะได้

$$\frac{|\Delta V|}{|\Delta I|} < 0.35 \quad (4.14)$$

เพื่อให้ให้ขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เทวินินได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นค่า  $|\Delta I|$  ไม่ควรมีค่าน้อยเกินไปจนทำให้จุดทำงานที่รับเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณมีค่าซ้ำกัน และสามารถคำนวณได้ทันต่อเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ดังนั้น ค่า  $|\Delta I|$  ไม่ควรมีค่ามากเกินไปจนอาจทำให้ผลการคำนวณผิดพลาด ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ค่า  $|\Delta I| = 1 \times 10^{-3}$  เมื่อแทนค่าดังกล่าวลงในสมการ (4.14) พบว่าค่า  $|\Delta V|$  ที่ใช้ควรมีค่าน้อยกว่า  $3.5 \times 10^{-4}$  โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ค่า  $|\Delta V| = 1 \times 10^{-4}$  ในขั้นตอนการทดสอบวิธีที่พัฒนาขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

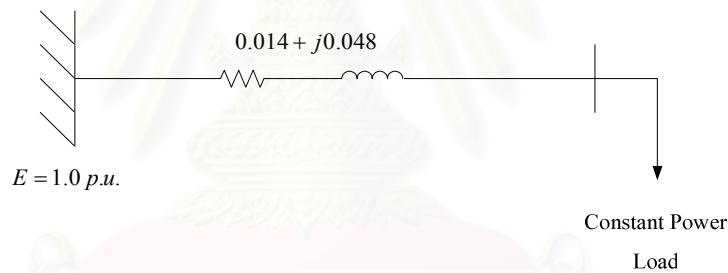
## บทที่ 5

### ระบบทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบทดสอบทั้ง 4 ระบบ ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้า และใช้ในการทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึมสำหรับกำหนดจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

#### 5.1 ระบบทดสอบที่ 1: โหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่เชื่อมต่ออยู่กับบัสอนันต์

ระบบทดสอบที่ 1 ประกอบด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ (Constant Power Load) เชื่อมต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่แทนด้วยบัสอนันต์ (Infinite Bus) ดังแสดงการเชื่อมต่อในรูปที่ 5.1 โดยจุดทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวแสดงไว้ในตารางที่ ค.1 และ ค.2 รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง แสดงไว้ในตารางที่ ค.3 ในภาคผนวก ค

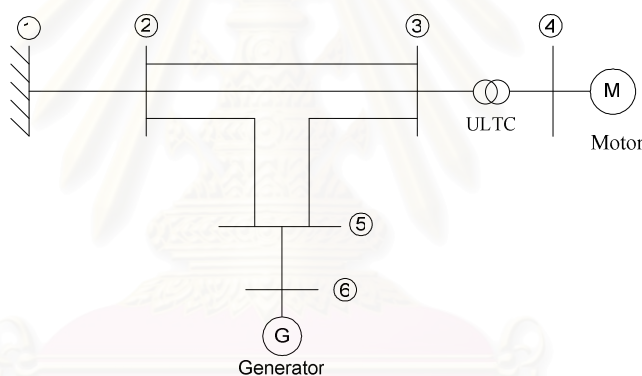


รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบที่ 1

ระบบทดสอบที่ 1 นี้จะใช้ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้า ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 นอกจากนี้ยังใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้น สมรรถนะการใช้งานของขั้นตอนวิธีในการกำหนดจุดวิกฤติขณะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบ และผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ต่อการเพิ่มขึ้นของโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะตรวจวัด และพิจารณาผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ โหลดบัล

## 5.2 ระบบทดสอบที่ 2: ระบบ 6 บัสที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำและหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลดเชื่อมต่ออยู่

ระบบทดสอบที่ 2 ประกอบด้วยบัสไฟฟ้าจำนวนทั้งสิ้น 6 บัส สายส่งจำนวน 7 เส้น มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแทนด้วยบัสอนันต์ที่บัส 1 และแหล่งจ่ายไฟฟ้าอีกแหล่ง แทนด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส เชื่อมต่ออยู่ที่บัส 6 ส่วนโหลดไฟฟ้าในระบบแทนด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำต่ออยู่กับบัส 4 นอกจากนี้ ยังมีหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลดเพื่อรักษาระดับแรงดันที่บัส 4 ซึ่งโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำเชื่อมต่ออยู่ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดยจุดทำงานของระบบที่สภาวะอยู่ตัวแสดงไว้ในตารางที่ ก.4 และ ก.5 รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง แสดงไว้ในตารางที่ ก.6 ทั้งหมดในภาคผนวก ก ส่วนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบกระตุ้น และระบบควบคุมความเร็วของระบบทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตาราง ก.1 ก.2 และ ก.3 ในภาคผนวก ก นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้แสดงไว้ในตาราง ข.2 ในภาคผนวก ข



รูปที่ 5.2 ระบบทดสอบที่ 2

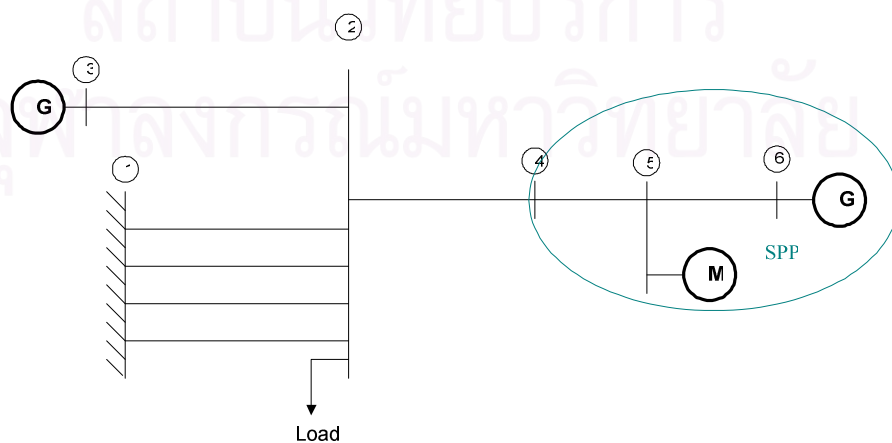
ระบบทดสอบที่ 2 จะใช้ศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตของการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน อันเนื่องมาจากการลัดวงจรบนสายส่งที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ และทิศทางการไหล รวมถึงความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบเปลี่ยนแปลงไป หลังจากสายส่งเส้นที่เกิดลัดวงจรถูกปลดออกจากระบบ โดยมีปัจจัยสำคัญที่กำหนดเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเกิดลัดวงจร ลักษณะการตอบสนองเชิงพลวัตต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดันของโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ และของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลดดังกล่าว นอกจากนี้ยังจะใช้ในการทดสอบสมรรถนะและความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้น ในการกำหนดจุดวิกฤติ ขณะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบ และผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ต่อเหตุการณ์การเกิดลัดวงจร ขณะสายส่งถูก

ปลดออกจากระบบ ความไวของการตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ต่อการทำงานของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันได้อัตโนมัติขณะมีโหลด เป็นต้น โดยจะตรวจวัด และพิจารณาผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่บัสที่โหลดมอเตอร์ต่ออยู่ เช่นเดียวกับในระบบทดสอบที่ 1

### 5.3 ระบบทดสอบที่ 3: ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย

ระบบทดสอบที่ 3 เป็นการพัฒนาแบบจำลองระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่ายที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบส่งไฟฟ้าหลัก ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งประกอบด้วย บัสไฟฟ้า จำนวนทั้งสิ้น 6 บัส สายส่งจำนวน 8 เส้น ภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่แทนด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ควรรวมเป็นชุดเดียว (Lumped Model) 1 ชุด ณ บัส 6 และแทนโหลดภายในระบบด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบควรรวม 1 ชุด ต่ออยู่ที่บัส 5 ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กดังกล่าว เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าภายนอกที่บัส 4 โดยจุดทำงานของระบบที่ภาวะอยู่ตัวแสดงไว้ในตารางที่ ก.7 และ ก.8 รวมถึงค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง แสดงไว้ในตารางที่ ก.9 ทั้งหมดในภาคผนวก ค ส่วนค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบกระตุ้น และระบบควบคุมความเร็วของระบบทดสอบนี้ได้แสดงไว้ในตาราง ก.4 ก.5 และ ก.6 ในภาคผนวก ก นอกจากนี้ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้แสดงไว้ในตาราง ข.3 ในภาคผนวก ข

ภายนอก แทนโรงไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงด้วย แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสที่ควรรวมเป็นชุดเดียวอีก 1 ชุดที่บัส 3 นอกจากนี้แทนระบบส่งไฟฟ้าหลักที่เชื่อมโยงอยู่ด้วยสายส่งขนานกันจำนวน 4 วงจร เชื่อมต่อไปยังส่วนที่เหลือของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหลัก ซึ่งในที่นี้แทนด้วยบัสอนันต์ ส่วนโหลดภายนอก ณ บัส 2 แทนด้วยแบบจำลองโหลดกำลังคงที่

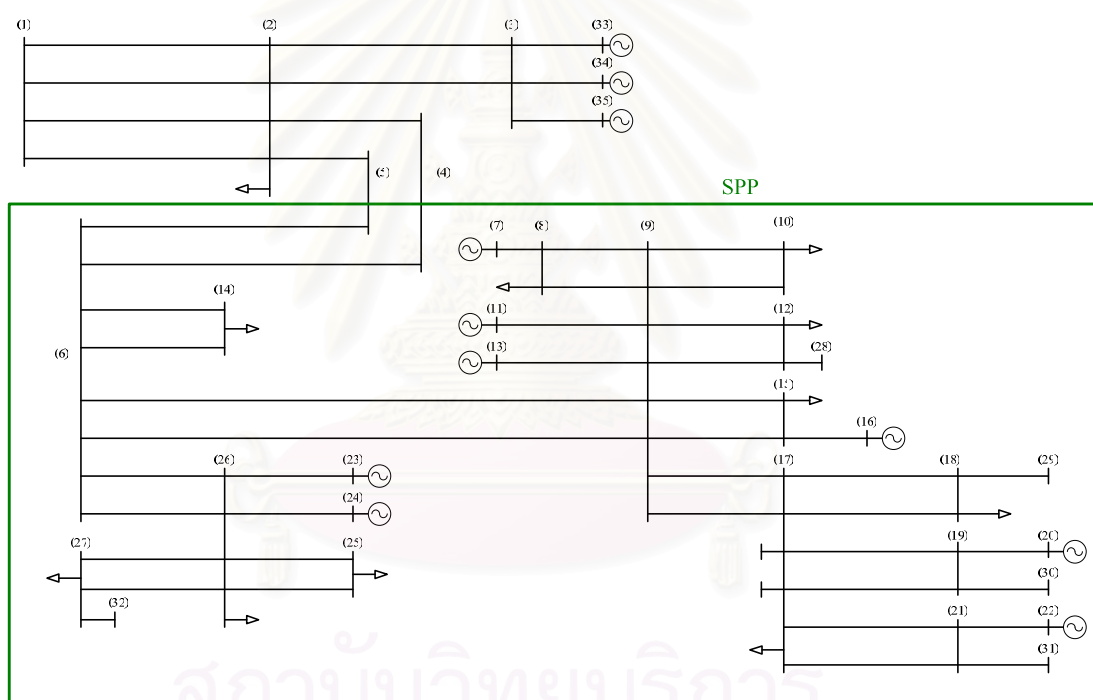


รูปที่ 5.3 ระบบทดสอบที่ 3

ระบบทดสอบที่ 3 จะใช้ในการทดสอบสมรรถนะและความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการกำหนดจุดวิกฤติขณะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ บัสเชื่อมต่อ อันเนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอกโดยการเพิ่มโหลดที่บัส 2 อย่างต่อเนื่อง เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนในระบบอย่างง่าย และเพื่อใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบต่อไป ก่อนที่จะทำการศึกษาปัญหาการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงโดยละเอียดต่อไป

#### 5.4 ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย

แบบจำลองเชิงพลวัตของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ที่พิจารณาในที่นี้ ประกอบด้วยบัสไฟฟ้าทั้งสิ้นจำนวน 35 บัส สายส่งไฟฟ้าจำนวนรวม 52 เส้น เชื่อมต่อกันดังแสดงด้วยแผนภาพเส้นเดียวในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภาพเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย  
เชื่อม โยงกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก

แหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยแทนด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส พร้อมทั้งระบบกระตุ้นและระบบควบคุมความเร็วโรเตอร์ จำนวน 8 ชุด ส่วนแหล่งจ่ายไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงแทนด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส และหม้อแปลงจำนวนอีก 3 ชุด ลักษณะโหลดไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย เพื่อการศึกษา

ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน จะแทนด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบควมรวมที่แต่ละโหลดบัสจำนวนทั้งสิ้น 10 ชุด

ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยรวมถึงโรงไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงเชื่อมต่อกับระบบส่งจ่ายไฟฟ้าหลัก ซึ่งในที่นี้จะแทนด้วยสายส่งขนานกัน 4 วงจร เชื่อมต่อไปยังระบบส่งส่วนที่เหลือที่แทนด้วยบัสอนันต์ ดังที่ปรากฏในรูป 5.4

ระบบทดสอบที่ 4 จะใช้ในการทดสอบสมรรถนะและความถูกต้องของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการกำหนดจุดวิกฤตขณะเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ บัสเชื่อมต่อของระบบไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบส่งหลัก อันเนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอกโดยการเพิ่มโหลดที่บัส 2 อย่างต่อเนื่อง โดยในการทดสอบจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ในระบบจริง ซึ่งไม่สามารถเปิดเผยในวิทยานิพนธ์นี้ได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



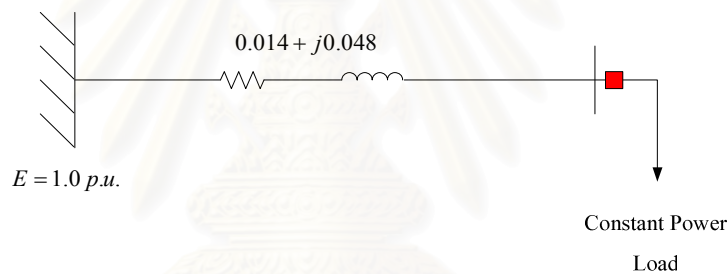
## บทที่ 6

### ผลการทดสอบ

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีการทดสอบ และผลการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน รวมถึงผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบภายใต้การรบกวน (Disturbances) ในรูปแบบต่างๆ กัน โดยใช้ระบบทดสอบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5

#### 6.1 การเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่ในระบบทดสอบที่ 1

ในระบบทดสอบที่ 1 จะทำการทดสอบโดยพิจารณาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันที่โหลดบัส ๓ บัสที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 6.1

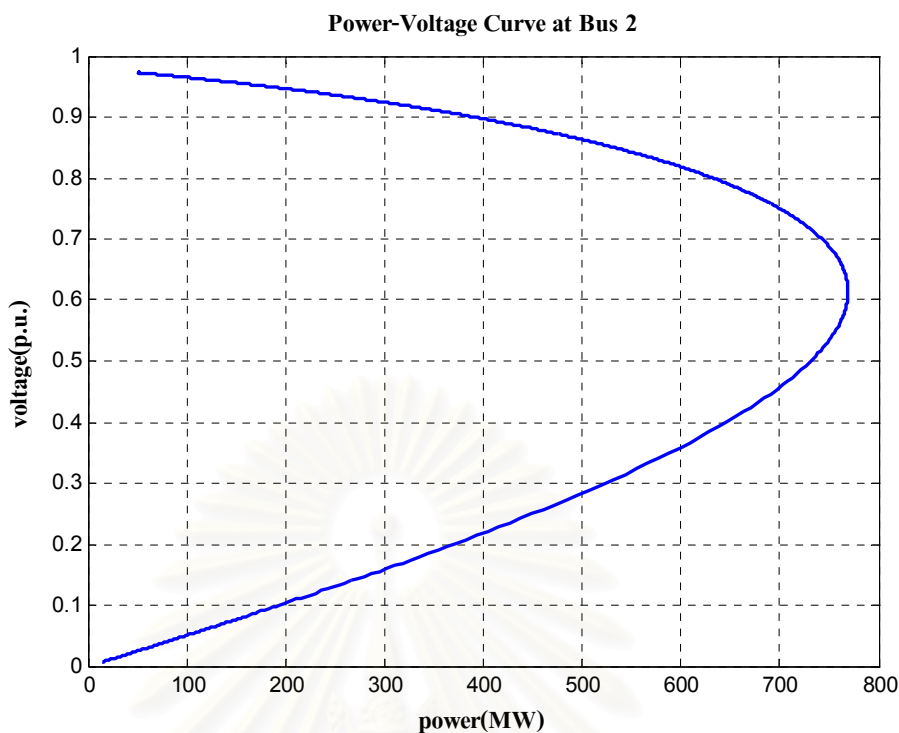


รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบที่ 1

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าจริงคงที่จนกระทั่งระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน จากนั้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่โหลดบัส ๓ บัสที่ 2 กับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่โหลด (P-V Curve) ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



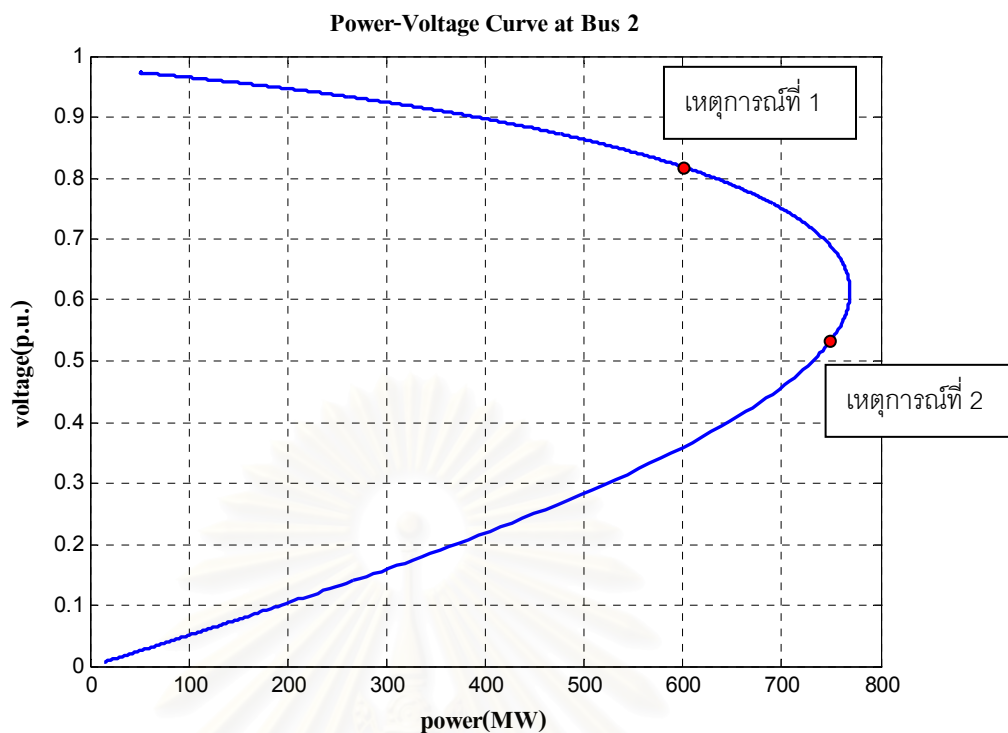
**รูปที่ 6.2** ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่โหลดกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่โหลด

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากการทดสอบเชิงพลวัตในรูปที่ 6.2 มีลักษณะคล้ายกับความสัมพันธ์เส้นโค้งกำลังไฟฟ้า-แรงดัน (PV-Curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในสถานะอยู่ตัวที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายนั่นเอง

2. ทำการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีเพื่อใช้ชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบก่อนหน้านี้นี้ ในรูปที่ 6.2 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 เหตุการณ์ ดังต่อไปนี้

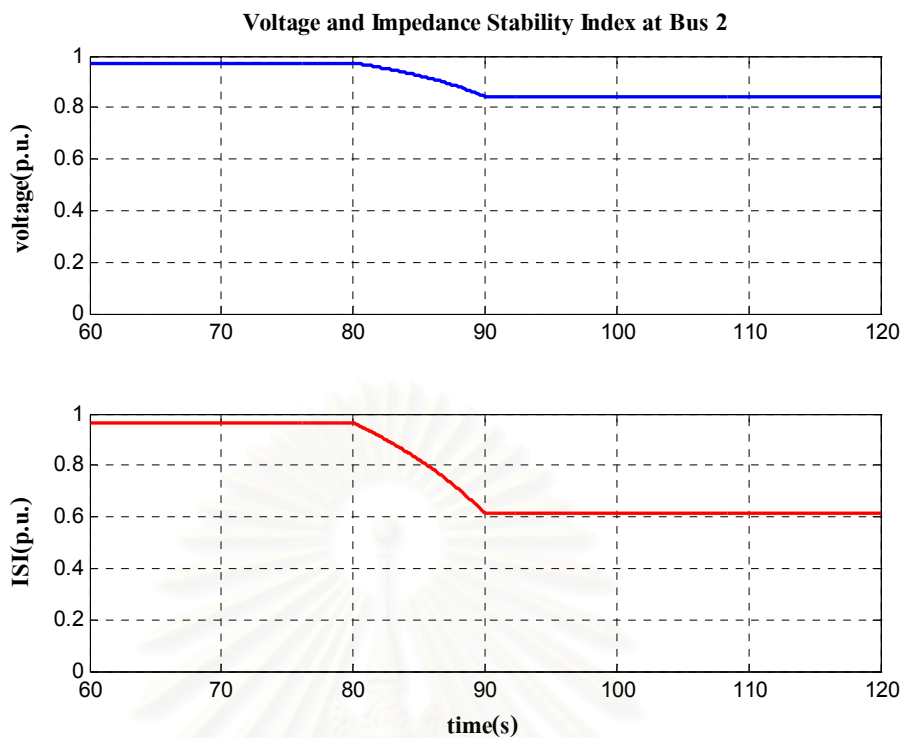
**เหตุการณ์ที่ 1** ทำการเพิ่มโหลดตั้งแต่วันที่ 80 จนกระทั่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่า 600 MW แล้วจึงหยุดเพิ่มโหลด ซึ่งจากรูปที่ 6.3 จะสังเกตเห็นว่าจุดทำงานของระบบตลอดการเกิดเหตุการณ์นี้ อยู่ด้านบนของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่มีเสถียรภาพ

**เหตุการณ์ที่ 2** ทำการเพิ่มโหลดตั้งแต่วันที่ 80 จนกระทั่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าเกินกว่า 760 MW แล้วจึงหยุดเพิ่มโหลด ซึ่งจากรูปที่ 6.3 จะสังเกตเห็นว่าจุดทำงานสิ้นสุดของเหตุการณ์นี้ อยู่ด้านล่างของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่สูญเสียเสถียรภาพ

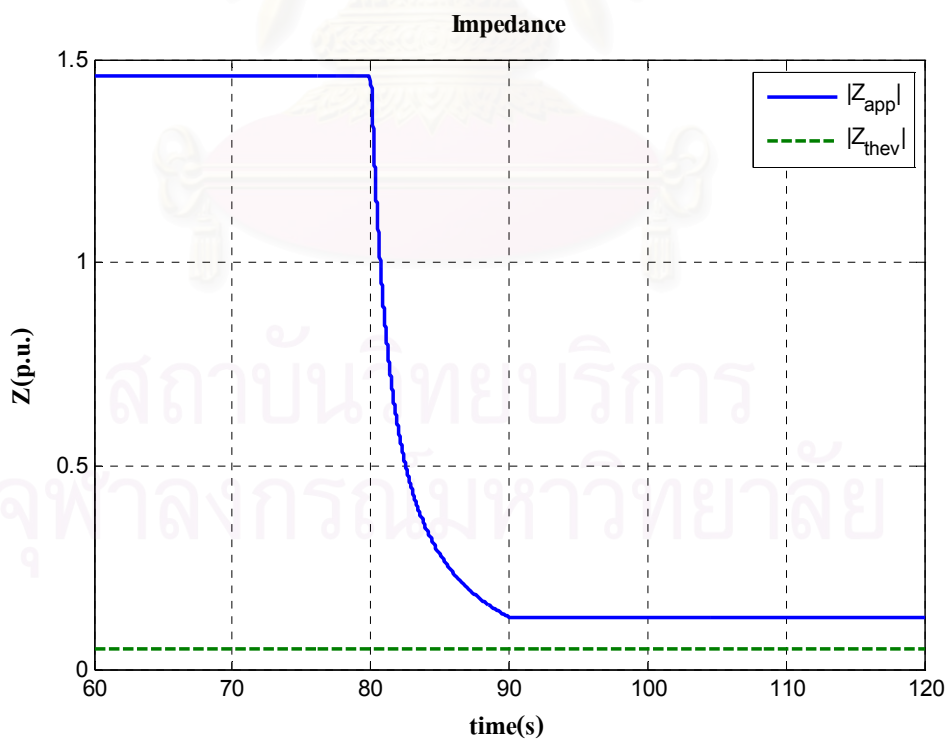


รูปที่ 6.3 ตำแหน่งที่หยุดการเพิ่มโหลดในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

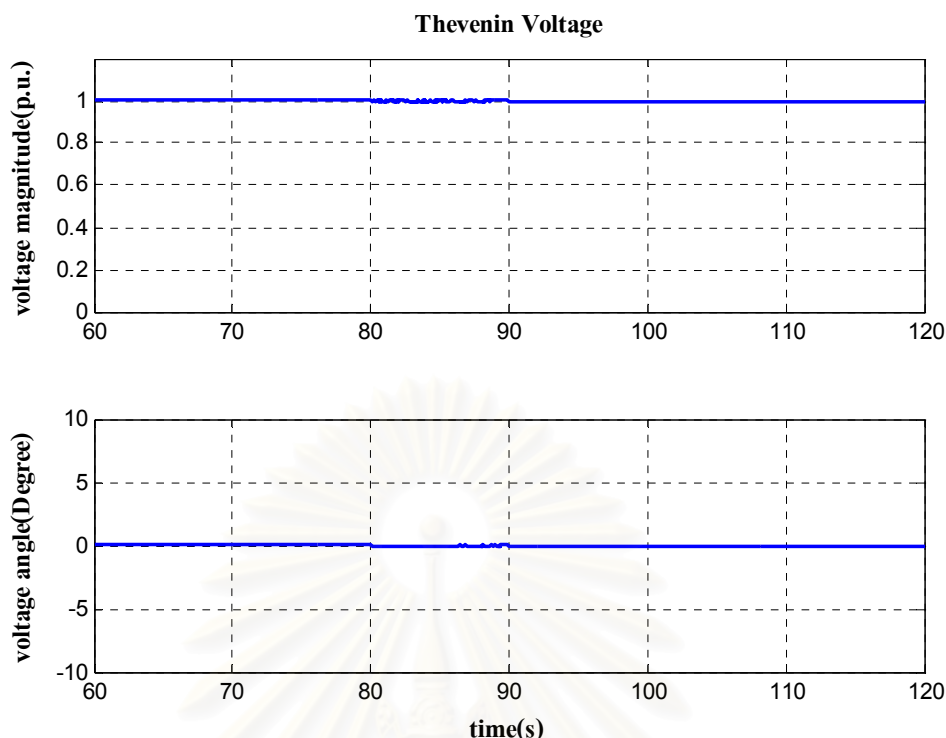
ลักษณะผลตอบแทนทางเวลาของขนาดแรงดัน ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ขนาดเทวินินอิมพีแดนซ์และขนาดโหลดอิมพีแดนซ์ รวมทั้งขนาดของแหล่งจ่ายเทวินินและค่ามุมของแหล่งจ่ายดังกล่าว สำหรับการทดสอบในเหตุการณ์ที่ 1 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.4 - 6.6 ส่วนลักษณะผลตอบแทนในเหตุการณ์ที่ 2 แสดงไว้ในรูปที่ 6.7 - 6.9 ตามลำดับ



