

การประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่



นาย ณพฤกษ์ พิมป์सार

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

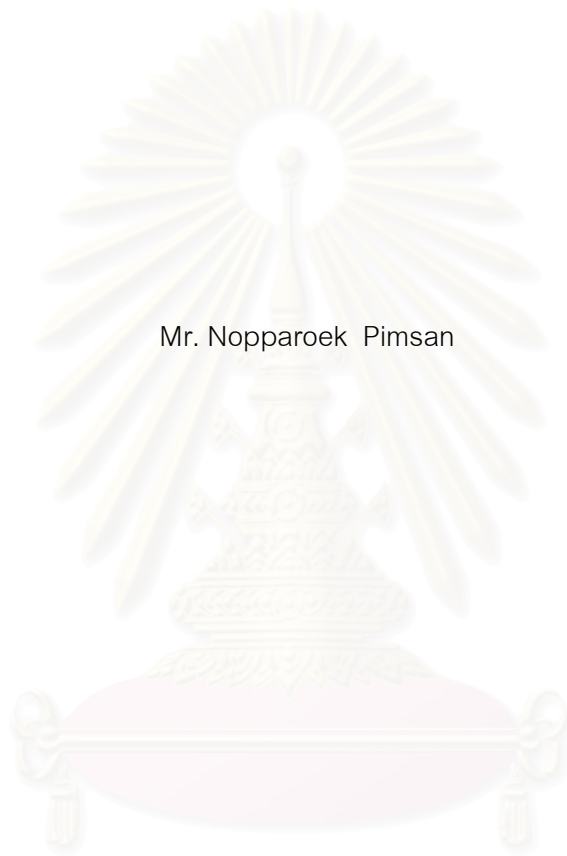
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INTER-AREA POWER TRANSFER CAPABILITY EVALUATION



Mr. Nopparoek Pimsan

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
โดย
สาขาวิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

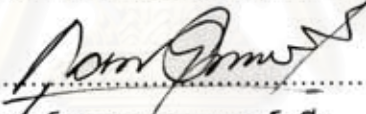
การประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่
นายณพฤกษ์ ทิมพัสสาร
วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

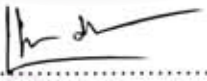

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.กุลยศ อุดมวงศ์เสรี)


.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ ชุชนพิพัฒน์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ณพฤกษ์ พิมพ์สาร : การประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่.

(INTER-AREA POWER TRANSFER CAPABILITY EVALUATION)

อ. ที่ปรึกษา : ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี, 97หน้า.

ปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์จนเราอาจจะกล่าวได้ว่า หากปราศจากพลังงานไฟฟ้าแล้ว กิจกรรมส่วนใหญ่ในชีวิตประจำวันก็ไม่อาจดำเนินไปอย่างปกติได้ ในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไปสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า หากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมีค่ามากจนเกินไป จะทำให้ระยะห่างระหว่างจุดทำงานของระบบกับขีดจำกัดทางด้านความมั่นคงมีแนวโน้มที่จะลดลง จนอาจก่อให้เกิดปัญหาทางด้านความมั่นคงของระบบในอนาคตได้จากสาเหตุดังกล่าว ในปี พ.ศ. 2538 คณะกรรมการความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าอเมริกาเหนือ (North American Electric Reliability Council; NERC) จึงได้นำเสนอแนวคิดและนิยามของความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งได้กำหนดให้หมายถึงค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านระบบสายส่งจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลด โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาความมั่นคงใดๆในระบบขึ้น โดยทั้งแหล่งกำเนิดและโหลดที่เราสนใจอาจเป็นเพียงบัสเดี่ยวๆในระบบไฟฟ้ากำลัง กลุ่มของบัสหรือระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบก็ได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ รวมทั้งได้อธิบายความหมายทางกายภาพในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยเราสามารถจำแนกลักษณะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เป็น 2 ส่วน คือ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด และค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคง นอกจากนี้ ยังนำเสนอแนวทางการพิจารณาผลของเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบส่ง ที่มีต่อค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ โดยอาศัยการกำหนดดัชนีเหตุขัดข้องร่วมกับการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล เมื่อได้ข้อมูลของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์แล้ว ในส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางการกำหนดค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็นร่วมกับการกำหนดระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้ วิธีการนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือเพื่อช่วยให้ผู้ควบคุมระบบสามารถดูและระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทดสอบกับระบบ IEEE 118 บัส ผลการคำนวณที่ได้รับเป็นที่น่าพอใจ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....ณพฤกษ์ พิมพ์สาร.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา.....2550.....

4970295221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: TOTAL TRANSFER CAPABILITY / AVAILABLE TRANSFER CAPABILITY

NOPPAROEK PIMSAN : AREA-BASED POWER TRANSFER CAPABILITY

EVALUATION. THESIS ADVISOR : KULYOS AUDOMVONGSEREE, Ph.D., 97 pp.

At present, electricity is one of the most important necessities for life. One can say that human activities can never continue smoothly without it. In transmission of electric energy from source to end-user, if the amount of energy is too large, it will affect system security in the future, which decreases margin between the system operating condition and its limits. From above reason, in 1995, North America Electric Reliability Council (NERC) has proposed concepts and definitions of total transfer capability, which is defined as the maximum amount of power that can be reliably transferred over the interconnected transmission systems between a pair of defined source and sink. Both of them can be either a single bus, group of buses, or areas.

The methodology to evaluate the area-based power transfer capability and its physical meaning are proposed in this thesis. It classifies the power transfer capability into two categories, maximum power transfer capability and security-concern power transfer capability. In addition, the proposed contingency index incorporated with Monte Carlo simulation method is applied to take impacts of contingency in transmission system to power transfer capability into account. Finally, the risk level concept and probabilistic approach are proposed to define the optimal power transfer capability. This proposed concept can be used as a tool to help the system operator regulate the power system more efficiently.

The methods proposed in this thesis have been tested with the IEEE-118 bus system. Satisfactory results are obtained.

Department : Electrical Engineering Student's signature : Nopparoek Pimsan
 Field of study : Electrical Engineering Advisor's signature : [Signature]
 Academic year : 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสวี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.แนบบุญ หุ่นเจริญ และ อาจารย์ ดร.ทรงศักดิ์ ชุณหวิวัฒน์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำ วิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่ให้อำนาจใจตลอดมา ตลอดจน พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า.....	5
2.1 หลักการพื้นฐานของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า.....	5
2.1.1 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า.....	5
2.1.2 นิยามของ TTC.....	6
2.1.3 วิธีการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ (Inter-area TTC Evaluation).....	7
2.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า.....	9
2.3 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ.....	14
2.4 การจำลองเหตุการณ์ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบมอนติคาร์โล.....	15
2.4.1 การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน.....	16
2.4.2 เกณฑ์การหยุดคำนวณ.....	18
บทที่ 3 การประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่.....	20
3.1 แบบจำลองสำหรับการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	20
3.2 ความไวของเงื่อนไขขีดจำกัดของระบบเทียบกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตและ การเพิ่มขึ้นของโหลด.....	23

3.2.1 การหาค่าความไวของขีดจำกัดทางด้านแรงดันไฟฟ้า.....	25
3.2.2 การหาค่าความไวของขีดจำกัดทางด้านกำลังไฟฟ้าของสายส่ง.....	26
3.2.3 การหาค่าความไวของขีดจำกัดทางด้านกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	27
3.2.4 ความไวของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ.....	28
3.3 วิธีการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ.....	28
3.4 กระบวนการหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อพิจารณาผลทางเสถียรภาพในสภาวะ ชั่วคราว.....	32
3.5 ความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่.....	35
3.5.1 แนวทางการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาความมั่นคงของระบบ.....	36
3.5.2 วิธีการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคง.....	39
3.6 ผลสรุปการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคง.....	42
บทที่ 4 การประเมินสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ส่งผลต่อค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า.....	44
4.1 ดัชนีกำหนดสายส่งที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่.....	44
4.2 การประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงเมื่อคำนึงถึงเหตุขัดข้อง เหตุขัดข้องในระบบส่ง.....	45
4.2.1 การประเมินผลของเหตุขัดข้องในระบบส่งโดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์.....	45
4.2.2 การกำหนดค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็น.....	45
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	50
5.1 ผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการที่นำเสนอ.....	50
5.2 ผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าตามความหมายทางกายภาพของ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่.....	52
5.3 ผลการทดสอบการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคง.....	54
5.4 ผลการทดสอบการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่ระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ กำหนด.....	58
5.5 ผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความ น่าจะเป็น.....	60
5.6 ผลการทดสอบผลกระทบของการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่มีต่อการจำลอง เหตุการณ์.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	66
ภาคผนวก.....	71

ภาคผนวก ก. การประเมินสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	72
ภาคผนวก ข. ระบบทดสอบ IEEE 118 Bus Test System.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	94



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 ตารางจำแนกบัสใน Area1 และ Area 2	50
ตารางที่ 5.2 สภาวะที่เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด	51
ตารางที่ 5.3 แสดงการจำแนกขอบเขตของซีดจำกัดที่เกิดขึ้น	51
ตารางที่ 5.4 แสดงการปรับปรุงระบบที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด	52
ตารางที่ 5.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (1)	53
ตารางที่ 5.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (2)	54
ตารางที่ 5.7 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านแรงดัน ณ บัสที่ 43 เท่านั้น	55
ตารางที่ 5.8 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านแรงดัน ณ บัสที่ 45 เท่านั้น	55
ตารางที่ 5.9 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านสายส่งระหว่างบัสที่ 30 และ 38 เท่านั้น*	56
ตารางที่ 5.10 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านการผลิต ณ บัสที่ 12 เท่านั้น	56
ตารางที่ 5.11 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านการผลิต ณ บัสที่ 15 เท่านั้น	57
ตารางที่ 5.12 แสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานใหม่ที่ระดับส่งผ่านเท่ากับ 41.27MW (1)	57
ตารางที่ 5.13 แสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานใหม่ที่ระดับส่งผ่านเท่ากับ 41.27 MW (2)	58
ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบการวิเคราะห์การกำหนดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า	59
ตารางที่ 5.15 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาผลทางเสถียรภาพของระบบ	61
ตารางที่ 5.16 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่พิจารณาผลทางเสถียรภาพและรับประกันความมั่นคงของระบบ	62
ตารางที่ 5.17 ผลการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เหมาะสมโดยกำหนดความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 0.01	65

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ขีดจำกัดต่างๆ ที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด	7
รูปที่ 2.2	การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้ากำลัง.....	8
รูปที่ 2.3	ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน.....	13
รูปที่ 2.4	ลักษณะสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	14
รูปที่ 2.5	การทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเมื่อประมาณช่วงเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย.....	15
รูปที่ 2.6	แสดงช่วงเวลาในการทำงานของ 2 อุปกรณ์	17
รูปที่ 2.7	ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์โดยวิธีสุ่มช่วงเวลาการทำงาน.....	19
รูปที่ 3.1	แสดงการเพิ่มกำลังการผลิตในกลุ่มบัสต้นทางไปยังโหนดบัสในกลุ่มบัสปลายทาง	23
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	31
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาผลทางเสถียรภาพ.....	34
รูปที่ 3.4	ความหมายทางกายภาพของการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3.5	ความหมายทางกายภาพของการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในด้านความมั่นคง.....	37
รูปที่ 3.6	การวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด	38
รูปที่ 3.7	แสดงการเดินทางของค่ากำลังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	38
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของแต่ละเงื่อนไขบังคับ	41
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยกำหนดจากกลุ่มผู้ต้องการไฟฟ้า	43
รูปที่ 4.1	ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า	47
รูปที่ 4.2	แสดงขั้นตอนการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักการของความน่าจะเป็น.....	49
รูปที่ 5.1	ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส.....	51
รูปที่ 5.2	ความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	63
รูปที่ 5.3	ความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงของระบบ	63
รูปที่ 5.4	ค่าเฉลี่ยของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์จนเราอาจกล่าวได้ว่า หากปราศจากพลังงานไฟฟ้าแล้ว กิจกรรมส่วนใหญ่ในชีวิตประจำวันก็ไม่อาจดำเนินไปอย่างปกติได้ จากการเติบโตของเศรษฐกิจ และการเพิ่มของจำนวนประชากรอย่างรวดเร็วทำให้ปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย การผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นนี้จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนเพื่อให้สามารถผลิต และจัดส่งไปยังผู้บริโภคได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

โดยทั่วไปการวางแผนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะมุ่งพิจารณาที่ตัวโรงไฟฟ้าเป็นหลัก ส่วนการวางแผนการส่งพลังงานไฟฟ้าจะพิจารณาควบคู่กันไประหว่าง การวางแผนการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างเหมาะสมและการวางแผนการใช้งานระบบสายส่งอย่างมีประสิทธิภาพ ในบางประเทศการวางแผนระบบส่งอยู่ในความรับผิดชอบของหน่วยงานที่กำกับดูแลโดยรัฐบาล แต่ในอีกหลายๆประเทศ ก็เป็นหน้าที่ขององค์กรอิสระที่ไม่ขึ้นอยู่กับการแทรกแซงของรัฐ สำหรับประเทศไทย รัฐบาลชุดที่ผ่านมาได้ผ่านพระราชบัญญัติเกี่ยวกับกิจการพลังงานทำให้มีการก่อตั้งคณะกรรมการกิจการพลังงานซึ่งเป็นองค์กรอิสระทำหน้าที่ดูแลด้านพลังงานของประเทศ ซึ่งรวมถึงการควบคุมและตรวจสอบการวางแผนการใช้งานระบบส่งนี้ด้วย

เนื่องจากการแปรรูปหรือการลดการควบคุมอุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นสิ่งที่กำลังเป็นอยู่หรือกำลังจะเกิดขึ้นในหลายประเทศทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย การแปรรูประบบไฟฟ้างดงกล่าวนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากต่อการจัดรูปแบบโครงสร้างองค์กร การบริหารจัดการ และ การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ในมุมมองทางวิศวกรรมไฟฟ้าซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าพบว่าเมื่อสามารถใช้ระบบส่งได้อย่างอิสระแล้ว ผู้ใช้ไฟจะสามารถซื้อไฟฟ้าจากผู้ขายไฟฟ้าที่ตนต่อเชื่อมอยู่ได้โดยอิสระ อย่างไรก็ตาม บริษัทผลิตไฟฟ้าก็อาจเลือกที่จะซื้อไฟฟ้าจากบริษัทอื่นเพื่อจ่ายไหลคืนในบริเวณของตนได้เช่นกัน ดังนั้น โดยทั่วไประบบไฟฟ้าเมื่อถูกแปรรูปแล้ว เราจะพบว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบมักมีค่ามากขึ้นกว่าสถานะที่ยังไม่มีการแปรรูป และสำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงส่วนใหญ่ที่ไม่ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับธุรกรรมทางไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในระบบเนื่องจากผลของการแปรรูป การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจำนวนมากจะทำให้ระยะห่างระหว่างจุด

ทำงานกับขีดจำกัดทางด้านความปลอดภัย (Security Margin) ของระบบดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะลดลงจนอาจก่อให้เกิดปัญหาทางด้านความมั่นคงของระบบได้ในอนาคตได้

จากสาเหตุดังกล่าว ในปี พ.ศ. 2538 คณะกรรมการความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าอเมริกาเหนือ (North American Electric Reliability Council; NERC) จึงได้นำเสนอแนวคิดและนิยามของความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Total Transfer Capability; TTC) ซึ่งได้กำหนดให้ TTC หมายถึงค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านระบบสายส่งจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาความมั่นคงใดๆในระบบขึ้น [1] โดยทั้งแหล่งกำเนิดและโหลดที่เราสนใจอาจเป็นเพียงบัสเดี่ยวๆในระบบไฟฟ้ากำลัง กลุ่มของบัส หรือระบบไฟฟ้ากำลังแต่ละระบบก็ได้

จากการศึกษาบทความวิจัยย้อนหลังพบว่า มีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการคำนวณค่า TTC มากมาย แต่อย่างไรก็ดี งานวิจัยส่วนมากจะมุ่งเน้นพิจารณาแค่กรณีการส่งพลังงานไฟฟ้าจากบัสเดี่ยวๆ ไปยังจุดโหลดที่เป็นบัสเดี่ยวๆ (Point-to-point TTC) เท่านั้น นอกจากนี้ แม้ว่าบางงานวิจัยจะนำเสนอวิธีการคำนวณค่า TTC ระหว่างระบบไฟฟ้ากำลัง (Inter-area TTC) แต่ก็มีได้อธิบายถึงความหมายทางกายภาพของผลลัพธ์ที่คำนวณได้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ พร้อมทั้งอธิบายความหมายทางกายภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนี้ จะนำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการที่นำเสนอเพื่อเป็นแนวทางในการกำกับดูแลการวางแผนใช้งานระบบส่งอย่างมีประสิทธิภาพในอนาคตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธหาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดพร้อมทั้งองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. อธิบายความหมายทางกายภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการประยุกต์เพื่อเป็นแนวทางในการกำกับดูแลการวางแผนระบบส่งอย่างมีประสิทธิภาพ
3. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมที่ใช้หาค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่

2. พิจารณาเฉพาะขีดจำกัด เงื่อนไขค่าพิกัดสายส่ง เงื่อนไขพิกัดขนาดแรงดัน และเงื่อนไขพิกัดกำลังการผลิตสูงสุดและเงื่อนไขเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราวเท่านั้น
3. พิจารณาเหตุขัดข้องที่เกิดจากการผิดพลาดของอุปกรณ์ โดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์
4. กำหนดให้แบบจำลองโหลดเป็นแบบค่ากำลังไฟฟ้าคงที่และมีตัวแปรกำลังคงที่

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาวิธีการกำหนดความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและรูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลังแบบต่างๆ
2. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบที่จะนำมาใช้ทดสอบ
3. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด
4. ทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณกับวิธีการอื่นที่ได้มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้
5. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
6. เรียบเรียงผลงานวิจัยเพื่อทำการเสนอต่อคณะกรรมการต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. ประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ได้
2. ดัชนีที่ใช้จำแนกการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำกับดูแลระบบไฟฟ้ากำลังได้

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอในที่นี้ถูกจัดเรียงลำดับตามความเหมาะสมในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต รวมทั้งขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานการวิเคราะห์ที่ใช้ในการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ประกอบด้วย นิยามของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า และ ทฤษฎีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า หลักการพื้นฐานในการจำลองอุปกรณ์ และการจำลองเหตุการณ์ของมอนติคาร์โล

บทที่ 3 จะนำเสนอหลักการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ ความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่และแนวทางการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาความมั่นคงของระบบ

บทที่ 4 จะนำเสนอการวิเคราะห์ผลของเหตุขัดข้องในระบบส่งที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

บทที่ 5 จะนำเสนอผลการทดสอบวิธีการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงของระบบ ผลการกำหนดสายส่งที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ และการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักการทางความน่าจะเป็น

บทที่ 6 จะสรุปผลที่ได้จากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และข้อเสนอแนะสำหรับมีการพัฒนางานวิจัยต่อเนื่องในอนาคต



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

2.1 หลักการพื้นฐานของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

2.1.1 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า [1], [2]

การประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (Transmission transfer capability evaluation) เป็นการคำนวณค่าขีดจำกัดในการส่งกำลังไฟฟ้าจากบัสหนึ่งไปยังอีกบัสหนึ่ง (หรือจากพื้นที่หนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่ง) โดยผ่านระบบสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างกลุ่มบัสเหล่านั้นๆ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่พิจารณาจะอยู่ในเทอมของกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบสำคัญหลายประการ เช่น หลักการจัดสรรระบบผลิต โครงสร้างระบบสายส่ง นโยบายการกำกับดูแลระบบไฟฟ้า และหลักการควบคุมการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบ

แนวคิดของการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าถูกนำเสนอในปี พ.ศ. 2538 โดยคณะกรรมการความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังอเมริกาเหนือ (NERC) ซึ่งให้ความหมายของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าพร้อมมูล (Available Transfer Capability : ATC) ว่าเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถที่เหลืออยู่ในการส่งผ่านพลังงาน จากกลุ่มตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งค่าการส่งผ่านกำลังพร้อมมูลนี้ คำนวณได้จากผลต่างระหว่างความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Total Transfer Capability : TTC) กับผลรวมของกำลังไฟฟ้า ณ สภาวะการทำงานปัจจุบันของระบบ (Existing Transmission Commitment : ETC) กำลังส่งในระบบสายส่งที่สำรองเพื่อความมั่นคงและความเชื่อถือได้ในระบบ (Transmission Reliability Margin : TRM) และกำลังส่งที่สำรองเพื่อผลทางด้านความน่าเชื่อถือได้ในการผลิต (Capacity Benefit Margin : CBM) โดยสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$ATC = TTC - ETC - TRM - CBM \quad (2.1)$$

โดยที่ TTC คือ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ETC คือ ค่าภาระโหลดปัจจุบันของระบบสายส่ง

TRM คือ ค่ากำลังส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่สำรองไว้เพื่อเหตุผลทางด้านความปลอดภัย

CBM คือ ค่ากำลังไฟฟ้าที่สำรองไว้เพื่อผลทางด้านความน่าเชื่อถือของกำลังการผลิต

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการพิจารณาเฉพาะการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (TTC) ที่ส่งระหว่างพื้นที่หนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่งเท่านั้น ซึ่งการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบพื้นที่นั้นเป็นการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากที่สุดในทางปฏิบัติ โดยส่วนมากจะเป็นการส่งกำลังไฟฟ้าพื้นที่ที่มีกำลังการผลิตมากไปยังพื้นที่ที่มีกำลังการผลิตน้อยกว่า

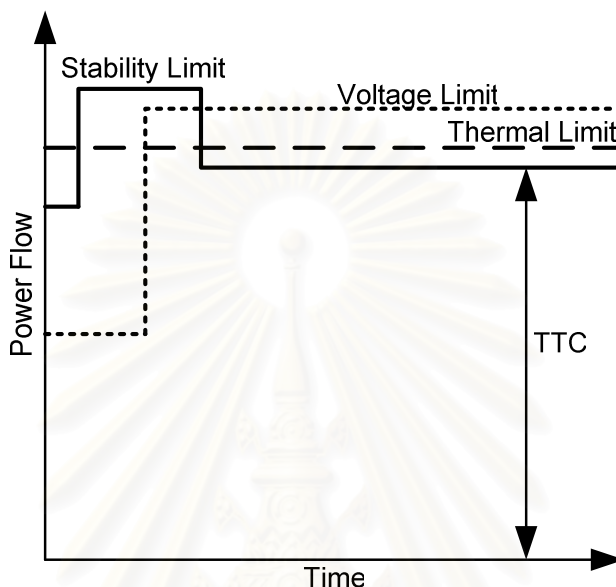
2.1.2 นิยามของ TTC

ความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด หรือ TTC ถูกนิยามให้หมายถึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถส่งจากตำแหน่งหนึ่งในระบบผ่านระบบสายส่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง โดยไม่ทำให้ระบบอยู่ในสถานะที่เสี่ยงต่อการเกิดปัญหาเกี่ยวกับความมั่นคง อย่างไรก็ตาม สถานะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากความต้องการกำลังไฟฟ้ามีค่าไม่คงที่ นอกจากนี้ โครงสร้างของระบบและอุปกรณ์ต่างๆที่อาจเกิดการชำรุดเสียหายได้ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้จะมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับเวลาและสถานะต่างๆ ของระบบ

โดยทั่วไปแล้ว ในการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่เราจะทำการจำลองสถานะการทำงานของระบบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยต้องจำลองสถานะการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะเป็น ความต้องการโหลด การจัดสรรกำลังการผลิต สถานะของโครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆในระบบที่อาจเกิดการชำรุด จากนั้นทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อกำหนดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สามารถส่งระหว่างพื้นที่ได้ โดยไม่ละเมิดขีดจำกัดของระบบ โดยขีดจำกัดของระบบที่ต้องพิจารณา มีดังนี้