รูปที่ 6.4 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัส 2 และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1



รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองของขนาดเทวินินอิมพีแดนซ์และขนาดโหลดอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1

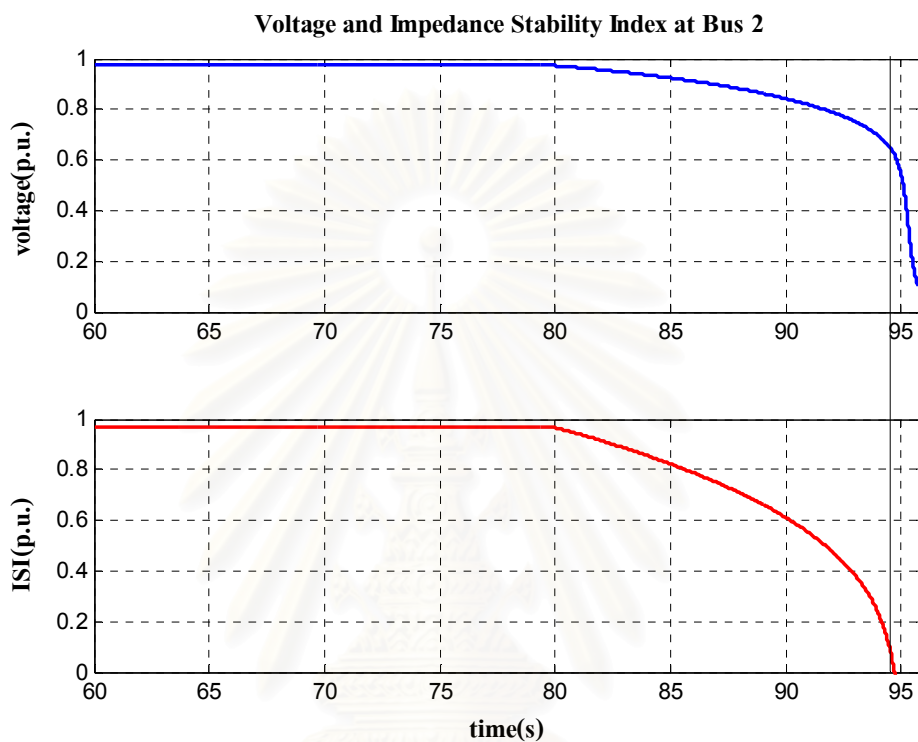


รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองของขนาดและมุมของแหล่งจ่ายสมมูลเทวินิน ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1

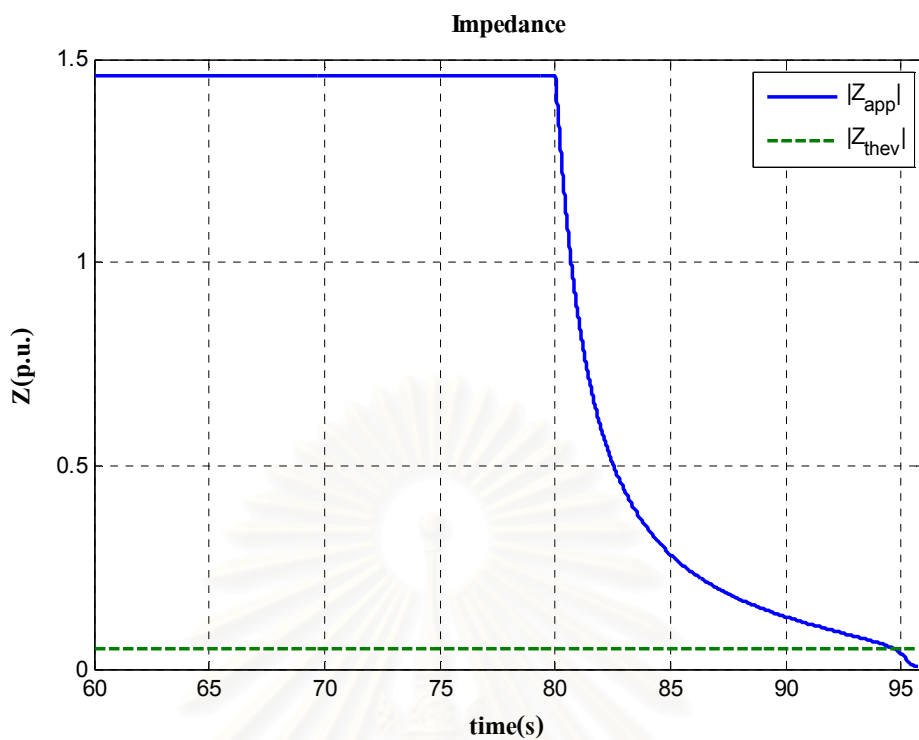
จากรูปที่ 6.4 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มโหลดในเหตุการณ์ที่ 1 ส่งผลให้แรงดันมีค่าลดต่ำลงแต่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน และหากสังเกตผลตอบของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ก็ให้ผลสอดคล้องกับผลตอบสนองของขนาดแรงดัน โดยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงทันทีที่มีการรบกวนเกิดขึ้นในวินาทีที่ 80 จากนั้นเมื่อหยุดการเพิ่มโหลด และระบบเข้าสู่ภาวะอยู่ตัว จะสังเกตเห็นว่าค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์เข้าสู่ค่าคงที่ประมาณ 0.6 p.u. ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ประเมินได้ก่อนการเพิ่มโหลด โดยดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีค่าประมาณ 0.95 จากการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าถึงแม้ในกรณีนี้ระบบจะยังไม่สูญเสียเสถียรภาพ แต่ค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าระบบมีความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโหลดในระบบขณะนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก

จากรูปที่ 6.5 พบว่าขนาดของเทวินินอิมพีแดนซ์ที่ประมาณได้มีค่าคงที่เท่ากับ 0.05 p.u. ตลอดการเกิดเหตุการณ์ ซึ่งเป็นการประมาณค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่าเท่ากับ  $0.014 + j0.048$  pu. ส่วนผลตอบสนองของโหลดอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงทันทีที่มีการเพิ่มโหลดขึ้นในระบบ และเข้าสู่ค่าคงที่อีกครั้งเมื่อหยุดเพิ่มโหลดและระบบเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวหลังจากนั้น ทำให้ผลต่างระหว่างขนาดเทวินินอิมพีแดนซ์และขนาดโหลดอิมพีแดนซ์มีค่าลดลง

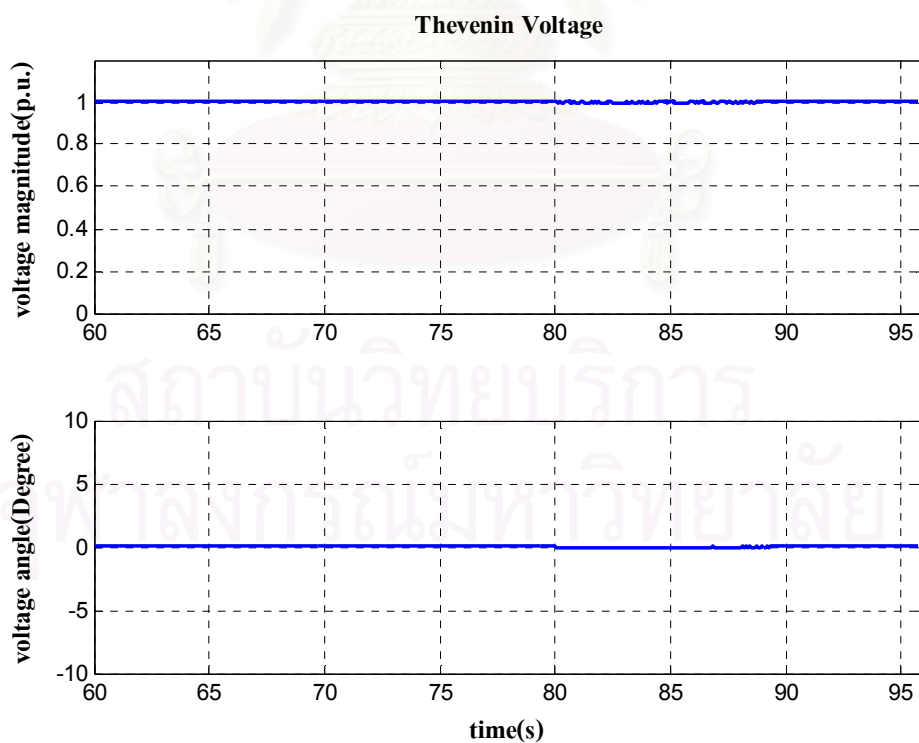
จากรูปที่ 6.6 พบว่าค่าของขนาดและมุมของแหล่งจ่ายสมมูลเทวินินจะมีค่าคงที่ตลอดเวลา คือ ประมาณ 1 p.u. และ 0 องศา ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดและมุมของแรงดัน ณ บัสอ้างอิงที่ใช้ในระบบทดสอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการในการระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบ ( $R_{thev}, X_{thev}, E_R, E_I$ ) ทำงานได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัส 2 และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2



รูปที่ 6.8 ผลตอบสนองของขนาดเทวินินิมพีแดนซ์และขนาดโหลดอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2



รูปที่ 6.9 ผลตอบสนองของขนาดและมุมของแหล่งจ่ายสมมูลเทวินิน ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2

ผลตอบสนองในเหตุการณ์ที่ 2 แตกต่างจากเหตุการณ์ที่ 1 ข้างต้น โดยในรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าขนาดแรงดันมีค่าลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง แม้ขณะที่หยุดการเพิ่มโหลดไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันแล้ว และหากสังเกตผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ก็มีความสอดคล้องกัน โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์เกิดขึ้นทันทีที่มีการเพิ่มโหลด และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเข้าสู่ศูนย์ ซึ่งระบุให้เห็นว่าในสภาวะดังกล่าว ระบบเกิดการสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้น ทั้งนี้ หากตรวจสอบค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ ขณะเวลาที่ระบบเข้าสู่จุดวิกฤติ กล่าวคือ จุดที่ระบบสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้สูงสุด ตามที่ปรากฏใน P-V Curve ดังรูปที่ 6.2 พบว่า ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีค่าประมาณ 0.1 p.u. แสดงให้เห็นว่าหากต้องการนำดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ไปใช้ในการพิจารณาปลดโหลดบางส่วนออกจากระบบเพื่อป้องกันปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน จะต้องมีการกำหนดค่าช่วงเพื่อที่เหมาะสมไว้ด้วย

จากรูปที่ 6.8 พบว่า ขนาดของเทวินินอิมพีแดนซ์ยังคงมีค่าคงที่เท่ากับ 0.05 p.u. ตลอดเหตุการณ์ ส่วนขนาดโหลดอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีค่าเท่ากับขนาดของเทวินินอิมพีแดนซ์ ในช่วงเวลาเดียวกันกับที่ระบบเข้าสู่จุดวิกฤตเสถียรภาพเชิงแรงดัน

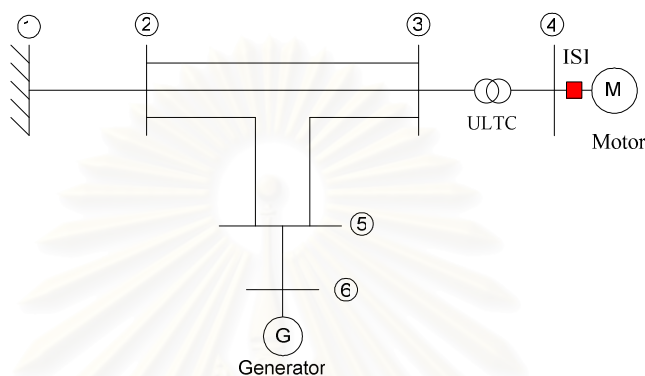
จากรูปที่ 6.9 พบว่า ค่าของขนาดและมุมของแหล่งจ่ายสมมูลเทวินินยังคงมีค่าคงที่ตลอดเวลาเช่นกัน คือ ประมาณ 1 p.u. และ 0 องศา ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับขนาดและมุมของแรงดัน ณ บัสอ้างอิงที่ใช้ในระบบทดสอบที่ 1 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการในการระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบ ( $R_{th}, X_{th}, E_R, E_I$ ) ทำงานได้อย่างถูกต้อง

จากผลการศึกษาในระบบทดสอบที่ 1 พบว่า ผลตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทั่วที่ต่อการรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยการเพิ่มโหลด และสามารถใช้ระบุถึงความใกล้ไกลจุดวิกฤติ หรือความเสี่ยงของระบบต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ บัสที่พิจารณาได้



## 6.2 การลัดวงจรบนสายส่งในระบบทดสอบที่ 2

ในระบบทดสอบที่ 2 จะทำการทดสอบโดยพิจารณาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ บัสที่มีโหลดมอเตอร์เชื่อมต่ออยู่ ณ บัสที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 6.10 โดยการทดสอบทำขึ้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของทั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ และหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลดที่มีผลต่อเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ หลังเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรบนสายส่งบางเส้น



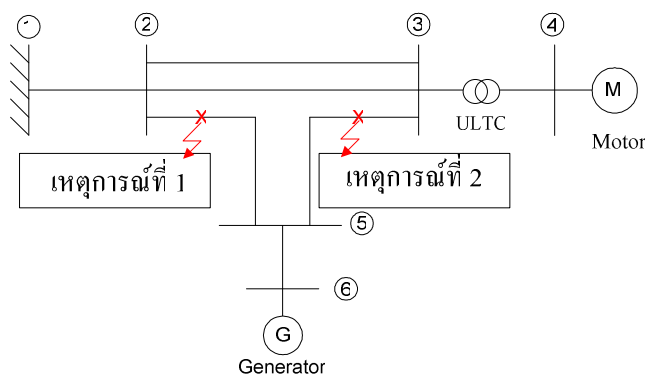
รูปที่ 6.10 ระบบทดสอบที่ 2

### ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 เหตุการณ์หลัก ดังนี้

**เหตุการณ์ที่ 1** เกิดลัดวงจรบนสายส่งที่เชื่อมโยงระหว่างบัส 2 กับบัส 5 ดังในรูปที่ 6.11 ณ วินาทีที่ 60 จากนั้น กำจัดความผิดปกติโดยการปลดสายส่งเส้นดังกล่าวออกภายใน 60 มิลลิวินาที

**เหตุการณ์ที่ 2** เกิดลัดวงจรบนสายส่งที่เชื่อมโยงระหว่างบัส 3 กับบัส 5 ดังในรูปที่ 6.11 ณ วินาทีที่ 60 จากนั้น กำจัดความผิดปกติโดยการปลดสายส่งเส้นดังกล่าวออกภายใน 60 มิลลิวินาที เช่นกัน



รูปที่ 6.11 ตำแหน่งที่เกิดลัดวงจรในระบบในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2

ในการทดสอบทั้งสองเหตุการณ์ข้างต้น กำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองระบบควบคุมของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลด ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.4 ดังนี้

- $V_{ref} = 0.98$  Per Unit
- $D = 0.01$  Per Unit
- $T_d = 3$  sec

ลักษณะผลตอบสนองทางเวลาของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ในระบบ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่บัส 4 ในเหตุการณ์ที่ 1 แสดงไว้ในรูปที่ 6.12 และ 6.13 ส่วนในเหตุการณ์ที่ 2 แสดงไว้ในรูปที่ 6.14 และ 6.15 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.12 ก่อนเกิดการลัดวงจรในเหตุการณ์ที่ 1 เนื่องจากการทำงานของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลดทำให้ขนาดแรงดันที่บัส 4 ที่โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำเชื่อมต่ออยู่ มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ค่าที่ปรับตั้งไว้ (0.98 p.u.) ส่งผลให้การไหลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โหลดมอเตอร์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากนั้นเมื่อเกิดลัดวงจรที่วินาทีที่ 60 ทำให้ขนาดแรงดันที่ทุกบัสในระบบตกลงชั่วขณะ และภายหลังปลดสายส่งเส้นที่เกิดลัดวงจรออกแล้ว ขนาดแรงดันของบัสต่างๆ มีค่ากลับคืนสู่ขนาดใกล้เคียงกันกับขนาดแรงดันก่อนเกิดลัดวงจร ทั้งนี้เนื่องจากการปลดสายส่งเส้นที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบไม่ส่งผลกระทบมากนักต่อปริมาณและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟในระบบ กล่าวคือ ระยะทางระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไม่แตกต่างกันไปจากก่อนเกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ดังนั้น ระบบจึงยังคงรักษาเสถียรภาพเชิงแรงดันไว้ได้ในกรณีนี้

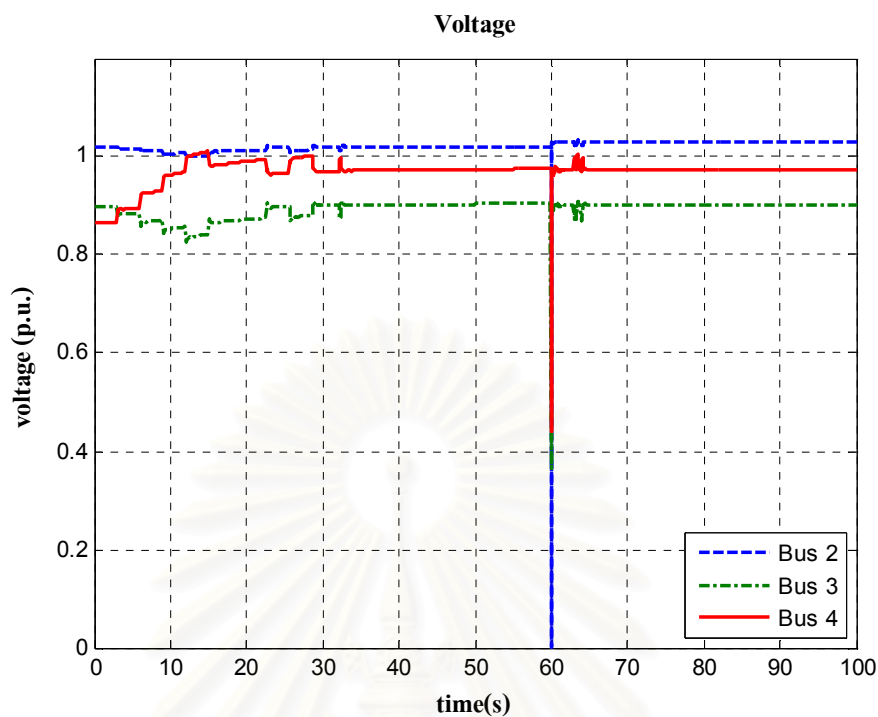
เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ในรูปที่ 6.13 พบว่ามีความไวต่อพลวัตของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลด โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ

และแรงดันตกชั่วขณะเนื่องจากการลัดวงจรอยู่ในระดับหนึ่ง แต่ไม่ส่งผลให้เกิดการแปลความหมายผิดพลาดในการระบุความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบ นอกจากนี้ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่ภาวะอยู่ตัวยังสะท้อนให้เห็นถึงความแข็งแกร่งของระบบ หรือความเสี่ยงต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ จะเห็นได้จากค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในกรณีที่หม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลดส่งผลให้ขนาดแรงดันในระบบ ณ จุดโหลดมีค่าสูงขึ้น

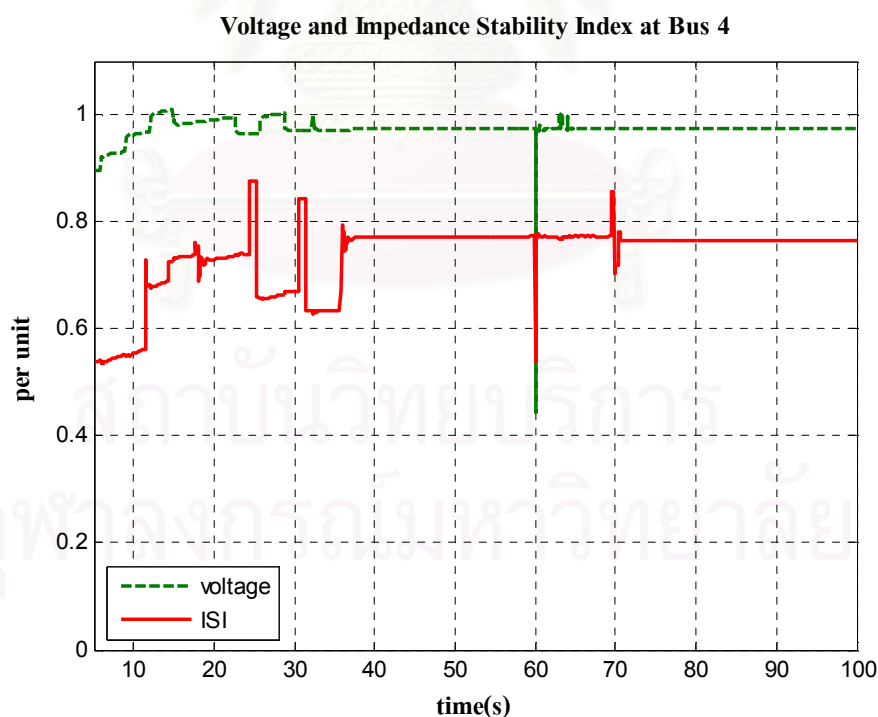
นอกจากนี้พบว่าค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะมีการแกว่งเกิดขึ้นในวินาทีที่ 70 ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของการคำนวณค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ของขั้นตอนวิธีที่ใช้ กล่าวคือ ภายหลังจากการเกิดความผิดพลาดและทำการปลดสายส่งเส้นดังกล่าวออกจากวงจรพบว่าแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลดส่งผลให้ทั้งขนาดของกระแสและแรงดันเกิดการแกว่งตัว ในช่วงเวลาดังกล่าวโปรแกรมจะยังไม่คำนวณหาค่าเทวินินอิมพีแดนซ์เนื่องจากความแตกต่างของกระแสและแรงดันไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด หลังจากนั้นเมื่อแรงดันเข้าสู่ภาวะอยู่ตัวกระแสจะยังคงมีการแกว่งอยู่เล็กน้อย โปรแกรมจะรออยู่อีกช่วงเวลาหนึ่งจนกระทั่งความแตกต่างของกระแสเข้าสู่ช่วงที่กำหนดจากนั้นจึงจะทำการคำนวณค่าเทวินินอิมพีแดนซ์ออกมา จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์มีการแกว่งเกิดขึ้นในวินาทีที่ 70 ภายหลังจากเกิดการแกว่งตัวของแรงดัน อย่างไรก็ตามการแกว่งของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นยังคงไม่ส่งผลให้ผู้ดูแลระบบตัดสินใจผิดพลาด

ส่วนในรูปที่ 6.14 และ 6.15 จากการจำลองเหตุการณ์ที่ 2 จะเห็นว่า ในกรณีนี้หลังเกิดการลัดวงจรบนสายส่ง และปลดสายส่งเส้นดังกล่าวออกภายในระยะเวลาเดียวกันแล้ว อย่างไรก็ตามขนาดของแรงดันที่บัสต่างๆ ยังคงลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งของการเกิดลัดวงจรและการปลดสายส่งออกมีผลทำให้ปริมาณและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน กล่าวคือ ระยะเวลาระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไกลขึ้นกว่าระยะทางก่อนเกิดเหตุการณ์ลัดวงจร ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการสูญเสียกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบเพิ่มขึ้นมาก และด้วยพลวัตการตอบสนองของหม้อแปลงปรับระดับแรงดันอัตโนมัติขณะมีโหลด และโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำขณะที่ขนาดแรงดันในระบบตกลงในกรณีนี้ จึงส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุด

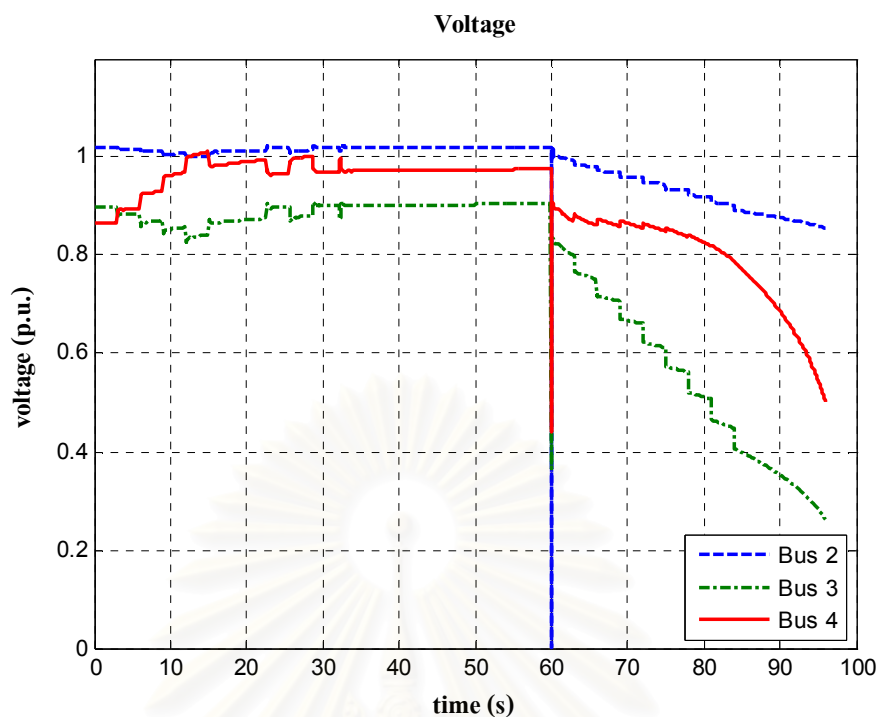
หากพิจารณาผลตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ในรูปที่ 6.15 พบว่าสามารถตอบสนองต่อการที่สายส่งเส้นสำคัญที่เชื่อมโยงมายังโหลดถูกปลดออกได้อย่างรวดเร็ว โดยมีค่าลดลงมาเหลือประมาณ 0.4 p.u. แม้ขณะนั้นขนาดของแรงดันที่บัสดังกล่าวยังคงมีค่าสูงกว่า 0.85 p.u. ซึ่งเป็นการระบุให้เห็นว่าระบบอ่อนแอลงอย่างชัดเจน หลังจากนั้นค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ จะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและเข้าสู่ศูนย์ เมื่อระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุด



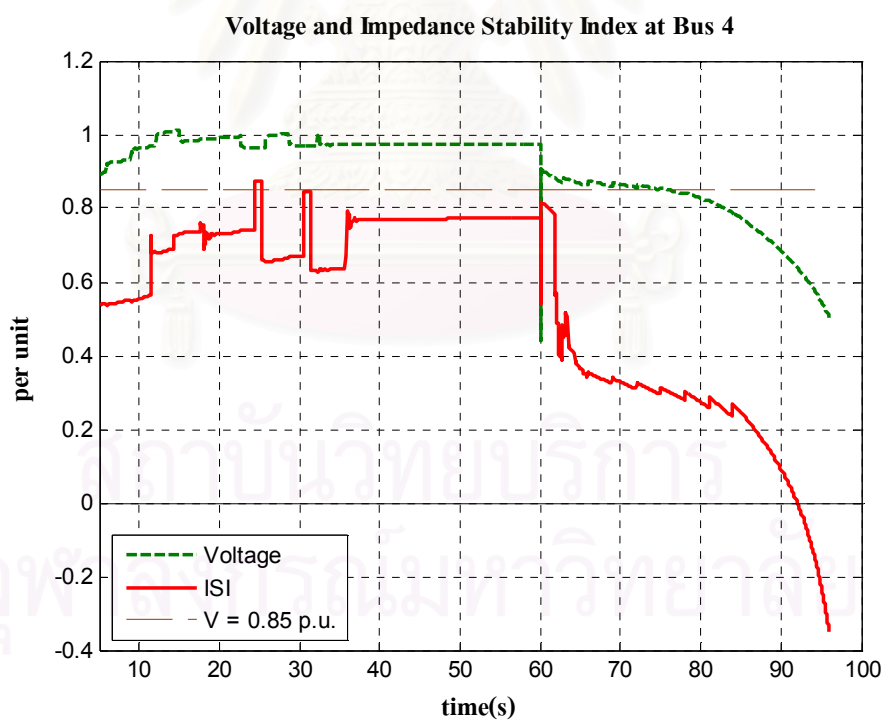
รูปที่ 6.12 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่าง ๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1



รูปที่ 6.13 เปรียบเทียบผลตอบสนองของขนาดแรงดันกับค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1



รูปที่ 6.14 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่าง ๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2



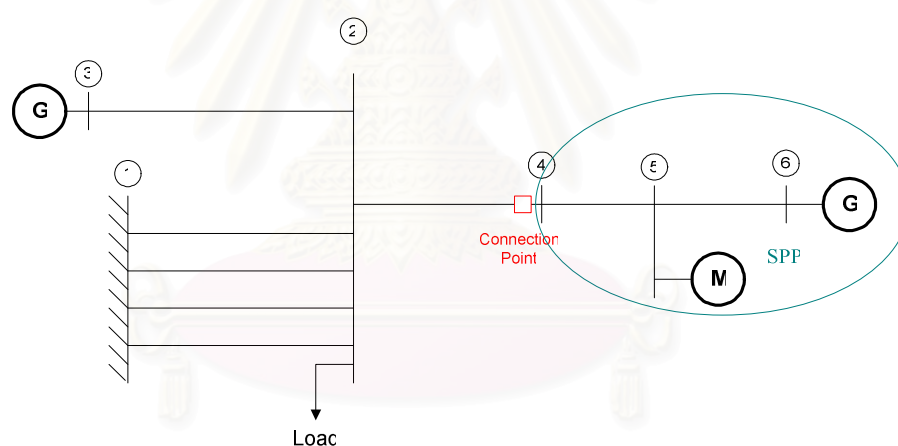
รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบผลตอบสนองของขนาดแรงดันกับค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2

จากผลการศึกษาในระบบทดสอบที่ 2 พบว่าตำแหน่งการเกิดลัดวงจรและการปลดสายส่งออกจากระบบที่ตำแหน่งต่างๆ กัน มีผลต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ โดยหากตำแหน่งดังกล่าวส่งผลให้ปริมาณและระยะทางการไหลของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความเสี่ยงในการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันมีมากขึ้นด้วย

นอกจากนั้น ผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วต่อการที่สายส่งเส้นสำคัญในการส่งกำลังไฟฟ้าไปสู่โหลดถูกปลดออกจากระบบ และสามารถใช้ระบุถึงความใกล้ไกลจุดวิกฤติ หรือความเสี่ยงของระบบต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ บัสที่พิจารณาได้เป็นอย่างดี

### 6.3 การเพิ่มโหลดภายนอกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กในระบบทดสอบที่ 3

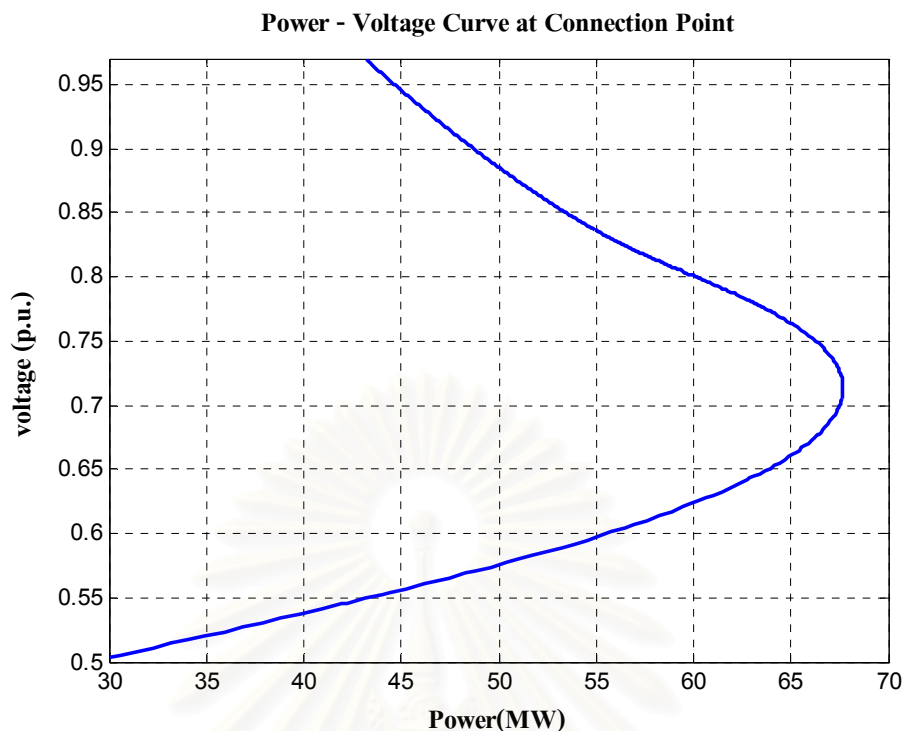
ระบบทดสอบที่ 3 จะทำการศึกษาวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดจากภายนอก โดยพิจารณาผลตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ บัสเชื่อมต่อกับระบบ ณ บัสที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 ระบบทดสอบที่ 3

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการเพิ่มโหลดภายนอกที่ต่ออยู่กับบัส 2 จนกระทั่งระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน จากนั้น เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กไปสู่ระบบส่งภายนอก ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6.17



**รูปที่ 6.17** ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่บัสเชื่อมต่อกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก

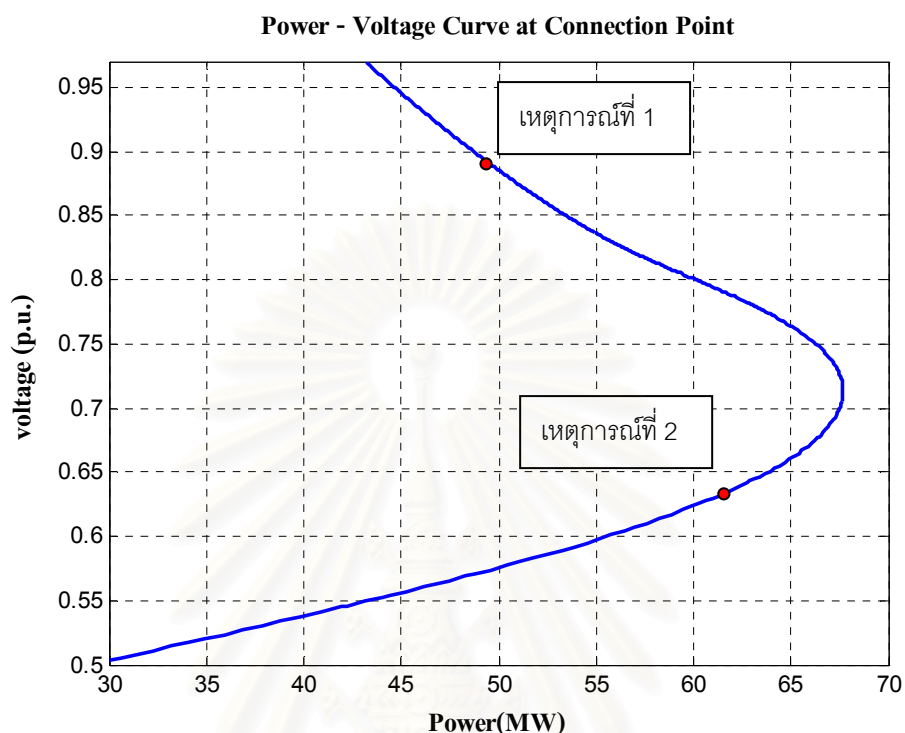
จากรูปที่ 6.17 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกสู่ภายนอกที่ได้จากการจำลองเชิงพลวัต มีลักษณะคล้ายกับ P-V Curve เช่นเดียวกับในระบบทดสอบที่ 1

- ทำการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีเพื่อใช้ชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ โดยอ้างอิงจากผลการทดสอบก่อนหน้านี ในรูปที่ 6.17 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 เหตุการณ์ ดังต่อไปนี้

**เหตุการณ์ที่ 1** ทำการเพิ่มโหลดตั้งแต่วันที่ 80 จนกระทั่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมีค่า 48 MW แล้วจึงหยุดเพิ่มโหลด ซึ่งจากรูปที่ 6.18 จะสังเกตเห็นว่าจุดทำงานของระบบตลอดการเกิดเหตุการณ์นี้ อยู่ด้านบนของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่มีเสถียรภาพ

**เหตุการณ์ที่ 2** ทำการเพิ่มโหลดตั้งแต่วันที่ 80 จนกระทั่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมีค่าเกินกว่า 68 MW แล้วจึงหยุดเพิ่มโหลด ซึ่งจากรูปที่ 6.18 จะ

สังเกตเห็นว่าจุดทำงานสิ้นสุดของเหตุการณ์นี้ อยู่ด้านล่างของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่สูญเสียเสถียรภาพ

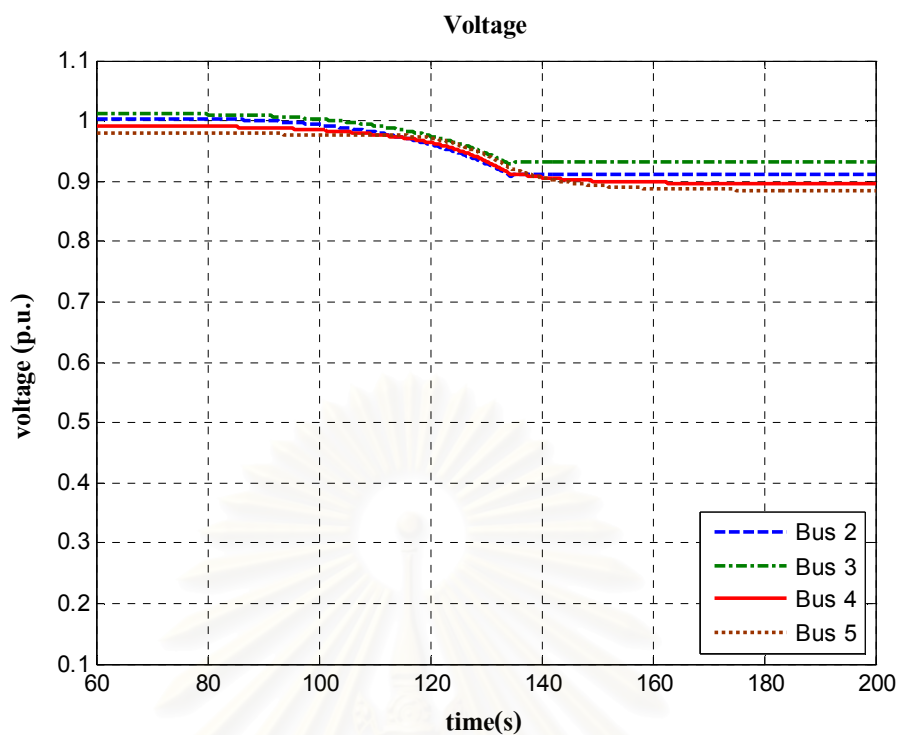


รูปที่ 6.18 ตำแหน่งที่หยุดการเพิ่มโหลดบริเวณภายนอกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

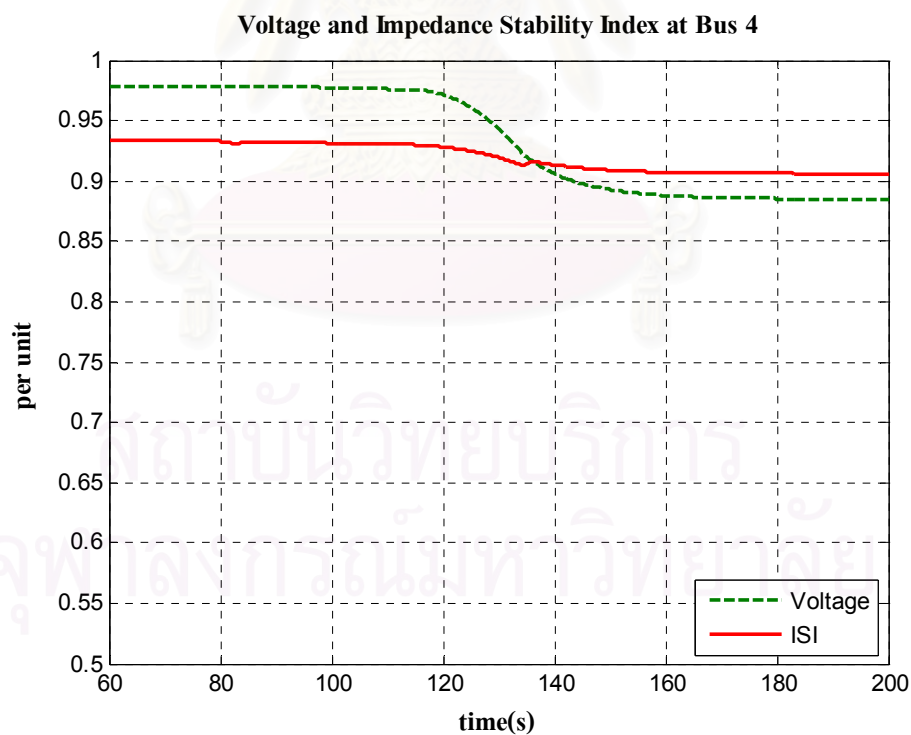
ลักษณะผลตอบแทนเวลาของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ในระบบ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ สำหรับการทดสอบในเหตุการณ์ที่ 1 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.19 และ 6.20 ส่วนลักษณะผลตอบแทนในเหตุการณ์ที่ 2 แสดงไว้ในรูปที่ 6.21 - 6.23 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

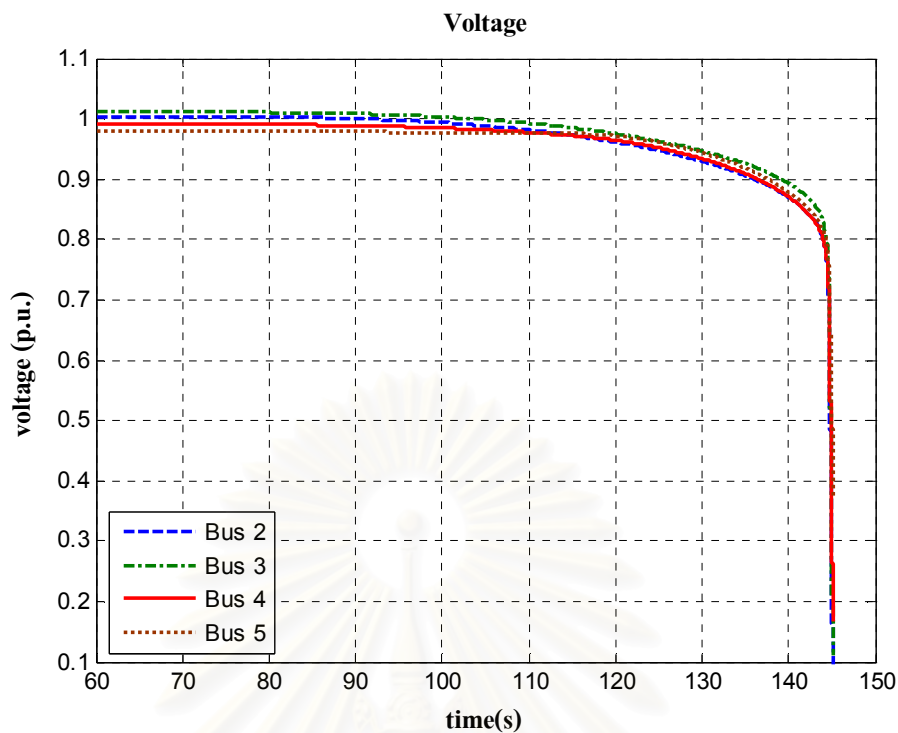




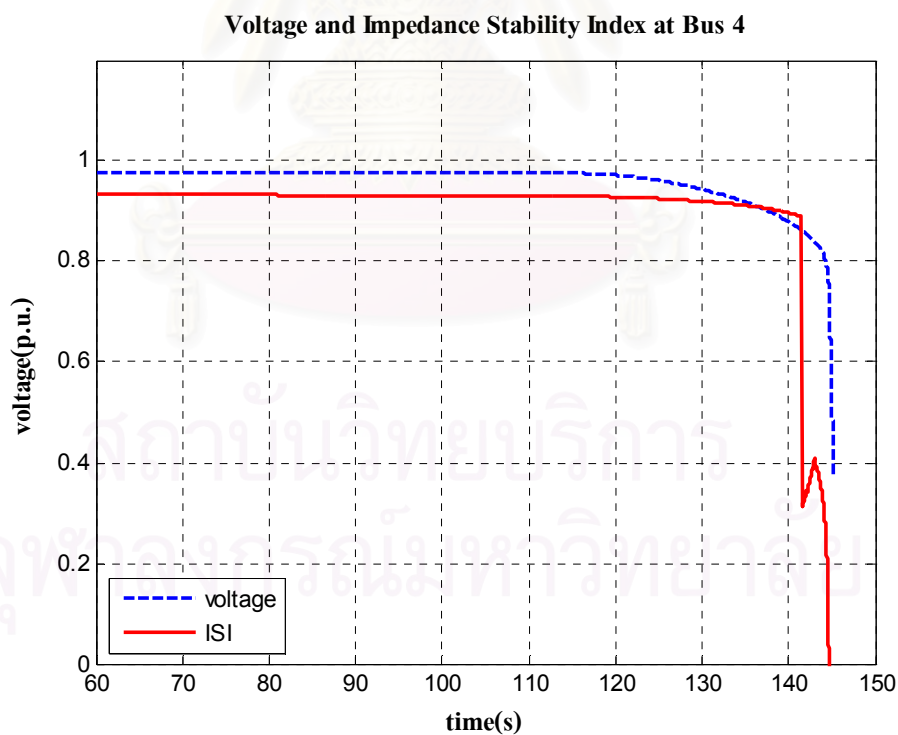
รูปที่ 6.19 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1



รูปที่ 6.20 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1

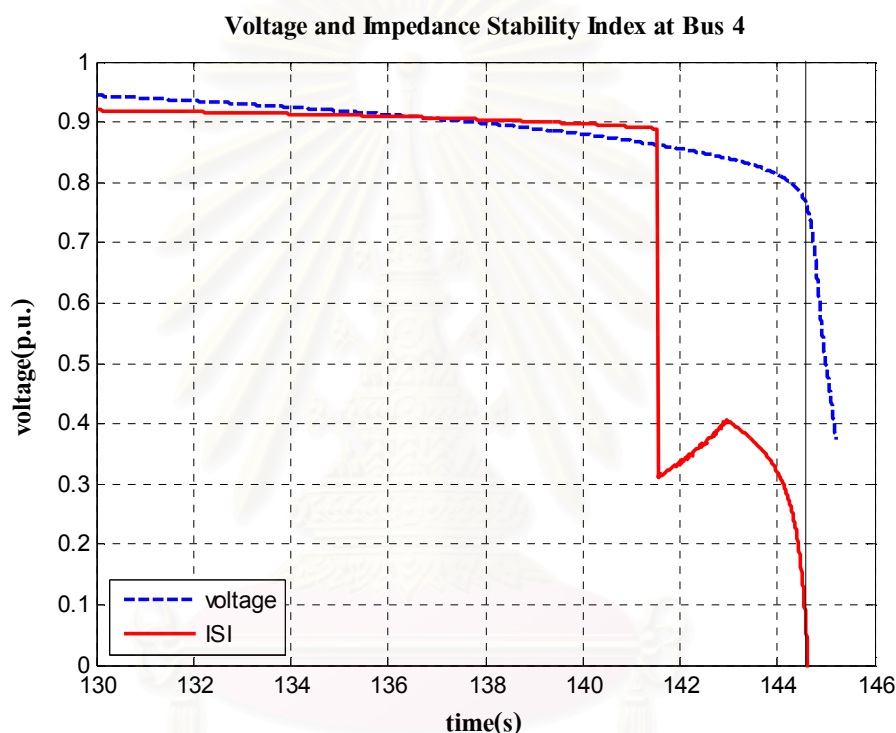


รูปที่ 6.21 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2



รูปที่ 6.22 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2

จากผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 6.19 - 6.22 ยังคงยืนยันสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ เพื่อใช้ในการระบุความเสี่ยงต่อปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ สำหรับระบบทดสอบที่ 3 ในลักษณะเช่นเดียวกันกับผลการศึกษาที่ระบบทดสอบที่ 1 ข้างต้น โดยสังเกตเห็นว่าในเหตุการณ์การรบกวนที่ 1 ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีค่าลดลงไม่มากนัก แสดงว่าการเพิ่มโหลดภายนอกที่ระดับที่ทดสอบนี้ ส่งผลต่อความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กไม่มากนัก เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้า ณ บัสเชื่อมต่อ



รูปที่ 6.23 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2 ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน

สำหรับการเพิ่มโหลดภายนอกในเหตุการณ์ที่ 2 ซึ่งส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุดนั้น จะเห็นว่าการตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ตอบสนองได้รวดเร็วกว่าขนาดแรงดันที่ลดลง เมื่อเข้าใกล้จุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน ดังแสดงให้เห็นเพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นในรูปที่ 6.23 ทั้งนี้ สังเกตว่าค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตั้งแต่ระบบกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางยูนิตเข้าสู่ขีดจำกัดความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแล้ว ในขณะที่ขนาดของแรงดันที่บัสดังกล่าวยังมีขนาดลดลงไม่มากนัก ซึ่งในกรณีนี้หากผู้ดูแลระบบพิจารณาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ด้วยก็อาจจะมีเวลาเพียงพอใน

การตัดสินใจแก้ไขปัญหาเสถียรภาพที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้ทันเวลา นอกจากนี้ในการศึกษากรณีนี้พบว่าค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ จุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดันมีค่าประมาณ 0.1 p.u.

จากผลการศึกษาในระบบทดสอบที่ 3 ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยเพียงแต่ลดความซับซ้อนของรายละเอียดภายในลง พบว่า ขั้นตอนวิธียังคงสามารถใช้ระบุถึงความใกล้ไกลจุดวิกฤติ หรือความเสี่ยงของระบบต่อการเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อได้เป็นอย่างดี

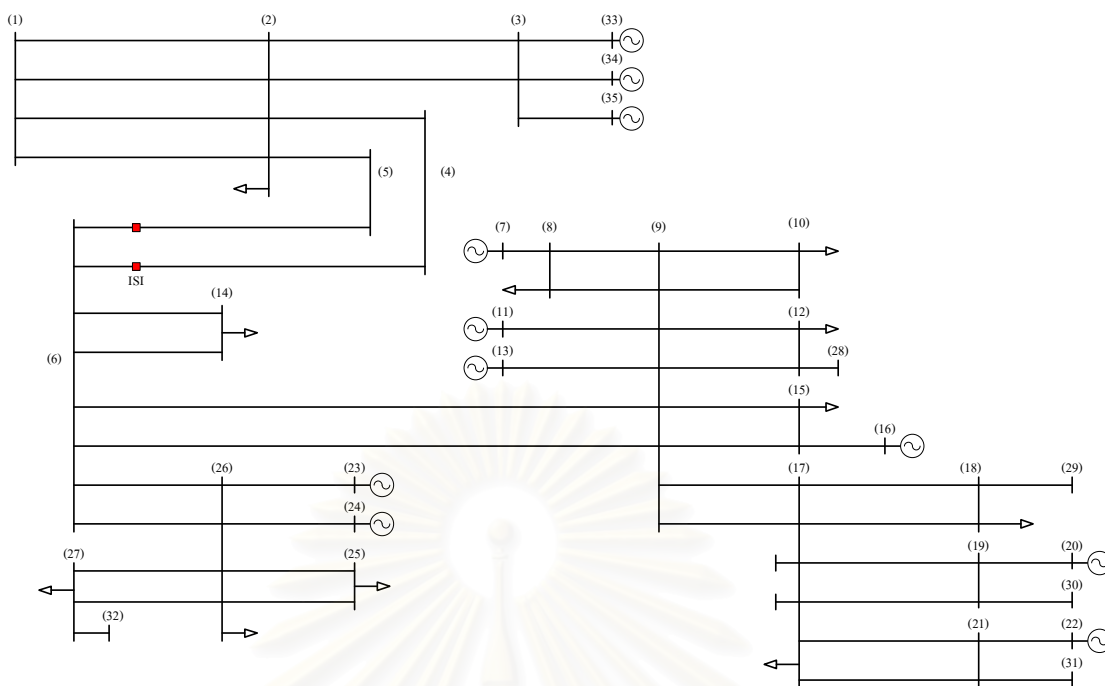
#### 6.4 การศึกษาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย

ในส่วนนี้จะนำหลักการและวิธีการทดสอบมาใช้ศึกษาบนแบบจำลองของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยโดยละเอียด ดังที่ได้อธิบายระบบไว้แล้วในบทที่ 5 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณีศึกษาหลัก คือ 1) ศึกษาการรบกวนด้วยการเพิ่มโหลดจากระบบส่งภายนอกในกรณีที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กเป็นปกติ 2) ศึกษาการรบกวนด้วยการเพิ่มโหลดจากระบบส่งภายนอกในกรณีที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอ่อนแอ

##### 6.4.1 กรณีศึกษาที่ 1 ศึกษาการรบกวนด้วยการเพิ่มโหลดจากระบบส่งภายนอกในกรณีที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กเป็นปกติ

ทำการศึกษาวิเคราะห์ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดจากภายนอก โดยพิจารณาผลตอบแทนของขนาดแรงดัน และผลตอบแทนของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ บัสเชื่อมต่อกับระบบ ณ บัสที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 6.24

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

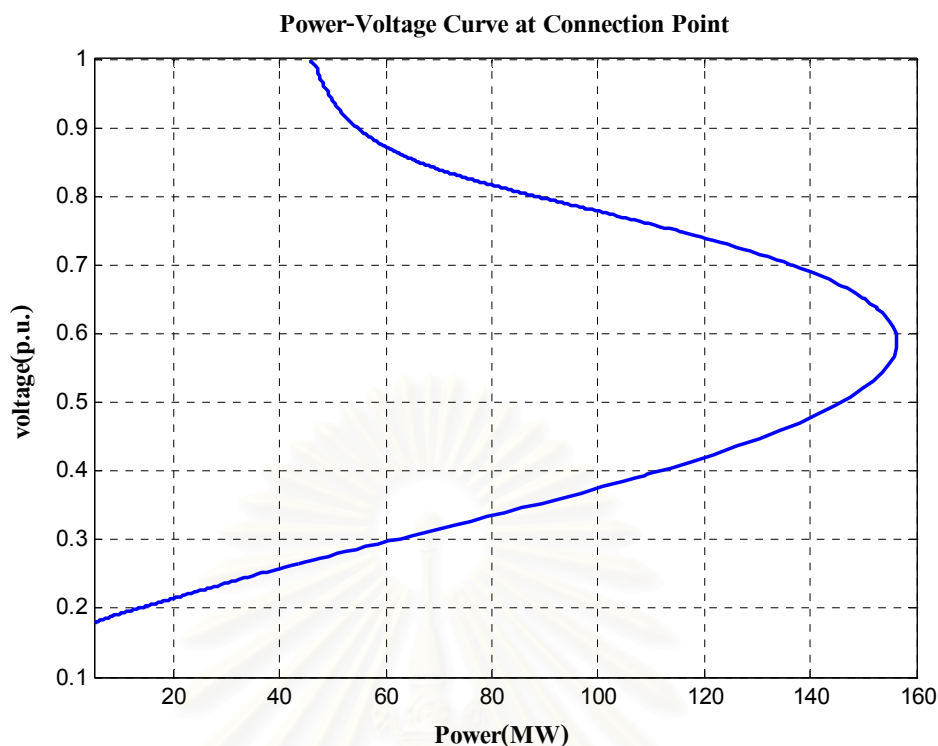


รูปที่ 6.24 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ในกรณีปกติ

#### ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการเพิ่มโหลดภายนอกที่ต่ออยู่กับบัส 2 ณ วินาทีที่ 100 จนกระทั่งระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน จากนั้นเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยไปสู่ระบบส่งภายนอก ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6.25