1. เกณฑ์ขีดจำกัดของระดับแรงดัน (Voltage level limit) โดยทุกตำแหน่งในระบบจะต้องได้รับไฟฟ้าที่ระดับแรงดันในช่วง 0.95 ถึง 1.05 p.u.
2. เกณฑ์ขีดจำกัดทางอุณหภูมิของสายส่ง (Thermal limit) โดยสายส่งแต่ละเส้นต้องไม่รับกำลังเกินกว่าขีดจำกัดที่จะทำให้สายส่งมีอุณหภูมิเกินที่กำหนด ขีดจำกัดนี้จะถูกระบุในรูปแบบของกำลังที่ไหลในสายส่งในหน่วย MVA หรือกระแสที่ไหลผ่านสายส่งในหน่วย kA
3. ขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generation limit) โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่องในระบบจะต้องไม่จ่ายกำลังเกินความสามารถของเครื่อง
4. ขีดจำกัดเสถียรภาพ (Stability limit) โดยระบบไฟฟ้าจะต้องมีความสามารถในการต้านทานการรบกวน (Disturbance) ได้

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดที่ 1 ถึง 3 เป็นหลัก ในส่วนของเงื่อนไขขีดจำกัดทางด้านเสถียรภาพของระบบ จะนำมาพิจารณาภายหลังจากพิจารณาเงื่อนไขหลักเสร็จสิ้น [2], [3]



รูปที่ 2.1 ขีดจำกัดต่างๆ ที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

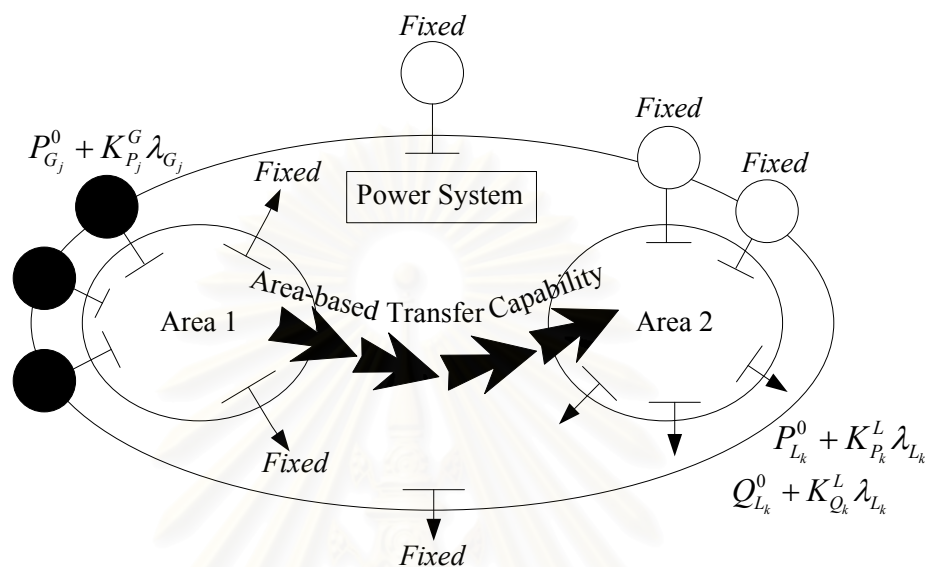
จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า TTC จะมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับขีดจำกัดทางด้านแรงดันไฟฟ้า ขีดจำกัดของสายส่ง ขีดจำกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขีดจำกัดเสถียรภาพของระบบ

2.1.3 วิธีการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ (Inter-area TTC Evaluation)

โดยทั่วไป การเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากำลังเข้าด้วยกันจะเป็นการช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวม โดยในกรณีที่กำลังการผลิตของระบบหนึ่งไม่เพียงพออีกระบบหนึ่งก็สามารถส่งกำลังไฟฟ้ามาช่วยเหลือได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

สมมติว่า ระบบไฟฟ้ากำลังในพื้นที่ที่ 2 ร้องขอการส่งกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่ที่ 1 ปัญหาที่น่าสนใจก็คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดขนาดเท่าไรที่ระบบไฟฟ้าจากพื้นที่ที่ 1 สามารถส่งมาช่วยได้ การประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่หรือระหว่างระบบสามารถตอบคำถามนี้ได้

จากอดีตจนกระทั่งปัจจุบัน มีงานวิจัยเป็นจำนวนมากนำเสนอวิธีการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแม้ว่าส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการส่งระหว่างบัสต่อบัสก็ตาม ซึ่งเราสามารถแบ่งวิธีการคำนวณออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้



รูปที่ 2.2 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้ากำลัง

1. วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบซ้ำ (Repeated Power Flow Calculation)
งานวิจัยที่อาศัยหลักการนี้ [7], [9] จะทำการเพิ่มระดับโหลด และตรวจสอบเงื่อนไขการละเมิดขีดจำกัดของระบบไฟฟ้าด้วยวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยการเพิ่มโหลดจะกระทำไปจนกระทั่งเกิดการละเมิดขีดจำกัดของระบบขึ้น ข้อดีของวิธีการนี้คือง่ายต่อการวิเคราะห์แต่มีข้อด้อยคือใช้เวลาในการคำนวณนาน
2. วิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสม (Optimization Power Flow; OPF)
งานวิจัยที่อาศัยวิธีการนี้ [10], [11] จะทำการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายเป็นการหาค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ส่งจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งที่พิจารณา และจะจัดรูปแบบของขีดจำกัดของระบบให้อยู่ในรูปแบบของอสมการเงื่อนไข ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่ดีที่สุด จะเป็นวิธี Gradient-search เช่น วิธีการเชิงเลขของนิวตัน หรือ Heuristic-search เช่น Genetic Algorithm ก็ได้ อย่างไรก็ตามวิธีเหล่านี้มีข้อด้อยคือ มีความซับซ้อนของปัญหาสูง และใช้เวลาในการคำนวณมาก
3. วิธีที่ใช้การประมาณค่าคำตอบ (Linear Estimation) วิธีการนี้จะใช้การประมาณในเชิงเส้นเพื่อหาค่าคำตอบที่ใกล้เคียงที่สุด [13]-[16] แต่คำตอบที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน

แตกต่างจากคำตอบที่คำนวณได้จากวิธีการที่ 1 และ 2 ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถคำนวณคำตอบได้ด้วยความเร็ว แต่มีข้อด้อยคือ คำตอบอาจคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้

2.2 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

เทคนิคที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel method) วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธีการของนิวตัน-ราฟสันมีประสิทธิภาพในการคำนวณสูง และสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะพิจารณาเฉพาะวิธีการของนิวตัน-ราฟสัน เท่านั้น

พิจารณาสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ฉีดเข้าที่บัส i ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบด้วยบัสทั้งหมด n บัส ดังสมการที่ (2.2)

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (2.2)$$

โดยที่	P_i	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากบัส i
	Q_i	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายออกจากบัส i
	V_i, V_n	คือ แรงแดันไฟฟ้าบัส i และ n ตามลำดับ
	V_i^*	คือ สังกะยัฒนของแรงแดันไฟฟ้าที่บัส i
	Y_{in}	คือ สมาชิกที่ตำแหน่งที่ (i, n) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์
	N	คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบไฟฟ้า

เราสามารถจัดสมการที่ (2.2) ให้อยู่ในรูปของส่วนจริงและส่วนจินตภาพได้ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.3)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.4)$$

โดยที่	P_i	คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกจากบัส i
--------	-------	--

Q_i	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายออกจากบัส i
$ V_i $	คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าบัส i
$ V_j $	คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าบัส j
δ_i	คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i
δ_j	คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส j
$ Y_{in} $	คือ ขนาดของสมาชิกที่ตำแหน่งที่ (i, n) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์
θ_{ij}	คือ มุมของสมาชิกที่ตำแหน่งที่ (i, n) ของบัสแอดมิตแตนซ์เมทริกซ์

จะเห็นว่าสมการที่ (2.3) และ (2.4) เป็นสมการไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equation) ซึ่งเราจะทำการคำนวณหาคำตอบด้วยวิธีการเชิงเลขของนิวตัน-ราฟสัน โดยจะทำการประมาณสมการไม่เชิงเส้นนี้ให้อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นโดยอาศัยอนุกรมของเทเลอร์ (Taylor's series) ที่ละเลยพจน์ที่มีอันดับสูงกว่าหนึ่งไป ดังนั้น สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าสามารถลดรูปให้อยู่ในรูปแบบของสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอกทีฟแบบเมทริกซ์ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta V}{|V|} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยที่	ΔP	คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าจริงของแต่ละบัส
	ΔQ	คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของแต่ละบัส
	ΔV	คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของขนาดของแรงดันไฟฟ้า
	$\Delta \delta$	คือ เวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนของมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า
	J_1, J_2, J_3, J_4	คือ เมทริกซ์จาโคเบียนย่อย (Sub Jacobian Matrix)

โดยสมาชิกของเมทริกซ์จาโคเบียนย่อยที่ 1 (J_1) นั้น ณ ตำแหน่ง Diagonal element และ Off-Diagonal element จะแสดงดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.7)$$

โดยสมาชิกของเมทริกซ์จาโคเบียนย่อยที่ 2 (J_2) นั้น ณ ตำแหน่ง Diagonal element และ Off-Diagonal element จะแสดงดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) + 2G_{ii} |V_i| \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.9)$$

โดยสมาชิกของเมทริกซ์จาโคเบียนย่อยที่ 3 (J_3) นั้น ณ ตำแหน่ง Diagonal element และ Off-Diagonal element จะแสดงดังสมการที่ (2.10) และ (2.11)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.11)$$

และสมาชิกของเมทริกซ์จาโคเบียนย่อยที่ 4 (J_4) นั้น ณ ตำแหน่ง Diagonal element และ Off-Diagonal element จะแสดงดังสมการที่ (2.12) และ (2.13)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) - 2B_{ii} |V_i| \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.13)$$

และค่าของ G_{ii} และ B_{ii} ได้จากสมการดังนี้

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} = |Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + j |Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) = G_{ii} + jB_{ii} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.5) นั้นแต่ละสมาชิกของ ΔP และ ΔQ นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับดังนี้ เพื่อทำการปรับจุดทำงานใหม่ของการคำนวณครั้งต่อไป

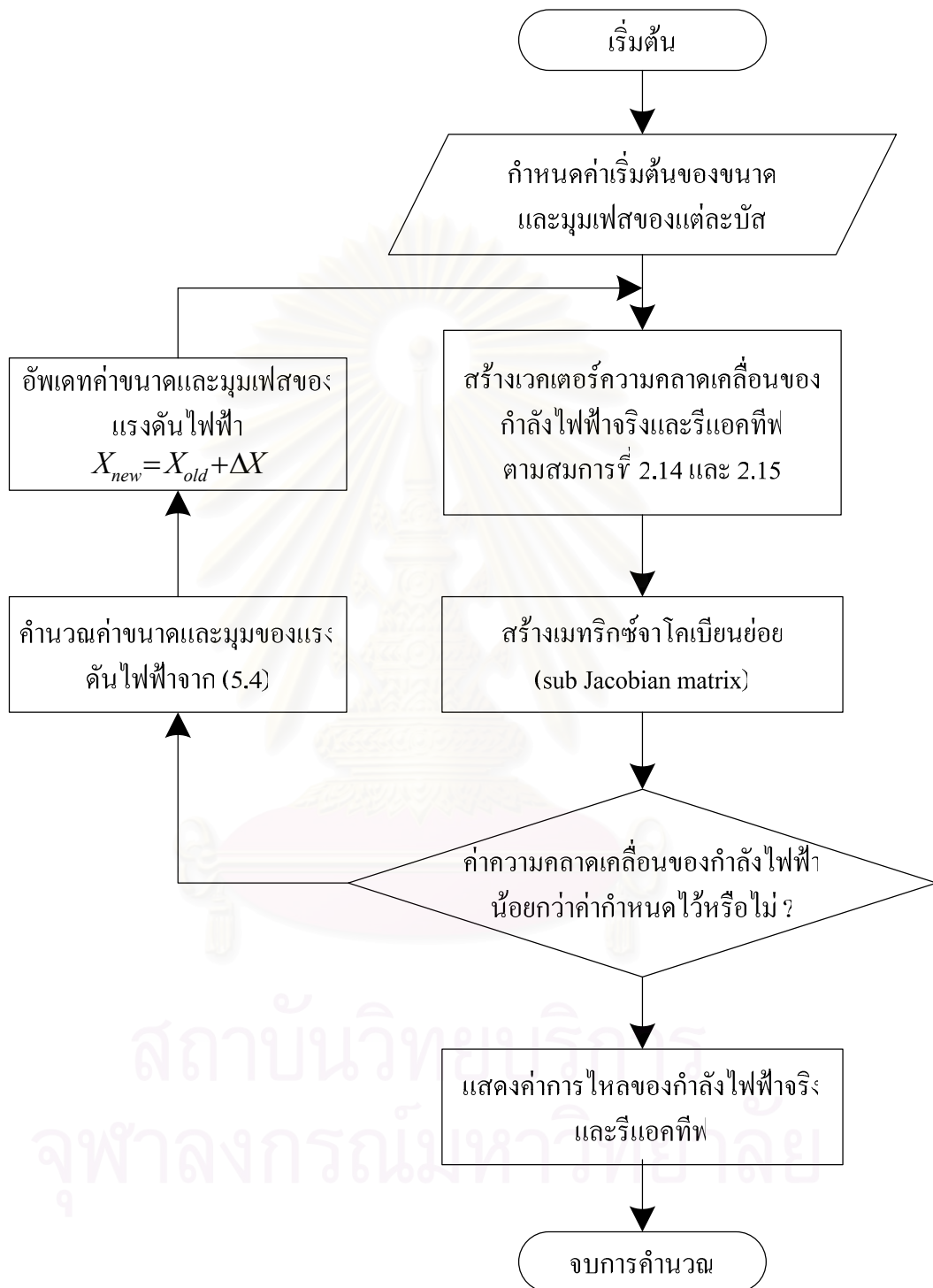
$$\Delta P_i = (P_{gi} - P_{di}) - P_{i,cal} \quad (2.15)$$

$$\Delta Q_i = (Q_{gi} - Q_{di}) - Q_{i,cal} \quad (2.16)$$

โดยที่	ΔP_i	คือ สมาชิกตัวที่ i ของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้าจริง
	ΔQ_i	คือ สมาชิกตัวที่ i ของเวกเตอร์ความคลาดเคลื่อนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
	P_{gi}	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ที่บัส i
	P_{di}	คือ ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i
	Q_{gi}	คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ผลิตได้ที่บัส i
	Q_{di}	คือ ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่บัส i
	$P_{i,cal}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.3) สำหรับบัส i
	$Q_{i,cal}$	คือ ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.4) สำหรับบัส i

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสันนั้น จำเป็นต้องทำการคำนวณสมการ (2.5) ซ้ำ เพื่อหาค่าที่จะนำไปปรับเปลี่ยนค่าขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส คือ $\Delta \delta$ และ $|\Delta V|/|V|$ ให้มีค่าใกล้เคียงค่าตอบมากขึ้น จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าเริ่มต้นของครั้งถัดไป โดยการคำนวณจะกระทำซ้ำจนกระทั่งความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยมากจนกระทั่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

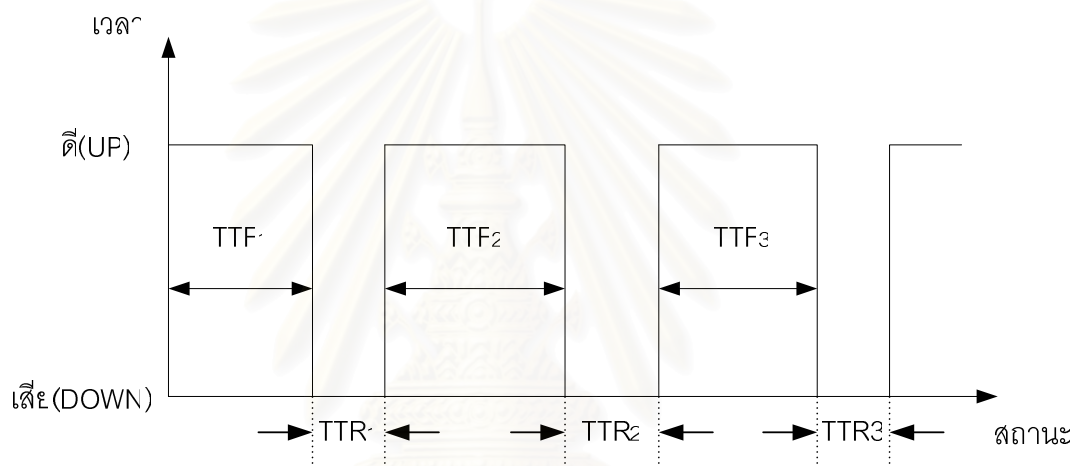
ในขั้นตอนสุดท้าย เราสามารถนำผลลัพธ์ที่เป็นคำตอบของแรงดันทั้งขนาดและมุมเฟสที่ตำแหน่งต่างๆในระบบ ณ สภาวะที่กำหนด ไปคำนวณปริมาณต่างๆในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ รวมไปถึงกำลังไฟฟ้าการสูญเสียในระบบไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

2.3 แบบจำลองรอบการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ [18]

หากพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะพบว่าการทำงานปกติของอุปกรณ์มีลักษณะเป็นช่วงตามคาบเวลาที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-periodic) ประกอบด้วยสถานะทำงานปกติ “สถานะดี” (Operable state) สลับกับสถานะขัดข้อง “สถานะเสีย” (Failed state) แต่ในการสร้างแบบจำลอง 2 สถานะ “ดี-เสีย” เพื่อแทนการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวในช่วงระยะเวลายาว จะสามารถประมาณช่วงระยะเวลาในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย และช่วงคาบเวลาแสดงพฤติกรรมของอุปกรณ์มีลักษณะเป็นคาบเวลาที่สม่ำเสมอ (Periodic) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5

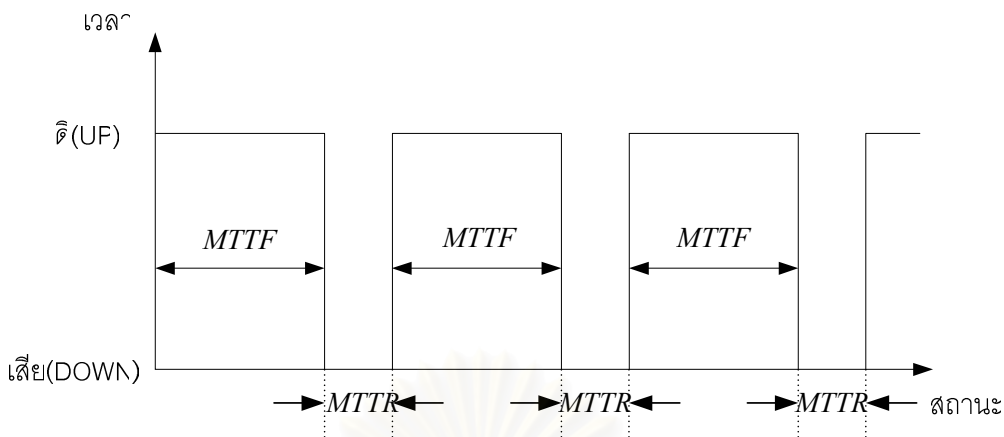


รูปที่ 2.4 ลักษณะสถานะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โดยที่ TTF_i คือ เวลาที่อุปกรณ์จะเสีย หรือระยะเวลาที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ในครั้งที่ i

TTR_i คือ เวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์ หรือระยะเวลาที่อุปกรณ์เสียในครั้งที่ i

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 การทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเมื่อประมาณช่วงเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย

- โดยที่
- MTTF คือ ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่อุปกรณ์สามารถทำงานได้ (ค่าเฉลี่ยของ TTF) และมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\lambda}$
 - MTTR คือ ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่อุปกรณ์เสีย (ค่าเฉลี่ยของ TTR) และมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{\mu}$
 - λ คือ อัตราการเสีย (Failure Rate) หรืออัตราการออกจากสถานะดี
 - μ คือ อัตราการซ่อม (Repair Rate) หรืออัตราการเข้าสู่สถานะดี

ซึ่งการจำลองสถานะของอุปกรณ์แบบการจำลองมาร์คอฟ 2 สถานะ จะช่วยในการจำลองเหตุการณ์ของระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

2.4 การจำลองเหตุการณ์ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบมอนติคาร์โล

การจำลองเหตุการณ์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น ส่วนใหญ่มักใช้การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล การจำลองระบบไฟฟ้าด้วยวิธีนี้นั้นมีจุดด้อยเนื่องจากการคำนวณจะมีความซับซ้อนและเสียเวลามากหากระบบมีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการจำลองด้วยวิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณสูงแต่สามารถจัดการกับปัญหาที่ซับซ้อนได้ดี ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะอาศัยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลซึ่งเป็นวิธีที่ยังคงมีประสิทธิภาพสูงแม้ว่าขนาดของระบบจะใหญ่ขึ้นมากก็ตาม

การจำแนกประเภทของการสุ่มแบบมอนติคาร์โลนั้นหากจำแนกตามความสัมพันธ์ของแต่ละสถานะที่สุ่มได้จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือชนิดที่ไม่มีความเกี่ยวเนื่องกัน (Nonsequential)

และชนิดที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน (Sequential) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการสุ่มช่วงเวลาการทำงาน (State duration sampling) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการสุ่มที่มีความเกี่ยวเนื่องกัน [18]

2.4.1 การสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

การสุ่มช่วงเวลาการทำงานเป็นการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ตามแบบจำลอง 2 สถานะ โดยจะมีสมมติฐานให้ช่วงเวลาทำงานในแต่ละสถานะ เช่น “สถานะดี” หรือ “สถานะเสีย” มีการกระจายตัวที่อธิบายได้ด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density function) โดยทั่วไป ระยะเวลาที่อุปกรณ์หนึ่งๆ อยู่สถานะดี สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันการกระจายตัวแบบเอกโพเนนเชียล (Exponential Distribution function) ดังสมการที่ (2.17)

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.17)$$

โดยที่ λ คือ อัตราความล้มเหลว
 T คือ เวลา

ดังนั้นค่าความไม่พร้อมมูล (U) ที่เวลา T คำนวณได้จาก

$$U = F_T(T) = \int_0^T \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda T} \quad (2.18)$$

จะได้ว่า

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-U) \quad (2.19)$$

แต่ $(1-U)$ มีการกระจายเช่นเดียวกับ U ดังนั้นจึงสามารถเขียนได้ดังนี้

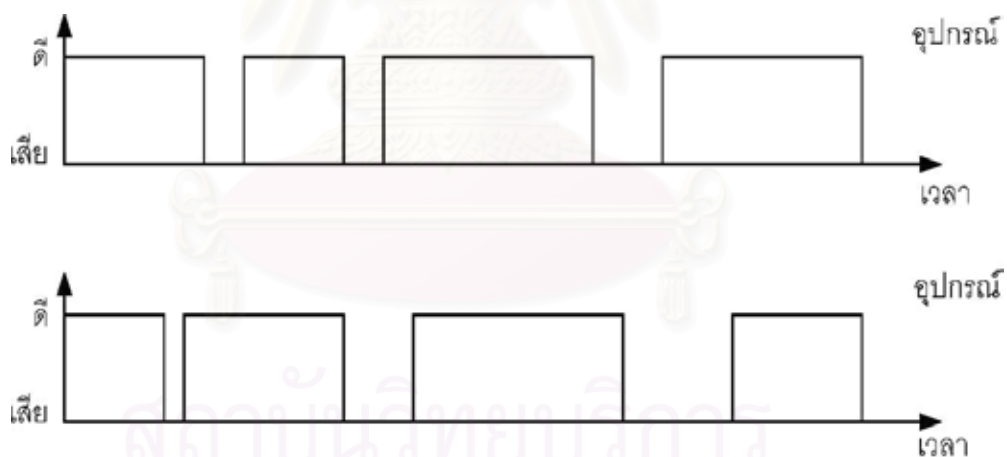
$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln(U) \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกันหากเราสมมติให้ช่วงเวลาในการซ่อมแซมอุปกรณ์โดยเริ่มตั้งแต่อุปกรณ์เสียหายจนกลับมาใช้งานได้มีการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) เราจะสามารถคำนวณช่วงเวลาการซ่อมแซมอุปกรณ์ได้ดังสมการที่ (2.21)

$$T = r + Z \times \sigma_r \quad (2.21)$$

โดยที่ U คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวปกติ
 r คือ ระยะเวลาในการซ่อมแซมเฉลี่ย
 σ_r คือ ความแปรปรวนของระยะเวลาซ่อมแซมโดยปกติ กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $0.1 \times r$

ด้วยวิธีการดังกล่าวจะสามารถสุ่มระยะเวลาที่แต่ละอุปกรณ์อยู่ในสถานะหนึ่งๆ จนกระทั่งเปลี่ยนสถานะ และเมื่อทำซ้ำจนครบทุกอุปกรณ์จนครบระยะเวลาที่ต้องการจะได้ข้อมูลของระบบดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงช่วงเวลาในการทำงานของ 2 อุปกรณ์

วิธีการสุ่มช่วงเวลาการทำงานในแต่ละสถานะของแต่ละอุปกรณ์มีข้อดีคือสามารถจำลองลักษณะการกระจายของสถานะการทำงานของอุปกรณ์โดยใช้การกระจายแบบใดก็ได้แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์สูงกว่า ใช้เวลาการคำนวณมากกว่า และมีความซับซ้อนสูง แต่เนื่องจากปัจจุบันสมรรถนะของคอมพิวเตอร์สูงขึ้นมากดังนั้นข้อเสียดังกล่าวจึงสามารถละเลยได้

2.4.2 เกณฑ์การหยุดคำนวณ (Stopping criteria) [18]

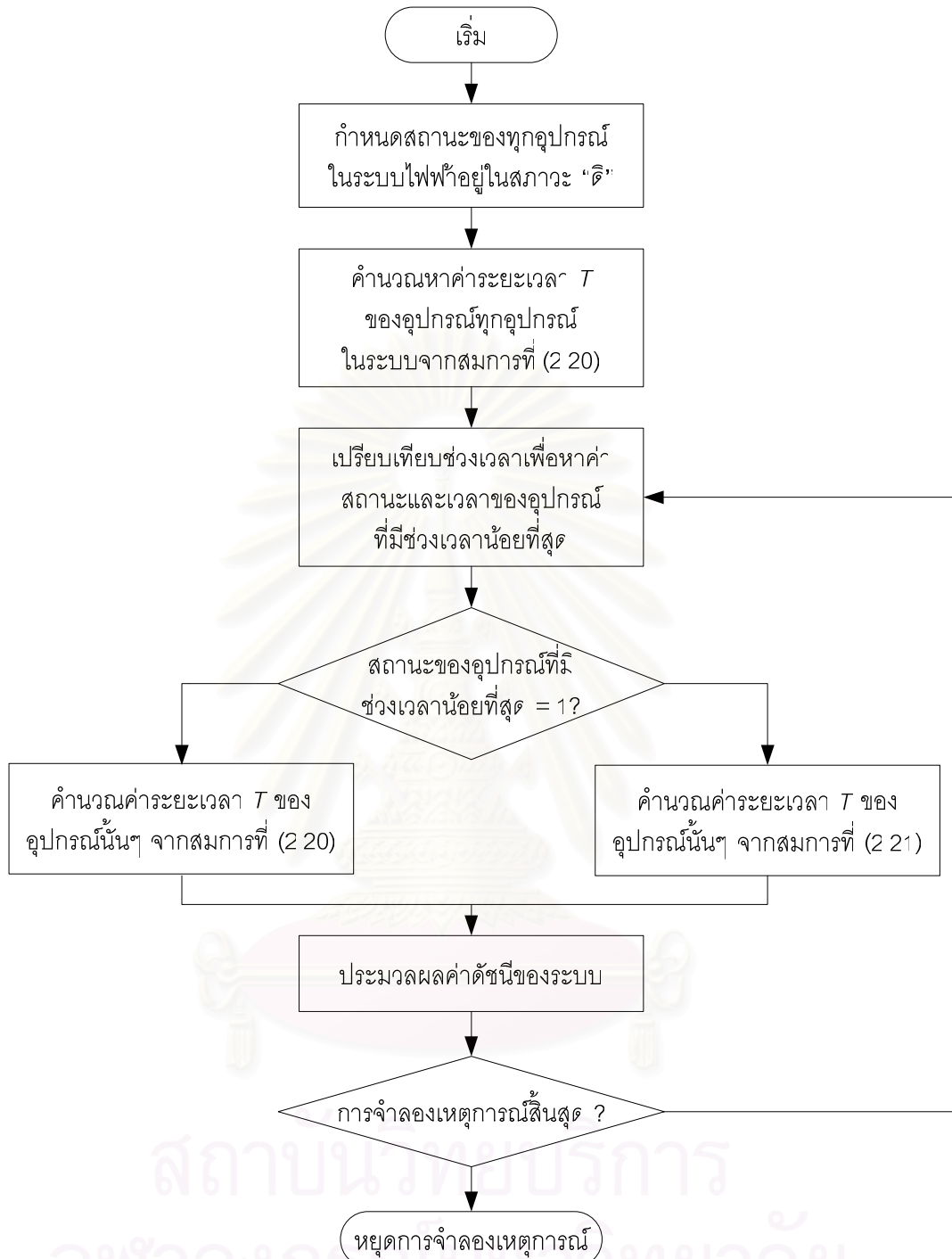
สำหรับเกณฑ์การหยุดคำนวณของการจำลองเหตุการณ์ตามวิธีมอนติคาร์โลนั้นนิยมใช้เกณฑ์สองแบบ คือ การกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการทำงานหรือการกำหนดค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative uncertainty) ของดัชนีที่ยอมรับได้ไว้ที่ค่าหนึ่ง การคำนวณความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์แสดงไว้ในสมการที่ 2.22

$$\text{ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์} = \frac{S}{\hat{x}\sqrt{n}} \quad (2.22)$$

โดยที่	S	คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของดัชนี
	\hat{x}	คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) ของดัชนี
	n	คือ จำนวนครั้งของการสุ่ม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ยอมรับได้แต่อย่างไรก็ตามจะกำหนดให้จำนวนของเหตุการณ์เป็นเกณฑ์การหยุดการคำนวณควบคู่กันไป ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์โดยวิธีสุ่มช่วงเวลาทำงานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงดังรูปที่ 2.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์โดยวิธีสุ่มช่วงเวลาการทำงาน

บทที่ 3

การประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่

การประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีความสำคัญมาก เนื่องจากในปัจจุบันระบบไฟฟ้ามักถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกันเป็นโครงข่าย การประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด จะช่วยบ่งบอกถึงขอบเขตของปริมาณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากระบบหนึ่งไปยังอีกระบบหนึ่งที่เชื่อมต่อกันอยู่ว่าสามารถส่งได้มากที่สุดเท่าไร ซึ่งในบางโครงสร้างการกำกับดูแลระบบไฟฟ้า เราอาจพิจารณาได้ว่าการส่งกำลังไฟฟ้าจากพื้นที่หนึ่งไปยังพื้นที่หนึ่ง หมายถึงการซื้อขายพลังงาน ซึ่งค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลที่ใช้ช่วยในการตัดสินใจก่อนทำการซื้อขายจริงได้ หรือในการวางแผนการขยายระบบไฟฟ้ากำลังในระยะยาว ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้ ก็สามารถช่วยในการวิเคราะห์ด้านความเชื่อถือได้ทางด้านการกำหนดขนาดกำลังผลิตสำรองได้ซึ่งข้อมูลนี้ทำให้เราทราบว่า เราสามารถรับกำลังไฟฟ้าจากระบบข้างเคียงเพื่อจ่ายในยามฉุกเฉินได้มากที่สุดเท่าไร จึงจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์เพื่อหาค่าส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นมีความสำคัญมากและเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลกในปัจจุบัน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอวิธีการวิเคราะห์หาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ โดยอาศัยหลักการประยุกต์ระหว่างวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสม (OPF) และวิธีการประมาณเชิงเส้น ซึ่งจากข้อดีแต่ละด้านของวิธีการทั้งสองทำให้วิธีการที่นำเสนอสามารถคำนวณผลลัพธ์ได้อย่างถูกต้อง และใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก

3.1 แบบจำลองสำหรับการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

จากที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.1.2 การคำนวณหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากระบบหนึ่งไปยังระบบที่ต่อเชื่อมกันนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยการจำลองสภาวะการทำงานของระบบด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งโดยหลักการหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยทั่วไปนั้น เราจะทำการเพิ่มปริมาณของโหลด ณ กลุ่มบัสปลายทาง และทำการจัดสรรกำลังการผลิต ณ กลุ่มบัสต้นทางโดยควบคุมให้การเพิ่มของกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง สมดุลกับการเพิ่มของโหลด ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าที่สอดคล้องกับสภาวะการทำงานของสุดท้ายก่อนที่จะเกิดการละเมิดของขีดจำกัดต่างๆขึ้นในระบบ

จากหลักการพื้นฐานดังกล่าว เราได้สร้างแบบจำลองที่พิจารณาผลของตัวแปรอัตราการผลิต โหลด ณ กลุ่มบัสปลายทาง λ_L และตัวแปรอัตราการผลิตเพิ่มกำลังการผลิต ณ กลุ่มบัสต้นทาง λ_G และรวมผลนี้เข้ากับสมการกำลังไฟฟ้าง (3.1) – (3.3)

$$P_{G_k} = P_{G_k}^0 + K_G^P \cdot \lambda_{G_k} \quad (3.1)$$

$$P_{L_j} = P_{L_j}^0 + K_L^P \cdot \lambda_{L_j} \quad (3.2)$$

$$Q_{L_j} = Q_{L_j}^0 + K_L^Q \cdot \lambda_{L_j} \quad (3.3)$$

โดยที่	λ_{G_k}	คือ อัตราการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าของบัส k^{th} ในกลุ่มบัสต้นทาง
	λ_{L_j}	คือ อัตราการเพิ่มโหลดกำลังไฟฟ้าของบัส j^{th} ในกลุ่มบัสปลายทาง
	P_{G_k}	คือ กำลังการผลิตไฟฟ้าของบัส k^{th} ในกลุ่มบัสต้นทาง
	P_{L_j}	คือ กำลังไฟฟ้าจริงของโหลด ณ บัส j^{th} ในกลุ่มบัสปลายทาง
	Q_{L_j}	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลด ณ บัส j^{th} ในกลุ่มบัสปลายทาง
	K_G^P , และ K_L^P	คือ ตัวสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยกำหนดให้โหลดที่พิจารณามีตัวประกอบกำลังคงที่

ดังนั้น สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่คำนึงถึงผลของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) - K_{G_i}^P \cdot \lambda_{G_i} + K_{L_i}^P \cdot \lambda_{L_i} = P_{G_i}^0 - P_{L_i}^0 \quad (3.4)$$

$$Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) - K_{G_i}^Q \cdot \lambda_{G_i} + K_{L_i}^Q \cdot \lambda_{L_i} = Q_{G_i}^0 - Q_{L_i}^0 \quad (3.5)$$

ในส่วนของบัสต่างๆที่อยู่ในส่วนของบริเวณกลุ่มบัสต้นทางและกลุ่มบัสปลายทางนั้น ตัวบอกลักษณะ K_G^P , K_G^Q , K_L^P และ K_L^Q จะมีค่าตามสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะการทำงานเริ่มต้น แต่ในส่วนของบัสอื่นๆที่ไม่ได้อยู่ในกลุ่มบัสในระบบทั้งสองนี้จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะหาได้จากผลรวมสูงสุดของการเพิ่มโหลดกลุ่มบัสปลายทาง (กลุ่มบัสผู้ต้องการไฟฟ้า) หรือ การผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายออกจากกลุ่มบัสต้นทาง (กลุ่มบัสผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า) โดยค่าในการเพิ่มโหลดหรือกำลังการผลิตนั้นต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขขีดจำกัดต่างๆของระบบ

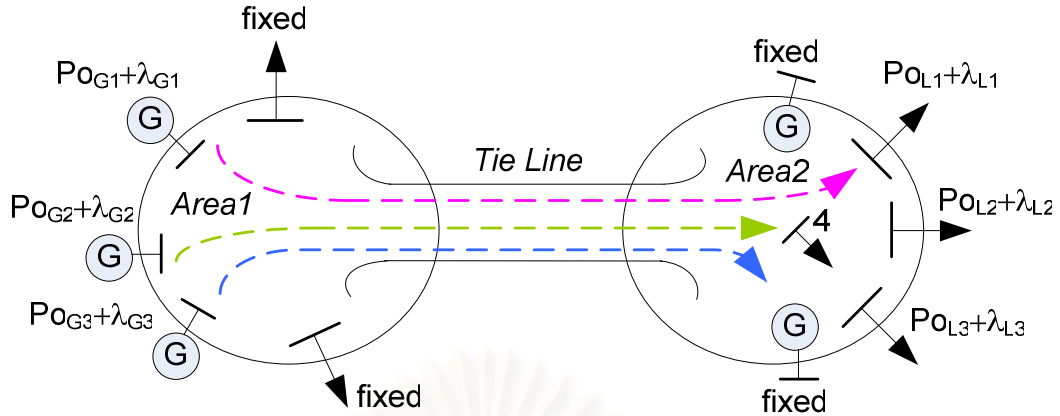
จากสมการที่ (3.4) และ (3.5) นั้นจะเห็นได้ว่าตัวแปรในแต่ละสมการนั้นประกอบด้วยตัวแปรแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของการผลิตกำลังไฟฟ้า (λ_G) ที่มีจำนวนเท่ากับจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายจากกลุ่มบัสต้นทาง (n_g) และตัวแปรแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของโหลด (λ_L) ซึ่งมีจำนวนเท่ากับจำนวนโหลดของกลุ่มบัสปลายทาง (n_l) เพราะฉะนั้นตัวแปรที่ต้องพิจารณาจะเพิ่มขึ้นจากกรณีของการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าทั่วไปเท่ากับ $n_g + n_l$ ตัวแปร ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เราสามารถหาคำตอบของระบบสมการนี้ได้ เราจะต้องมีสมการแสดงเงื่อนไขของความสัมพันธ์บางประการในระบบเพิ่มขึ้นอีก $n_g + n_l$ สมการ

เนื่องจากการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า เราจะมีเงื่อนไขของการสมดุลกันระหว่างการเพิ่มของโหลดที่กลุ่มบัสปลายทาง (รวมกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เพิ่มขึ้น) และการเพิ่มของกำลังการผลิตที่กลุ่มบัสต้นทางเสมอ ซึ่งเงื่อนไขสมดุลกำลังไฟฟ้า (Power Balance) นี้ สามารถเขียนได้ดัง (3.6)

$$\sum_{k=1}^{n_g} K_{G_k}^P \cdot \lambda_{G_k} = \sum_{j=1}^{n_l} K_{L_j}^P \cdot \lambda_{L_j} + \Delta P_{loss} \cdot (\lambda_G, \lambda_L) \quad (3.6)$$

ดังนั้น เมื่อหักสมการสมดุลกำลังไฟฟ้าออกไป เราจะต้องการสมการความสัมพันธ์เพิ่มเติมอีก $n_g + n_l - 1$ สมการ ซึ่งหากพิจารณาอย่างละเอียดแล้วจะพบว่าความสัมพันธ์อีก $n_g + n_l - 1$ สมการที่จะต้องเกิดขึ้นก็คือ เงื่อนไขขอบเขตของขีดจำกัดในระบบที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดการละเมิดนั่นเอง เงื่อนไขดังกล่าวประกอบด้วย ขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า ขีดจำกัดของสายส่ง ขีดจำกัดของกำลังการผลิตไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือขีดจำกัดทั้งสามประกอบกัน เช่น หากในระบบมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าอยู่ 3 เครื่อง และ 3 จุดโหลดตามลำดับดังรูปที่ 3.1 ดังนั้น ณ สภาวะที่การส่งผ่านกำลังไฟฟาระหว่างสองระบบมีค่าสูงที่สุดจะต้องมีขีดจำกัดของระบบจำนวน 5 ขีดจำกัดที่มีค่าอยู่ที่ขอบเขตของมัน

ในกรณีพิเศษสำหรับการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างบัสคู่บัส เนื่องจากตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมีอยู่สองตัวแปร คือ การเพิ่มกำลังที่บัสต้นทางและการเพิ่มของโหลดที่บัสปลายทางดังนั้น จะมีเงื่อนไขที่ต้องการอีกเพียงหนึ่งสมการเท่านั้น ซึ่งก็คือ เงื่อนไขขอบเขตของขีดจำกัดของระบบก่อนที่จะเกิดการละเมิดนั่นเอง



รูปที่ 3.1 แสดงการเพิ่มกำลังการผลิตในกลุ่มบัสต้นทางไปยังโหนดบัสในกลุ่มบัสปลายทาง

3.2 ความไวของเงื่อนไขขีดจำกัดของระบบเทียบกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิต และการเพิ่มขึ้นของโหลด

จากที่กล่าวไว้ในตอนต้น วิธีการประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอจะเป็นการประยุกต์ระหว่างวิธีการ OPF และวิธีการประมาณเชิงเส้น โดยเราจะเริ่มจากการประมาณเงื่อนไขขีดจำกัดต่างๆในระบบเป็นสมการเชิงเส้นที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิต (λ_G) และการเพิ่มขึ้นของโหลด (λ_L) ที่เพิ่มขึ้นรอบๆสภาวะการทำงานเริ่มต้น ดังนี้

$$f_{P_i}(\delta, |V|, \lambda) = P_i - K_{G_i}^P \cdot \lambda_{G_i} + K_{L_i}^P \cdot \lambda_{L_i} - (P_{G_i}^0 - P_{L_i}^0) = 0 \quad (3.7)$$

$$f_{Q_i}(\delta, |V|, \lambda) = P_i - K_{G_i}^Q \cdot \lambda_{G_i} + K_{L_i}^Q \cdot \lambda_{L_i} - (Q_{G_i}^0 - Q_{L_i}^0) = 0 \quad (3.8)$$

เมื่อทำการประมาณเชิงเส้นเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า และตัวแปรการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตและโหลดในรูปแบบเมทริกซ์จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \Delta f_P \\ \Delta f_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_G^P & K_L^P \\ -K_G^Q & K_L^Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_G \\ \Delta \lambda_L \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_P^0 \\ f_Q^0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

โดยเราจะกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial |V|} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$[K_{G,L}^{P,Q}] = \begin{bmatrix} -K_G^P & K_L^P \\ -K_G^Q & K_L^Q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$[\Delta\lambda] = \begin{bmatrix} \Delta\lambda_G \\ \Delta\lambda_L \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

แทนสมการที่ (3.10) (3.11) และ (3.12) ลงในสมการที่ (3.9) จะได้ว่า

$$[\Delta f] = [J] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} + [K_{G,L}^{P,Q}] [\Delta\lambda] = -[f(\delta_0, |V_0|, \lambda_0)] \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) จะเห็นชัดเจนว่าที่สถานะสมดุล ณ จุดทำงานใหม่ค่าของฟังก์ชัน $[\Delta f]$ จะเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้การเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับขนาดการเพิ่มของกำลังการผลิตและการเพิ่มของโหลด ดังสมการที่ (3.14)

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = -[J]^{-1} \left([f(\delta_0, |V_0|, \lambda_0)] + [K_{G,L}^{P,Q}] [\Delta\lambda] \right) \quad (3.14)$$

โดยหากในการคำนวณเราเริ่มต้นจากตำแหน่งจุดทำงาน $(\delta_0, |V_0|, \lambda_0)$ ที่ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟสมดุลกัน ซึ่งจะทำให้ค่าของ $f(\delta_0, |V_0|, \lambda_0)$ เป็นศูนย์แล้ว สมการที่ (3.14) สามารถลดรูปลงได้เป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = -[J]^{-1} \cdot [K_{G,L}^{P,Q}] [\Delta\lambda] \quad (3.15)$$

สมมติให้ g เป็นฟังก์ชันของเงื่อนไขใด ๆ ในระบบ การเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน g เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน รอบๆจุดทำงานเริ่มต้นนั้นจะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta g = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial \delta} & \frac{\partial g}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial \delta} & \frac{\partial g}{\partial |V|} \end{bmatrix} [J]^{-1} \cdot [K_{G,L}^{P,Q}] [\Delta \lambda] \quad (3.16)$$

สมการที่ (3.16) จะช่วยให้เราสามารถคำนวณหาความไวของชิตจำกัดต่างๆ ของระบบ เทียบกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตและโหลด (λ) ได้ โดย

$$\frac{\partial g}{\partial \lambda} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial \delta} & \frac{\partial g}{\partial |V|} \end{bmatrix} [J]^{-1} \cdot [K_{G,L}^{P,Q}] \quad (3.17)$$

สมการสำหรับคำนวณหาความไวของชิตจำกัดของระบบทั้ง ชิตจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้า ชิตจำกัดของสายส่ง และ ชิตจำกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยอาศัยหลักการที่อธิบายโดยสมการที่ (3.17) เป็นดังนี้

3.2.1 การหาค่าความไวของชิตจำกัดทางด้านแรงดันไฟฟ้า

ชิตจำกัดทางด้านแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบของฟังก์ชัน g สามารถเขียนได้ดังนี้

$$g = |V_k| \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial |V_k|}{\partial \lambda} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial |V_k|}{\partial \delta} & \frac{\partial |V_k|}{\partial |V|} \end{bmatrix} [J]^{-1} \cdot [K_{G,L}^{P,Q}] \quad (3.19)$$

ดังนั้น ความไวของชิตจำกัดเมื่อเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.20) และ (3.21) ตามลำดับ

$$\frac{\partial V_k}{\partial \delta} = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial V} = e_k \quad (3.21)$$

โดยที่ e_k จะมีค่าเป็น 1 ที่ตำแหน่งของโหนดบัสในกลุ่มบัสปลายทางที่รับกำลังไฟฟ้า ส่วนในตำแหน่งอื่นๆ จะมีค่าเป็น 0

3.2.2 การหาค่าความไวของชิตจำกัดทางการส่งกำลังไฟฟ้าของสายส่ง

ชิตจำกัดของสายส่งในรูปแบบของฟังก์ชัน g สามารถเขียนได้ดังนี้

$$g = s_{ij} = \sqrt{p_{ij}^2 + q_{ij}^2} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial \lambda} = - \left[\frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta} \quad \frac{\partial s_{ij}}{\partial |V|} \right] [J]^{-1} \cdot [K_{G,L}^{P,Q}] \quad (3.23)$$

โดยที่ $p_{ij} = |V_i|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + G_{ii} |V_{ii}|^2 - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$ (3.24)

$$q_{ij} = -|V_i|^2 |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} - B_{ii} |V_{ii}|^2 - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.25)$$

ดังนั้น ความไวของชิตจำกัดเมื่อเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.26) (3.27) (3.28) และ (3.29) ตามลำดับ

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{1}{s_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_i} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_i} \right) \quad (3.26)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_i} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

และ $\frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_i} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial \delta_j} = \frac{1}{s_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_j} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_j} \right) \quad (3.27)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

และ $\frac{\partial q_{ij}}{\partial \delta_j} = |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial |V_i|} = \frac{1}{s_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_i|} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_i|} \right) \quad (3.28)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_i|} = 2|V_i|(|Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + G_{ii}) - |V_j||Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

และ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_i|} = -2|V_i|(|Y_{ij}| \sin \theta_{ij} + B_{ii}) - |V_j||Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

$$\frac{\partial s_{ij}}{\partial |V_j|} = \frac{1}{s_{ij}} \left(p_{ij} \frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_j|} + q_{ij} \frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_j|} \right) \quad (3.29)$$