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

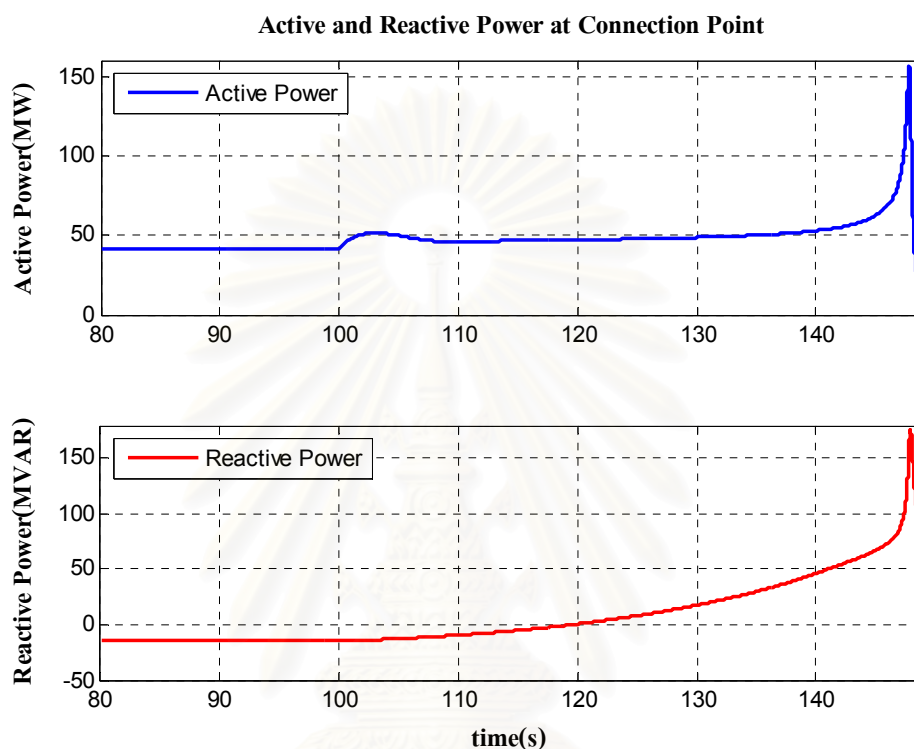


รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ (บัส 6) กับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทย

จากรูปที่ 6.25 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกสู่ภายนอกที่ได้จากการจำลองเชิงพลวัต ยังคงมีลักษณะคล้ายกับ P-V Curve เช่นเดียวกับผลที่ได้ในระบบทดสอบที่ 3 โดยจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า หากพิจารณา ณ จุดทำงานระบบที่ใช้ทดสอบก่อนเกิดการรบกวน เมื่อโหลดจากภายนอกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องแล้วระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยมีความสามารถในการส่งกำลังไฟฟ้าจริงออกสู่ภายนอกได้สูงถึงประมาณ 150 MW ที่ขนาดแรงดัน ณ บัสเชื่อมต่อมีค่าลดลงมาที่ 0.6 p.u. ก่อนที่ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยจะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน

อย่างไรก็ดีพบว่าปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟออกสู่ภายนอก อันเนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอกนี้จะมีลักษณะการเพิ่มขึ้นจากค่าปกติก่อนการรบกวนอย่างค่อยเป็นค่อยไป ตั้งแต่วินาทีที่ 100 จนถึงวินาทีที่ 145 ระยะเวลาดังกล่าวขึ้นกับอัตราการเพิ่มขึ้นของโหลดจากภายนอกด้วย จากนั้น ปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงค่อยเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และนำไปสู่การสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน ภายในระยะเวลาอันสั้น 1-3 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 6.26

นอกจากนี้ ยังพบว่าในขณะที่มีการเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลออกสู่ภายนอกนี้ ขณะเดียวกันก็ส่งผลทำให้โหลดมอเตอร์ส่วนใหญ่ภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยได้รับกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน

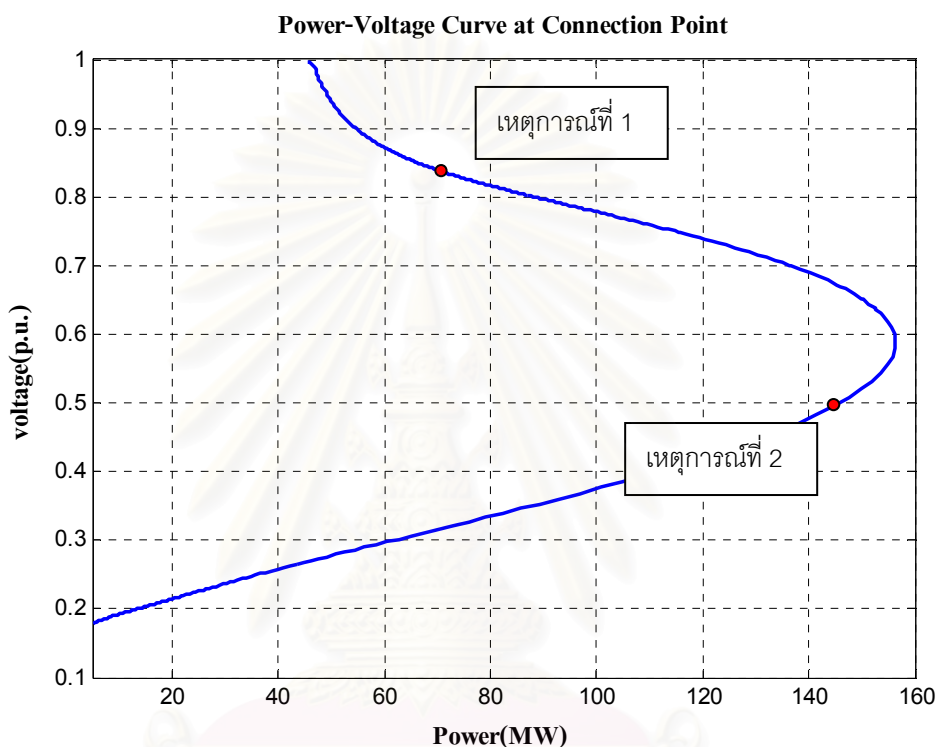


**รูปที่ 6.26** ผลตอบสนองของการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลออกสู่ภายนอก อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดภายนอกในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก

2. ทำการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีเพื่อใช้ชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบ โดยอ้างอิงจากการทดสอบก่อนหน้านี ในรูปที่ 6.25 โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 เหตุการณ์ ดังต่อไปนี้

**เหตุการณ์ที่ 1** ทำการเพิ่มโหลดภายนอกตั้งแต่วันที่ 100 จนกระทั่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยมีขนาดเท่ากับ 70 MW แล้วจึงหยุดเพิ่มโหลด ซึ่งจากรูปที่ 6.27 จะสังเกตเห็นว่าจุดทำงานของระบบตลอดการเกิดเหตุการณ์นี้ อยู่ด้านบนของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่มีเสถียรภาพเชิงแรงดัน

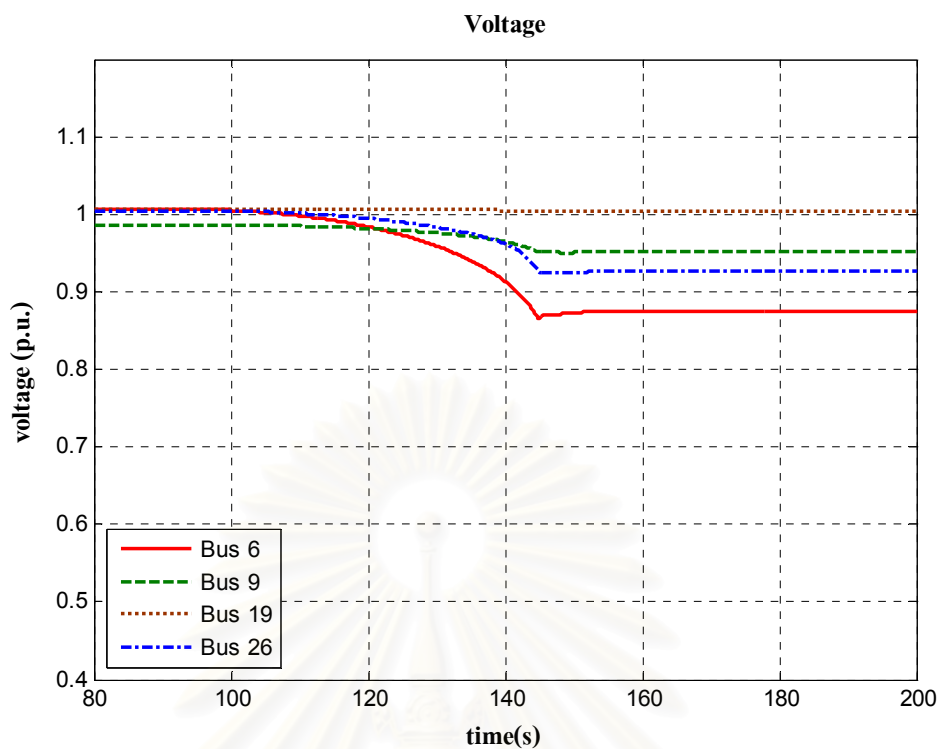
**เหตุการณ์ที่ 2** ทำการเพิ่มโหลดตั้งแต่วันที่ 100 จนกระทั่งกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลออกจากระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทย มีค่าเกินกว่า 150 MW แล้วจึงหยุดเพิ่มโหลด ซึ่งจากรูปที่ 6.27 จะสังเกตเห็นว่าจุดทำงานสิ้นสุดของเหตุการณ์นี้ อยู่ด้านล่างของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งเป็นช่วงการทำงานที่สูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดัน



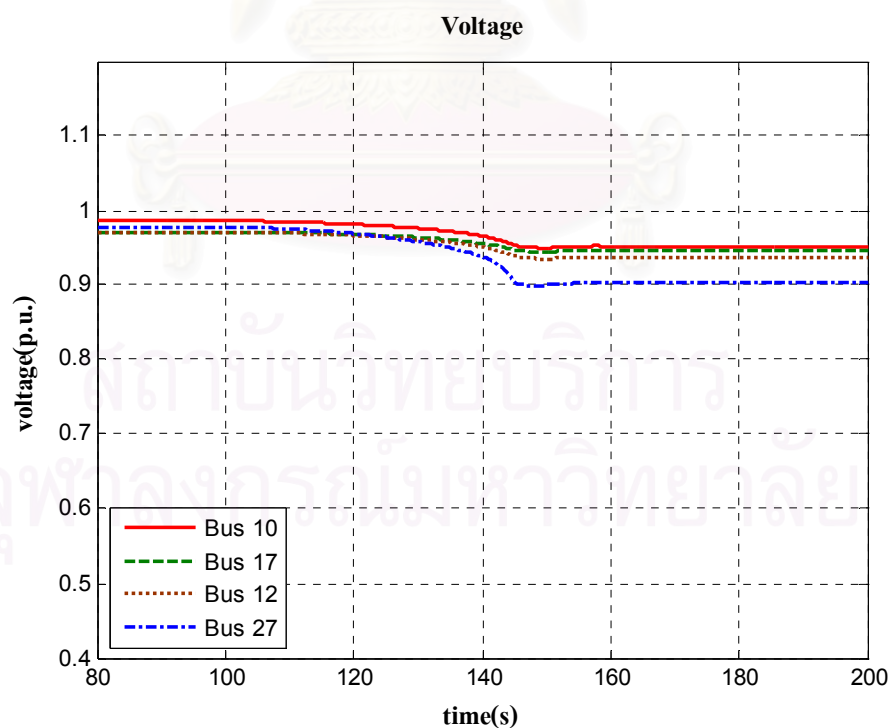
**รูปที่ 6.27** ตำแหน่งที่หยุดการเพิ่มโหลดจากภายนอกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในเหตุการณ์ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ลักษณะผลตอบแทนเวลาของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย บัสภายนอกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ จุดเชื่อมต่อ สำหรับการทดสอบในเหตุการณ์ที่ 1 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.28 – 6.31 ส่วนลักษณะผลตอบแทนในเหตุการณ์ที่ 2 แสดงไว้ในรูปที่ 6.32 – 6.36 ตามลำดับ

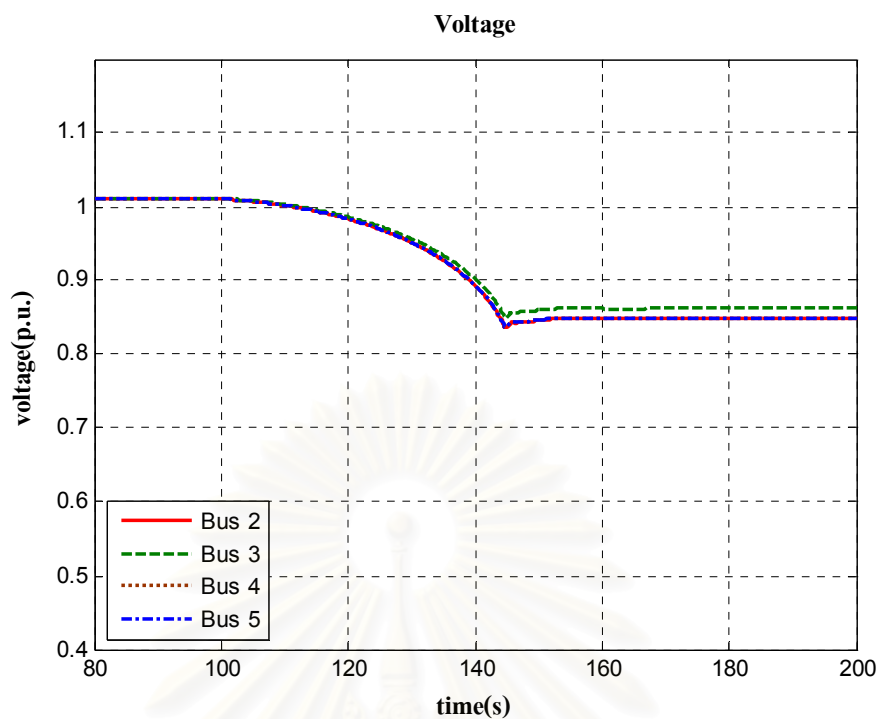




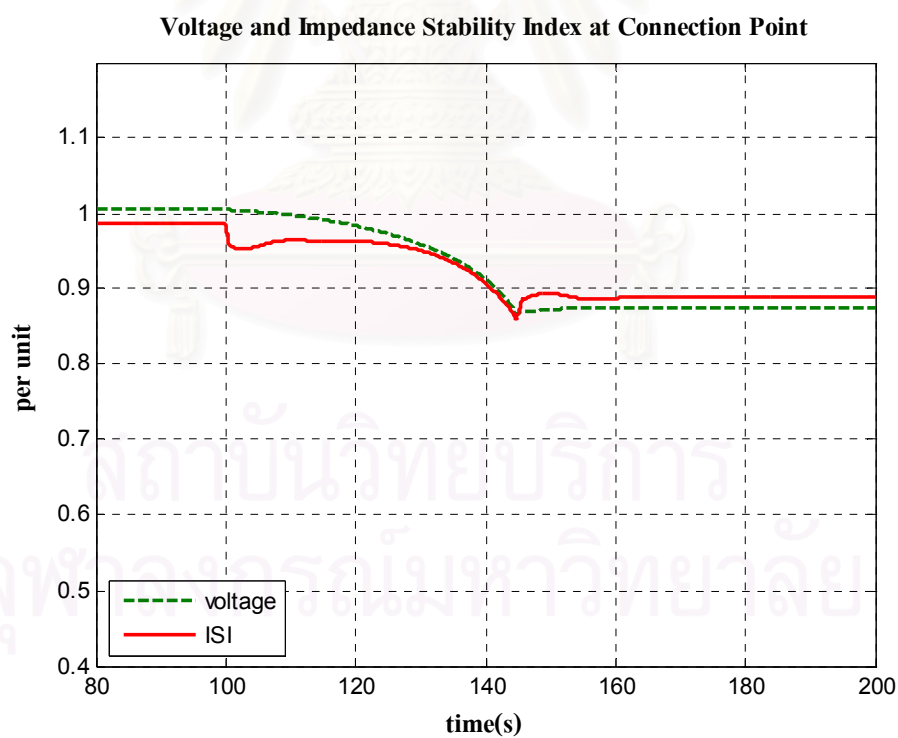
รูปที่ 6.28 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน รายเล็กจริงในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 1



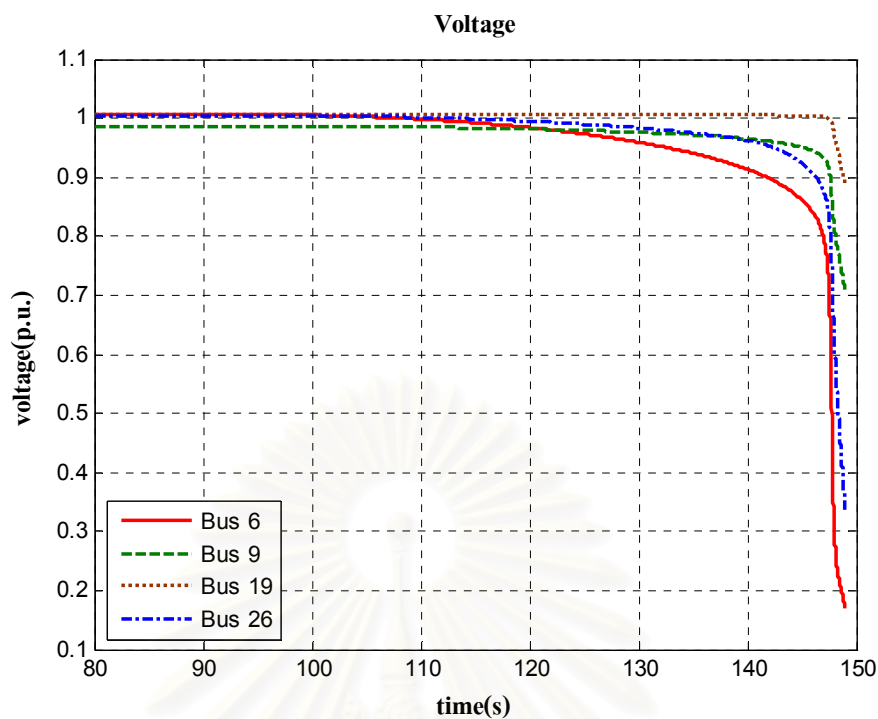
รูปที่ 6.29 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน รายเล็กจริงในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 1 (ต่อ)



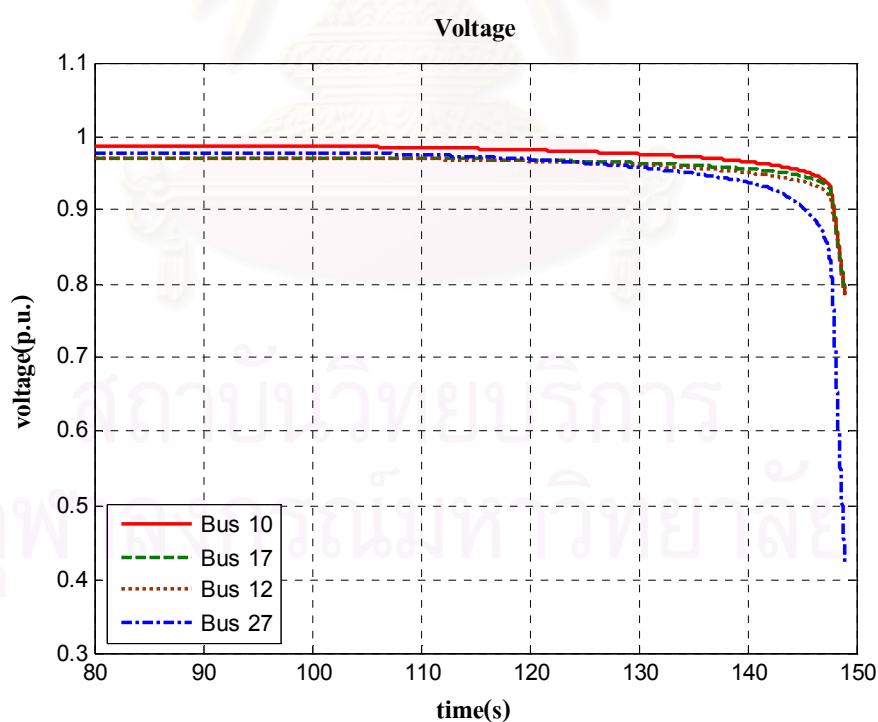
รูปที่ 6.30 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 1



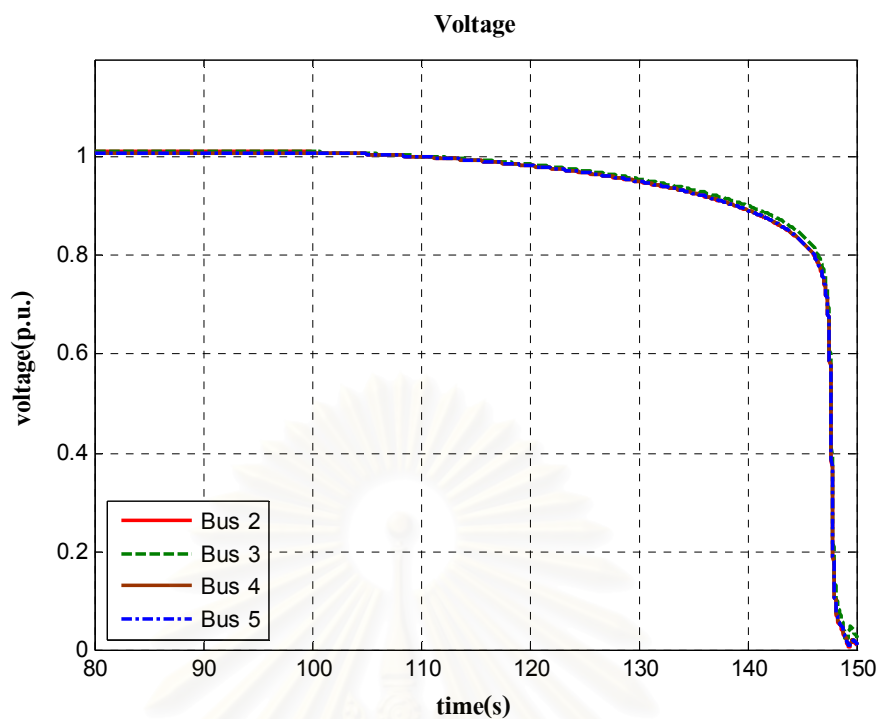
รูปที่ 6.31 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 1



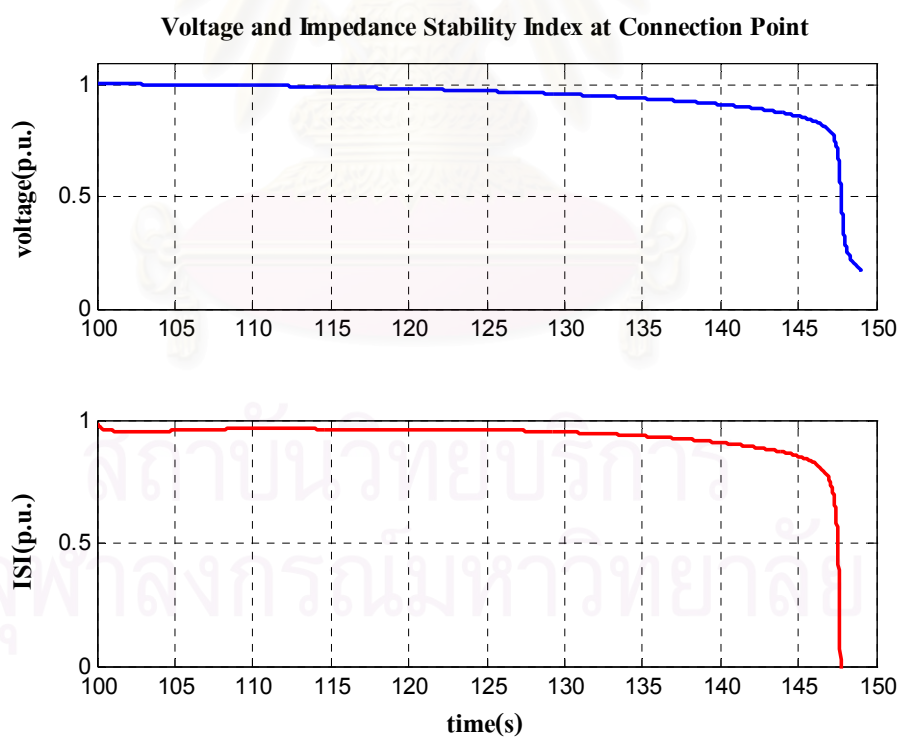
รูปที่ 6.32 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน รายเล็กจริงในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 2



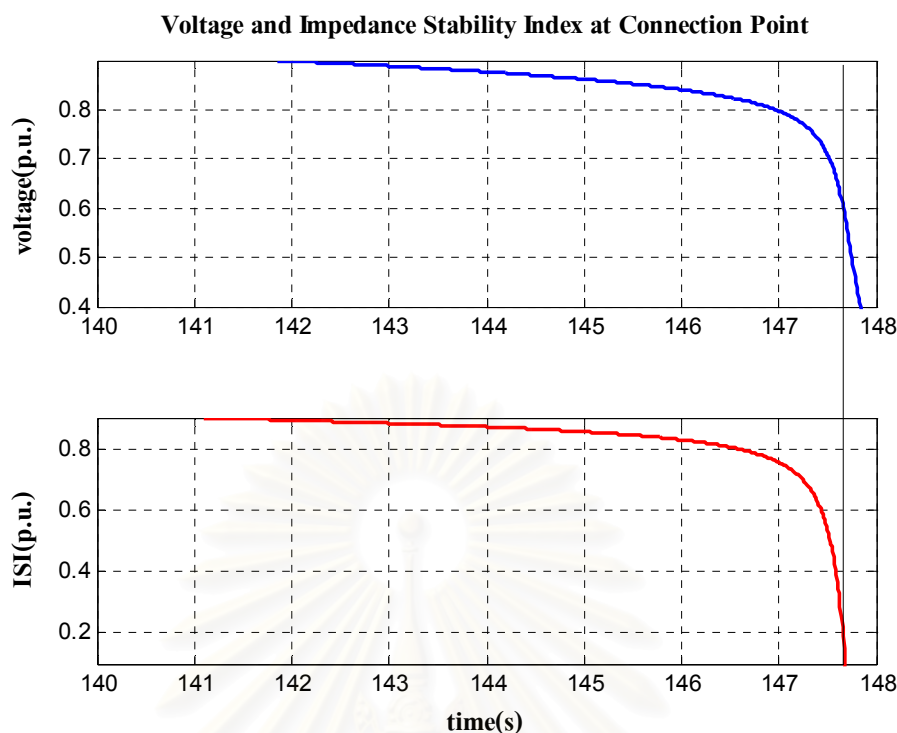
รูปที่ 6.33 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชน รายเล็กจริงในประเทศไทย ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 2 (ต่อ)



รูปที่ 6.34 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ภายใต้การรบกวนเหตุการณ์ที่ 2



รูปที่ 6.35 ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2



**รูปที่ 6.36** ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อ และค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน ภายใต้การรบกวนในเหตุการณ์ที่ 2

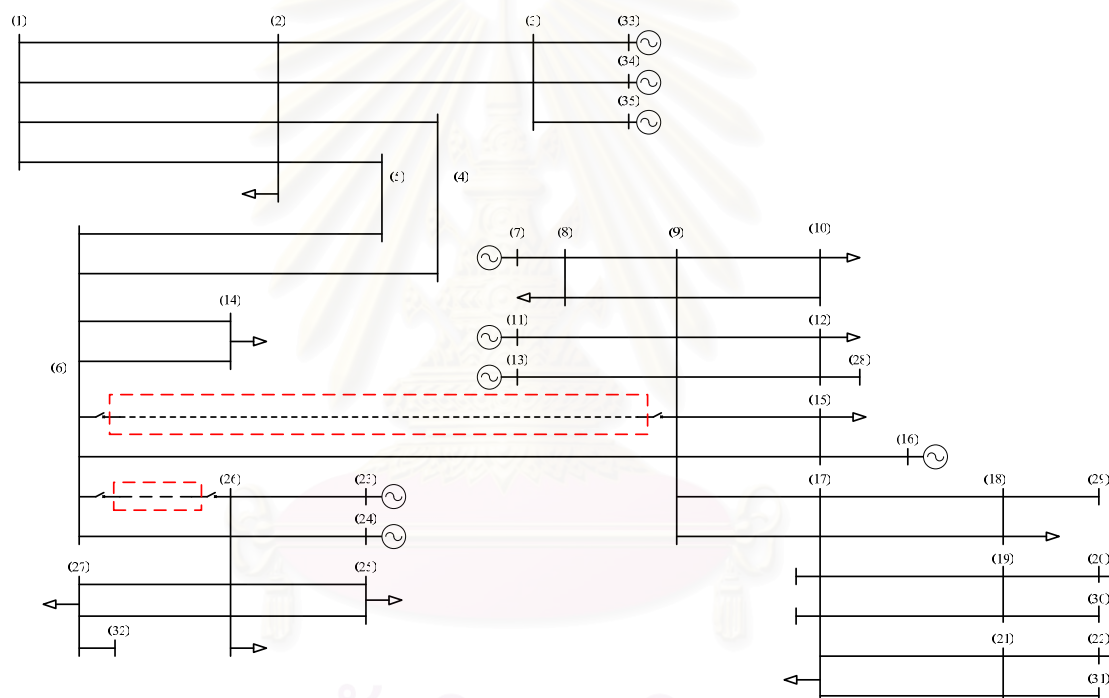
จากผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 6.28 – 6.36 ยังคงยืนยันสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ เพื่อใช้ในการระบุความเสี่ยงต่อปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย อันเนื่องมาจากการรบกวนจากภายนอก ในลักษณะเช่นเดียวกันกับผลการศึกษาจากระบบทดสอบที่ 3 โดยสังเกตเห็นว่าในเหตุการณ์การรบกวนที่ 1 เมื่อการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงออกจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยมีค่าไม่เกิน 70 MW ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ บัสเชื่อมต่อมีค่าลดลงไม่มากนัก แสดงว่า การเพิ่มโหลดภายนอกยังคงไม่ส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้าภายในระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยมากนัก

อย่างไรก็ดี สำหรับการเพิ่มโหลดภายนอกในเหตุการณ์ที่ 2 ส่งผลให้ระบบสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุด จะเห็นว่าการตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ตอบสนองได้รวดเร็วกว่าขนาดแรงดันที่ลดลง เมื่อเข้าไปใกล้จุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน ดังแสดงให้เห็นเพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นในรูปที่ 6.36 โดยมีลักษณะการลดลงของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ เทียบกับเวลา คล้ายคลึงกับลักษณะการลดลงของขนาดแรงดัน ณ บัสเชื่อมต่อนั้น

นอกจากนี้ หากพิจารณาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ จุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน พบว่า มีค่าประมาณ 0.2 p.u.

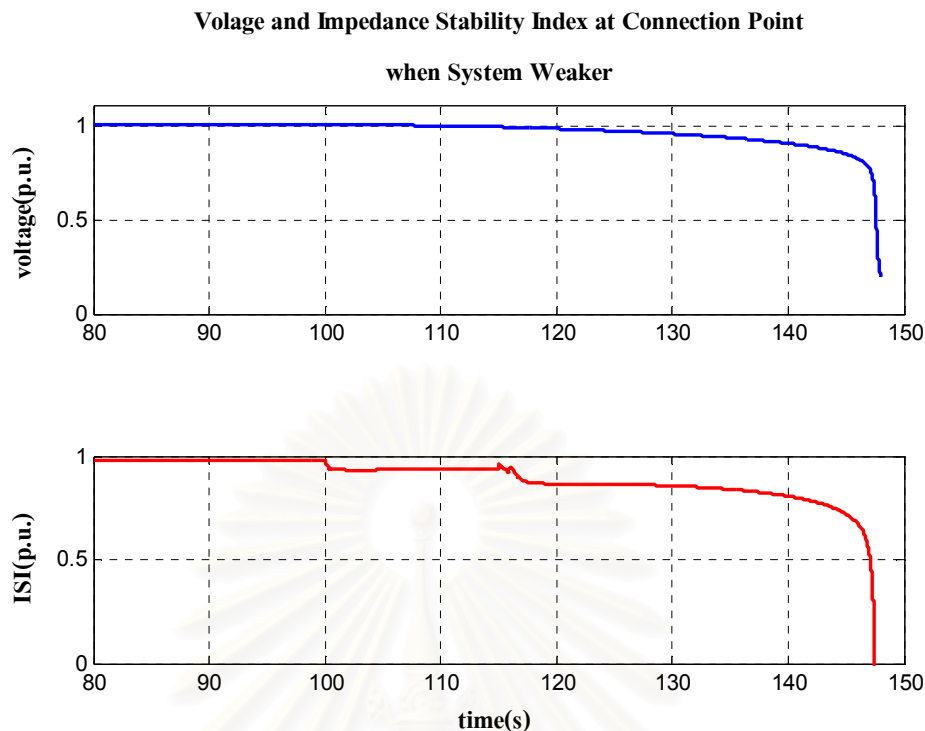
#### 6.4.2 กรณีศึกษาที่ 2 ศึกษาการรบกวนด้วยการเพิ่มโหลดจากระบบส่งภายนอกในกรณีที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอ่อนแอ

ในกรณีศึกษาที่ 2 มีขั้นตอนการทดสอบเช่นเดียวกับเหตุการณ์ที่ 2 ในขั้นตอนที่ 2 ในกรณีศึกษาที่ 1 แตกต่างกันเพียงการเพิ่มการจำลองให้ระบบไฟฟ้าภายในระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยอ่อนแอ ด้วยการปลดสายส่งเชื่อมโยงแบบวงจรขนาน 2 วงจร ออกจำนวน 2 เส้น ดังแสดงภาพประกอบไว้ในรูปที่ 6.37 ที่วินาทีที่ 115



รูปที่ 6.37 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย กรณีระบบภายในอ่อนแอ

วัตถุประสงค์หลักในการศึกษานี้เพื่อทดสอบว่าหากระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยอ่อนแออย่างมีนัยสำคัญแล้ว ผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ต่อการปลดสายส่งภายในระบบผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยออกมีลักษณะเป็นเช่นไร



**รูปที่ 6.38** ผลตอบสนองของขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพ  
เชิงอิมพีแดนซ์

จากผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 6.38 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยอ่อนแอลง คือ เมื่อสายส่ง 2 เส้นถูกปลดออกจากระบบในวินาทีที่ 115 พบว่าผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงทันทีเนื่องจากขนาดของเทวินินอิมพีแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลตอบสนองของแรงดันที่บัสเชื่อมต่อยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งการตอบสนองดังกล่าวจะช่วยให้ผู้ดูแลระบบมีเวลาเพียงพอในการตัดสินใจแก้ไขปัญหาเสถียรภาพที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้ทันเวลา

จากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าหากระบบมีการเปลี่ยนแปลงที่นำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน เช่น การเข้าสู่ขีดจำกัดของระบบควบคุมแรงดัน การที่สายส่งถูกปลดออกจากวงจร เป็นต้น ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน และไม่แสดงให้เห็นถึงการดำเนินงานที่ผิดพลาดในสภาวะปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของขั้นตอนวิธีได้เป็นอย่างดี

## บทที่ 7

### การวิเคราะห์ผลและการประยุกต์ใช้ในระบบจริง

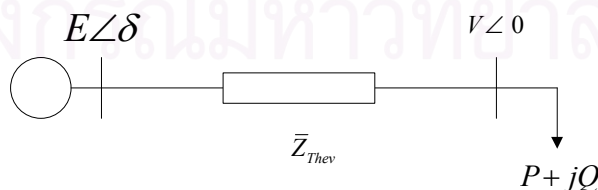
ในบทนี้ได้นำผลจากบทที่ 6 มาวิเคราะห์และหาช่วงเฟื่อที่เหมาะสมสำหรับใช้กับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก และได้นำช่วงเฟื่อดังกล่าวไปทดสอบเพิ่มเติมในแบบจำลองของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก รวมทั้งยังได้นำเสนอวิธีการหาค่าส่งไฟฟ้าที่สามารถส่งได้แบบเวลาจริง โดยนำพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากวงจรสมมูลเทวินินมาใช้ นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ถึงผลของช่วงเวลาที่ใช้ในการสุ่มสัญญาณขาเข้าต่อสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นอีกด้วย

#### 7.1 การกำหนดช่วงเฟื่อสำหรับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์

จากผลการทดสอบในบทที่ 6 พบว่า ณ จุดส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีค่ามากกว่า 0 p.u. อยู่เล็กน้อย ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าหากต้องการนำขั้นตอนวิธีในการคำนวณหาดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ไปประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับระบบส่งหลักควรมีการกำหนดช่วงเฟื่อให้กับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์เพื่อให้ขั้นตอนวิธีมีความถูกต้องและเหมาะสมในการตัดสินใจแยกตัวเป็นอิสระของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงออกจากระบบส่งหลักมากขึ้น

##### 7.1.1 การวิเคราะห์เพื่อหาช่วงเฟื่อของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์

ในหัวข้อนี้ได้ทำการพิจารณาที่มาของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์โดยละเอียด จากนั้นจะชี้ให้เห็นถึงความไม่สมบูรณ์บางประการของดัชนีชี้วัดดังกล่าว และนำไปสู่การกำหนดช่วงเฟื่อต่อไป



รูปที่ 7.1 โหลดบัสและวงจรสมมูลเทวินินของระบบไฟฟ้า



จากรูปที่ 7.1 กำหนดให้บัสต้นทางมีค่า  $E \angle \delta$  ขณะที่บัสปลายทางมีค่า  $V \angle 0$  และในขณะนั้นโหลด ณ บัสปลายทางมีค่า  $P + jQ$  เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวแทนลงในสมการ (2.28) ในบทที่ 2 จะได้

$$(P + jQ)\bar{Z}_{Thev}^* = V(E \angle \delta - V)^*$$

หรืออาจเขียนใหม่ได้

$$(P + jQ)\bar{Z}_{Thev}^* = V\{(E \cos \delta - V) - jE \sin \delta\} \quad (7.1)$$

จากสมการ (7.1) จะได้

$$V^2 \{(E \cos \delta - V)^2 + (E \sin \delta)^2\} = |S|^2 |\bar{Z}_{Thev}|^2 \quad (7.2)$$

เมื่อกระจายเทอมในวงเล็บในสมการ (7.2) จะได้

$$V^2 (E^2 + V^2 - 2EV \cos \delta) = |S|^2 |\bar{Z}_{Thev}|^2 \quad (7.3)$$

เอา  $V^2$  คูณกระจายในสมการ (7.3) จะได้

$$V^4 - (2E \cos \delta)V^3 + E^2V^2 - |S|^2 |\bar{Z}_{Thev}|^2 = 0 \quad (7.4)$$

แทนค่า  $|S| = \frac{V^2}{|\bar{Z}_{app}|}$  ลงในสมการ (7.4) จะได้

$$V^4 - (2E \cos \delta)V^3 + E^2V^2 - V^4 \frac{|\bar{Z}_{Thev}|^2}{|\bar{Z}_{app}|^2} = 0 \quad (7.5)$$

จากสมการ (7.5) เขียนในรูปสมการกำลัง 2 ได้ดังสมการ (7.6)

$$V^2 \left\{ \left( 1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|^2}{|\bar{Z}_{app}|^2} \right) V^2 - (2E \cos \delta)V + E^2 \right\} = 0 \quad (7.6)$$

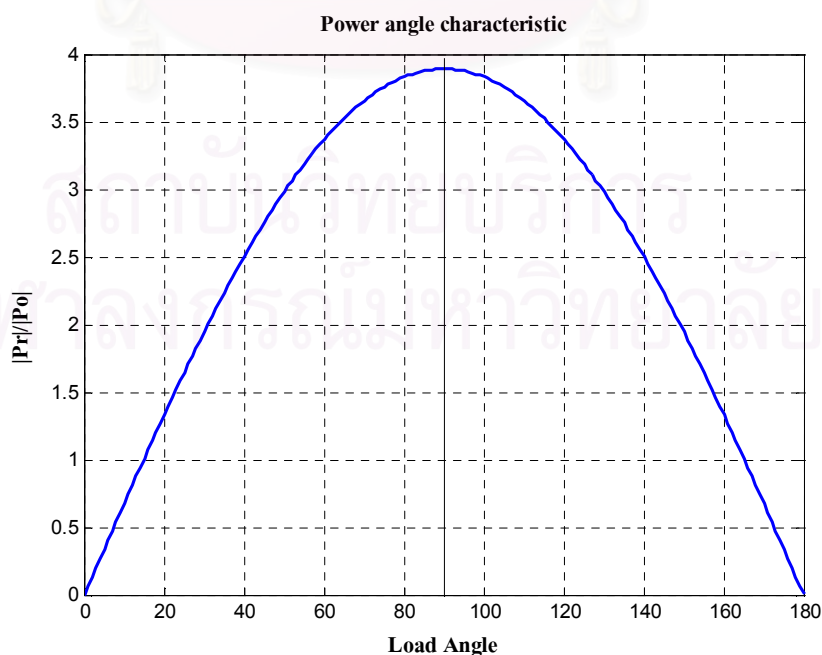
จากสมการ (7.6) จุด bifurcation เกิดขึ้นเมื่อ

$$(2E \cos \delta)^2 - 4 \left( 1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|^2}{|\bar{Z}_{app}|^2} \right) E^2 = 0$$

$$\frac{|\bar{Z}_{Thev}|^2}{|\bar{Z}_{app}|^2} = (1 - \cos \delta)^2 \quad (7.7)$$

จากสมการ (7.7) จะได้ว่า  $|\bar{Z}_{Thev}|^2 = |\bar{Z}_{app}|^2 (\sin \delta)^2$  และ  $V = E \cos \delta / \left( 1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|^2}{|\bar{Z}_{app}|^2} \right)$

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ณ จุดซึ่งเป็นจุดวิกฤตเสถียรภาพเชิงแรงดัน  $|\bar{Z}_{Thev}| = |\bar{Z}_{app} \sin \delta|$  ซึ่งสมการนี้จะเป็นจริง ณ จุดที่เป็นจุดวิกฤตเสถียรภาพเชิงแรงดันเท่านั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สมการนี้จะเป็นจริงเฉพาะจุดซึ่งความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดันต้นทางและปลายทางเป็นค่า ณ จุดวิกฤตเสถียรภาพเชิงแรงดัน หรือความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดันวิกฤต ( $\delta_{Critical}$ ) นั้นเอง แต่ในดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ กำหนดให้ ณ จุดซึ่งเป็นจุดวิกฤตเสถียรภาพเชิงแรงดัน  $|\bar{Z}_{Thev}| = |\bar{Z}_{app}|$  เนื่องจากว่าหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดัน (P- $\delta$  Curve) ในรูปที่ 7.2 พบว่าหากผลของผลของความต้านทาน ณ จุดส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดันจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา (sin(90) = 1)



รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดัน

แต่โดยปกติแล้วความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดัน ณ จุดส่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีค่าไม่ถึง 90 องศา จุดนี้จึงเป็นความไม่สมบูรณ์ของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ซึ่งสามารถนำเหตุผลดังกล่าวไปใช้ในการหาช่วงเฝ้าได้ ดังนี้

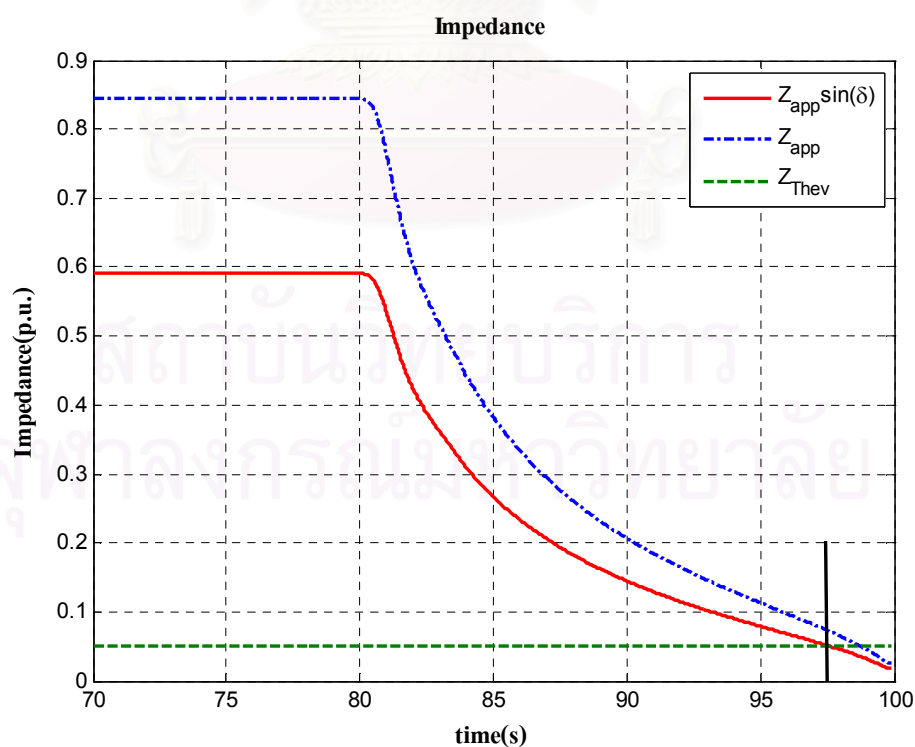
หากพิจารณาโดยใช้สมการที่คล้ายกับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์จะได้ว่า

$$ISI(\delta) = \frac{(|\bar{Z}_{app} \sin \delta| - |\bar{Z}_{Thev}|)}{|\bar{Z}_{app} \sin \delta|}$$

หรือ อาจเขียนให้ง่ายลงได้

$$ISI(\delta) = 1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app} \sin \delta|}$$

ซึ่งหากนำดัชนี  $ISI(\delta)$  ไปใช้จะพบว่า จะเข้าใกล้ 0 ก่อน  $ISI$  เนื่องจากความแตกต่างระหว่างมุมของแรงดันวิกฤตในระบบจริงจะมีค่าน้อยกว่า 90 องศา นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับเวลา

จากรูปที่ 7.3 หากจุดวิกฤตเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้างกล่าว คือ จุดที่  $|\bar{Z}_{Thev}| = |\bar{Z}_{app} \sin \delta|$  พบว่าหากคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ จุดดังกล่าวแล้ว ค่าที่ได้จะมากกว่าศูนย์อยู่เล็กน้อย เนื่องจาก  $|\bar{Z}_{app}|$  มีค่ามากกว่า  $|\bar{Z}_{Thev}|$  ดังนั้น ที่จุดวิกฤตเสถียรภาพเชิงแรงดันพบว่า

$$ISI(\delta) + \varepsilon = ISI \quad (7.8)$$

หากแทนค่า  $ISI(\delta) = 0$  และ  $ISI = 1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app}|}$  ลงในสมการ (7.8) จะได้ว่า

$$0 + \varepsilon = 1 - \frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app}|} \quad (7.9)$$

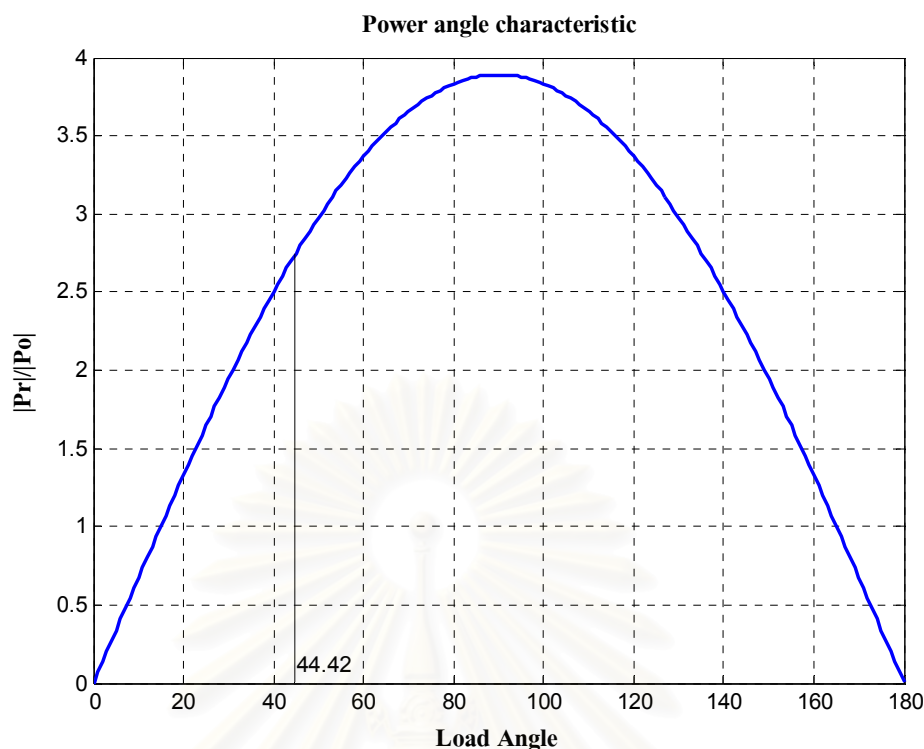
ในการคำนวณหาค่า  $\varepsilon$  ในสมการ (7.9) นั้นจำเป็นต้องทราบค่า  $\frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app}|}$  ซึ่งค่าดังกล่าวได้มา

จาก  $|\bar{Z}_{Thev}| = |\bar{Z}_{app} \sin \delta|$  คือ  $\frac{|\bar{Z}_{Thev}|}{|\bar{Z}_{app}|} = |\sin \delta|$  แทนค่าดังกล่าวลงในสมการ (7.9) จะได้

$$\varepsilon = 1 - |\sin \delta| \quad (7.10)$$

ซึ่งสมการ (7.10) จะถูกใช้ในการคำนวณหาช่วงต่อไปนี้

เมื่อทำการพิจารณาค่าความแตกต่างระหว่างมุมวิกฤตในระบบไฟฟ้างกำลังจะพบว่าค่าดังกล่าวย่อมมีค่าแตกต่างกันไปตามสถานการณ์และโครงสร้างของระบบจึงเป็นการยากที่จะกำหนดค่าความแตกต่างระหว่างมุมวิกฤตที่แน่นอนได้ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทดลองนำค่าความแตกต่างระหว่างมุมของบัสต้นทางและปลายทางที่ใช้เป็นช่วงเพื่อสำหรับเสถียรภาพของสายส่ง [1] มาใช้ในการกำหนดช่วงเพื่อสำหรับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ โดยค่าดังกล่าว คือ ค่า  $\delta = 44.42$  ดังแสดงในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 ความแตกต่างระหว่างมุมที่นำมาใช้ในการกำหนดช่วงเพื่อ

$$\varepsilon = 1 - \sin(44.42) = 0.3 \quad (7.11)$$

จากสมการ (7.11) พบว่าหากนำค่า  $\delta = 44.42$  มาใช้ในการวิเคราะห์หาช่วงเพื่อสำหรับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะมีค่าประมาณ 0.3 p.u. ซึ่งในหัวข้อต่อไปได้นำค่าดังกล่าวไปใช้ในการพิจารณาเพื่อแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบส่งไฟฟ้าหลัก

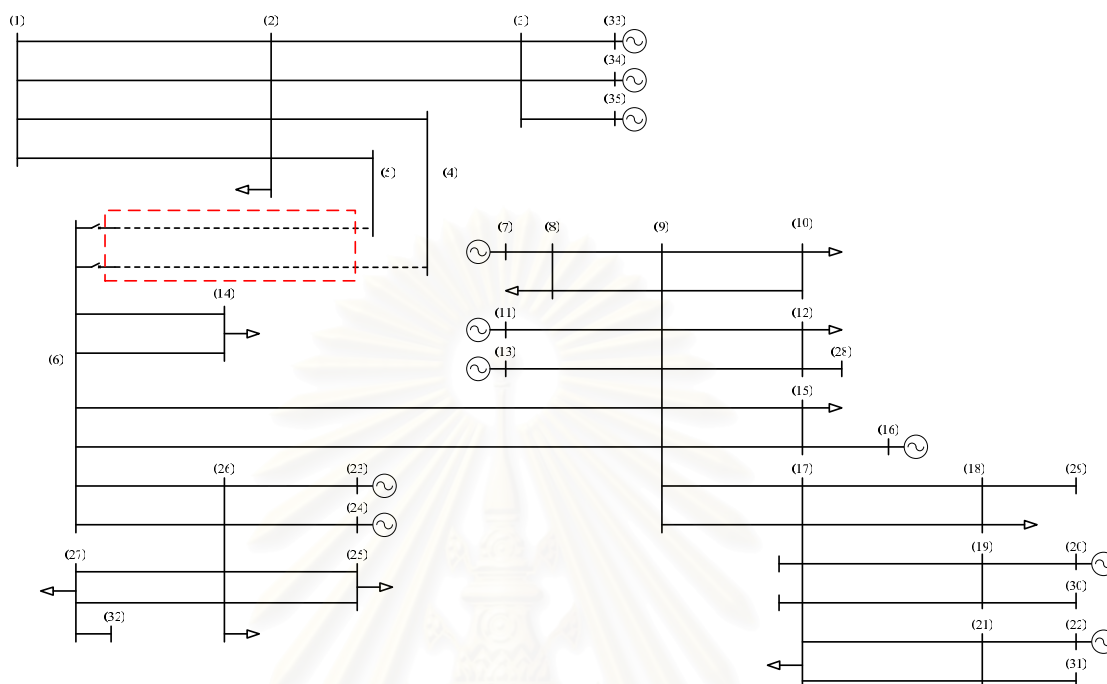
### 7.1.2 ตัวอย่างการนำช่วงเพื่อไปประยุกต์ใช้ในการแยกตัวของระบบไฟฟ้ากำลัง