โดยที่ $\frac{\partial p_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

และ $\frac{\partial q_{ij}}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$

3.2.3 การหาค่าความไวของชิตจำกัดทางด้านกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ชิตจำกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในรูปแบบของฟังก์ชัน g สามารถเขียนได้ดังนี้

$$g = P_k^S = \sum |V_k||V_j||Y_{kj}| \cos(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial P_k^S}{\partial \lambda} = - \left[\frac{\partial P_k^S}{\partial \delta} \quad \frac{\partial P_k^S}{\partial |V|} \right] [J]^{-1} \cdot [K_{G,L}^{P,Q}] \quad (3.31)$$

ดังนั้น ความไวของชิตจำกัดเมื่อเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.32) ,(3.33) ,(3.34) และ (3.35) ตามลำดับ

$$\frac{\partial P_k^S}{\partial \delta_k} = - \sum_{j=1}^n |V_k||V_j||Y_{kj}| \sin(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial P_k^S}{\partial \delta_k} = -|V_k||V_j||Y_{kj}| \sin(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial P_k^S}{\partial |V_k|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_j| |Y_{kj}| \cos(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) - 2|V_k| |Y_{kj}| \cos(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial P_k^S}{\partial |V_j|} = |V_k| |Y_{kj}| \cos(\delta_k - \delta_j - \theta_{kj}) \quad (3.35)$$

3.2.4 ความไวของการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ

ความไวของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตและโหลดในรูปแบบของฟังก์ชัน g สามารถเขียนได้ดังนี้

$$g = \Delta P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial \lambda} = - \left[\frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial \delta} \quad \frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial |V|} \right] [J]^{-1} \cdot [K_{G,L}^{P,Q}] \quad (3.37)$$

ดังนั้น ความไวของขีดจำกัดเมื่อเทียบกับขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.38) และ (3.39)

$$\frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| 2 \cos(-\theta_{kj}) \sin(\delta_j - \delta_k) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial |V_k|} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (|V_j| |Y_{ij}| 2 \cos(-\theta_{kj}) \sin(\delta_k - \delta_j)) + 2|V_{kk}| |Y_{kk}| \cos(-\theta_{kk}) \quad (3.39)$$

3.3 วิธีการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่น่าเสนอ

จากผลการหาค่าการเปลี่ยนแปลงของขีดจำกัดต่างๆ ของระบบเทียบกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของกำลังการผลิตไฟฟ้าที่กลุ่มบัสต้นทางและการเพิ่มขึ้นของโหลดที่กลุ่มบัสปลายทาง เราสามารถคำนวณหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างสองระบบนี้ได้ โดยอาศัยการแก้ปัญหา ค่าขีดสุด ดังต่อไปนี้

$$\text{Maximize : } [0 \quad I][\lambda_0]^T + [0 \quad I][\Delta\lambda]^T$$

$$\text{Subject to : } \left(\left[K_{G,L}^P \right] - \left[\frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \right) [\Delta\lambda]^T = \Delta P_{loss}^0 - [K_{G,L}^P][\lambda_0]^T$$

$$\left. \begin{aligned} & - \left[\frac{\partial |V_k|}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \cdot [\Delta\lambda]^T \leq [V_k^0 - V_{k-Limit}^{LB}] \\ & \left[\frac{\partial s_k^{ij}}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \cdot [\Delta\lambda]^T \leq [s_{k-Limit}^{ij} - s_k^{ij-0}] \\ & \left[\frac{\partial P_k^S}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \cdot [\Delta\lambda]^T \leq [P_{k-Limit}^S - P_k^{S-0}] \end{aligned} \right\} \text{System Limits}$$

$$[\Delta\lambda] \geq [\lambda_0] \quad (3.40)$$

โดยที่	$[\lambda]$	คือ $[\lambda_G \quad \lambda_L]^T$
	$[K_{G,L}^P]$	คือ $[K_G^P \quad -K_L^P]$
	ΔP_{loss}	คือ $P_{loss}(\delta, V , \lambda) - P_{loss}(\delta, V , 0)$
	V_k	คือ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งบัส k^{th} ซึ่งพิจารณาทุกตำแหน่งของโหนดบัสในระบบ
	$V_{k-Limit}^{LB}$	คือ ขนาดของขีดจำกัดของขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ซึ่งพิจารณาทุกตำแหน่งของโหนดบัสในระบบ
	s_k^{ij}	คือ ค่าขนาดกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านของสายส่งทุกเส้นในระบบ
	$s_{k-Limit}^{ij}$	คือ ขนาดของขีดจำกัดที่สายส่งนั้นๆ สามารถรับได้
	P_k^S	คือ กำลังที่ผลิตของเครื่องกำเนิดที่ k^{th} ในกลุ่มบัสต้นทาง
	$P_{k-Limit}^S$	คือ ขนาดของขีดจำกัดของกำลังการผลิตไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกลุ่มบัสต้นทาง

เราจะทำการหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยอาศัยวิธีโปรแกรมเชิงเส้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าเรามีสมการสมมูลกำลังไฟฟ้าที่เป็นแบบเงื่อนไขบังคับแบบสมการ (Equality Constraint) และสมการของขีดจำกัดของระบบ (ขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า ขีดจำกัดสายส่ง และ ขีดจำกัดกำลังการผลิตสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า) ซึ่งเป็นแบบเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ (Inequality Constraint) อย่างไรก็ตาม จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.1 ว่า สมภาวะที่การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่าง

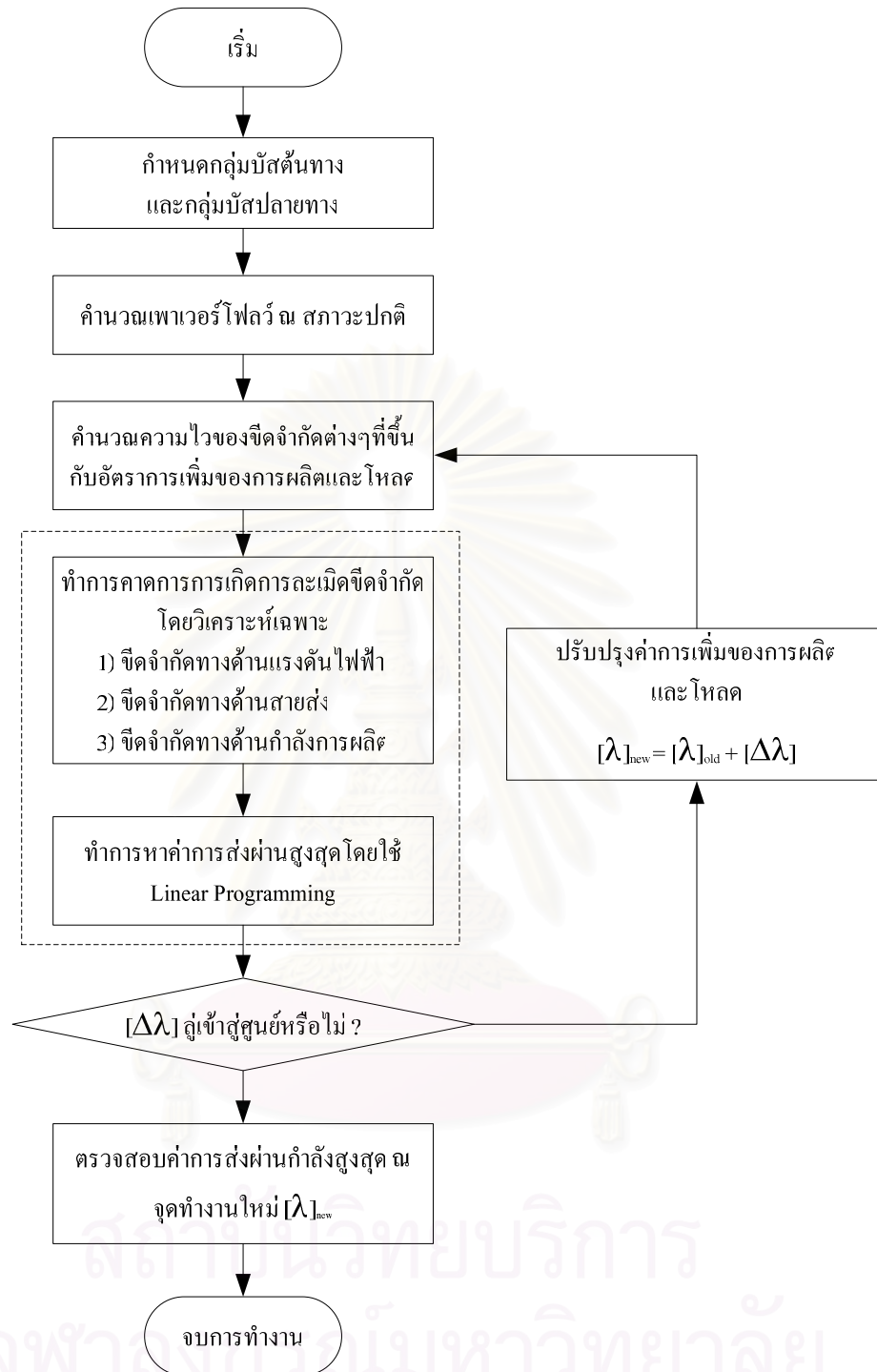
สองพื้นที่ที่มีค่าสูงที่สุด จะต้องมียึดจำกัดของระบบจำนวน $n_g + n_l - 1$ ยึดจำกัดที่มีค่าอยู่ที่ขอบเขตของมัน นั่นคือ ในเงื่อนไขบังคับแบบสมการทั้งหมดนั้นจะต้องมีอยู่ $n_g + n_l - 1$ เงื่อนไขที่เปลี่ยนเป็นเงื่อนไขบังคับแบบสมการ หรือในทางหลักการแก้ปัญหาค่าขีดสุด เราเรียกว่าเงื่อนไขบังคับเหล่านั้นว่าเป็น Active Constraints นั่นเอง

อย่างไรก็ดี ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นอาจมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบางเครื่องที่กลุ่มบัสต้นทางที่ไม่มีส่วนร่วมในการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังกลุ่มบัสปลายทางบางบัส (หรือปริมาณการเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าเป็นศูนย์) และอาจจะมีโหลดบางบัสที่กลุ่มบัสปลายทางไม่เกิดการเพิ่มโหลด (หรือปริมาณการเพิ่มของโหลดบัสในกลุ่มบัสปลายทางมีค่าเท่ากับศูนย์) ดังนั้นเพื่อความสมบูรณ์ เราอาจสรุปได้ว่า ณ สภาวะที่การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างสองพื้นที่ที่มีค่าสูงที่สุด จำนวน Active Constraints หรือยึดจำกัดของระบบที่มีค่าอยู่ที่ขอบเขตจะมีค่าเท่ากับ จำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และโหลดที่มีส่วนร่วมในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าลบด้วยหนึ่งเสมอ

กระบวนการโดยละเอียดของการประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการกำหนดบัสต้นทางกำลังไฟฟ้า และ กำหนดบัสปลายทาง คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ณ สภาวะปกติที่ยังไม่ได้เพิ่มกำลังการผลิตและโหลด
2. คำนวณหาความไวของยึดจำกัดของแรงดันไฟฟ้า ยึดจำกัดของสายส่ง และยึดจำกัดของกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
3. ทำการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะได้ค่าอัตราการเพิ่มของกำลังการผลิตแต่ละตัวของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกลุ่มบัสต้นทาง และ อัตราการเพิ่มโหลดของบัสปลายทาง
4. ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงอัตราการเพิ่มทั้งสอง ว่าเกิดการลู่เข้าของคำตอบแล้วให้ไปยังขั้นตอนที่ 5 ถ้ายังทำการอัปเดตค่าอัตราการเพิ่ม ณ จุดทำงานใหม่แล้วย้อนกลับไปยังขั้นตอนที่ 3 เพื่อคำนวณความไวของยึดจำกัด ณ สภาวะจุดทำงานใหม่
5. ทำการตรวจสอบค่าอัตราการเพิ่มโหลดและการผลิต ณ จุดทำงานใหม่ เพื่อตรวจสอบจำนวนสมการยึดจำกัดที่ Active กับสมการสมดุลกำลังไฟฟ้า ว่าเท่ากับจำนวนของอัตราการเพิ่มของกำลังการผลิตและโหลดลบด้วยหนึ่งหรือไม่
6. จบการทำงานของการทำงานหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

กระบวนการดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.4 กระบวนการหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อพิจารณาผลทางเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว

ปัญหาสำคัญประการหนึ่งในการวางแผนควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังก็คือ จุดทำงานของระบบต้องมีเสถียรภาพและสามารถทนต่อการรบกวนในสถานะชั่วคราว (Transient stability) ได้ กล่าวคือ หากมีเหตุขัดข้องใดๆเกิดขึ้นในระบบ ต้องไม่ทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างจนทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้

วิธีการทั่วไปที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพในสถานะชั่วคราวจะอาศัยการวิเคราะห์เชิงเวลา (Time-domain analysis) ซึ่งต้องมีการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณมาก อย่างไรก็ตาม ปัญหาทางเสถียรภาพในสถานะชั่วคราวเป็นปัญหาที่ไม่เกิดขึ้นบ่อยนัก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพในสถานะชั่วคราวโดยตรง แต่จะทำการประเมินทางอ้อมโดยอาศัยดัชนีความมั่นคง (Security index) ที่นิยามจากผลต่างของมุมของแรงดันในระบบแทน โดยจะกำหนดให้ผลต่างของมุมของแรงดันคู่ใดๆ ในระบบต้องมีค่าไม่เกินค่าวิกฤตค่าหนึ่ง เพื่อรับประกันความมั่นคงของระบบ ($\delta_{jk} \leq \Delta\delta_{Limit}$)

เนื่องจากวิธีการประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ที่นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา ยังไม่ได้รวมผลของการพิจารณาเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว ดังนั้น เราจะทำการปรับปรุงวิธีการดังกล่าวโดย หลังจากเสร็จสิ้นการคำนวณปัญหาค่าขีดสุดที่วิธีการที่นำเสนอแล้วหากตรวจพบว่า ผลต่างระหว่างตำแหน่งที่มีมุมเฟสของแรงดันมากที่สุดและตำแหน่งที่มีมุมเฟสของแรงดันต่ำที่สุด มีค่ามากกว่าไม่เกินค่าวิกฤต (ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 45°) เราจะถือว่าไม่เกิดปัญหาเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว แต่หากผลต่างของมุมเฟสมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต เราจะต้องพิจารณาผลของเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว โดยเราจะทำการเพิ่มเงื่อนไขดังสมการ (3.41) เข้าไปในการแก้ปัญหา ค่าขีดสุด เพื่อประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาผลของเสถียรภาพในสถานะชั่วคราว

$$g = \delta_{jk} = \delta_j - \delta_k = \Delta\delta_{Limit} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial \delta_{jk}}{\partial \lambda} = - \left[\frac{\partial \delta_{jk}}{\partial \delta} \quad \frac{\partial \delta_{jk}}{\partial V} \right] [J]^{-1} [K_{G,L}^{P,Q}] \quad (3.42)$$

ดังนั้นความไวของขีดจำกัดเมื่อเทียบกับมุมเฟสและขนาดของแรงดันไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.43) และ (3.44) ตามลำดับดังนี้

$$\frac{\partial \delta_{jk}}{\partial \delta} = e_{jk} \quad (3.43)$$

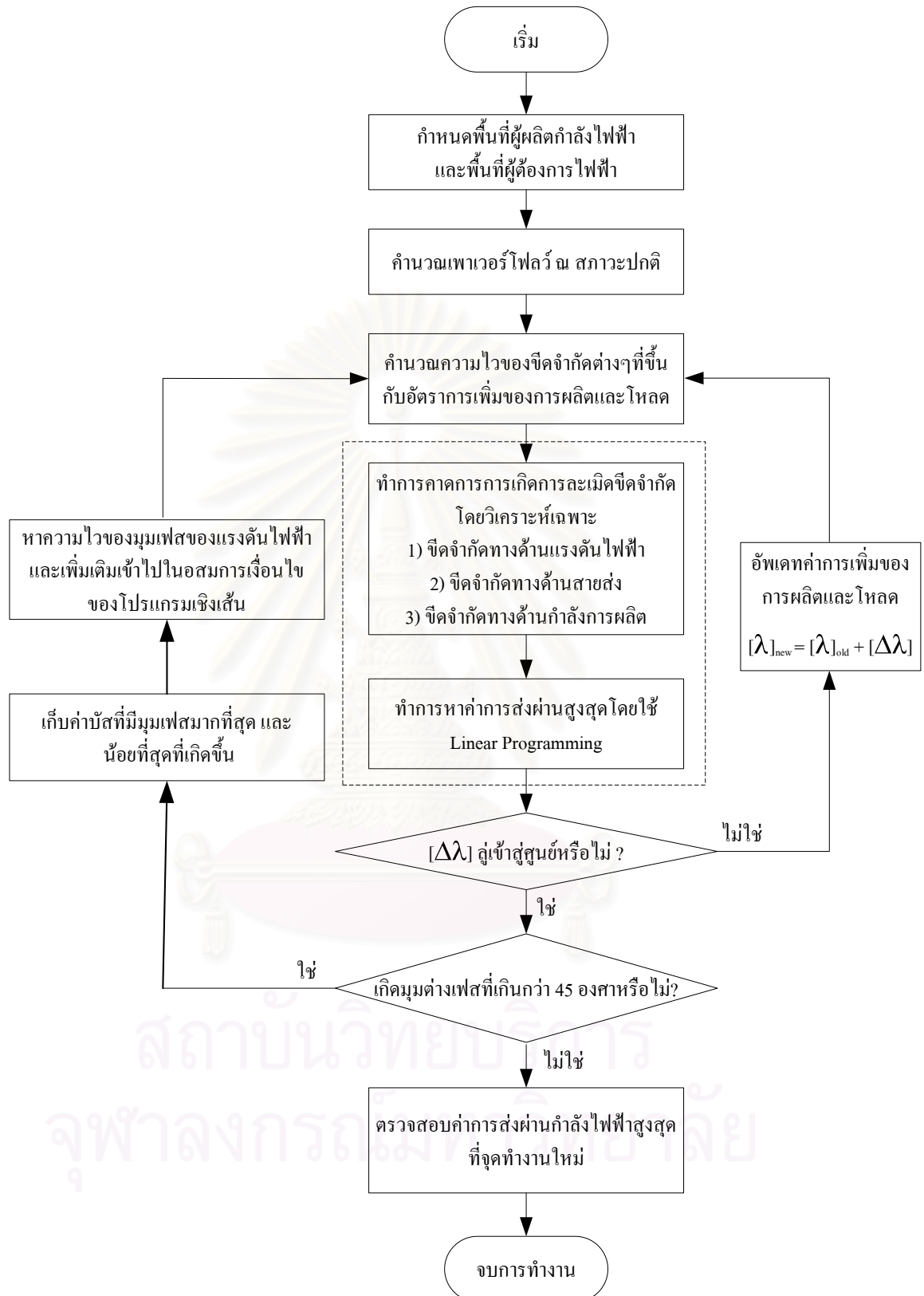
$$\frac{\partial \delta_{jk}}{\partial V} = 0 \quad (3.44)$$

โดยที่ e_{jk} จะมีค่าเท่ากับ 1 ที่ตำแหน่งบัส j เป็น -1 ที่ตำแหน่งบัส k และเป็น 0 ที่ตำแหน่งอื่นๆ

ดังนั้น ปัญหาขีดสุดในการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่เมื่อพิจารณาเสถียรภาพในสภาวะชั่วคราว สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{Maximize} && [0 \quad 1][\lambda_0]^T + [0 \quad 1][\Delta\lambda]^T \\ & \text{Subject To} && \left([K_{G,L}^P] - \left[\frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \right) [\Delta\lambda]^T = \Delta P_{loss}^0 - [K_{G,L}^P][\lambda_0]^T \\ & && \left. \begin{aligned} & - \left[\frac{\partial V_k}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \cdot [\Delta\lambda]^T \leq [V_k^0 - V_{k-Limit}^{LB}] \\ & \left[\frac{\partial s_k^{ij}}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \cdot [\Delta\lambda]^T \leq [s_{k-Limit}^{ij} - s_k^{ij-0}] \\ & \left[\frac{\partial P_k^S}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \cdot [\Delta\lambda]^T \leq [P_{k-Limit}^S - P_k^{S-0}] \\ & \left[\frac{\partial \delta_k}{\partial \lambda} \right]_{\lambda_0} \cdot [\Delta\lambda]^T \leq [\Delta s_{Limit} - (\delta_j^0 - \delta_k^0)] \\ & [\Delta\lambda] \geq [\lambda_0] \end{aligned} \right\} \text{System limits} \end{aligned} \quad (3.45)$$

ขั้นตอนการคำนวณหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยพิจารณาผลทางเสถียรภาพสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.3

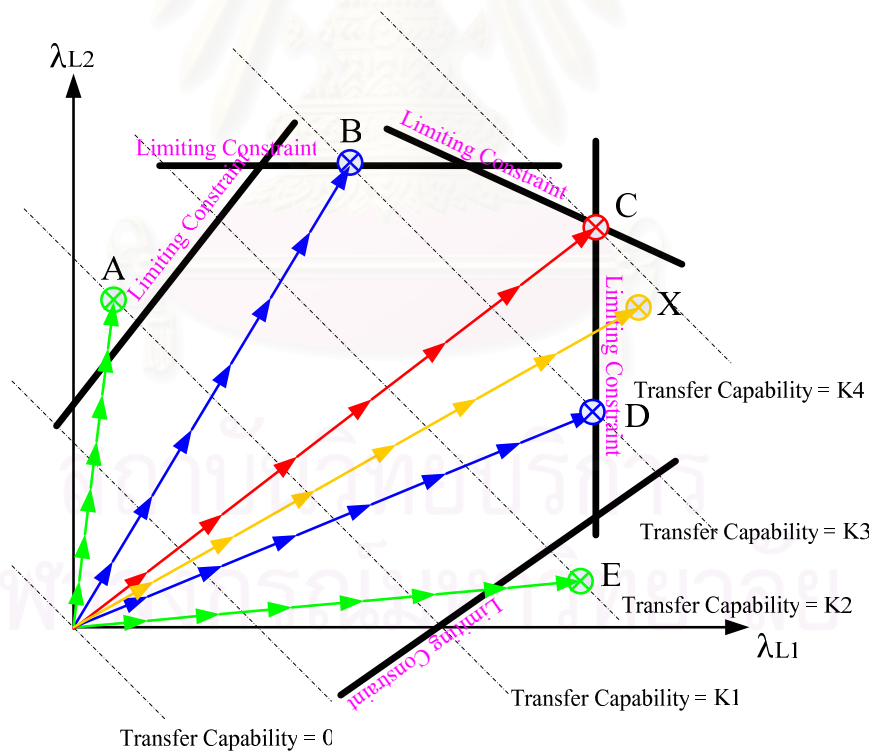


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาผลทางเสถียรภาพ

3.5 ความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่

จากนิยามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นเป็นปริมาณกำลังไฟฟ้าที่มากที่สุดที่สามารถส่งจากพื้นที่หนึ่งไปยังอีกพื้นที่หนึ่ง (หรือบัสหนึ่งไปยังบัสหนึ่ง) ได้โดยไม่ทำให้เกิดการละเมิดขีดจำกัดใดๆของระบบ นั่นหมายความว่า หากเราส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในปริมาณเกินกว่าค่าความสามารถนี้ จะมีการละเมิดขีดจำกัดความมั่นคงของระบบอย่างแน่นอน อย่างไรก็ตาม สำหรับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบกลุ่มบัสไปยังกลุ่มบัสนั้นไม่ได้รับประกันว่า หากส่งกำลังไฟฟ้าด้วยปริมาณที่น้อยกว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบแล้วจะไม่เกิดการละเมิดขีดจำกัดขึ้น