ในส่วนนี้ได้นำค่า 0.3 p.u. มาใช้เป็นช่วงเพื่อในการพิจารณาเพื่อแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กออกจากระบบส่งไฟฟ้าหลัก ทั้งในสภาวะปกติและเมื่อระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอ่อนแอลง

#### 7.1.2.1 การแยกตัวเป็นอิสระในสภาวะที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยเป็นปกติ

ในการทดสอบทำโดยจำลองเหตุการณ์ในลักษณะเช่นเดียวกับเหตุการณ์ที่ 2 ในหัวข้อ 6.4.1 ในบทที่ 6 แต่แตกต่างกันตรงที่ จะทำการแยกตัวเมื่อค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ มีค่าประมาณ 0.3 p.u. ดังแสดงภาพประกอบไว้ในรูปที่ 7.5 ทั้งนี้ เพื่อตรวจสอบว่าหากใช้ค่าช่วงเพื่อที่

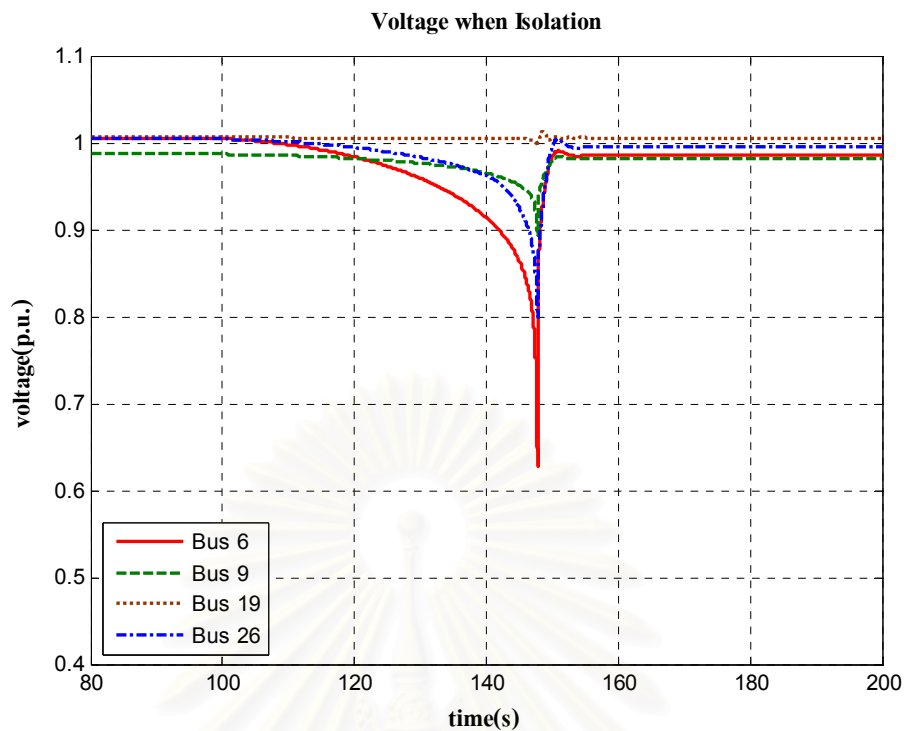
กำหนดดังกล่าว ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยจะสามารถรักษาเสถียรภาพเชิงแรงดันภายในไว้ได้หรือไม่ หลังแยกตัวเป็นอิสระ



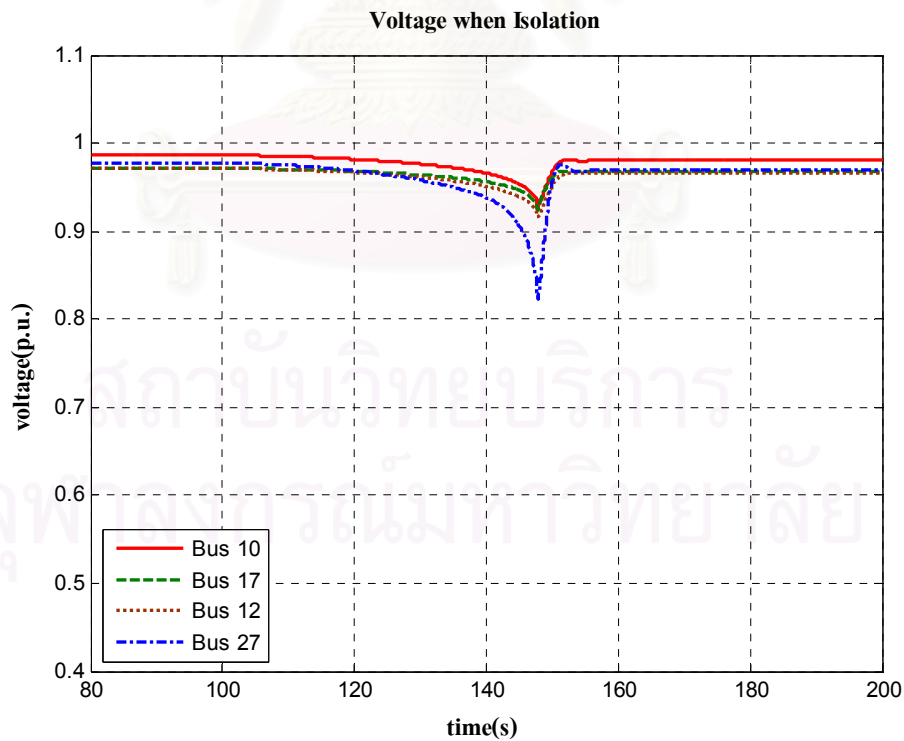
รูปที่ 7.5 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย  
ในกรณีแยกตัวเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าภายนอก

ผลการศึกษาเพื่อยืนยันว่าระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยสามารถรักษาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไว้ได้ หลังแยกตัวเป็นอิสระจากระบบส่งไฟฟ้าหลัก แสดงไว้ในรูปที่ 7.6 ถึง 7.9 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ชัดว่าหลังแยกตัวจากระบบส่งไฟฟ้าหลัก แล้ว ส่งผลให้ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในระบบของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยมีค่ากลับขึ้นมาสู่ระดับปกติได้ ในขณะที่ขนาดแรงดันบริเวณภายนอก ในรูปที่ 7.8 ยังคงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่า การกำหนดค่าช่วงเฟื่อของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่ 0.3 p.u. สามารถป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย อันเนื่องมาจากปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันจากการรบกวนจากภายนอกได้

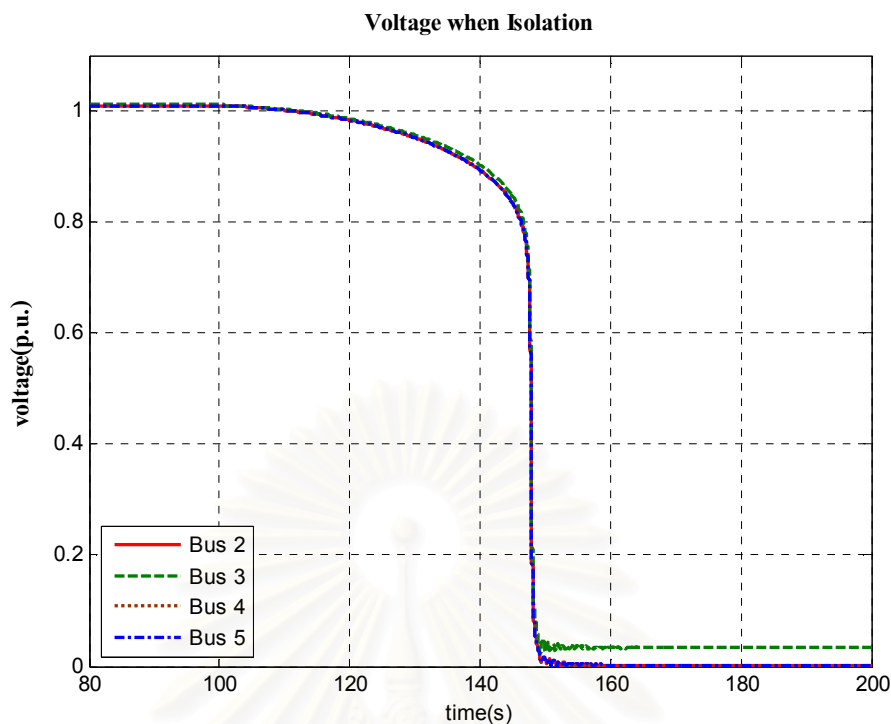
หากสังเกตผลตอบแทนของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ในรูปที่ 7.9 พบว่า สอดคล้องกับผลตอบแทนของขนาดแรงดัน ณ บัสเชื่อมต่อ โดยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงทันทีที่มีการรบกวนเกิดขึ้น จากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีค่าเป็น 0.3 p.u. และหลังจากแยกตัวเป็นอิสระแล้ว ขั้นตอนวิธีในการประมาณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ จะหยุดทำงานเนื่องจากการเชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักถูกปลดออกชั่วคราว ส่วนขนาดของแรงดัน ณ บัสเชื่อมต่อจะกลับเข้าสู่ค่าที่ระดับการทำงานปกติ



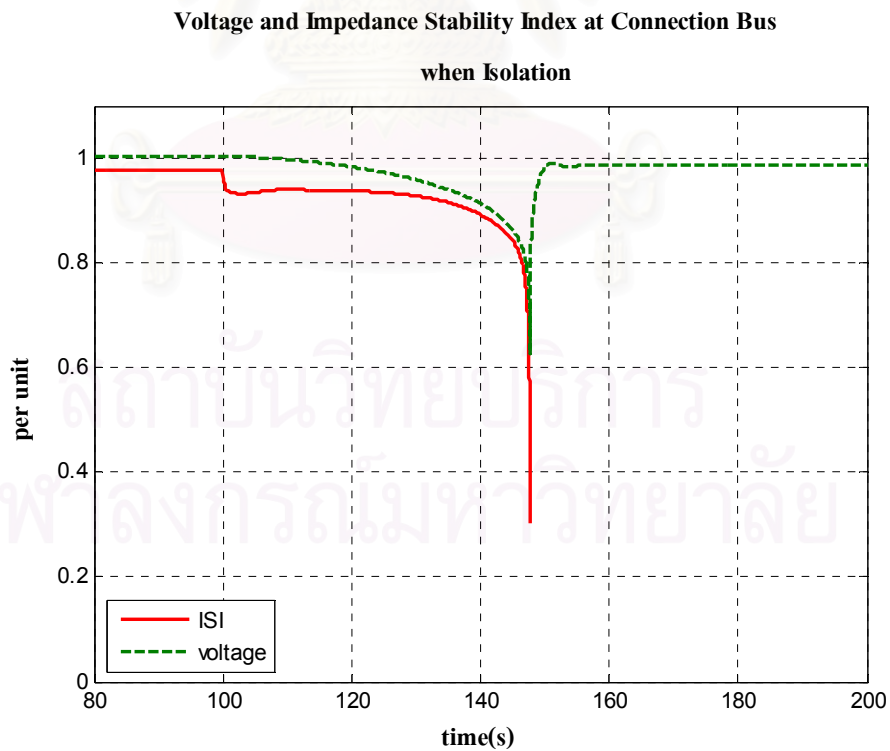
รูปที่ 7.6 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อน และ หลัง การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก



รูปที่ 7.7 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อน และ หลัง การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก (ต่อ)



รูปที่ 7.8 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ก่อนและ หลังจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก  
จริงในประเทศไทยแยกตัวเป็นอิสระ

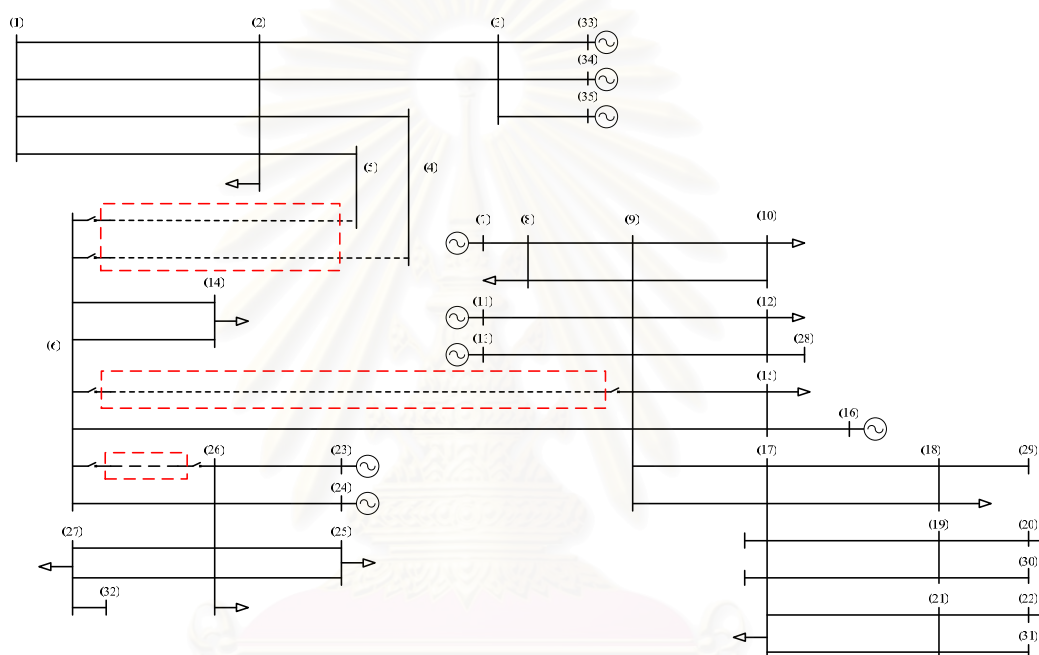


รูปที่ 7.9 ขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ก่อนและหลัง  
การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก



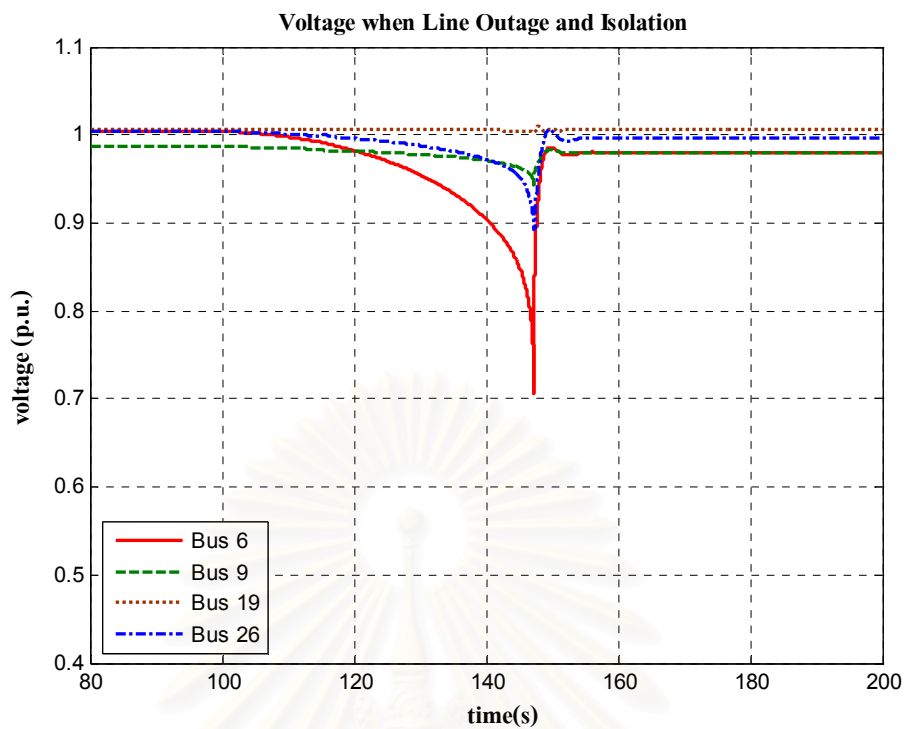
### 7.1.2.2 การแยกตัวเป็นอิสระในสถานะที่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ไทยอ่อนแอลง

ในหัวข้อนี้มีขั้นตอนการทดสอบเช่นเดียวกับหัวข้อก่อนหน้านี้ แต่ต่างกันเพียงการเพิ่มการจำลองให้ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยอ่อนแอลง โดยการปลดสายส่งเชื่อมโยงแบบวงจรขนาน 2 วงจร ออกจำนวน 2 เส้น ดังแสดงภาพประกอบไว้ในรูปที่ 7.10 ที่วินาทีที่ 115 ก่อนที่จะแยกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยออกเป็นอิสระ เมื่อค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ มีค่าประมาณ 0.3 p.u.

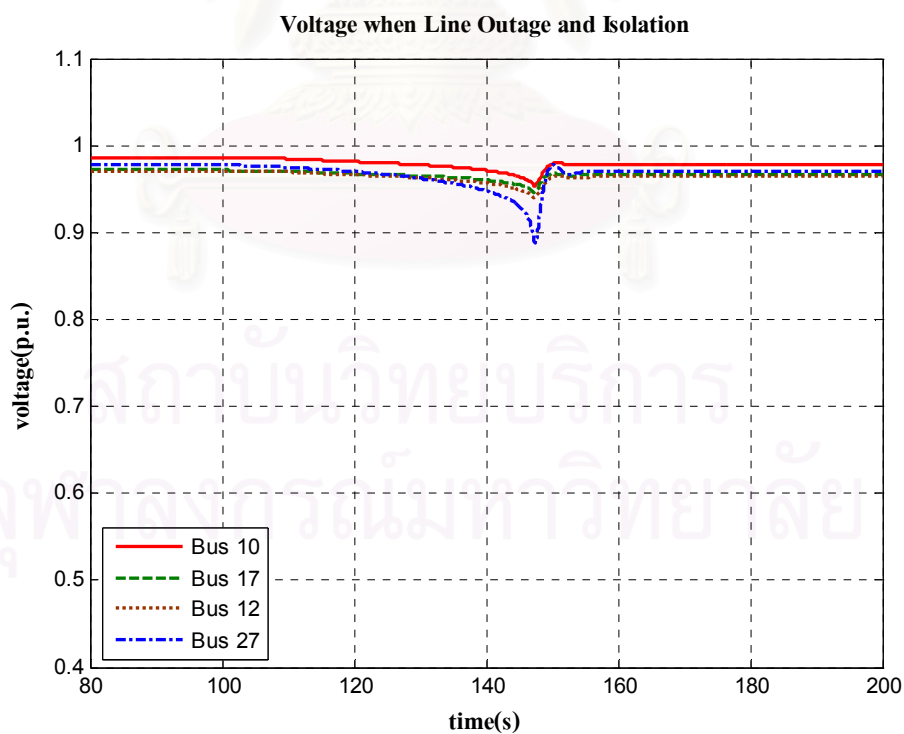


รูปที่ 7.10 แผนภาพเส้นเดียวแสดงระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ในกรณี  
ที่ระบบภายในอ่อนแอลงก่อนแยกตัวเป็นอิสระจากระบบไฟฟ้าภายนอก

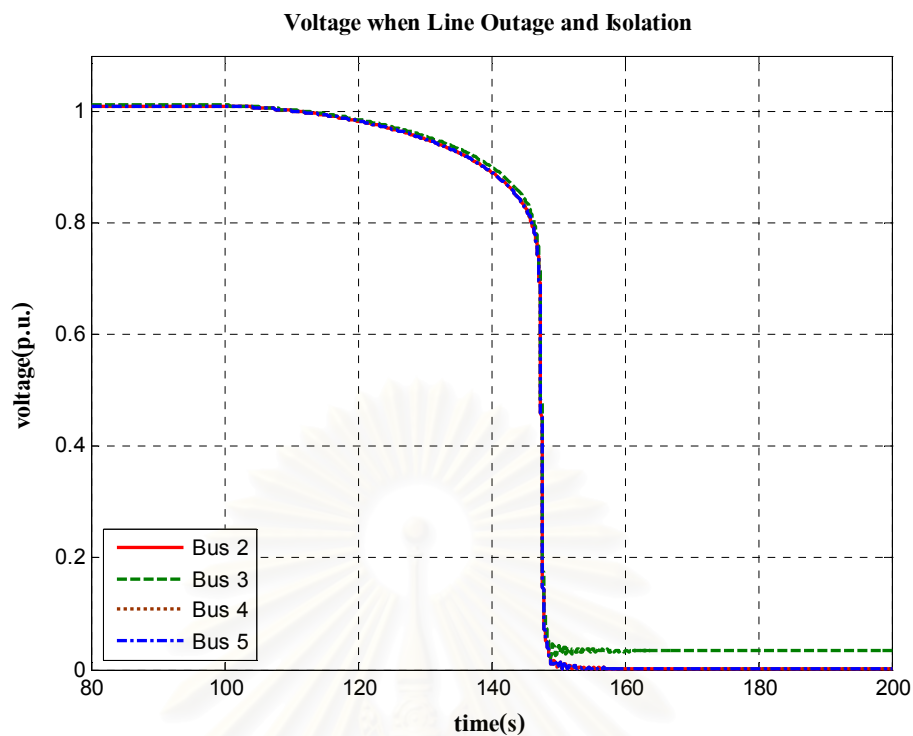
วัตถุประสงค์หลักในการศึกษานี้เพื่อทดสอบว่าหากระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยอ่อนแอลงอย่างมีนัยสำคัญแล้ว ที่ค่าช่วงเฝ้าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์เท่าเดิม คือ 0.3 p.u. ระบบจะยังคงรักษาเสถียรภาพเชิงแรงดันหลังแยกตัวเป็นอิสระได้หรือไม่ และผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ต่อการปลดสายส่งภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยออกมีลักษณะเป็นเช่นไร



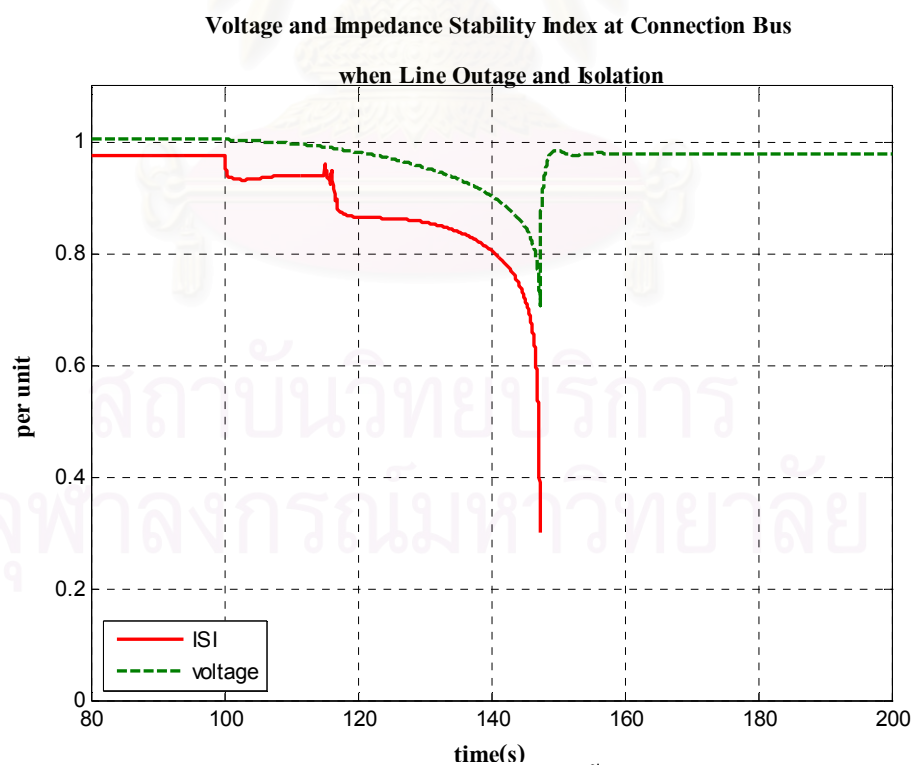
รูปที่ 7.11 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อน และ หลัง การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก



รูปที่ 7.12 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทย ก่อน และ หลัง การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก (ต่อ)



รูปที่ 7.13 ขนาดแรงดันที่บัสต่างๆ ภายนอก ก่อน และหลังจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก  
จริงในประเทศไทยแยกตัวเป็นอิสระ



รูปที่ 7.14 ขนาดแรงดันที่บัสเชื่อมต่อและค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์  
ก่อน และ หลัง การแยกตัวเป็นอิสระจากระบบภายนอก

จากผลการศึกษาที่แสดงในรูปที่ 7.11 ถึง 7.14 พบว่า แม้ว่าระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยจะอ่อนแอลง ด้วยการปลดสายส่งเส้นสำคัญบางเส้นออก การตัดสินใจแยกตัวเป็นอิสระจากระบบส่งไฟฟ้าหลักที่ค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ประมาณ 0.3 p.u. ยังคงมีผลทำให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงในประเทศไทยรักษาเสถียรภาพไว้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 7.11 และ 7.12 ขณะที่ขนาดแรงดันภายนอกสูญเสียเสถียรภาพ ดังแสดงในรูปที่ 7.13

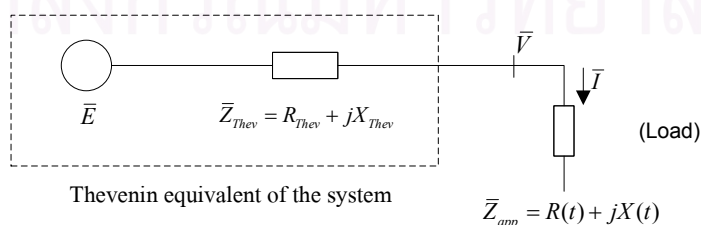
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลตอบแทนของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ บัสเชื่อมต่อ ในรูปที่ 7.14 พบว่ามีขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว ณ วินาทีที่ 115 เมื่อทำการปลดสายส่งเส้นสำคัญบางเส้นออกจากระบบ แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของระบบที่อ่อนแอลงได้อย่างรวดเร็วกว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดัน ณ บัสเชื่อมต่อนั้น ซึ่งการตอบสนองดังกล่าวจะช่วยให้ผู้ดูแลระบบมีเวลาเพียงพอในการตัดสินใจแก้ไขปัญหาเสถียรภาพที่จะเกิดขึ้นล่วงหน้าได้ทันเวลา

## 7.2 กำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งได้ของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลักในเชิงพลวัต

ในส่วนนี้ได้นำพารามิเตอร์ที่ได้จากเทคนิคระบุเอกลักษณ์ในขั้นตอนการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ มาประยุกต์ใช้กับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4.2 ในบทที่ 2 เพื่อคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งได้ของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก และได้แสดงตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้อีกด้วย

### 7.2.1 การประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลัก

ในการนำวิธีที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4.2 มาประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักนั้น ทำในลักษณะเดียวกันกับการคำนวณหาค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ กล่าวคือ ทำการพิจารณาระบบไฟฟ้าภายในของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักด้วยวงจรสมมูลเทวินิน ดังแสดงในรูปที่ 7.15