พิจารณากรณีศึกษาดังแสดงในรูปที่ 3.4 สมมติว่าระบบที่พิจารณามีบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงบัสเดียว และมีโหลดบัสอยู่ 2 บัส เพราะฉะนั้นการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดจากผลรวมของการเพิ่มโหลดของทั้งสองบัส ไปตามระดับของเส้นจุดไขปลาตามรูปที่ 3.4 เนื่องจากปริมาณการเพิ่มโหลดมีค่าเป็นบวกได้เท่านั้น ดังนั้นทิศทางการเพิ่มของโหลดรวมจากทั้งสองบัสนี้ๆ จึงวิ่งไปตามแนวแกนบวกของทั้งคู่ โดยเส้นที่บั้นนั้นจะเป็นเส้นของสมการขีดจำกัดต่างๆของระบบนั่นเอง



รูปที่ 3.4 ความหมายทางกายภาพของการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

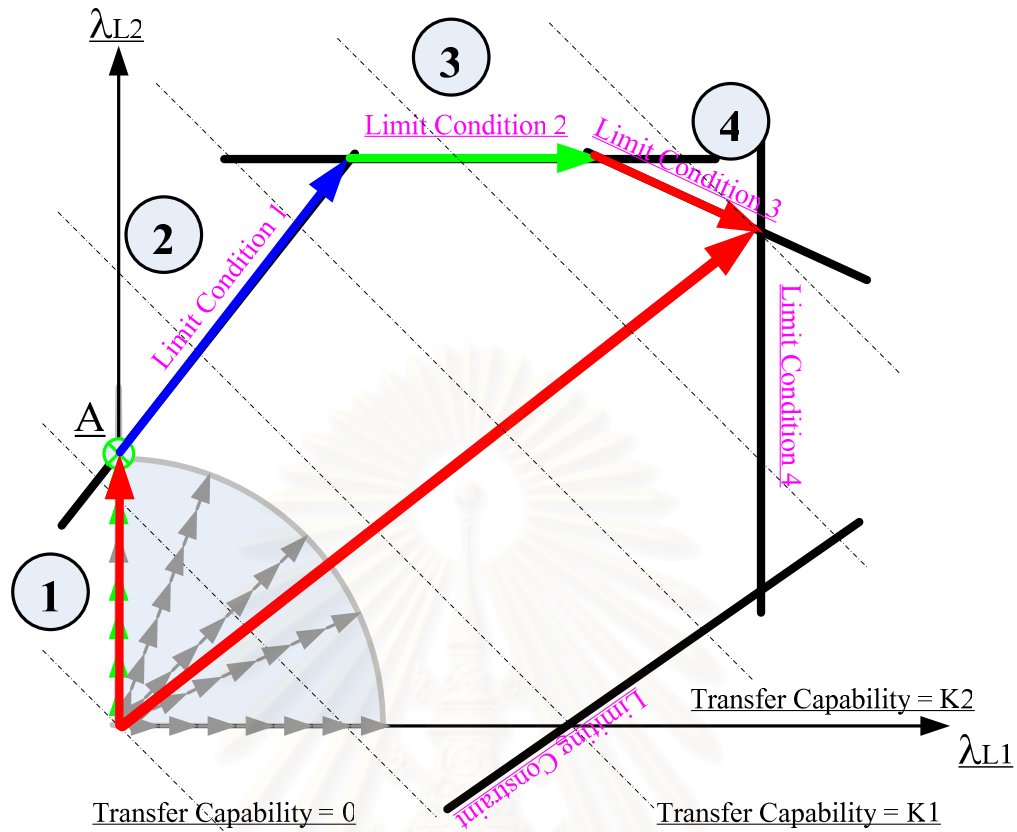
เมื่อพิจารณาระดับการเพิ่มโหลดที่ K1 ณ จุดทำงาน A และระดับการเพิ่มโหลดที่ K2 ณ จุดทำงาน E จะเห็นได้ว่าค่าการส่งผ่านนั้นน้อยกว่าการส่งผ่านสูงสุด แต่อย่างไรก็ดี ระบบก็ยังเกิดการละเมิดขีดจำกัดขึ้น

ที่ระดับโหลด K4 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ณ จุดทำงานที่สอดคล้องกับจุด C นี้จะทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยไม่ละเมิดขีดจำกัดใดๆของระบบ

3.5.1 แนวทางการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเมื่อพิจารณาความมั่นคงของระบบ

จากการวิเคราะห์ทางกายภาพของระบบไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถใช้ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบตามแนวทางดังกล่าว เป็นดัชนีรับประกันความมั่นคงของระบบไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม ในการวางแผนและการดำเนินระบบนั้น ผู้ควบคุมดูแลระบบควรต้องแยกแยะได้ว่า หากมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบเกิดขึ้นจริง การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปริมาณเท่านี้จะทำให้เกิดอันตรายต่อความมั่นคงของระบบหรือไม่ ดังนั้น หากมีดัชนีหนึ่งซึ่งสามารถใช้จำแนกประเภทได้ว่า ปริมาณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าขนาดเท่าใดเป็นอันตรายหรือไม่อันตรายต่อระบบ โดยไม่ว่ารูปแบบการจัดสรรกำลังการผลิตจะเป็นแบบใดก็ตาม ก็จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ควบคุมดูแลระบบเป็นอย่างมาก ในหัวข้อนี้จะนำเสนอแนวทางการกำหนดดัชนีเพื่อใช้จำแนกประเภทการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าว่า ปริมาณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าขนาดเท่าใดเป็นอันตรายหรือไม่อันตรายต่อระบบในแง่ของความมั่นคง

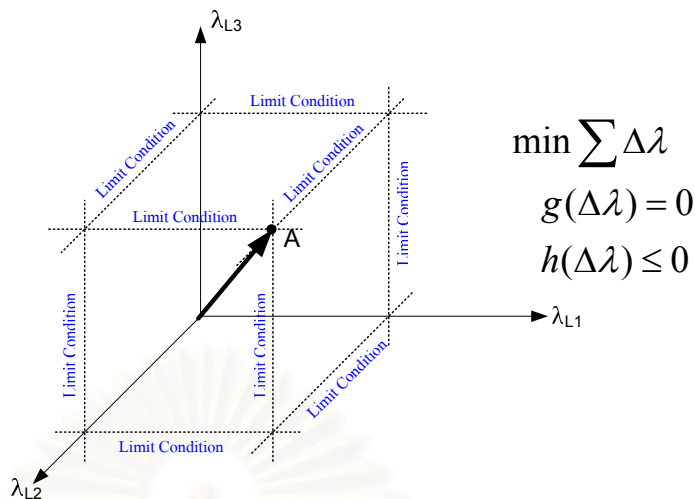
พิจารณากรณีตัวอย่างที่ใช้อธิบายความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.4 อีกครั้งหนึ่งจากรูปที่ 3.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจุดทำงานภายใต้รัศมีที่เป็นพื้นที่แรเงานั้นจะเป็นจุดทำงานที่ไม่ว่าจะทำการจัดสรรกำลังการผลิตอย่างไรก็ตาม หากส่งผ่านกำลังไฟฟ้าปริมาณไม่เกินขอบเขตนี้จะสามารถรับประกันได้ว่าไม่เกิดปัญหาความมั่นคงของระบบอย่างแน่นอน ซึ่งจากตัวอย่างนี้ เงื่อนไขขีดจำกัดที่ 1 เป็นขีดจำกัดที่สามารถใช้กำหนดดัชนีบ่งชี้ความมั่นคงของระบบได้ เนื่องจากขีดจำกัดนั้นเป็นขีดจำกัดที่ใกล้จุดทำงานปกติมากที่สุด



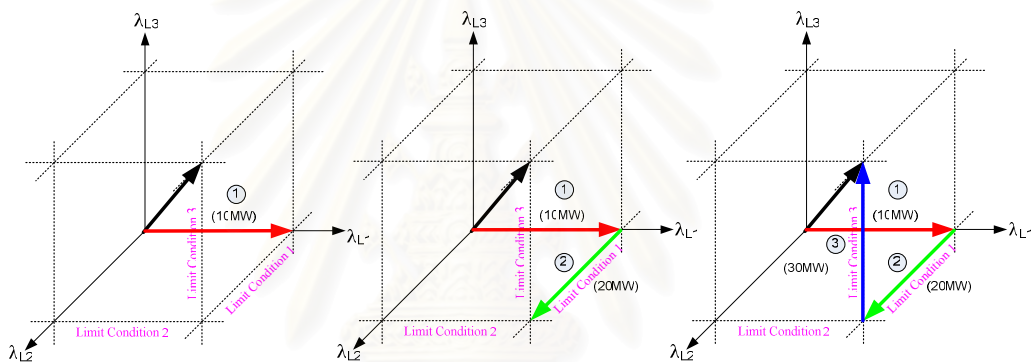
รูปที่ 3.5 ความหมายทางกายภาพของการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในด้านความมั่นคง

สำหรับระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบอาจเกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดเป็นจำนวนมาก ซึ่งหมายความว่ามีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาตามไปด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่ามีความเป็นไปได้ยากที่เราจะสามารถวิเคราะห์หาเงื่อนไขขีดจำกัดที่บ่งชี้ความมั่นคงของระบบได้โดยอาศัยวิธีการพิจารณาจากกราฟดังเช่นตัวอย่างที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์จากตัวอย่างที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าขอบเขตของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงของระบบนั้น จะเกิดขึ้นเมื่อมีเงื่อนไขของระบบอยู่ที่ค่าขอบเขตเพียงเงื่อนไขเดียว

เพื่อให้เข้าใจความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามากขึ้น พิจารณากรณีศึกษาอีกกรณีหนึ่ง ดังรูปที่ 3.6 สมมติว่า หลังจากใช้วิธีการที่นำเสนอกับระบบตัวอย่างนี้ เราพบว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่จุด A โดยมีเงื่อนไขของระบบอยู่ที่ค่าขอบเขตอยู่ 3 เงื่อนไข เราสามารถวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบนี้ได้อย่างละเอียดมากขึ้นโดยอาศัยรูปที่ 3.7 แสดงการเดินทางของค่ากำลังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด



$\min \sum \Delta \lambda$ $g(\Delta \lambda) = 0$ $h_{1,active}(\Delta \lambda) = 0$ $h(\Delta \lambda) \leq 0$ <p>(ก)</p>	$\min \sum \Delta \lambda$ $g(\Delta \lambda) = 0$ $h_{1,active}(\Delta \lambda) = 0$ $h_{2,active}(\Delta \lambda) = 0$ $h(\Delta \lambda) \leq 0$ <p>(ข)</p>	$\min \sum \Delta \lambda$ $g(\Delta \lambda) = 0$ $h_{1,active}(\Delta \lambda) = 0$ $h_{2,active}(\Delta \lambda) = 0$ $h_{3,active}(\Delta \lambda) = 0$ $h(\Delta \lambda) \leq 0$ <p>(ค)</p>
---	--	---

รูปที่ 3.7 แสดงการเดินทางของค่ากำลังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

รูปที่ 3.7(ก) การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเมื่อขีดจำกัดที่ 1 อยู่ที่ขอบเขตความมั่นคง

รูปที่ 3.7(ข) การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเมื่อขีดจำกัดที่ 1 และ 2 อยู่ที่ขอบเขตความมั่นคง

รูปที่ 3.7(ค) การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเมื่อขีดจำกัดที่ 1 2 และ 3 อยู่ที่ขอบเขตความมั่นคง

พิจารณารูปที่ 3.7 เราจะพบว่าเมื่อค่อยๆเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าขึ้นเรื่อยๆ ในทิศทางตามกรณี (ก) เราจะส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ไม่เกิน 10 MW ก่อนที่ขีดจำกัดที่ 1 จะเริ่มเข้าใกล้ขอบเขตความมั่นคงจนกลายเป็น Active Constraint อย่างไรก็ตามถ้าหากเราทำการเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามากขึ้นแต่เป็นในทิศทางตามกรณี (ข) คือวิ่งไปในแนวที่ขีดจำกัดที่ 1 อยู่ที่ค่าขอบเขต เรายังสามารถทำการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเพิ่มได้อีก 20 MW ก่อนที่ขีดจำกัดที่ 2 จะเริ่มเข้าใกล้ขอบเขตความมั่นคงอีกขีดจำกัดหนึ่งจนกลายเป็น Active Constraints ทั้ง 2 เงื่อนไขและด้วยเหตุผลเดิม หากเรายังทำการเพิ่มการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าตามทิศทางของกรณี)ค (คือวิ่งไปในแนวที่ทั้งขีดจำกัดที่ 1 และ 2 อยู่ที่ค่าขอบเขต เรายังสามารถทำการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเพิ่มได้อีก 30 MW ก่อนที่ขีดจำกัดที่ 3 จะเริ่มเข้าใกล้ขอบเขตความมั่นคงอีกขีดจำกัดหนึ่งกลายเป็น Active Constraints ทั้ง 3 เงื่อนไข ที่สภาวะการทำงานนี้ เราไม่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบเพิ่มได้อีกแล้วเนื่องจากจะทำให้ระบบละเมิดเงื่อนไขความมั่นคงอย่างแน่นอน

ตัวอย่างดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า หากเราสามารถระบุได้ว่าเงื่อนไขบังคับใดในเงื่อนไขบังคับที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบเป็นเงื่อนไขแรกที่เกิดขึ้นดังในกรณี (ก) ของรูปที่ 3.7 เราก็สามารถสรุปได้ว่า หากส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไม่เกินค่านั้น จะรับประกันได้ว่าระบบจะไม่เกิดปัญหาด้านความมั่นคงอย่างแน่นอน

3.5.2 วิธีการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคง

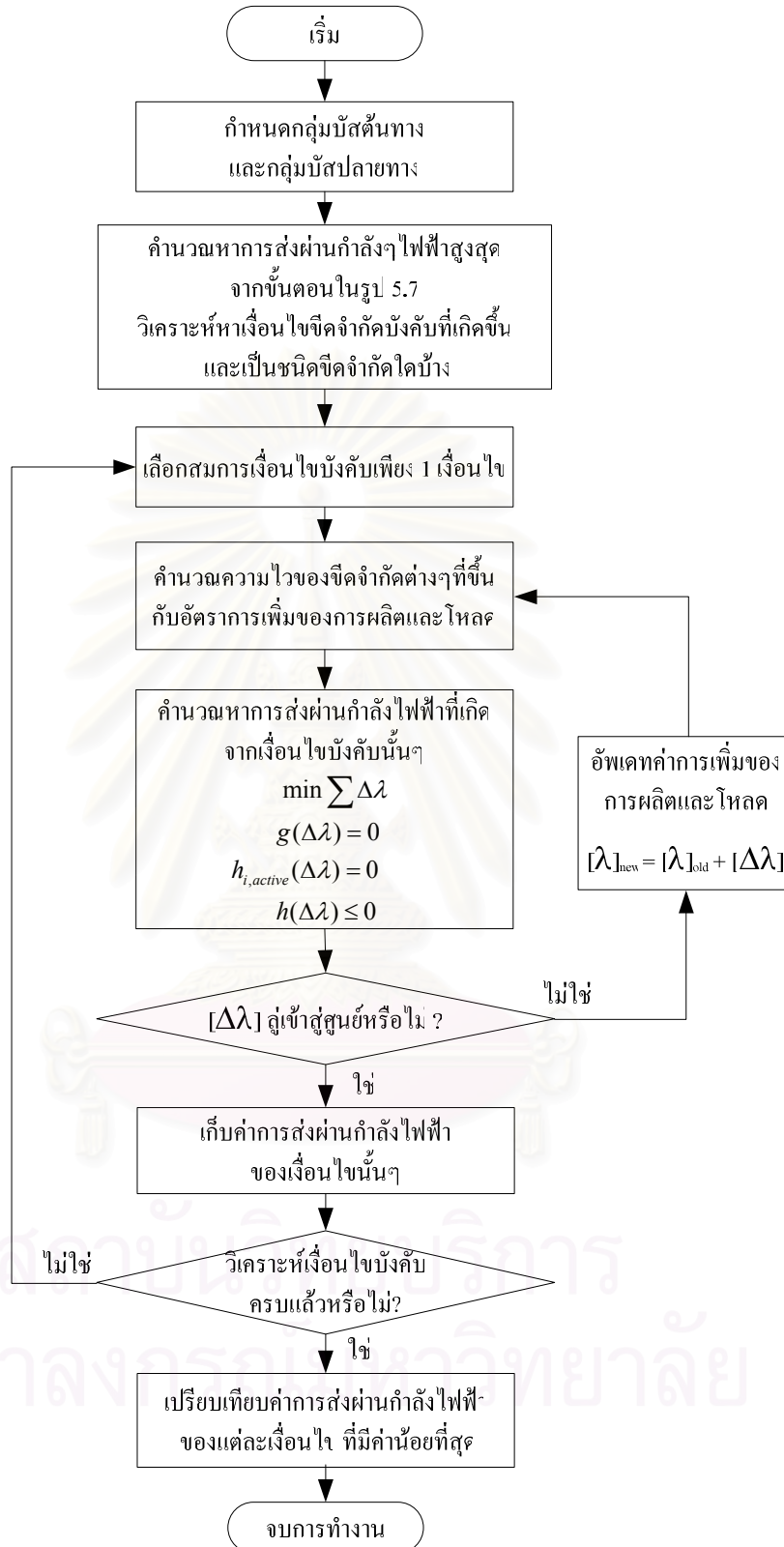
ด้วยวิธีการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ที่นำเสนอจะทำให้เราทราบว่า เงื่อนไขขีดจำกัดใดบ้างจะเป็นเงื่อนไขที่จำกัดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้น หากเราต้องการคำนวณดัชนีที่บ่งชี้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบ ที่รับประกันความมั่นคงตามแนวคิดข้างต้นที่อธิบายโดยอาศัยรูปที่ 3.6 เราก็แค่ทำการระบุให้ได้ว่าขีดจำกัดใดเกิดขึ้นก่อนโดยอาศัยการแก้ปัญหาดังสมการที่ (3.46)

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad T_j \\
 & \text{s.t.} \quad T_j = \text{Min} \sum \Delta\lambda \\
 & \quad \text{s.t.} \quad g(\Delta\lambda) = 0 \\
 & \quad \quad h_j(\Delta\lambda) = 0 \\
 & \quad \quad h(\Delta\lambda) \leq 0 \\
 & \quad \quad j \in \text{Active Constraint Set}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

โดยที่	T_j	คือ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่เกิดจากการที่ เงื่อนไขของระบบเปลี่ยนเป็น Active Constraints เพียง หนึ่งเงื่อนไข
	$g(\Delta\lambda)$	คือ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า (Power Balance)
	$h_j(\Delta\lambda)$	คือ สมการเงื่อนไขบังคับหนึ่งสมการจากเงื่อนไขบังคับ ทั้งหมดที่เรากำหนดให้เป็น Active Constraint
	$h(\Delta\lambda)$	คือ สมการเงื่อนไขขีดจำกัดต่างๆ ของระบบที่เหลือทั้งหมด
	<i>ActiveConstraint Set</i>	คือ เซตของสมการเงื่อนไขบังคับที่เกิดขึ้นทั้งหมด ณ สภาวะ ที่การส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด

กระบวนการดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของแต่ละเงื่อนไขบังคับ

3.6 ผลสรุปการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคง

จากหลักการทั้งหมดที่นำเสนอ สามารถนำไปสู่ข้อสรุปได้ดังนี้ ที่สภาวะการทำงานพื้นฐานหนึ่งๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง หากผู้ควบคุมระบบได้ทำการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด และการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงแล้ว

บทสรุป: กำหนดให้ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคงมีค่า K_1 และการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบมีค่า K_2 โดย $K_1 \leq K_2$

- หากมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในปริมาณน้อยกว่า K_1 สามารถอนุญาตให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องตรวจสอบ

- หากมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในปริมาณมากกว่า K_2 จะต้องไม่อนุญาตให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นโดยเด็ดขาด เพราะจะทำให้เกิดปัญหาความมั่นคงต่อระบบ

- หากมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในปริมาณที่อยู่ระหว่าง K_1 และ K_2 จะต้องทำการตรวจสอบอย่างละเอียดก่อนว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารูปแบบดังกล่าว ทำให้เกิดปัญหาความมั่นคงต่อระบบหรือไม่

จากตัวอย่างการคำนวณที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 3.5 สามารถยืนยันผลสรุปในข้อที่ 3 ได้เป็นอย่างดี ซึ่งเราพบว่าค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ 78.81 MW และ 141.33 MW ตามลำดับนั้น น้อยกว่าระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ยังส่งผลทำให้ระบบเกิดปัญหาความมั่นคงได้

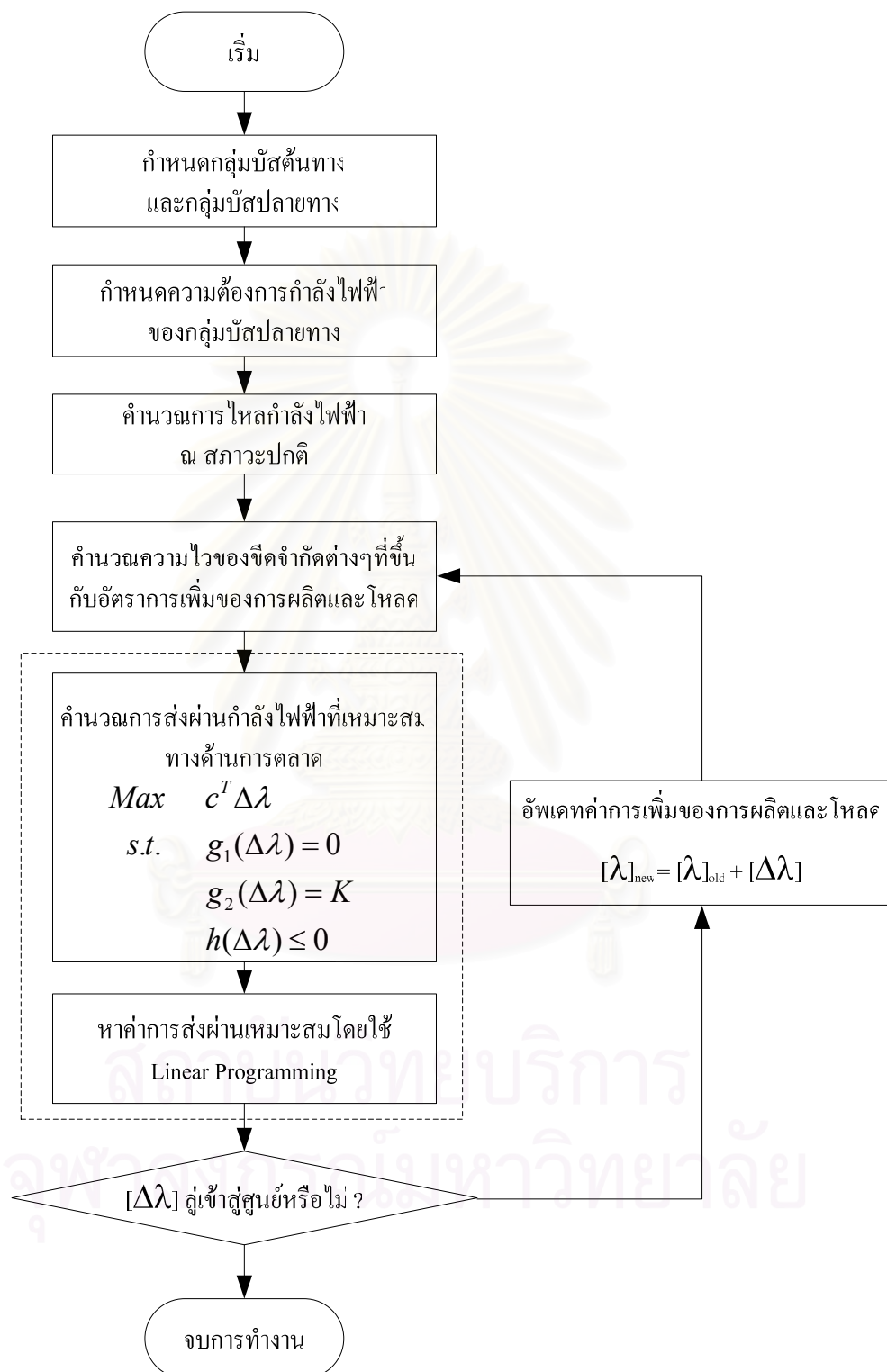
อย่างไรก็ดี ที่แต่ละระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่น้อยกว่า K_2 เราจะสามารถคำนวณหา รูปแบบการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดที่เหมาะสมมากที่สุดที่สอดคล้องกับเป้าหมายที่กำหนดได้เสมอ เช่น หากพิจารณาว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบนั้นคือการซื้อขายพลังงานไฟฟ้า เราสามารถคำนวณหา รูปแบบการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลด ที่มีปริมาณการซื้อขายกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบเท่ากับ K ที่ให้ผลตอบแทนสูงสุดได้ ดังสมการที่ (3.6)