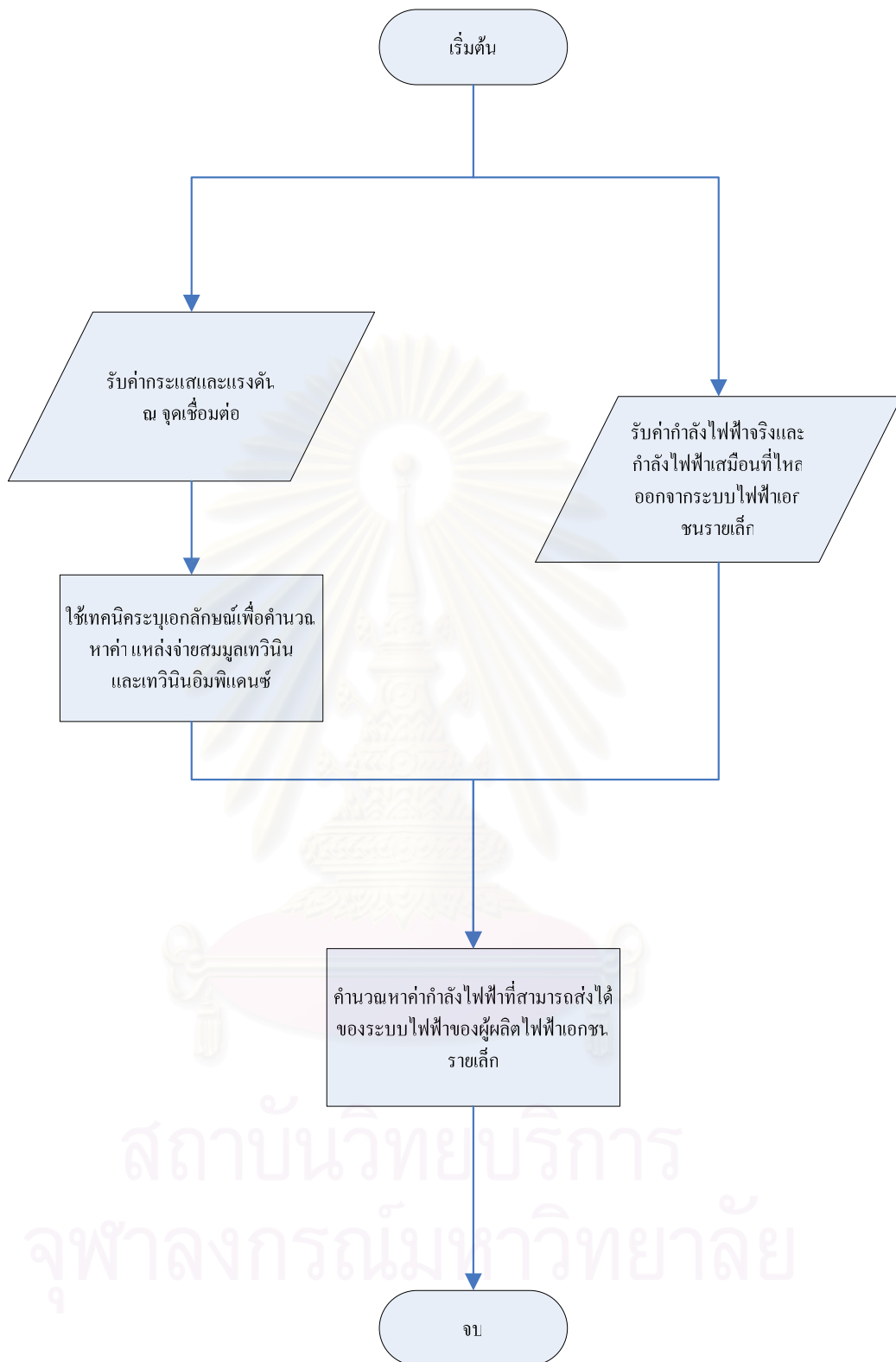


รูปที่ 7.15 โหลดบัสและวงจรสมมูลเทวินินของระบบไฟฟ้า

จากนั้นหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลเทวินิน กล่าวคือ แหล่งจ่ายสมมูลเทวินิน และเทวินินอิมพีแดนซ์โดยใช้เทคนิคระบุเอกลักษณ์เช่นเดียวกับการคำนวณหาดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ จากนั้นใช้แหล่งจ่ายเทวินินแทนบัสต้นทางของสายส่ง และเทวินินอิมพีแดนซ์แทนพารามิเตอร์สายส่ง ส่วนเฟสเซอร์แรงดันและกำลังไฟฟ้าที่ไหลออกจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักนั้นสามารถวัดได้ที่จุดเชื่อมต่อ เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวครบถ้วนแล้ว จะสามารถนำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งได้ของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก โดยขั้นตอนวิธีที่ใช้ได้แสดงในแผนภาพ ดังรูป 7.16



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

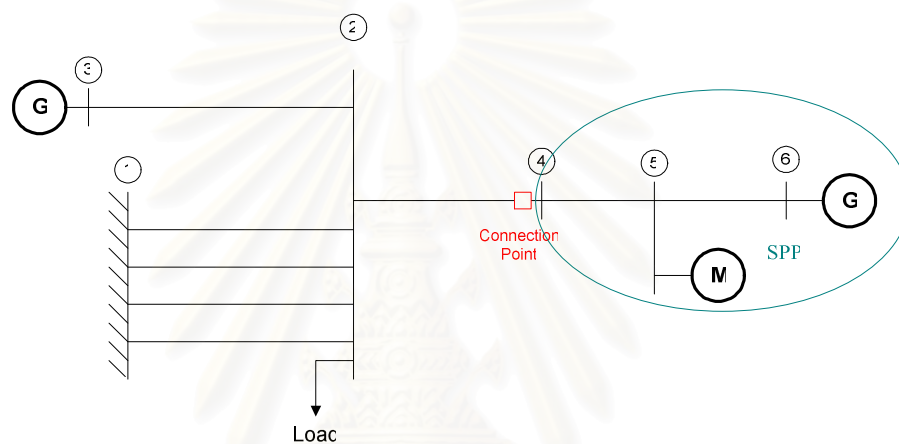


รูปที่ 7.16 แผนภาพแสดงขั้นตอนวิธีในการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งได้  
ของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตเอกชนรายเล็ก

## 7.2.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้

ในหัวข้อนี้ได้นำวิธีการที่เสนอไว้ในหัวข้อ 7.2.1 มาทดสอบกับแบบจำลองของระบบไฟฟ้า 2 ระบบ กล่าวคือ ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย และระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักในประเทศไทย ซึ่งแผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.17 และ 7.18 ด้านล่าง นอกจากนั้นยังได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์อีกด้วย

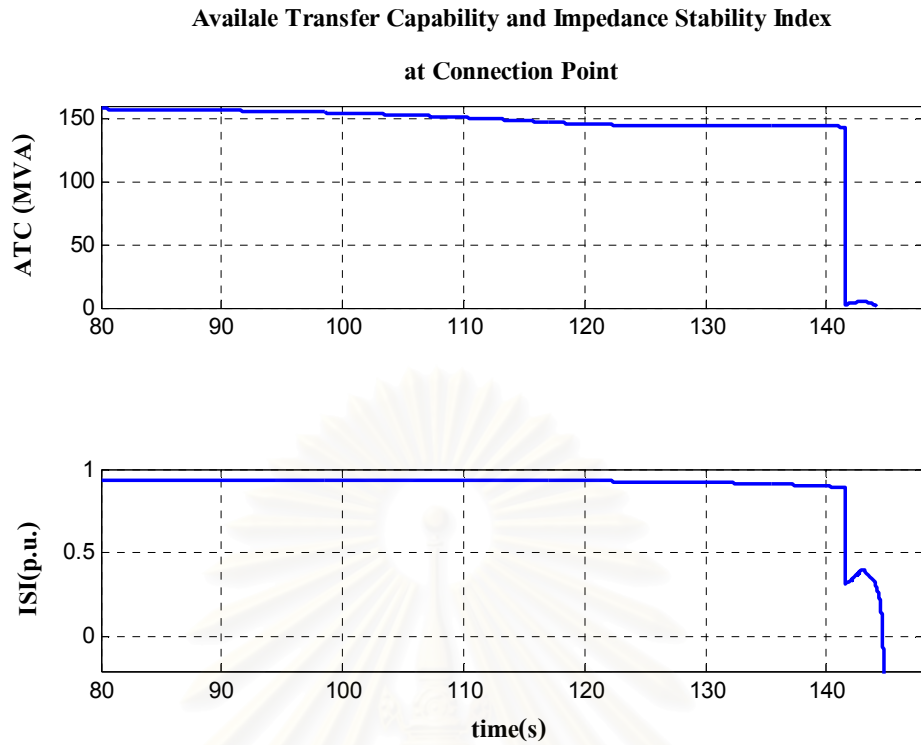
### 7.2.2.1 ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย



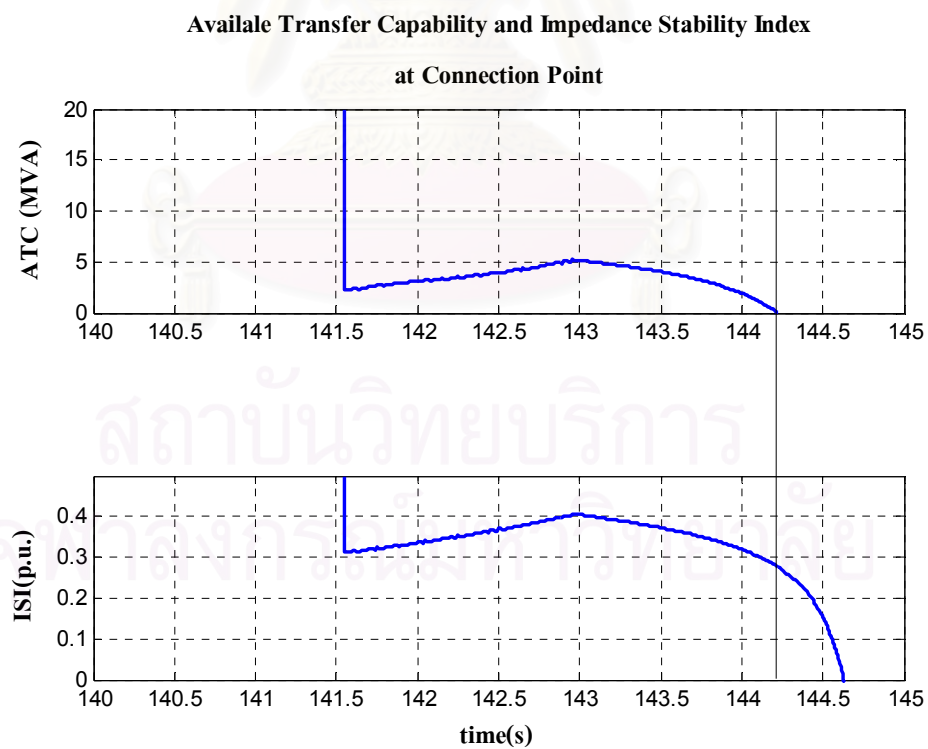
รูปที่ 7.17 แผนภาพเส้นเดียวระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอย่างง่าย

ทดสอบโดยทำการเพิ่มโหลดจากบริเวณภายนอกของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กตั้งแต่วันที่ 100 จนกระทั่งเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้น จากนั้นจะพิจารณาดัชนีชี้วัดทั้ง 2 ตัวเทียบกับเวลา นอกจากนี้ยังพิจารณาวิถี (Trajectory) ของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลายอีกด้วย โดยลักษณะผลตอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.18 ถึง 7.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.18 ลักษณะผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท



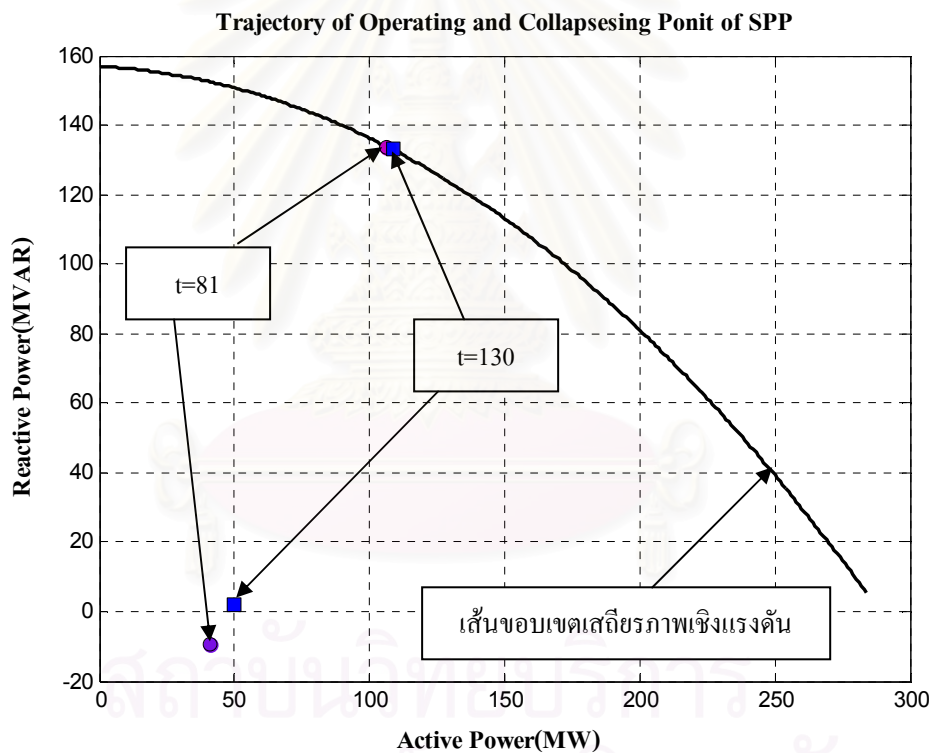
รูปที่ 7.19 ลักษณะผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท

ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน

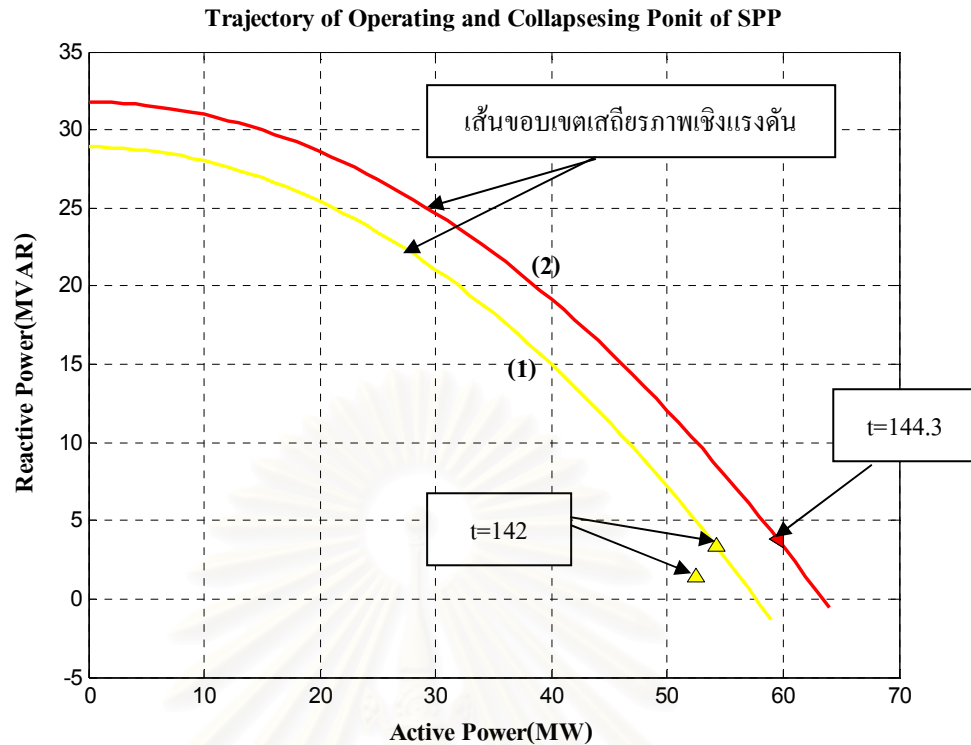


จากรูปที่ 7.18 พบว่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภททำงานได้สอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันประเภทแรกแสดงให้เห็นว่ายังสามารถจ่ายกำลังไฟออกจากระบบได้อีกมาก คือ ประมาณ 150 MVA และเมื่อโหลดภายนอกเพิ่มขึ้นมากจนใกล้จะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันค่าดัชนีชี้วัดดังกล่าวจะมีค่าใกล้ 0 MVA อย่างรวดเร็วที่วินาทีที่ 142 เนื่องจากการชนขีดจำกัดของระบบควบคุมแรงดันเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ส่วนค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์นั้นก็จะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้หากสังเกตในรูปที่ 7.19 พบว่า ณ จุดซึ่งใกล้จะสูญเสียเสถียรภาพของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันประเภทแรก คือ เข้าใกล้ 0 MVA ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะมีค่าประมาณ 0.28 p.u. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ใช้เป็นช่วงเพื่ออีกด้วย



รูป 7.20 วิธีของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลาย

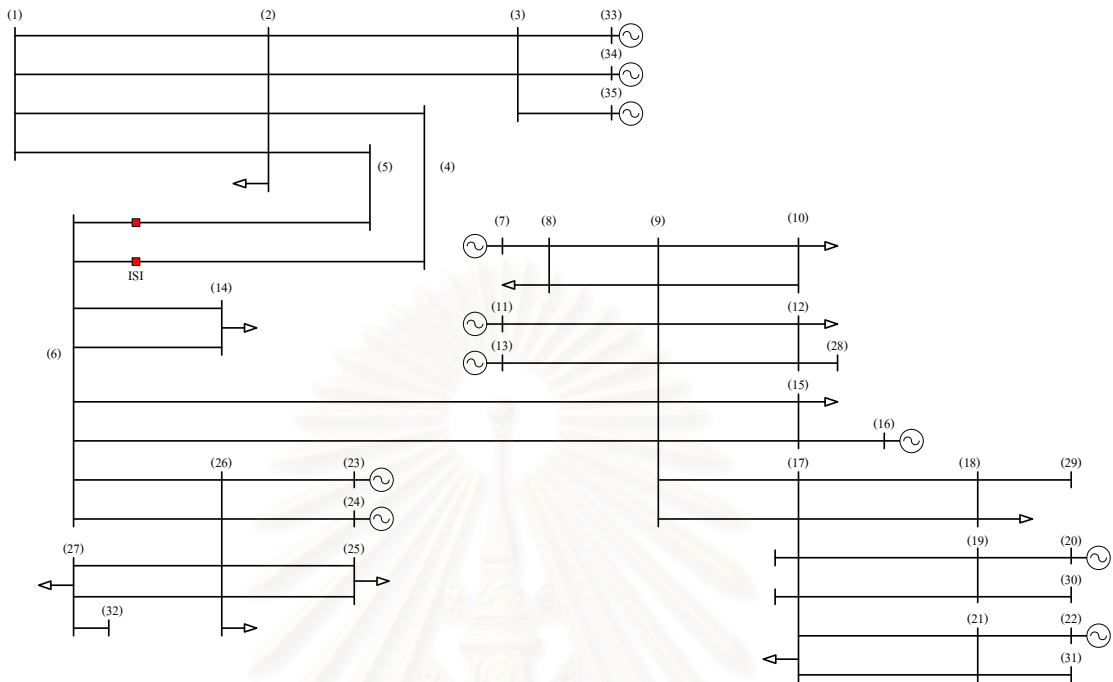


รูป 7.21 วิธีของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลาย (ต่อ)

ในช่วงแรกขณะที่โหลดบริเวณภายนอกมีค่าต่ำ ระยะระหว่างจุดทำงานขณะใดๆ กับจุดทำงานพังทลายจะยังคงมีค่ามาก ดังแสดงในรูปที่ 7.20 แต่เมื่อโหลดภายนอกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งชนขีดจำกัดของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันส่งผลให้เทวินินอิมพีแดนซ์ในสายส่งเปลี่ยนแปลง ทำให้ขอบเขตเสถียรภาพเชิงแรงดันมีค่าลดลง ดังแสดงในเส้นที่ 1 ในรูปที่ 7.21 จึงทำให้ระยะระหว่างจุดทำงานขณะใดๆ กับจุดทำงานพังทลายมีค่าน้อยลงอย่างทันทีทันใด และในช่วงที่โหลดภายนอกกำลังเพิ่มขึ้นและเทวินินอิมพีแดนซ์ในสายส่งกำลังเปลี่ยนแปลงจุดทำงานทั้ง 2 ทับกันในที่สุด ดังแสดงในเส้นที่ 2 ในรูปที่ 7.21 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้นในระบบโดยจุดที่อยู่บนเส้นขอบเขตเสถียรภาพเชิงแรงดันแสดงถึงจุดทำงานพังทลาย และจุดที่อยู่ภายในแสดงถึงจุดทำงานขณะใดๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

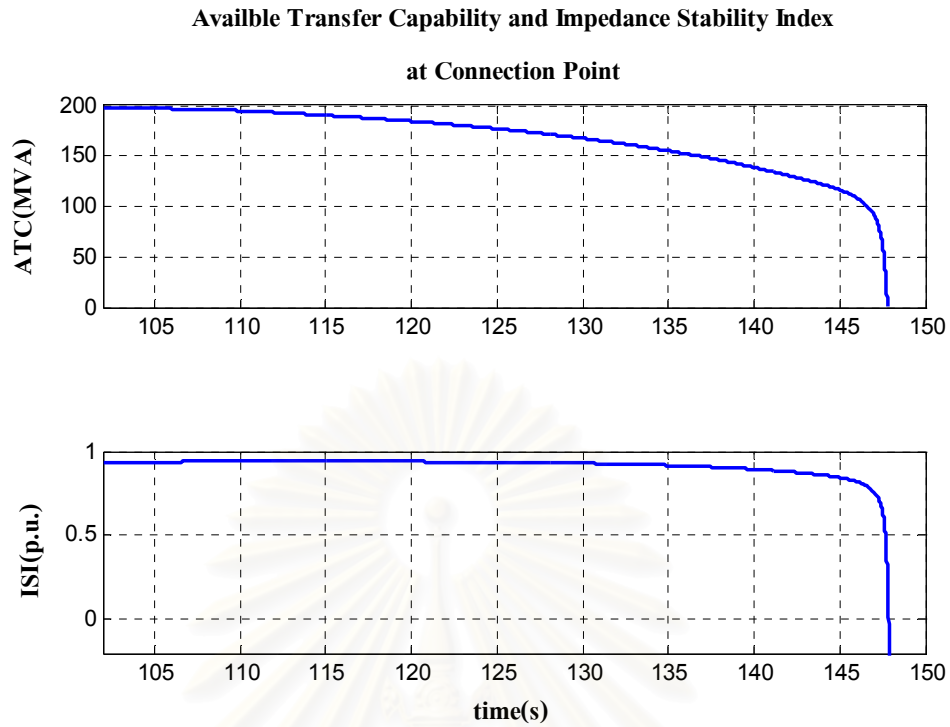
### 7.2.2.2 ระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงที่เชื่อมต่อกับระบบส่งหลักในประเทศไทย



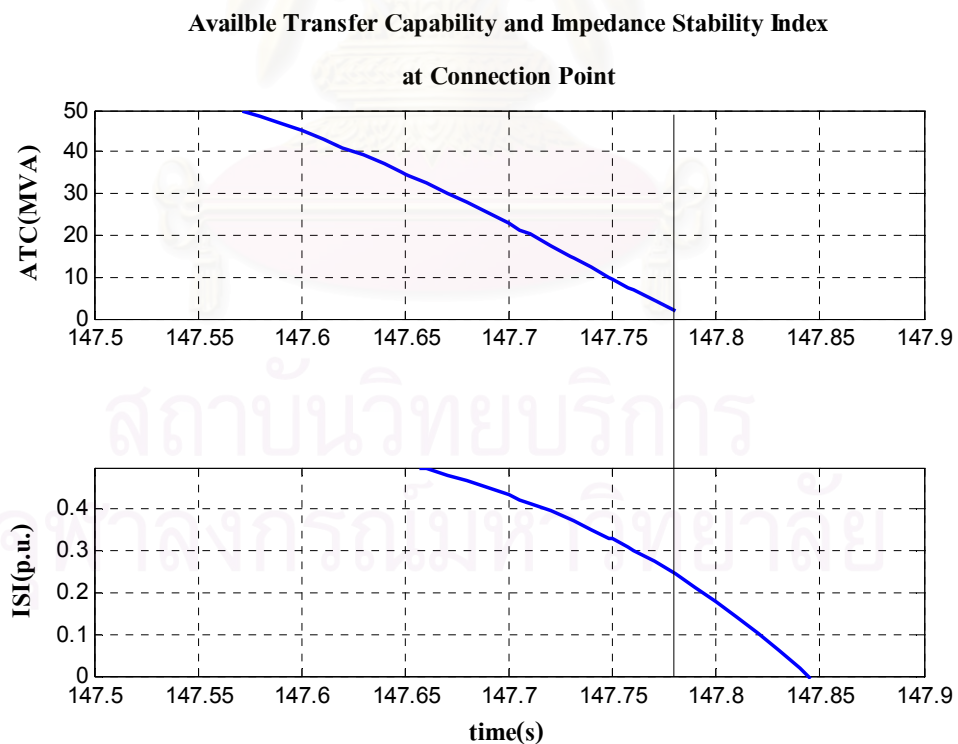
รูปที่ 7.22 แผนภาพเส้นเคเบิลระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตเอกชนรายเล็กจริงเชื่อมโยงกับระบบส่งไฟฟ้าหลักในประเทศไทย

ทดสอบโดยทำการเพิ่มโหลดจากบริเวณภายนอกของระบบไฟฟ้าเอกชนรายเล็กจริงในประเทศไทยตั้งแต่วันที่ 100 จนกระทั่งเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้น จากนั้นจะพิจารณาดัชนีชี้วัดทั้ง 2 ตัวเทียบกับเวลา นอกจากนี้ยังพิจารณาวิถีของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลายอีกด้วย โดยลักษณะผลตอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.23 ถึง 7.25

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.23 ลักษณะผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท

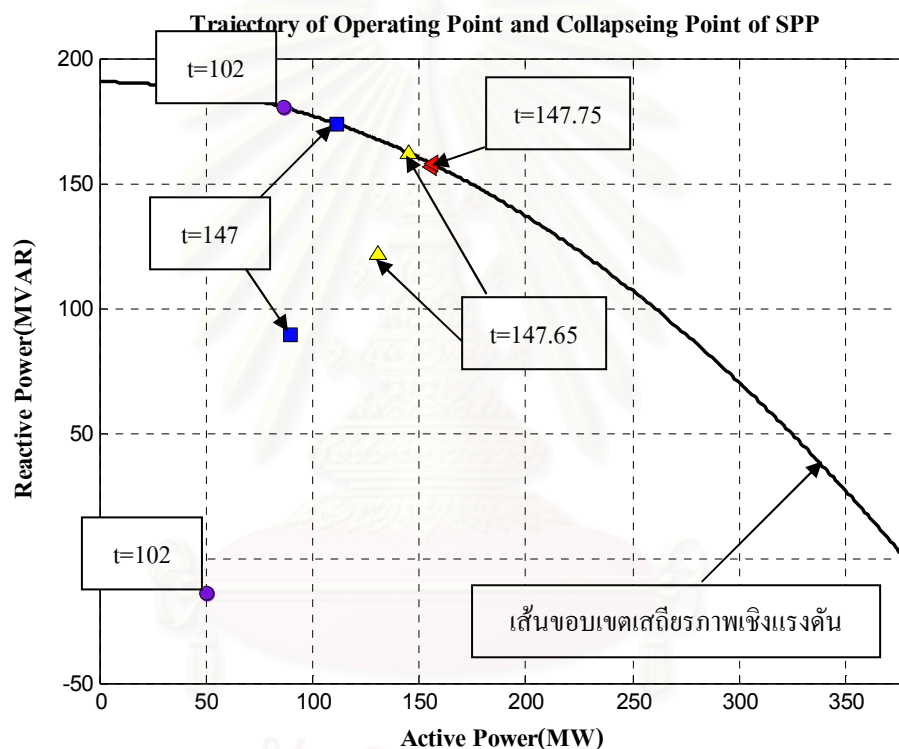


รูปที่ 7.24 ลักษณะผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภท

ณ จุดทำงานใกล้กับจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน

จากรูปที่ 7.23 พบว่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันทั้ง 2 ประเภททำงานได้สอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อ โหลดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันประเภทแรกแสดงให้เห็นว่ายังสามารถจ่ายกำลังไฟออกจากระบบได้อีกมาก คือ ประมาณ 200 MVA และเมื่อโหลดภายนอกเพิ่มขึ้นมากจนใกล้จะสูญเสียเสถียรภาพเชิงแรงดันค่าดัชนีชี้วัดดังกล่าวจะมีค่าใกล้ 0 MVA ส่วนค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์นั้นก็ค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งเป็น 0 p.u. ในที่สุด