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} \quad c^T \Delta \lambda \\
 & \text{s.t.} \quad g_1(\Delta \lambda) = 0 \\
 & \quad \quad g_2(\Delta \lambda) = K \\
 & \quad \quad h(\Delta \lambda) \leq 0
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

โดยที่

c^T	คือ เวกเตอร์ผลตอบแทนจากการซื้อขายไฟฟ้าของผู้เกี่ยวข้อง
$g_1(\Delta \lambda)$	คือ สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า
$g_2(\Delta \lambda)$	คือ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าของระบบที่ต้องการ (เท่ากับ K)
$h(\Delta \lambda)$	คือ สมการเงื่อนไขขีดจำกัดต่างๆ ของระบบ

กระบวนการดังกล่าวสามารถสรุปได้เป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยกำหนดจากกลุ่มผู้ต้องการไฟฟ้า

บทที่ 4

การประเมินสายส่งกำลังไฟฟ้าที่ส่งผลต่อค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

หลักการประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ตั้งหัวข้อต่างๆที่กล่าวมาในบทต่างๆ นั้น กล่าวถึงหลักการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอและการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันผลทางด้านความมั่นคงของระบบโดยที่พิจารณาว่าโครงสร้างของระบบมีความเชื่อถือได้ 100% อย่างไรก็ดี เนื่องจากสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเป็นเหตุขัดข้องที่เกิดจากความไม่พร้อมมูลของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะของระบบด้วย

4.1 ดัชนีกำหนดสายส่งที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่

ปัญหาหนึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ก็คือ จำนวนอุปกรณ์ในระบบส่งที่ต้องทำการพิจารณาอยู่จำนวนมาก หากเราต้องวิเคราะห์เหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นกับทุกๆ อุปกรณ์จะทำให้ใช้เวลาในการคำนวณมากตามไปด้วย ในบางครั้งอุปกรณ์บางอย่าง เช่น สายส่งบางเส้น ก็อาจอยู่ห่างไกลจากบริเวณที่เรากำลังพิจารณา จนทำให้ผลของเหตุขัดข้องจากอุปกรณ์ดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์เลย ดังนั้น หากเราจำแนกอุปกรณ์ดังกล่าวและตัดออกจากการวิเคราะห์ได้ จะทำให้เวลาในการคำนวณลดลงไปด้วย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการจำแนกอุปกรณ์ในระบบส่งดังกล่าวโดยการกำหนดดัชนีเหตุขัดข้อง (Contingency index) ซึ่งประเมินจากการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบส่ง ณ จุดทำงานที่ทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเทียบกับการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ณ สถานะปกติดังสมการที่ (4.1)

$$CI = \frac{|P_{flow,TTC} - P_{flow,base.case}|}{P_{flow,base.case}} \times 100\% \quad (4.1)$$

โดยหากอุปกรณ์ระบบส่งใดมีค่าดัชนีสูงกว่า 5% เราจะถือว่าอุปกรณ์นั้นมีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ที่เราพิจารณา

4.2 การประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงเมื่อคำนึงถึงเหตุขัดข้อง เหตุขัดข้องในระบบส่ง

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอหลักการกำหนดการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณาทั้งการรับประกันความมั่นคงและผลของเหตุขัดข้องในระบบ โดยจะประยุกต์วิธีการจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โลเพื่อวิเคราะห์ และรวบรวมผลกระทบของเหตุขัดข้องในระบบส่งที่มีต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด หลักการนั้นจะนำเสนอแนวทางการกำหนดระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็นต่อไป

4.2.1 การประเมินผลของเหตุขัดข้องในระบบส่งโดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์

จากที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาการประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีที่นำเสนอ นั้น ได้พิจารณาเฉพาะในกรณีที่สายส่งทุกเส้นในระบบไฟฟ้านั้นมีความเชื่อถือได้ 100% อย่างไรก็ดี ในความเป็นจริงแล้วระบบไฟฟ้ากำลังมีการเปลี่ยนแปลงสถานะอยู่ตลอดเวลาส่งผลให้ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สภาวะของระบบที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นอาจเกิดจากเหตุขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบส่ง อย่างไรก็ดีสายส่งบางเส้นอาจอยู่ห่างไกลจากบริเวณที่สนใจเกินกว่าจะส่งผลกระทบต่อค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ได้ ดังนั้นเราจึงกำหนดดัชนีเหตุขัดข้องเพื่อจำแนกอุปกรณ์ในระบบส่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้น เพื่อช่วยในการลดจำนวนเหตุการณ์ในการวิเคราะห์ จากชุดของสายส่งที่ได้จากการจำแนกด้วยดัชนีดังกล่าว เรา จะใช้การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลมาช่วยในการจำลองเหตุการณ์เพื่อประเมินผลของ เหตุการณ์ขัดข้องจากสายส่งชุดนี้ว่ามีผลต่อค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่มากน้อยเพียงใด

4.2.2 การกำหนดค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็น

จากหลักการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.6 เราจะพบว่า ที่สภาวะการทำงานหนึ่งๆ ของระบบ เราจะสามารถกำหนดระดับค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้สองค่าคือ ระบบการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันว่าจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาใดๆ ในระบบ (K_1) และระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ (K_2) โดยหากส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่เกินกว่าค่านี้จะทำให้เกิดปัญหาในระบบอย่างแน่นอน

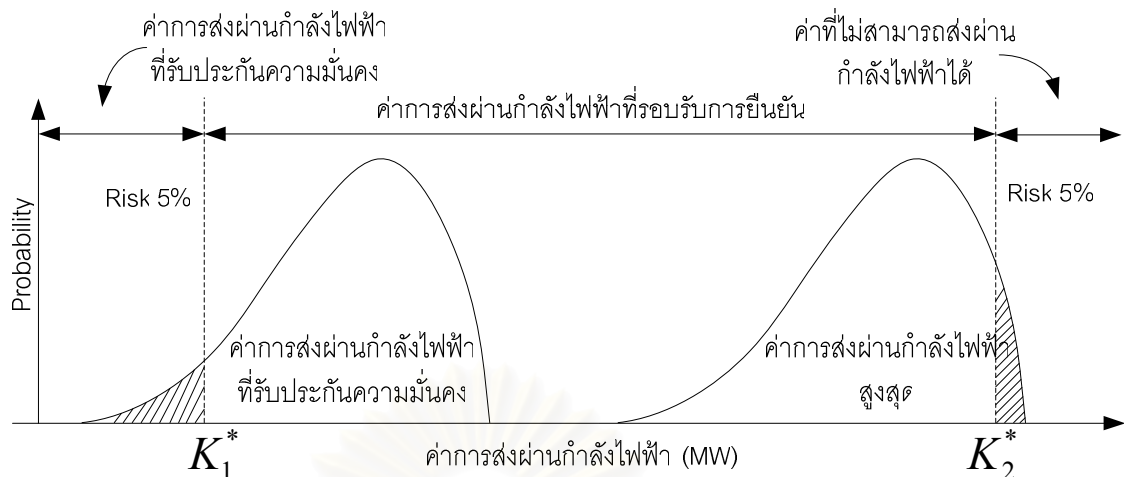
อย่างไรก็ดี เมื่อเราพิจารณาถึงเหตุขัดข้องในระบบส่งด้วย จะทำให้เราต้องพิจารณา สภาวะการทำงานของระบบเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้อง

พิจารณาเป็นจำนวนมากตามไปด้วย ซึ่งเรายังคงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ กลุ่มของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคง และกลุ่มของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นตามลำดับ คำถามต่อมาคือ จากข้อมูลระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะการทำงานต่างๆ ที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก เราจะเลือกค่าใดเป็นค่าที่เหมาะสมในการกำหนด K_1 และ K_2

หากเราให้ความสำคัญกับความมั่นคงของระบบเป็นอันดับแรก เราจะต้องเลือกค่าน้อยที่สุดในกลุ่มกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงเป็น K_1 และจะต้องเลือกค่าสูงสุดในกลุ่มของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นเป็น K_2 โดยในทางปฏิบัติค่า K_1 อาจมีค่าน้อยมากจนทำให้เราอาจยอมให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่โดยไม่ต้องตรวจสอบได้ อย่างไรก็ตาม หากเราพิจารณาถึงหลักของความน่าจะเป็นแล้ว โอกาสที่อุปกรณ์ในระบบส่งจะเกิดการขัดข้องจนทำให้เกิดสภาวะของระบบที่มีค่า K_1 น้อยที่สุดอาจมีค่าน้อยมากก็ได้ ซึ่งจะทำให้การกำหนดค่า K_1 โดยการพิจารณาเฉพาะความมั่นคงเพียงอย่างเดียวเป็นการเข้มงวดจนเกินไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำเสนอแนวทางในการกำหนดค่า K_1 และ K_2 ที่เหมาะสมโดยการพิจารณาควบคู่กันทั้งทางด้านความมั่นคงและด้านความน่าจะเป็น หลักการที่นำเสนอสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติว่า เราทำการวิเคราะห์ระบบตัวอย่างหนึ่งๆ โดยอาศัยวิธีการคำนวณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคง และค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นำเสนอ พร้อมทั้งพิจารณาผลของเหตุขัดข้องในระบบส่งด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล หลังจากนั้นนำค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าทั้งสองค่าที่ได้จากการคำนวณในแต่ละสภาวะของระบบมาสร้างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้างดรูปที่ 4.1 หากเราพิจารณาเฉพาะความมั่นคงเพียงอย่างเดียว เราจะต้องกำหนดให้ระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าทางด้านซ้ายสุดและขวาสุดเป็น K_1 และ K_2 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามโอกาสที่จะเกิดเหตุขัดข้องจนนำไปสู่เหตุการณ์ดังกล่าวมีค่าน้อยมาก การกำหนดระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ค่าดังกล่าวอาจจะเข้มงวดจนเกินไป



รูปที่ 4.1 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

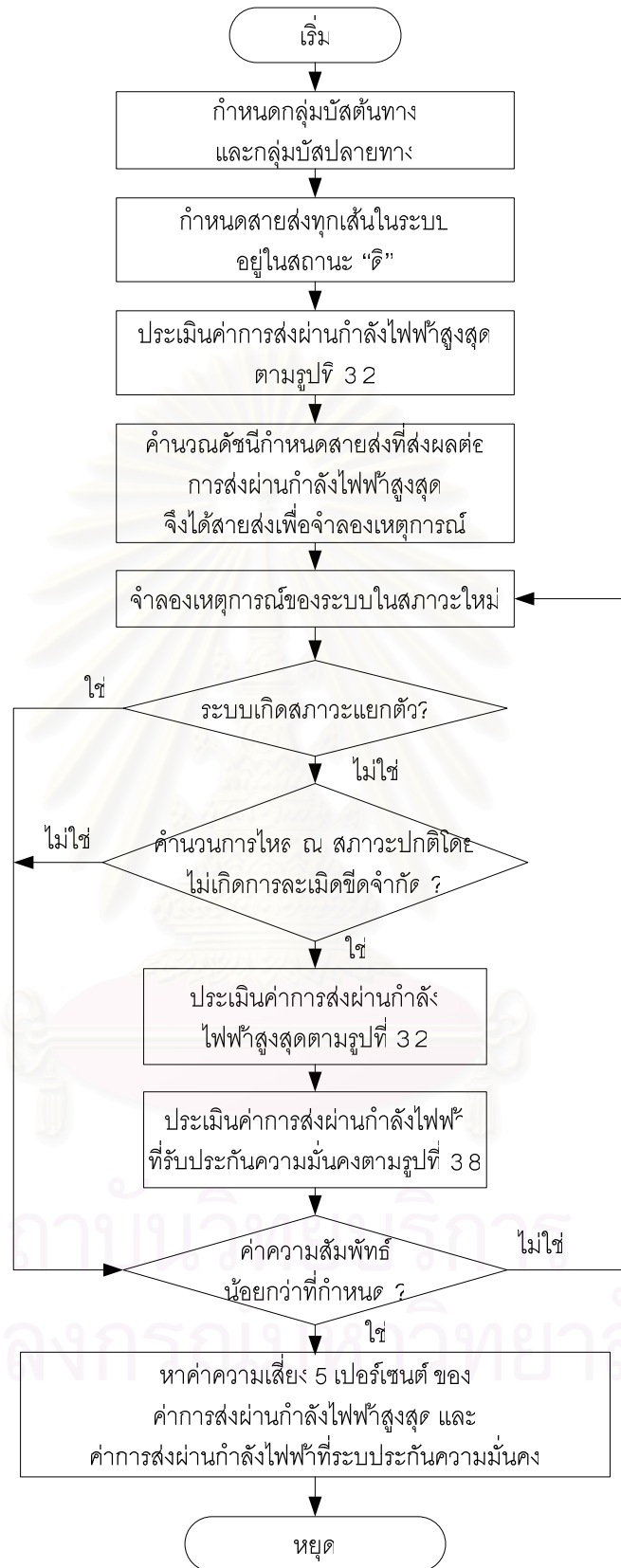
เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว หากเรายอมรับความเสี่ยงทางความมั่นคงของระบบในการกำหนดค่าระดับการส่งผ่านกำลังที่รับประกันความมั่นคงของระบบที่ 5% และพิจารณาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมรับความเสี่ยงในการสูญเสียผลประโยชน์ของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 5% นั้น ผลการยอมรับความเสี่ยงที่ได้กล่าวมานั้น จะทำให้เราสามารถกำหนดค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็นได้เป็น K_1^* และ K_2^* ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าวางพื้นที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อทำการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็น โดยมีขั้นตอนในการประเมินดังต่อไปนี้

1. ทำการกำหนดกลุ่มบัสต้นทางกำลังไฟฟ้า และกำหนดกลุ่มบัสปลายทาง คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าใน สภาวะปกติ
2. ทำการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามขั้นตอนในรูปที่ 3.3 ซึ่งทำให้เราได้ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบในสภาวะปกติ
3. ทำการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่ โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งในส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดกับสภาวะปกติ
4. กำหนดชุดของสายส่งที่จะทำการจำลองผลของเหตุขัดข้องด้วยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

5. ทำการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบ ณ สภาวะเริ่มต้นของเหตุการณ์นั้น แล้วทำการตรวจสอบว่าเกิดการละเมิดของขีดจำกัดหรือไม่ (ขีดจำกัดทางด้านแรงดัน ขีดจำกัดด้านสายส่ง ขีดจำกัดทางด้านกำลังการผลิต และ ขีดจำกัดทางเสถียรภาพ) ถ้าสามารถคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าและระบบยังมีความมั่นคง ให้ไปยังขั้นตอนที่ 7 ถ้าไม่ใช่ให้ไปยังขั้นตอนที่ 8
6. ทำการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.2 ทำการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงของระบบตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.8
7. ทำการหาค่าเฉลี่ยของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเหตุการณ์ที่ผ่านมา แล้วตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ ถ้ามีค่าน้อยกว่ากำหนดให้หยุดการทำงาน ถ้าไม่ใช่ กลับไปยังขั้นตอนที่ 4 เพื่อจำลองเหตุการณ์ต่อไป
8. หลังจากค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่าที่กำหนด จึงทำการพิจารณาความเสี่ยงของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงที่ 5% และ ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาความเสี่ยงในการสูญเสียผลประโยชน์สูงสุดที่ 5% เช่นกัน

โดยขั้นตอนการประเมินการส่งผ่านกำลังไฟฟาระหว่างระบบที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักการของความน่าจะเป็นจะแสดงแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักการของ
ความน่าจะเป็น

บทที่ 5

ผลการทดสอบ

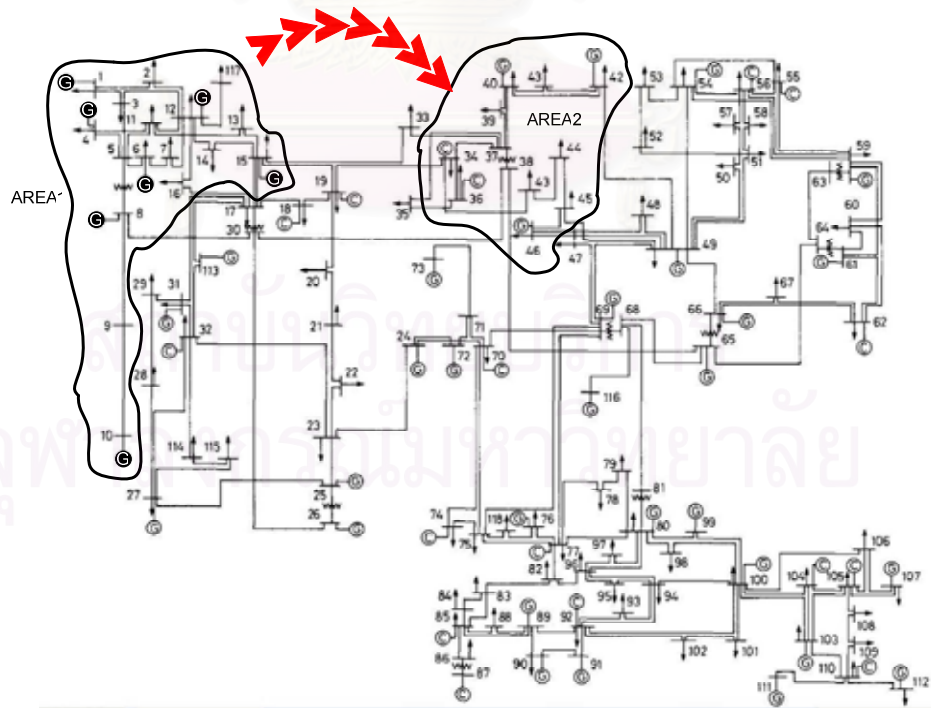
5.1 ผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการที่นำเสนอ

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยวิธีการที่นำเสนอตั้งหัวข้อที่ 3.3 นั้นจะทำการทดสอบโดยใช้ระบบทดสอบ IEEE-118 บัส โดยกำหนดให้กลุ่มบัสต้นทาง (Area 1) เป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าและกำหนดกลุ่มบัสปลายทาง (Area 2) เป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่รับกำลังไฟฟ้าตามลำดับ รายละเอียดของบัสต่างๆในกลุ่มบัสต้นทางและกลุ่มบัสปลายทางแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางจำแนกบัสใน Area1 และ Area 2

Area	Generator Buses	Load Buses
กลุ่มบัสต้นทาง	1, 4, 6, 8, 10, 12, 15	2, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 14, 16, 117
กลุ่มบัสปลายทาง	34, 36, 40, 42, 46	37*, 38*, 39, 41, 43, 44, 45

* เป็นบัสที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งไม่มีโหลดต่ออยู่



รูปที่ 5.1 ระบบทดสอบ IEEE 118 บัส

เมื่อใช้วิธีการที่นำเสนอ จะพบว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่สภาวะดังแสดง
ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สภาวะที่เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละ บัส(MW)	กำลังการส่งผ่าน ไฟฟ้าสูงสุด (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	14.58	214.58
	4	0.00	
	6	0.00	
	8	0.00	
	10	0.00	
	12	100.00	
	15	100.00	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ปลายทาง	37	0.00	194.92
	38	0.00	
	39	0.00	
	41	99.42	
	43	25.91	
	44	0.00	
	45	69.59	

ตารางที่ 5.3 แสดงการจำแนกขอบเขตของขีดจำกัดที่เกิดขึ้น

Active Constrains	ค่าขอบเขตของขีดจำกัด
ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 43	0.94 p.u.
ขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่บัส 45	0.94 p.u.
สายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 30และ 38	175 MVA
กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 12	185 MW
กำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัส 15	100 MW

จากการทดสอบจะพบว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจาก Area 1 ไปยัง Area 2 นั้นมีค่าเท่ากับ 194.92 MW โดยจะมีบัลที่รับกำลังไฟฟ้าคือบัลที่ 41, 43 และ 45 ในกำลังการผลิตไฟฟ้าใน Area 1 นั้นจะมีเพียงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัลที่ 44 และ 45 ที่จัดสรรกำลังการผลิตไฟฟ้าโดยจ่ายรวมกันเท่ากับ 214.58 MW ซึ่งเมื่อตรวจสอบจำนวนเงื่อนไขบังคับที่ Active ตามตารางที่ 5.3 จะพบว่าแรงดันที่บัล 43 และ 45 อยู่ที่ขอบเขตล่าง กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่ต่อระหว่างบัล 30 และ 38 มีค่าเท่ากับขีดจำกัดความร้อน และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่บัล 12 และ 15 จ่ายโหลดเต็มพิกัด ซึ่งจะเห็นว่ามิใช่เงื่อนไขที่เป็นขอบเขตของการละเมิดทั้งหมด 5 เงื่อนไข ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปที่กล่าวไว้คือ จำนวนกลุ่มบัลต้นทางและกลุ่มบัลปลายทางที่มีส่วนร่วมในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าครั้งนี้จำนวน 6 บัลลดด้วยหนึ่ง

หากพิจารณาจากขีดจำกัดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในตารางที่ 5.3 อย่างละเอียดแล้วจะพบว่าข้อมูลนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกปรับปรุงระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคตได้ โดยหากเราต้องการเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่าง Area 1 และ Area 2 แล้ว เราควรให้ความสำคัญกับปัญหาเหล่านั้นก่อน ตารางที่ 5.4 แสดงตัวอย่างการปรับปรุงระบบเพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในสองแนวทาง คือ ติดตั้งตัวเก็บประจุที่ตำแหน่งบัลที่ 43 หรือ เพิ่มกำลังการส่งของสายส่งที่เชื่อมระหว่างบัลที่ 30 และ 38 เป็น 200 MVA โดยการติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ซึ่งจะทำให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงการปรับปรุงระบบที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

Active Constraints	กำลังการส่งผ่าน ไฟฟ้าสูงสุด (MW)
ติดตั้งอุปกรณ์ FACTS ที่ตำแหน่งบัล 43 ขนาด 100 MVar	195.79
เพิ่มกำลังการส่งของสายส่งระหว่างบัลที่ 30 กับ 38 เป็น 200 MVA	232.24

5.2 ผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าตามความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่

ในหัวข้อนี้ เราจะแสดงให้เห็นถึงความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ โดยทำการจำลองเหตุการณ์ที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างสองพื้นที่ของระบบทดสอบข้างต้นที่น้อยกว่าค่าความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ยังคงทำให้ระบบเกิดปัญหาละเมิดขีดจำกัดความมั่นคงขึ้น ผลการทดสอบจะแสดงดังตารางที่ 5.5 และตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (1)

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส(MW)	กำลังการส่งผ่านไฟฟ้าสูงสุด (MW)	กรณีของการละเมิดขีดจำกัดของระบบ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสของ ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้า	1	84.46	84.46	$V_{44} = 0.935$ แรงดันที่บัส 44 ต่ำกว่าแรงดันขั้น ต่ำที่กำหนด
	4	0.00		
	6	0.00		
	8	0.00		
	10	0.00		
	12	0.00		
	15	0.00		
โหลดบัสในกลุ่ม บัสของพื้นที่ผู้ ต้องการไฟฟ้า	37	0.00	78.81 (<194.92)	
	38	0.00		
	39	0.00		
	41	99.42		
	43	25.91		
	44	0.00		
	45	69.59		

ตารางที่ 5.6 ตัวอย่างการวิเคราะห์การส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (2)

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส(MW)	กำลังการส่งผ่านไฟฟ้าสูงสุด (MW)	กรณีของการละเมิดขีดจำกัดของระบบ
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในกลุ่มบัสต้นทาง	1	0.00	158.97	$V_{39} = 0.935$ แรงดันที่บัส 39 ต่ำกว่าแรงดันขั้นต่ำที่กำหนด และ สายส่งระหว่างบัสที่ 30 และ 38 สูงกว่าพิกัดที่กำหนด $S_{30-38} = 180MVA$ $(>175MVA)$
	4	0.00		
	6	100.00		
	8	58.97		
	10	0.00		
	12	0.00		
	15	0.00		
โหลดบัสในกลุ่มบัสปลายทาง	37	0.00	141.33 (<194.92)	
	38	0.00		
	39	104.09		
	41	37.24		
	43	0.00		
	44	0.00		
	45	0.00		

จากตารางที่ 5.5 และ 5.6 จะเห็นได้ว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่าค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นไม่ได้รับประกันว่าจะไม่เกิดปัญหาใดๆ ขึ้นในระบบ ผลการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.5

5.3 ผลการทดสอบการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคง

จากผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบไฟฟ้ากำลังดังหัวข้อที่ 5.1 นั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถระบุเงื่อนไขบังคับที่เกิดขึ้นจากการคำนวณได้ โดยมีเงื่อนไขบังคับทางด้านขีดจำกัดแรงดัน ณ บัสที่ 43 และ บัสที่ 45 ขีดจำกัดทางด้านสายส่งที่ต่อระหว่างบัสที่ 30 และ 38 รวมทั้งเงื่อนไขขีดจำกัดทางด้านกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ บัสที่ 12 และ 15 ในขั้นตอนต่อไป เราจะทำการวิเคราะห์แต่ละเงื่อนไขบังคับที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.7 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านแรงดัน ณ บัสที่ 43 เท่านั้น

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส (MW)	กำลังส่งการส่งผ่าน ไฟฟ้า (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	42.83	42.83
	12	0.00	
	15	0.00	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ในกลุ่มบัสปลายทาง	41	0.00	41.27
	43	41.27	
	45	0.00	

ตารางที่ 5.8 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านแรงดัน ณ บัสที่ 45 เท่านั้น

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส (MW)	กำลังส่งการส่งผ่าน ไฟฟ้า (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	83.81	83.81
	12	0.00	
	15	0.00	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ในกลุ่มบัสปลายทาง	41	0.00	78.25
	43	0.00	
	45	78.25	

ตารางที่ 5.9 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านสายส่งระหว่างบัสที่ 30 และ 38 เท่านั้น*

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส (MW)	กำลังส่งการส่งผ่าน ไฟฟ้า (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	70.21	203.18
	12	100.00	
	15	32.97	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ปลายทาง	41	116.27	181.74
	43	0.00	
	45	65.47	

*หมายเหตุ ณ สภาวะนี้ เมื่อขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง 30-38 เปลี่ยนเป็น Active Constraint จะมีเงื่อนไขอีก 3 เงื่อนไข เปลี่ยนเป็น Active Constraint พร้อมกันด้วย

ตารางที่ 5.10 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางการผลิต ณ บัสที่ 12 เท่านั้น

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส (MW)	กำลังส่งการส่งผ่าน ไฟฟ้า (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	0.00	100.00
	12	100.00	
	15	0.00	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ปลายทาง	41	89.74	89.74
	43	0.00	
	45	0.00	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.11 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากเงื่อนไขบังคับทางด้านการผลิต ณ บัสที่ 15 เท่านั้น

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส (MW)	กำลังส่งการส่งผ่าน ไฟฟ้า (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	0.00	100.00
	12	0.00	
	15	100.00	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ในกลุ่มบัส ปลายทาง	41	90.90	90.90
	43	0.00	
	45	0.00	

จากการทดสอบข้างต้น เมื่อพิจารณาเงื่อนไขบังคับที่ส่งผลให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดนั้น เราจะสามารถกำหนดค่าส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงของระบบได้ ซึ่งจะกำหนดโดยเงื่อนไขบังคับที่เกิดจากขีดจำกัดทางด้านแรงดันไฟฟ้าของบัสที่ 43 ที่ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 41.27 MW เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบกำลังไฟฟ้านี้ จะทำการยกตัวอย่างการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบ IEEE-118 บัส สองกรณีว่าสามารถจัดสรรกำลังการผลิตอย่างไรก็ได้ที่ระดับการส่งกำลังไฟฟ้าไม่เกิน 41.27 MW โดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบเลย

ตารางที่ 5.12 แสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานใหม่ที่ระดับส่งผ่านเท่ากับ 41.27MW (1)

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส (MW)	กำลังส่งการส่งผ่าน ไฟฟ้า (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	42.83	42.83
	12	0.00	
	15	0.00	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ในกลุ่มบัสปลายทาง	41	0.00	41.27
	43	41.27	
	45	0.00	

ตารางที่ 5.13 แสดงการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานใหม่ที่ระดับส่งผ่านเท่ากับ 41.27 MW (2)

Area	บัส	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตและรับในแต่ละบัส (MW)	กำลังส่งการส่งผ่านไฟฟ้า (MW)
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในกลุ่มบัสต้นทาง	1	0.00	42.83
	12	0.00	
	15	42.83	
โหลดบัสในกลุ่มบัส ในกลุ่มบัสปลายทาง	41	13.76	41.27
	43	13.76	
	45	13.75	

จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการจัดสรรกำลังการผลิต ณ กลุ่มบัสต้นทางแบบใดก็ตาม หากค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้นไม่เกินกว่า 41.27 MW จะสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้นได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงระบบ

5.4 ผลการทดสอบการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดที่ระดับการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่กำหนด

จากหลักการดังในหัวข้อที่ 3.6 ที่ได้กล่าวมานั้น เราสามารถกำหนดผลตอบแทนจากการซื้อขายกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในตัวอย่างของระบบ IEEE-118 บัส สำหรับผู้เกี่ยวข้องแต่ละรายดังคอลัมน์ที่ 3 ในตารางที่ 5.14 และกำหนดให้ปริมาณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบเป็น 185 MW เราจะสามารถคำนวณได้ว่ารูปแบบการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดแบบใดที่ทำให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในปริมาณดังกล่าวไม่เกิดปัญหาความมั่นคงต่อระบบและยังทำให้เกิดผลตอบแทนสูงสุดด้วย ผลการคำนวณแสดงในคอลัมน์ที่ 4 ของตารางที่ 5.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบการวิเคราะห์การกำหนดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

Area	Bus	ผลตอบแทนจากการ ซื้อขายกำลังไฟฟ้า ระหว่างระบบ สำหรับ ผู้เกี่ยวข้องแต่ละราย (Baht/MW)	กำลังไฟฟ้าที่ผลิต และรับในแต่ละบัส	ค่าการส่งผ่าน กำลังไฟฟ้า(MW)
เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าในกลุ่ม บัสต้นทาง	1	37.00	0.00	207.87
	4	38.00	0.00	
	6	39.00	0.00	
	8	40.00	0.00	
	10	41.06	52.06	
	12	42.81	55.81	
	15	43.00	100.00	
โหลดบัสใน กลุ่มบัสใน กลุ่มบัส ปลายทาง	37	0.00	0.00	185.00
	38	0.00	0.00	
	39	48.00	0.00	
	41	49.00	105.98	
	43	50.00	0.00	
	44	21.98	0.00	
	45	52.00	79.02	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.5 ผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของ ความน่าจะเป็น

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็นที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 4.2.2 นั้นกับระบบทดสอบ IEEE-118 บัส โดยก่อนที่จะทำการจำลองเหตุการณ์ เราจะทำการคัดเลือกชุดของสายส่งที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่โดยอาศัยดัชนีเหตุขัดข้องที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.1 โดยจากสายส่งจำนวนทั้งสิ้น 186 เส้น เราจะทำการพิจารณาเฉพาะเหตุขัดข้องของสายส่งเพียง 102 เส้น ผลการคำนวณค่าดัชนีดังกล่าว แสดงอยู่ในตารางที่ ก.1 ในภาคผนวก ก. โดยในการทดสอบนั้นจะกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ในการจำลองเหตุการณ์ (R) เท่ากับ 0.03 และทำการพิจารณาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่พิจารณาผลทางด้านความน่าจะเป็นภายหลังจากการจำลองเหตุการณ์ของระบบเสร็จสิ้น ซึ่งผลการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักการของความน่าจะเป็นดังตารางที่ 5.15 และ 5.16

ตารางที่ 5.15 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

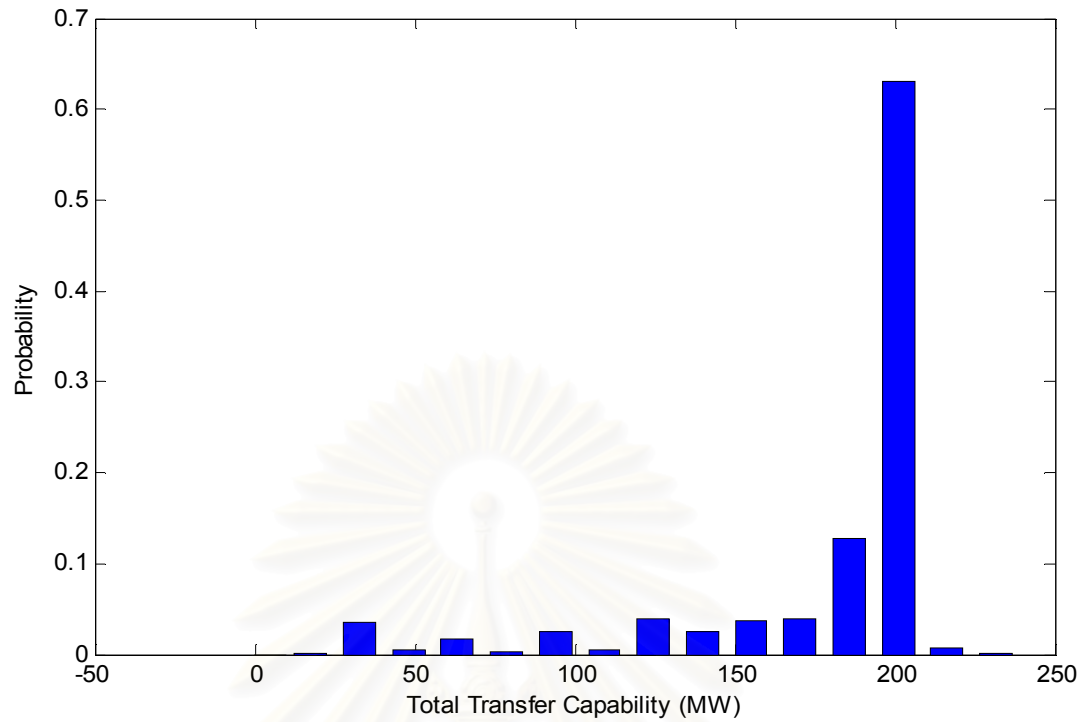
ขอบบน TTC		ขอบล่าง TTC	กึ่งกลาง TTC	ค่าความ น่าจะเป็น	ค่าความน่าจะเป็นสะสม	จำนวน ครั้ง
0	-	34.0587	17.0294	0	1	0
34.0587	-	46.7177	40.3877	0.002384	1	2
46.7177	-	59.3747	53.0457	0.001192	0.997616	1
59.3747	-	72.0326	65.7036	0.01907	0.996424	16
72.0326	-	84.6906	78.3672	0.001192	0.977354	1
84.6906	-	97.3485	91.0196	0.02503	0.976162	21
97.3485	-	110.0065	103.678	0.001192	0.951132	1
110.0065	-	122.6644	116.3356	0.002384	0.94994	2
122.6644	-	135.3224	128.9934	0.016687	0.947557	14
135.3224	-	147.9804	141.6514	0.01907	0.93087	16
147.9804	-	160.6383	154.3093	0.017878	0.9118	15
160.6383	-	173.2963	166.9673	0.020262	0.893921	17
173.2963	-	185.9542	179.6253	0.022646	0.873659	19
185.9542	-	198.6122	192.2832	0.827175	0.851013	694
198.6122	-	211.2702	204.9412	0.022646	0.023838	19
211.2702	-	223.9281	217.5991	0.001192	0.001192	1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

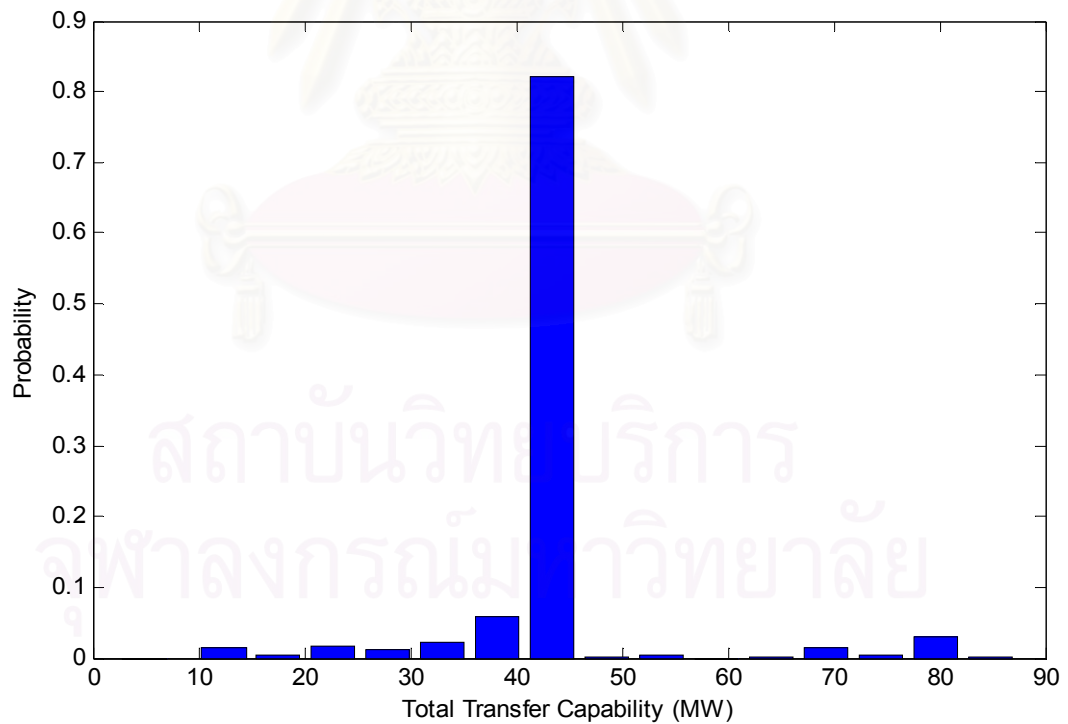
ตารางที่ 5.16 ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคง

ขอบบน TTC		ขอบล่าง TTC	กึ่งกลาง TTC	ค่าความ น่าจะเป็น	ค่าความน่าจะเป็น เป็นสะสม	จำนวน ครั้ง
0.0000	-	10.9961	5.4980	0.0000	0.0000	0
10.9961	-	16.0834	13.5397	0.0191	0.0191	16
16.0834	-	21.1707	18.6270	0.0084	0.0275	7
21.1707	-	26.2580	23.7143	0.0156	0.0431	13
26.2580	-	31.3453	28.8017	0.0048	0.0478	4
31.3453	-	36.4326	33.8890	0.0371	0.0849	31
36.4326	-	41.5199	38.9763	0.7608	0.8457	636
41.5199	-	46.6072	44.0636	0.0981	0.9438	82
46.6072	-	51.6945	49.1509	0.0000	0.9438	0
51.6945	-	56.7819	54.2382	0.0012	0.9450	1
56.7819	-	61.8692	59.3255	0.0036	0.9486	3
61.8692	-	66.9565	64.4128	0.0024	0.9510	2
66.9565	-	72.0438	69.5001	0.0132	0.9641	11
72.0438	-	77.1311	74.5874	0.0024	0.9665	2
77.1311	-	82.2184	79.6748	0.0335	1.0000	28
82.2184	-	87.3057	84.7621	0.0000	1.0000	0

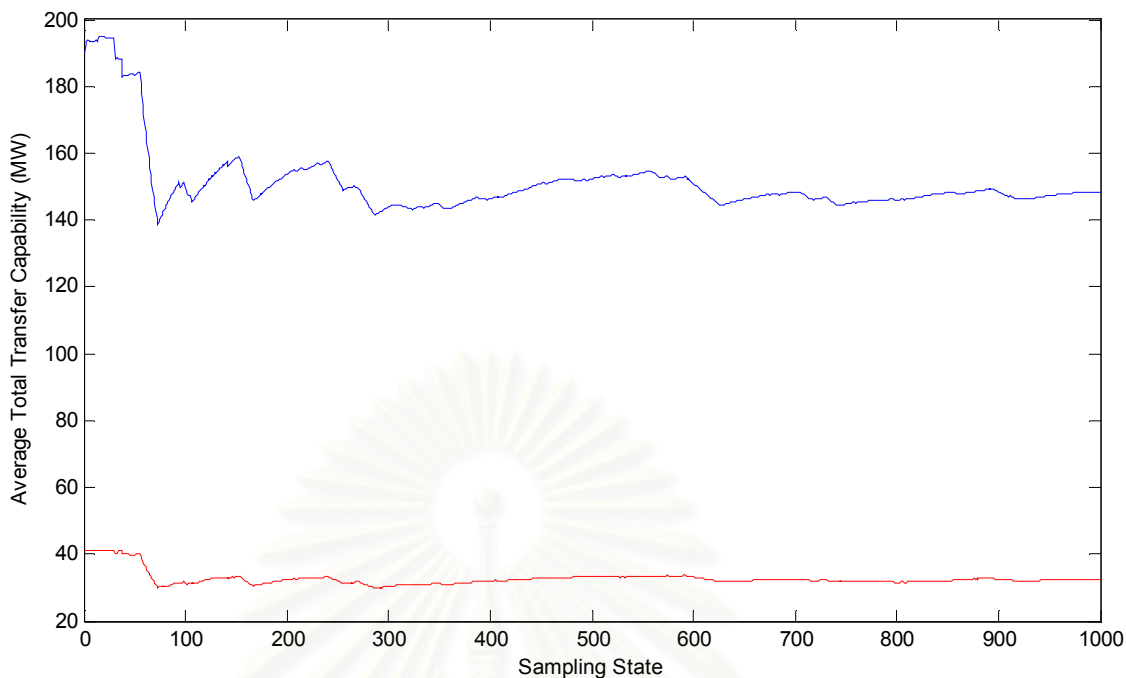
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2 ความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 5.3 ความน่าจะเป็นของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงของระบบ



รูปที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยของค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

จากการทดสอบการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นที่ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ 0.03 เมื่อทำการพิจารณาที่ความเสี่ยง 5% จะมีค่าเท่ากับ 198.21MW และค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงของระบบมีค่าเท่ากับ 31.64MW โดยใช้จำนวนในการจำลองเหตุการณ์เพียง 1000 เหตุการณ์

5.6 ผลการทดสอบผลกระทบของการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่มีต่อการจำลองเหตุการณ์

ผลการกำหนดค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ได้จากการจำลองเหตุการณ์ในหัวข้อ 5.6 ได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ไว้ที่ 0.03 ซึ่งจะทำให้จำนวนเหตุการณ์ที่เราต้องพิจารณามีอยู่ 1,000 เหตุการณ์ ในหัวข้อนี้ เราจะพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของการจำลองเหตุการณ์ เพื่อวิเคราะห์ว่าการกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ 0.03 มีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด เพื่อเปรียบเทียบผลของการทดสอบว่ามีความแม่นยำมากพอหรือไม่ เราจะทำการจำลองเหตุการณ์แบบเดียวกับที่ทำในหัวข้อ 5.6 อีกครั้งหนึ่ง แต่เปลี่ยนค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของการจำลองเหตุการณ์เป็น 0.01 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 ผลการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เหมาะสมโดยกำหนดความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 0.01

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (R)	ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MW)	ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคง (MW)	เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ (min)
0.01	198.35	31.46	210
0.03	198.21	31.64	140

ในการจำลองเหตุการณ์เพื่อประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่กำหนดความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 0.01 นั้น เราต้องพิจารณาเหตุการณ์จำนวน 2450 เหตุการณ์และใช้เวลาในการประเมิน 210 นาที เมื่อเทียบกับกรณีกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 0.03 นั้นจะใช้เวลาจำลองเหตุการณ์เพียงแค่ 1000 เหตุการณ์และใช้เวลาในการประเมินเพียง 140 นาทีเท่านั้น เมื่อวิเคราะห์ผลการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะพบว่า การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเมื่อกำหนดความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับ 0.03 และ 0.01 นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอวิธีการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบโดยใช้วิธีการประมาณเชิงเส้นร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบเหมาะสม ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงโดยให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและใช้การคำนวณที่รวดเร็ว โดยเงื่อนไขความมั่นคงของระบบพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย ขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้า ขีดจำกัดทางความร้อนของสายส่ง ขีดจำกัดทางด้านกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ ขีดจำกัดทางด้านเสถียรภาพ

การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบไฟฟ้านั้น จะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมากทั้งปริมาณการเพิ่มของกำลังการผลิตและโหลด ตัวแปรสถานะของระบบ เงื่อนไขความมั่นคงของระบบ ฯลฯ โดยอาศัยวิธีการที่นำเสนอ เราจะสามารถสรุปได้ว่า ณ สภาวะที่การส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดนั้น จำนวนขีดจำกัดของระบบที่มีค่าอยู่ที่ขอบเขตจะมีค่าเท่ากับจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและจุดโหลดที่มีส่วนร่วมในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าลบหนึ่งเสมอ

ในส่วนของภาวะวิเคราะห์ความหมายทางกายภาพของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่นั้น จะเห็นชัดเจนว่าค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดบ่งบอกได้อย่างเดียวว่าไม่สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามากกว่าค่านี้ได้ แต่ไม่รับประกันว่าหากส่งกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าค่านี้ระบบจะเกิดปัญหาหรือไม่ เราจึงไม่สามารถใช้ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงอย่างเดียวเป็นดัชนีบ่งชี้ความมั่นคงของระบบไฟฟ้าได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวคิดของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงได้ ซึ่งนำไปสู่ผลสรุปที่มีประโยชน์และอาจใช้เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการจำแนกประเภทการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าได้ โดยหากกำหนดให้ การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบที่รับประกันความมั่นคงมีค่า K_1 และการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระบบมีค่า K_2

- หากมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในปริมาณน้อยกว่า K_1 สามารถอนุญาตให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องตรวจสอบ
- หากมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในปริมาณมากกว่า K_2 จะต้องไม่อนุญาตให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นโดยเด็ดขาด เพราะจะทำให้เกิดปัญหาความมั่นคงต่อระบบ

- หากมีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบในปริมาณที่อยู่ระหว่าง K_1 และ K_2 จะต้องทำการตรวจสอบอย่างละเอียดก่อนว่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ารูปแบบดังกล่าว ทำให้เกิดปัญหาความมั่นคงต่อระบบหรือไม่

ในส่วนค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่อยู่ระหว่าง K_1 และ K_2 นี้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแนวคิดของการคำนวณหารูปแบบการจัดสรรกำลังการผลิตและโหลดที่ปริมาณการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าหนึ่งๆ ที่เหมาะสมมากที่สุดตามเป้าหมายที่กำหนด ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการซื้อขายไฟฟ้าระหว่างระบบที่ให้ผลตอบแทนมากที่สุดโดยไม่เสี่ยงต่อปัญหาความมั่นคงได้

ในการประเมินผลของเหตุขัดข้องจากอุปกรณ์ในระบบส่งที่มีต่อค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบนั้น เราได้กำหนดดัชนีเหตุขัดข้องเพื่อจำแนกสายส่งที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างพื้นที่เพื่อช่วยลดจำนวนสายส่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ จากนั้นได้อาศัยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลเพื่อรวบรวมข้อมูลในการวิเคราะห์ผล

ส่วนสุดท้ายของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวถึงการกำหนดค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่รับประกันความมั่นคงที่เหมาะสมโดยอาศัยหลักของความน่าจะเป็น โดยเราจะยอมรับความเสี่ยงทางความมั่นคงของระบบโดยกำหนดค่า K_1 ผิดพลาดที่ 5% และค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เหมาะสม โดยพิจารณาความเสี่ยงในการสูญเสียผลประโยชน์สูงสุดโดยกำหนดค่า K_2 ที่ความผิดพลาด 5% เช่นกัน

หลักการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถใช้แนวทางเพื่อช่วยผู้ดูแลระบบทำการวางแผนระบบส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะในการประเมินค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

1. การวิเคราะห์ดัชนีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ได้กล่าวในวิทยานิพนธ์นี้ เมื่อทำการพิจารณาดัชนีในสถานะจริงเพื่อทำการวิเคราะห์สมบรูณ์มากขึ้น อาจนำการพิจารณาความมั่นคงของระบบอื่นๆ มาช่วยในการตรวจสอบ
2. เนื่องจากสถานะของโหลดมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งไม่สามารถคาดการณ์ได้ หากเรานำผลของความไม่แน่นอนของโหลดมาพิจารณาร่วมด้วย จะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความสมบรูณ์มากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] North American Electric Reliability Council. 1995. Transmission Transfer Capability Task Force, **Transmission Transfer Capability**. Princeton, New Jersey.
- [2] North American Electric Reliability Council. 1996. Transmission Transfer Capability Task Force, **Available Transfer Capability Definition and Determination**. Princeton, New Jersey.
- [3] Powell, Lynn. 2004. **Power System Load Flow Analysis**. McGraw-Hill.
- [4] Saadat, Hadi. 2004. **Power System Analysis**. 2nd Edition. International edition 2004, Mc-Graw-Hill.
- [5] Audomvongseree,K., and Yokoyama,A. 2004. **Consideration of an Appropriate TTC by Probabilistic Approach**, IEEE Transaction on Power Systems, 19, 1: 375-383.
- [6] Audomvongseree,K., and Yokoyama,A. 2004. **Application of AC equivalent to Total Transfer Capability Evaluation using Two-Step Method**. in Proc. 2002 International Conference on Power System Technology, PowerCon: 383-387.
- [7] Ou, Y., and Sigh, C. 2002. **Assessment of Available Transfer Capability and Margins**. IEEE Transactions on Power Systems 17: 2.
- [8] Liang Min, and Ali Abur. 2006. **Total Transfer Capability Computation for Multi-Area Power Systems**. IEEE Transaction on Power System 21,3: 1141-1147.
- [9] Ou, Y., and Singh, C. 2001. **Improvement of Total Transfer Capability Using TCSC and SVC**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2 : 944-948.
- [10] Weixing Li, Peng Wang, Zhizhong Guo. 2006. **Determination of Optimal Transfer Capability Using a Probabilistic Approach**. IEEE Transaction on Power system 21,2: 862-868.
- [11] Mohamed Shaaban, Yixin Ni, and Felix Wu. 2000. **Total Transfer Capability Calculations for Competitive Power Networks Using Genetic Algorithm**. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring

and Power Technology 2000, City University London.

- [12] Mozafari, B., Ranjbar, A.M., Shirani, A.R., and Barkeseh, A. 2004. **A Comprehensive Method for Available Transfer Capability Calculation in a Deregulated Power System.** IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technology 2004, Hongkong.
- [13] Mello, J.C.O., Melo, A.C.G., and Granville, S. 1997. **Simultaneous transfer capability assessment by combining interior point methods and Monte Carlo simulation.** IEEE Trans. on Power Systems 12: 736-742.
- [14] Greene, S., Dobson, I., and Alvarado, F.L. 2002. **Sensitivity of transfer capability margins with a fast formula.** IEEE Transactions on Power Systems 17: 34 -40.
- [15] Gravener, M.H., Nwankpa, C. 1999. **Available Transfer Capability and First Order Sensitivity.** IEEE Trans. on Power Systems 14: 512-518.
- [16] Xiao, Y., Song, Y.H., and Sun, Y.Z. 2001. **A hybrid stochastic approach to available transfer capability evaluation.** IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.148: 420-426.
- [17] Audomvongseeree, K. 2004. **Transmission Reliability Assessment in the Deregulated Environment by mean of Probabilistic Approaches.** Ph.D. dissertation in Graduate School of Engineering, the University of Tokyo.
- [18] Billinton, R., and Li, W. **Composite System Reliability Assessment Using Monte - Carlo Approach.** Third international conference on probabilistic methods applied to electric power systems PMAPS: conf.proc.No.338.
- [19] สถาพร ลิ้มปัทมปาณี .2549. **การคำนวณความสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าพร้อมมูล โดยการใช้ระบบอนุমানนิรโทษซีแบบปรับตัวได้.** วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- [20] วิทยา สุริยาสกุล 2550. **การประเมินผลกระทบของ UPFC ที่มีต่อความเชื่อถือได้ของ ระบบไฟฟ้ากำลัง.** วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การประเมินสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่มีผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามหลักการของหัวข้อที่ 4.1 จะแสดงดังตารางที่ ก.1 ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
1	-	2	34.54	33.42	1.12	3.24	
1	-	3	84.67	65.56	19.11	22.57	✓
4	-	5	213.53	180.74	32.79	15.36	✓
3	-	5	141.11	111.95	29.16	20.67	✓
5	-	6	176.13	136.17	39.96	22.69	✓
6	-	7	71.66	31.00	40.66	56.75	✓
8	-	9	893.25	893.25	0.00	0.00	
8	-	5	710.76	576.23	134.53	18.93	✓
9	-	10	895.60	895.60	0.00	0.00	
4	-	11	127.56	95.25	32.30	25.32	✓
5	-	11	153.30	117.02	36.28	23.66	✓
11	-	12	98.06	46.97	51.09	52.10	✓
2	-	12	76.18	74.50	1.68	2.20	
3	-	12	28.95	31.64	2.69	9.27	✓
7	-	12	35.18	7.45	27.72	78.81	✓
11	-	13	73.74	89.68	15.95	21.63	✓
12	-	14	37.17	64.52	27.35	73.56	✓

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
13	-	15	2.36	20.48	18.11	766.56	✓
14	-	15	13.85	36.15	22.30	161.05	✓
12	-	16	18.38	57.76	39.38	214.30	✓
15	-	17	215.06	147.78	67.28	31.28	✓
16	-	17	35.32	15.47	19.86	56.22	✓
17	-	18	166.48	166.02	0.46	0.28	
18	-	19	51.76	52.16	0.40	0.77	
19	-	20	24.88	12.07	12.81	51.50	✓
15	-	19	39.58	108.61	69.03	174.38	✓
20	-	21	58.47	45.22	13.25	22.67	✓
21	-	22	86.18	73.46	12.72	14.76	✓
22	-	23	108.52	95.57	12.95	11.93	✓
23	-	24	30.53	75.23	44.70	146.41	✓
23	-	25	335.65	355.48	19.83	5.91	✓
26	-	25	185.01	198.81	13.80	7.46	✓
25	-	27	284.28	277.38	6.90	2.43	
27	-	28	65.53	60.44	5.10	7.78	✓
28	-	29	33.19	27.98	5.21	15.69	✓
30	-	17	490.29	403.84	86.45	17.63	✓
8	-	30	180.67	307.01	126.34	69.93	✓
26	-	30	444.14	430.53	13.61	3.06	
17	-	31	39.37	48.72	9.35	23.75	✓
29	-	31	23.62	26.60	2.98	12.63	✓

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
23	-	32	183.52	161.16	22.36	12.19	✓
31	-	32	65.44	55.26	10.18	15.55	✓
27	-	32	25.55	24.49	1.06	4.13	
15	-	33	15.76	99.03	83.27	528.51	✓
19	-	34	16.65	74.62	57.97	348.20	✓
35	-	36	8.59	7.41	1.18	13.78	✓
35	-	37	72.47	73.07	0.60	0.83	
33	-	37	36.33	64.62	28.28	77.85	✓
34	-	36	61.20	60.06	1.14	1.86	
34	-	37	208.54	214.03	5.50	2.64	
38	-	37	526.86	632.19	105.33	19.99	✓
37	-	39	108.96	200.10	91.14	83.64	✓
37	-	40	87.13	177.41	90.28	103.62	✓
30	-	38	145.32	350.00	204.68	140.85	✓
39	-	40	56.14	149.73	93.59	166.71	✓
40	-	41	31.05	193.76	162.71	524.01	✓
40	-	42	25.32	18.06	7.26	28.69	✓
41	-	42	45.31	92.62	47.31	104.43	✓
43	-	44	33.45	3.81	29.63	88.60	✓
34	-	43	7.82	89.89	82.07	1048.82	✓
44	-	45	66.89	37.04	29.85	44.63	✓
45	-	46	73.42	137.19	63.77	86.86	✓
46	-	47	62.58	97.13	34.55	55.20	✓

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
46	-	48	30.53	50.02	19.49	63.84	✓
47	-	49	27.75	36.11	8.36	30.13	✓
42	-	49	132.99	151.17	18.18	13.67	✓
42	-	49	132.99	151.17	18.18	13.67	✓
45	-	49	101.23	165.44	64.21	63.44	✓
48	-	49	70.37	91.66	21.29	30.25	✓
49	-	50	109.80	103.81	5.99	5.46	✓
49	-	51	136.33	129.40	6.93	5.08	✓
51	-	52	58.45	56.21	2.24	3.83	
52	-	53	21.99	20.02	1.97	8.94	✓
53	-	54	26.81	28.92	2.11	7.88	✓
49	-	54	79.68	73.82	5.87	7.36	✓
49	-	54	78.22	72.47	5.76	7.36	✓
54	-	55	14.88	13.13	1.75	11.78	✓
54	-	56	38.29	32.63	5.66	14.77	✓
55	-	56	44.36	39.84	4.52	10.20	✓
56	-	57	49.09	44.26	4.83	9.83	✓
50	-	57	73.75	68.21	5.54	7.51	✓
56	-	58	14.34	11.14	3.19	22.28	✓
51	-	58	38.25	33.78	4.48	11.70	✓
54	-	59	62.41	69.70	7.30	11.69	✓
56	-	59	56.87	63.09	6.22	10.94	✓
56	-	59	59.60	66.12	6.52	10.94	✓

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
55	-	59	71.09	78.11	7.02	9.87	✓
59	-	60	87.63	91.97	4.33	4.95	
59	-	61	104.80	109.58	4.77	4.55	
60	-	61	225.11	231.66	6.55	2.91	
60	-	62	23.50	22.03	1.47	6.25	✓
61	-	62	57.63	63.10	5.47	9.49	✓
63	-	59	328.09	345.69	17.60	5.37	✓
63	-	64	326.84	345.25	18.41	5.63	✓
64	-	61	67.03	81.72	14.69	21.92	✓
38	-	65	369.05	268.68	100.37	27.20	✓
64	-	65	381.73	417.29	35.56	9.32	✓
49	-	66	267.48	311.07	43.59	16.30	✓
49	-	66	267.48	311.07	43.59	16.30	✓
62	-	66	81.60	78.38	3.22	3.94	
62	-	67	55.56	52.72	2.84	5.11	✓
65	-	66	143.82	173.46	29.64	20.61	✓
66	-	67	112.42	109.02	3.41	3.03	
65	-	68	34.61	26.10	8.51	24.60	✓
47	-	69	116.65	143.20	26.54	22.75	✓
49	-	69	97.98	119.29	21.31	21.75	✓
68	-	69	331.74	335.23	3.49	1.05	
69	-	70	215.41	184.67	30.74	14.27	✓
24	-	70	13.00	17.64	4.64	35.68	✓

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
70	-	71	41.04	18.15	22.90	55.79	✓
24	-	72	11.66	31.03	19.37	166.15	✓
71	-	72	21.26	11.25	10.01	47.10	✓
71	-	73	23.66	23.56	0.10	0.43	
70	-	74	42.89	50.28	7.39	17.22	✓
70	-	75	23.11	23.10	0.01	0.02	
69	-	75	218.62	205.13	13.49	6.17	✓
74	-	75	105.10	94.46	10.64	10.13	✓
76	-	77	132.40	128.05	4.34	3.28	
69	-	77	124.94	120.80	4.14	3.31	
75	-	77	72.04	65.95	6.09	8.46	✓
77	-	78	91.81	93.44	1.63	1.78	
78	-	79	62.98	61.85	1.13	1.79	
77	-	80	208.84	205.92	2.91	1.39	
77	-	80	98.43	97.05	1.37	1.39	
79	-	80	143.70	142.29	1.41	0.98	
68	-	81	113.24	119.92	6.68	5.90	✓
81	-	80	172.85	177.31	4.47	2.59	
77	-	82	43.27	42.85	0.42	0.98	
82	-	83	107.80	107.62	0.18	0.16	
83	-	84	58.77	58.69	0.07	0.12	
83	-	85	89.77	89.67	0.10	0.12	
84	-	85	75.37	75.30	0.07	0.10	

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
85	-	86	36.42	36.42	0.00	0.00	
86	-	87	27.29	27.29	0.00	0.00	
85	-	88	102.44	102.36	0.09	0.08	
85	-	89	143.75	143.66	0.09	0.06	
88	-	89	199.51	199.43	0.09	0.04	
89	-	90	115.18	115.19	0.01	0.01	
89	-	90	219.12	219.13	0.01	0.01	
90	-	91	11.24	11.24	0.00	0.01	
89	-	92	399.56	399.68	0.12	0.03	
89	-	92	126.22	126.26	0.04	0.03	
91	-	92	20.03	20.02	0.01	0.07	
92	-	93	116.87	116.90	0.03	0.03	
92	-	94	107.52	107.55	0.03	0.03	
93	-	94	97.06	97.09	0.03	0.03	
94	-	95	83.52	83.47	0.05	0.06	
80	-	96	59.18	59.04	0.15	0.25	
82	-	96	21.41	20.80	0.61	2.86	
94	-	96	43.28	43.21	0.07	0.16	
80	-	97	74.63	74.46	0.17	0.23	
80	-	98	60.66	60.54	0.13	0.21	
80	-	99	44.27	44.16	0.11	0.24	
92	-	100	69.91	69.96	0.05	0.08	
94	-	100	96.68	96.77	0.08	0.09	

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
95	-	96	42.29	42.27	0.02	0.05	
96	-	97	44.35	44.26	0.09	0.21	
98	-	100	14.34	14.46	0.13	0.87	
99	-	100	45.99	46.12	0.13	0.29	
100	-	101	58.69	58.73	0.04	0.07	
92	-	102	90.56	90.62	0.05	0.06	
101	-	102	81.21	81.26	0.05	0.07	
100	-	103	245.60	245.60	0.00	0.00	
100	-	104	112.71	112.71	0.00	0.00	
103	-	104	70.84	70.84	0.00	0.00	
103	-	105	89.56	89.56	0.00	0.00	
100	-	106	119.65	119.65	0.00	0.00	
104	-	105	97.07	97.07	0.00	0.00	
105	-	106	19.88	19.88	0.00	0.00	
105	-	107	53.13	53.13	0.00	0.00	
105	-	108	52.18	52.18	0.00	0.00	
106	-	107	47.83	47.83	0.00	0.00	
108	-	109	48.43	48.43	0.00	0.00	
103	-	110	120.62	120.62	0.00	0.00	
109	-	110	37.14	37.14	0.00	0.00	
110	-	111	71.76	71.76	0.00	0.00	
110	-	112	149.64	149.64	0.00	0.00	
17	-	113	13.20	18.41	5.21	39.44	✓

ตารางที่ ก.1(ต่อ) ผลการประเมินดัชนีกำหนดสายส่งที่ส่งผลต่อการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สายส่งในระบบ ไฟฟ้ากำลัง			Line flow at base case (MW)	Line flow at TTC (MW)	การ เปลี่ยนแปลง การไหล (MW)	การเปลี่ยน กำลังไฟฟ้าใน สายส่ง(%)	การเลือก สายส่ง 5%
จาก		ถึง					
32	-	113	32.22	27.58	4.64	14.40	✓
32	-	114	19.38	19.95	0.57	2.92	
27	-	115	42.96	42.40	0.56	1.31	
114	-	115	2.80	3.38	0.58	20.60	✓
68	-	116	386.28	386.18	0.09	0.02	
12	-	117	42.27	42.27	0.00	0.00	
75	-	118	92.93	96.94	4.01	4.32	
76	-	118	22.84	25.49	2.65	11.61	✓

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ระบบทดสอบ IEEE 118 Bus Test System

เนื้อหาในภาคผนวก ก จะประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆ ของระบบทดสอบ IEEE Test System ขนาด 118 บัส ซึ่งระบบดังกล่าวจะประกอบไปด้วยบัสจำนวน 118 บัส สายส่ง 186 เส้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 54 เครื่อง ตั้งแต่ขนาด 800 MW ไปจนถึงขนาด 100 MW โดยรายละเอียดจะแสดงดังตารางที่ ข.1 ข.2 และ ข.3

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 118 bus Test System

Bus No.	Load		Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
	PI(MW)	QI(MW)		
1	51	27	1.06	0.94
2	20	9	1.06	0.94
3	39	10	1.06	0.94
4	39	12	1.06	0.94
5	0	0	1.06	0.94
6	52	22	1.06	0.94
7	19	2	1.06	0.94
8	28	0	1.06	0.94
9	0	0	1.06	0.94
10	0	0	1.06	0.94
11	70	23	1.06	0.94
12	47	10	1.06	0.94
13	34	16	1.06	0.94
14	14	1	1.06	0.94
15	90	30	1.06	0.94
16	25	10	1.06	0.94
17	11	3	1.06	0.94
18	60	34	1.06	0.94

ตารางที่ ข.1(ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 118 bus Test System

Bus No.	Load		Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
	PI(MW)	QI(MW)		
19	45	25	1.06	0.94
20	18	3	1.06	0.94
21	14	8	1.06	0.94
22	10	5	1.06	0.94
23	7	3	1.06	0.94
24	13	0	1.06	0.94
25	0	0	1.06	0.94
26	0	0	1.06	0.94
27	71	13	1.06	0.94
28	17	7	1.06	0.94
29	24	4	1.06	0.94
30	0	0	1.06	0.94
31	43	27	1.06	0.94
32	59	23	1.06	0.94
33	23	9	1.06	0.94
34	59	26	1.06	0.94
35	33	9	1.06	0.94
36	31	17	1.06	0.94
37	0	0	1.06	0.94
38	0	0	1.06	0.94
39	27	11	1.06	0.94
40	66	23	1.06	0.94
41	37	10	1.06	0.94
42	96	23	1.06	0.94
43	18	7	1.06	0.94
44	16	8	1.06	0.94
45	53	22	1.06	0.94

ตารางที่ ข.1(ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 118 bus Test System

Bus No.	Load		Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
	PI(MW)	QI(MW)		
46	28	10	1.06	0.94
47	34	0	1.06	0.94
48	20	11	1.06	0.94
49	87	30	1.06	0.94
50	17	4	1.06	0.94
51	17	8	1.06	0.94
52	18	5	1.06	0.94
53	23	11	1.06	0.94
54	113	32	1.06	0.94
55	63	22	1.06	0.94
56	84	18	1.06	0.94
57	12	3	1.06	0.94
58	12	3	1.06	0.94
59	277	113	1.06	0.94
60	78	3	1.06	0.94
61	0	0	1.06	0.94
62	77	14	1.06	0.94
63	0	0	1.06	0.94
64	0	0	1.06	0.94
65	0	0	1.06	0.94
66	39	18	1.06	0.94
67	28	7	1.06	0.94
68	0	0	1.06	0.94
69	0	0	1.06	0.94
70	66	20	1.06	0.94
71	0	0	1.06	0.94
72	12	0	1.06	0.94

ตารางที่ ข.1(ต่อ) ข้อมูล巴士ของระบบ IEEE 118 bus Test System

Bus No.	Load		Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
	PI(MW)	QI(MW)		
73	6	0	1.06	0.94
74	68	27	1.06	0.94
75	47	11	1.06	0.94
76	68	36	1.06	0.94
77	61	28	1.06	0.94
78	71	26	1.06	0.94
79	39	32	1.06	0.94
80	130	26	1.06	0.94
81	0	0	1.06	0.94
82	54	27	1.06	0.94
83	20	10	1.06	0.94
84	11	7	1.06	0.94
85	24	15	1.06	0.94
86	21	10	1.06	0.94
87	0	0	1.06	0.94
88	48	10	1.06	0.94
89	0	0	1.06	0.94
90	163	42	1.06	0.94
91	10	0	1.06	0.94
92	65	10	1.06	0.94
93	12	7	1.06	0.94
94	30	16	1.06	0.94
95	42	31	1.06	0.94
96	38	15	1.06	0.94
97	15	9	1.06	0.94
98	34	8	1.06	0.94
99	42	0	1.06	0.94

ตารางที่ ข.1(ต่อ) ข้อมูลบัสของระบบ IEEE 118 bus Test System

Bus No.	Load		Vmax (p.u.)	Vmin (p.u.)
	PI(MW)	QI(MW)		
100	37	18	1.06	0.94
101	22	15	1.06	0.94
102	5	3	1.06	0.94
103	23	16	1.06	0.94
104	38	25	1.06	0.94
105	31	26	1.06	0.94
106	43	16	1.06	0.94
107	50	12	1.06	0.94
108	2	1	1.06	0.94
109	8	3	1.06	0.94
110	39	30	1.06	0.94
111	0	0	1.06	0.94
112	68	13	1.06	0.94
113	6	0	1.06	0.94
114	8	3	1.06	0.94
115	22	7	1.06	0.94
116	184	0	1.06	0.94
117	20	8	1.06	0.94
118	33	15	1.06	0.94

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE 118 bus Test System

Bus No.	Generation		Pmax (p.u.)	Pmin (p.u.)
	Pg(MW)	Qg(MW)		
1	0	0	100	0
4	0	0	100	0
6	0	0	100	0
8	0	0	100	0
10	450	0	550	0
12	85	0	185	0
15	0	0	100	0
18	0	0	100	0
19	0	0	100	0
24	0	0	100	0
25	220	0	320	0
26	314	0	414	0
27	0	0	100	0
31	7	0	107	0
32	0	0	100	0
34	0	0	100	0
36	0	0	100	0
40	0	0	100	0
42	0	0	100	0
46	19	0	119	0
49	204	0	304	0
54	48	0	148	0
55	0	0	100	0
56	0	0	100	0
59	155	0	255	0
61	160	0	260	0
62	0	0	100	0

ตารางที่ ข.2)ต่อ (ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ IEEE 118 bus Test System

Bus No.	Generation		Pmax (p.u.)	Pmin (p.u.)
	Pg(MW)	Qg(MW)		
65	391	0	491	0
66	392	0	492	0
69	513.81	0	805.2	0
70	0	0	100	0
72	0	0	100	0
73	0	0	100	0
74	0	0	100	0
76	0	0	100	0
77	0	0	100	0
80	477	0	577	0
85	0	0	100	0
87	4	0	104	0
89	607	0	707	0
90	0	0	100	0
91	0	0	100	0
92	0	0	100	0
99	0	0	100	0
100	252	0	352	0
103	40	0	140	0
104	0	0	100	0
105	0	0	100	0
107	0	0	100	0
110	0	0	100	0
111	36	0	136	0
112	0	0	100	0
113	0	0	100	0
116	0	0	100	0

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลระบบส่งของระบบ IEEE 118 bus Test System

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (p.u.)	λ (f/yr)	μ (f/yr)
1	2	0.0303	0.0999	0.0254	1.75	0.4855	250
1	3	0.0129	0.0424	0.0108	1.75	0.2061	11.7
4	5	0.0018	0.008	0.0021	3	0.0388	11.7
3	5	0.0241	0.108	0.0284	1.75	0.5249	250
5	6	0.0119	0.054	0.0143	3	0.2625	11.7
6	7	0.0046	0.0208	0.0055	1.75	0.1011	11.7
8	