นอกจากนี้หากสังเกตในรูปที่ 7.24 พบว่า ณ จุดซึ่งใกล้จะสูญเสียเสถียรภาพของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันประเภทแรกเข้าใกล้ 0 MVA ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์จะมีค่าประมาณ 0.24 p.u. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ใช้เป็นช่วงเพื่ออีกด้วย



รูป 7.25 วิธีของจุดทำงานขณะใดๆ และจุดทำงานพังทลาย

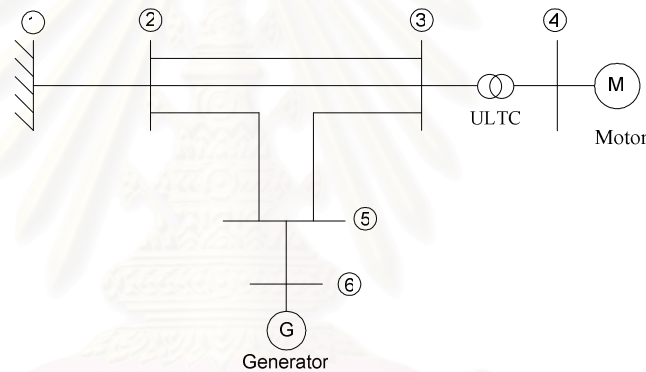
จากรูปที่ 7.25 แสดงให้เห็นว่าเมื่อโหลดบริเวณภายนอกเพิ่มขึ้นวิธีของจุดทำงานจะเข้าใกล้จุดทำงานพังทลายมากขึ้นเช่นกัน และจะทับกัน ในที่สุดเมื่อเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้นในระบบ โดยจุดที่อยู่บนเส้นขอบเขตเสถียรภาพเชิงแรงดันแสดงถึงจุดทำงานพังทลาย และจุดที่อยู่ภายในแสดงถึงจุดทำงานขณะใดๆ

### 7.3 ช่วงเวลาในการสุ่ม (Time Step)

ในการระบุค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินนั้น ช่วงเวลาในการสุ่มเป็นส่วนที่บ่งบอกถึงความถี่ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของวงจรเทวินิน ซึ่งความถี่จะขึ้นสิ่งทีแสดงให้เห็นถึงลักษณะผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ในส่วนนี้ได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ เมื่อใช้ช่วงเวลาในการสุ่มที่แตกต่างกัน 2 ค่า โดยทำการพิจารณาทั้งเหตุการณ์ที่เกิดจากความผิดพลาด และเหตุการณ์ที่เกิดจากการเพิ่มโหลด

#### 7.3.1 กรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากความผิดพลาด

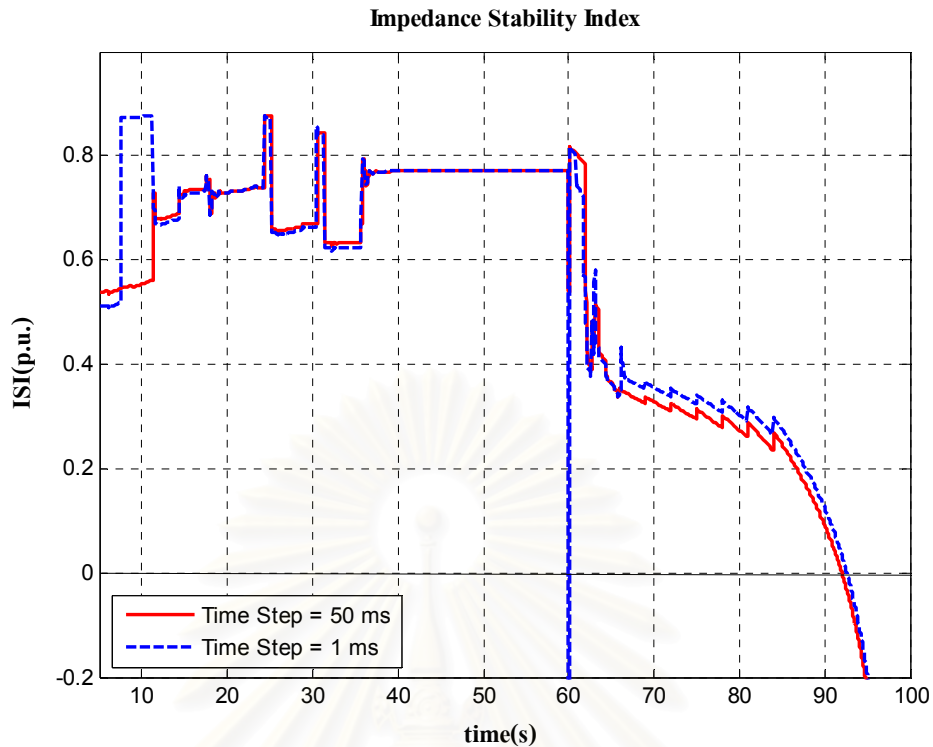
ในกรณีนี้ทำการพิจารณาเกิดลัดวงจรบนสายส่งที่เชื่อมโยงระหว่างบัส 3 กับบัส 5 ในรูปที่ 7.26 ที่วินาทีที่ 60 จากนั้น กำจัดความผิดพลาดโดยการปลดสายส่งเส้นดังกล่าวออกภายใน 60 มิลลิวินาที



รูปที่ 7.26 ระบบที่ใช้ในการพิจารณากรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากความผิดพลาด

ลักษณะผลตอบสนองทางเวลาของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่บัส 4 โดยใช้ช่วงเวลาในการสุ่มที่ต่างกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

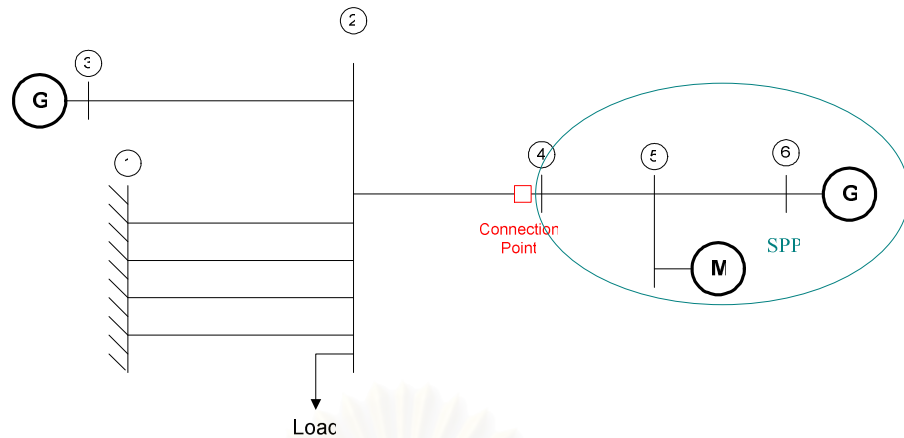


รูปที่ 7.27 เปรียบเทียบผลตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ โดยใช้ช่วงเวลาในการสุ่มแตกต่างกัน

จากรูปที่ 7.27 พบว่า ลักษณะผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ โดยสุ่มทุกๆ 1 ms จะมีการแกว่งมากกว่าการสุ่มทุกๆ 50 ms จากนั้นเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นค่าของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ในกรณีที่สุ่มทุกๆ 1 ms จะลงไปติด 0 ในขณะที่หากทำการสุ่มทุกๆ 50 ms จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น และเมื่อระบบสูญเสียเสถียรภาพแรงดันผลตอบของทั้ง 2 กรณีจะค่อยๆ ลดลงและ ไปติด 0 ในเวลาใกล้เคียงกัน

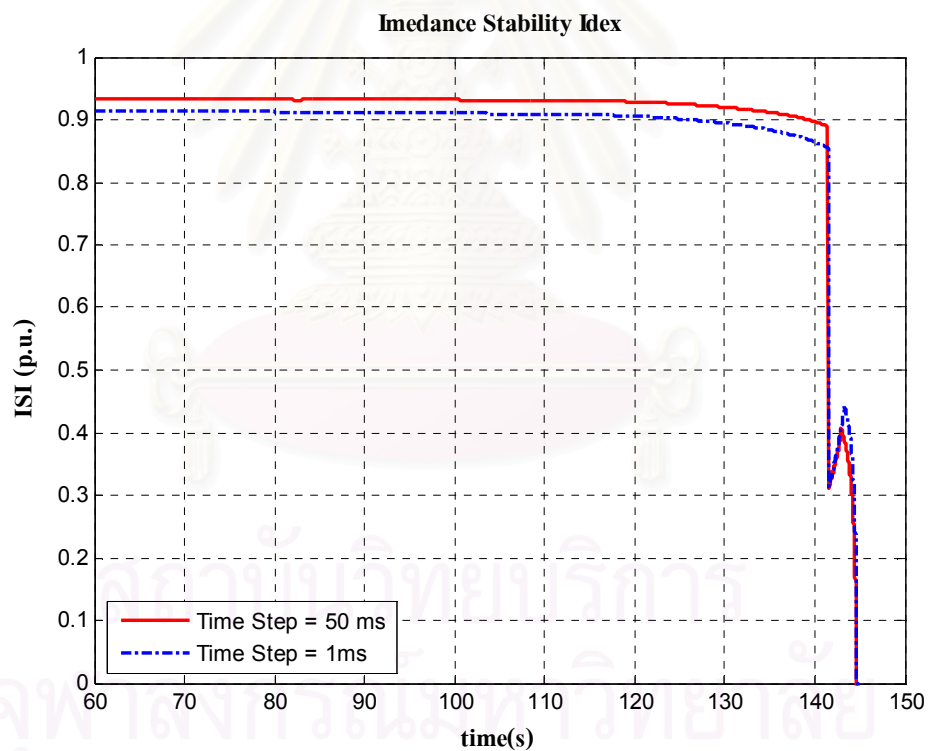
### 7.3.2 กรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากการเพิ่มโหลด

ในกรณีนี้ทำการพิจารณาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของโหลดจากภายนอก โดยพิจารณาผลตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ณ บัสเชื่อมต่อระบบ ณ บัสที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 7.28 โดยทำการเพิ่มโหลดตั้งแต่วันที่ 80 จนกระทั่งสูญเสียเสถียรภาพแรงดัน



รูปที่ 7.28 ระบบที่ใช้ในการพิจารณากรณีเหตุการณ์ที่เกิดจากการเพิ่มโหลด

ลักษณะผลตอบสนองทางเวลาของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ที่บัส 4 โดยใช้ช่วงเวลาในการสุ่มที่ต่างกัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.29



รูปที่ 7.29 เปรียบเทียบผลตอบสนองของค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ โดยใช้ช่วงเวลาในการสุ่มแตกต่างกัน

จากรูปที่ 7.29 พบว่า ลักษณะผลตอบสนองของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์โดยใช้ช่วงเวลาสุ่มทั้ง 2 ค่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยช่วงแรกจะมีค่าต่างกันเล็กน้อย หลังจากนั้นเมื่อโหลด



เพิ่มขึ้น ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ของทั้ง 2 ช่วงเวลาสุ่มจะค่อยๆ ลดลงและตัด 0 ที่เวลาใกล้เคียงกัน

จากผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ทั้ง 2 กรณี พบว่าการใช้ช่วงเวลาสุ่มที่แตกต่างกัน ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์จะมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งในสภาวะปกติ และเมื่อมีการเพิ่มโหลด แต่เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นจะพบว่าการใช้ช่วงเวลาสุ่ม 1 ms จะลงไปตัด 0 ซึ่งในลักษณะดังกล่าวอาจส่งผลให้ผู้ดูแลระบบเข้าใจผิดว่าเกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันขึ้นได้ ในขณะที่หากทำการสุ่มทุกๆ 50 ms จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้น ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการใช้เวลาในการสุ่ม 50 ms มีความเหมาะสมมากกว่า 1 ms



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 8

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักโดยพิจารณาเฉพาะการรบกวนที่เกิดจากระบบส่งหลักเท่านั้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสาเหตุส่วนใหญ่ที่นำไปสู่การเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กนั้นจะเกิดจากความถี่ของไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในระบบส่งหลัก ส่งผลให้มีกำลังไฟฟ้าไหลออกจากระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมากขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ขีดจำกัดเสถียรภาพ และนำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันในที่สุด แต่หากสามารถที่จะแยกตัวออกจากระบบส่งไฟฟ้าหลักได้อย่างทันท่วงทีก็จะสามารถป้องกันปัญหาดังกล่าวได้

อย่างไรก็ดี การแยกตัวโดยไม่จำเป็นอาจส่งผลให้ระบบไฟฟ้าโดยรวมมีความมั่นคงลดลง และอาจทำให้ต้องจ่ายค่าปรับตามสัญญาที่ทำไว้กับระบบส่งไฟฟ้าหลักโดยไม่จำเป็นอีกด้วย

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันที่เคยมีการนำเสนอไว้มาพัฒนาเป็นขั้นตอนวิธีในการตรวจสอบเสถียรภาพเชิงแรงดันให้กับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก โดยดัชนีชี้วัดเสถียรภาพแรงดันที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ คือ ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ซึ่งขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะระบุถึงจุดที่เกิดปัญหาเสถียรภาพแรงดันของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กได้เป็นอย่างดี กล่าวคือ ในกรณีที่ไม่มีเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์จะไม่แสดงลักษณะที่ทำให้ผู้ดูแลระบบเข้าใจผิดว่าเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้น คือ ไม่ลดลงมาตัดค่าศูนย์ และหากเกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดันขึ้น ผลตอบของดัชนีชี้วัดดังกล่าวสามารถแสดงถึงความรุนแรงของปัญหาได้อย่างถูกต้อง คือ ลดลงมาเข้าใกล้ค่าศูนย์ นอกจากนี้ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่อาจนำไปสู่ปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน โดยเฉพาะการเข้าสู่ขีดจำกัดของระบบควบคุมแรงดัน และการที่สายส่งถูกปลดออกจากวงจร

สำหรับผลการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงแรงดันสามารถสรุปได้ ดังนี้

ระบบทดสอบที่ 1 กรณีที่ทำการเพิ่มโหลดในระบบทดสอบอย่างง่าย ขั้นตอนวิธีที่ใช้แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการระบุถึงจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน กล่าวคือ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ไม่ได้ส่งผลให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันจะลดต่ำลงมาเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามหากการเพิ่ม โหลดดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหา

เสถียรภาพเชิงแรงดัน ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันจะลดต่ำลงจนกระทั่งลงมาตัดค่าศูนย์

ระบบทดสอบที่ 2 กรณีที่เกิดการลัดวงจรและปลดสายส่งที่เกิดปัญหาออก พบว่า ในกรณีที่สายส่งที่ถูกปลดออกเป็นสายส่งเส้นหลักที่ใช้ในการจ่ายกำลังรีแอกทีฟไปยังโหลด จะส่งผลให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน และผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันจะลดต่ำลงอย่างชัดเจนและตัดค่าศูนย์ในที่สุด

ระบบทดสอบที่ 3 กรณีที่ทำการเพิ่มโหลดจากภายนอกระบบที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก ขั้นตอนวิธีที่ใช้ยังคงแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการระบุถึงจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน กล่าวคือ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ไม่ได้ส่งผลให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันจะลดต่ำลงมาเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามหากการเพิ่มโหลดดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันจะลดต่ำลงจนกระทั่งลงมาตัดค่าศูนย์ ซึ่งในระบบนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากเข้าสู่ขีดจำกัดของระบบควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ระบบทดสอบที่ 4 กรณีที่ทำการเพิ่มโหลดจากภายนอกระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลัก ขั้นตอนวิธีที่ใช้ยังคงแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการระบุถึงจุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดัน กล่าวคือ เมื่อโหลดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่ไม่ได้ส่งผลให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันจะลดต่ำลงมาเล็กน้อย ในทางตรงกันข้ามหากการเพิ่ม โหลดดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหาเสถียรภาพเชิงแรงดัน ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันจะลดต่ำลงจนกระทั่งลงมาตัดค่าศูนย์

อย่างไรก็ดี ดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ยังมีความไม่สมบูรณ์อยู่บ้าง เนื่องจากที่จุดวิกฤติเสถียรภาพเชิงแรงดันค่าดังกล่าวจะมีค่ามากกว่า 0 อยู่เล็กน้อย ซึ่งความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวถูกแก้ไขโดยการกำหนดช่วงเฟื่อในลักษณะเดียวกันกับช่วงเฟื่อที่ใช้ในการป้องกันเสถียรภาพของสายส่ง กล่าวคือ กำหนดช่วงเฟื่อโดยให้กำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ของระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมีค่าไม่เกิน 70 เปอร์เซ็นต์ ของค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถจ่ายได้สำหรับสายส่ง

นอกจากนี้เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจของผู้ดูแลระบบ วิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลเทวินินที่ได้จากขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงแรงดันในรูปแบบของการหาลำดับไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กที่เชื่อมต่อกับระบบส่งไฟฟ้าหลักแบบเวลาจริง ซึ่งดัชนีชี้วัดดังกล่าวนั้นแสดงให้เห็นถึงระยะปลอดภัยจากจุดทำงาน ณ ขณะใดๆ ไปยังจุดทำงานพังทลาย โดยผลตอบที่ได้สอดคล้องกับผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพอิมพีแดนซ์อีกด้วย

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์ ซึ่งขั้นตอนวิธีที่ได้มีสมรรถนะค่อนข้างดี สำหรับการศึกษาศึกษาและพัฒนาต่อไปควรนำไปประยุกต์ใช้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในระบบจริง นั่นคือ เฟสเซอร์กระแสและแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กจริงกับระบบส่งไฟฟ้าหลักมาใช้เป็นข้อมูลเข้าสำหรับขั้นตอนวิธี เพื่อพิจารณาผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์เมื่อใช้ข้อมูลจริง

2. พิจารณานำผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์แบบเวลาจริงที่ได้ไปใช้ในการพัฒนาการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เช่น อุปกรณ์ FACT เพื่อช่วยให้ระบบส่งไฟฟ้ามีความมั่นคงทางด้านเสถียรภาพเชิงแรงดันมากขึ้นด้วย กล่าวคือ ในขณะที่ผลตอบของดัชนีชี้วัดเสถียรภาพเชิงอิมพีแดนซ์มีค่าลดต่ำลง อาจมีการนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้ในการกำหนดการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมในตำแหน่งที่จะทำให้ระบบมีความมั่นคงทางด้านเสถียรภาพเชิงแรงดันมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Prabha Kundur. Power System Stability and Control. New York: McGraw Hill, 1994.
2. Kurita, A.; and Sakurai, T. The power system failure on July 23, 1987 in Tokyo. Proceedings of the 27th IEEE Conference 3 (Dec 1988): 2093-2097.
3. U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackouts in the United States and Canada: Causes and Recommendations. April 2004.
4. Claudia Reis., and Maciel Barbosa, F.P. A Comparison of Voltage Stability Indices. IEEE MELECON (2006): 1007-1010.
5. Smon, I.; Verbic, G.; and Gubina, F. Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem. IEEE Transactions on Power Systems 21 (August 2006): 1267-1275.
6. Khoi Vu.; Miroslav Begovic.; Damir Novosel.; and Murari Mohan Saha. Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin. IEEE Transactions on Power System 14 (August 1999): 1029-1035.
7. Komsan Daroj., and Bundit Eua-Arporn. On-Line Voltage Security Assessment (VSA) for Cross-Border Trade. Electrical Engineering Conference 29 (November 2006): 85-88.
8. The Mathworks, Inc. 2006. Matlab and Simulink[Online]. Available from: <http://www.Mathworks.com>. [2006, September]
9. Haque, M.H., and Pothula, M.R. Evaluation of Dynamic Voltage Stability of Power System. Proceedings Power System Technology (November 2004): 1139 – 1143.
10. Carson W. Taylor. Power System Voltage Stability. New York: McGraw-Hill, 1994.
11. IEEE Committee Report. Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Transactions on Power Systems (August 1995): 1302-1313.
12. Milan S. Calovic. Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (July 1984): 1909-1915.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบกระตุ้น (Excitation Systems) และระบบควบคุมความเร็ว (Speed Governor Control) ที่ใช้สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

#### ก.1 ระบบทดสอบที่ 2

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบที่ 2

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6
$H(p.u./sec)$	3.5
$r_s (p.u)$	0.003
$X_d (p.u)$	1.536
$X_q (p.u)$	1.494
$X'_d (p.u)$	0.297
$X'_q (p.u)$	0.621
$T'_{do} (sec)$	6.857
$T'_{qo} (sec)$	0.885
$D (p.u)$	0

ตารางที่ ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกระตุ้นในระบบทดสอบที่ 2

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6
$K_A$	200
$T_R$	0.015
$E_t$	0.98
$V_{ref}$	0.99
$E_{Fmax}$	7
$E_{Fmin}$	-6.4

ตารางที่ ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบที่ 2

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6
$R$	0.05
$T_G$	0.2
$T_{ch}$	0.3

### ก.2 ระบบทดสอบที่ 3

ตารางที่ ก.4 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบที่ 3

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6
$H(\text{p.u./sec})$	30	9
$r_s (\text{p.u.})$	0.003	0.003
$X_d (\text{p.u.})$	1.536	1.536
$X_q (\text{p.u.})$	1.494	1.494
$X'_d (\text{p.u.})$	0.297	0.297
$X'_q (\text{p.u.})$	0.621	0.621
$T'_{do} (\text{sec})$	6.857	6.857
$T'_{qo} (\text{sec})$	0.885	0.885
$D (\text{p.u.})$	0	0

ตารางที่ ก.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบกระตุ้นในระบบทดสอบที่ 3

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6
$K_A$	200	200
$T_R$	0.015	0.015
$E_t$	1.011	1
$V_{ref}$	1.065	1.015
$E_{F \max}$	250	3.1
$E_{F \min}$	-60	0



ตารางที่ ก.6 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมความเร็วในระบบทดสอบที่ 3

ค่าพารามิเตอร์	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 3	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าบัส 6
$R$	0.05	0.05
$T_G$	0.2	0.2
$T_{ch}$	0.3	0.3



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ใช้สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

#### ข.1 ระบบทดสอบที่ 2

ตารางที่ ข.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบทดสอบที่ 2

พารามิเตอร์	$R_s$ (p.u.)	$X'$ (p.u.)	H(p.u.)
โหลดบัส 4	0.031	0.2704	0.7

#### ข.2 ระบบทดสอบที่ 3

ตารางที่ ข.2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้ในระบบทดสอบที่ 3

พารามิเตอร์	$R_s$ (p.u.)	$X'$ (p.u.)	H(p.u.)
โหลดบัส 5	0.031	0.2704	0.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

ข้อมูลบัส กำลังการผลิตไฟฟ้า และ โหลด ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัวก่อนเกิดการรบกวน และข้อมูลสายส่งที่ใช้สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้

## ค.1 ระบบทดสอบที่ 1

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 1

ข้อมูลบัส				
บัสที่	ชนิดบัส	โหลดจริง (MW)	โหลดเสมือน (MVA <sub>r</sub> )	ชัตเซปแดนซ์ขนาน (MVA <sub>r</sub> )
1	Slack	0	0	0
2	PQ	100	33	0

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 1

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า			
บัสที่	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิตเสมือน (MVAR)	ขนาดแรงดัน (p.u.)
1	104.94	36.71	1.0

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ในระบบทดสอบที่ 1

ข้อมูลสายส่ง					
เส้นที่	จากบัสที่	ไปบัสที่	ความต้านทาน (p.u.)	รีแอกแตนซ์ (p.u.)	ชัตเซปแดนซ์ (p.u.)
1	1	2	0.014	0.048	0

## ค.2 ระบบทดสอบที่ 2

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 2

ข้อมูลบัส				
บัสที่	ชนิดบัส	โหลดจริง (MW)	โหลดเสมือน (MVA <sub>r</sub> )	ชั้สเซปแดนซ์ขนาน (MVA <sub>r</sub> )
1	Slack	0	0	0
2	PQ	0	0	0
3	PQ	0	0	0
4	PQ	100	90	0
5	PQ	0	0	0
6	PV	0	0	0

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 2

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า			
บัสที่	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิตเสมือน (MVAR)	ขนาดแรงดัน (p.u.)
1	50	82.09	1.08
6	50	43.81	0.98

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ในระบบทดสอบที่ 2

ข้อมูลสายส่ง					
เส้นที่	จากบัสที่	ไปบัสที่	ความต้านทาน (p.u.)	รีแอกแตนซ์ (p.u.)	ชั้สเซปแดนซ์ (p.u.)
1	1	2	0	0.08	0
2	2	3	0	0.4432	0
3	2	3	0	0.4432	0
4	2	5	0	0.35	0
5	3	4	0	0.032	0
6	3	5	0	0.1	0
7	5	6	0	0.05	0

### ค.3 ระบบทดสอบที่ 3

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลบัส ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 3

ข้อมูลบัส				
บัสที่	ชนิดบัส	โหลดจริง (MW)	โหลดเสมือน (MVA <sub>r</sub> )	ชัตเซปแดนซ์ขนาน (MVA <sub>r</sub> )
1	Slack	0	0	0
2	PQ	327.8	288.8	0
3	PV	0	0	0
4	PQ	0	0	0
5	PQ	91.6	75.5	0
6	PV	0	0	0

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลกำลังการผลิตไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบ ณ จุดทำงานภาวะอยู่ตัว ในระบบทดสอบที่ 3

ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า			
บัสที่	กำลังการผลิตจริง (MW)	กำลังการผลิตเสมือน (MVAR)	ขนาดแรงดัน (p.u.)
1	-405.47	272.07	1.025
3	700	18.2	1.011
6	133	75.32	1.0

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง ในระบบทดสอบที่ 3

ข้อมูลสายส่ง					
เส้นที่	จากบัสที่	ไปบัสที่	ความต้านทาน (p.u.)	รีแอกแตนซ์ (p.u.)	ชัตเซปแดนซ์ (p.u.)
1	1	2	0.005206	0.038577	0.087527
2	1	2	0.005206	0.038577	0.087527
3	1	2	0.005229	0.037829	0.079132
4	1	2	0.005229	0.037829	0.079132
5	2	3	0.001000	0.000850	0.013600

ข้อมูลสายส่ง					
เส้นที่	จากบัสที่	ไปบัสที่	ความต้านทาน (p.u)	รีแอกแตนซ์ (p.u)	ซีสเซปแดนซ์ (p.u)
6	2	4	0.000335	0.130820	0.012400
7	2	5	0.000150	0.157087	0.00000
8	5	6	0.001300	0.027300	0.00000



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชนพล เจนสุทธิเวชกุล เกิดวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในมหาวิทยาลัยเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย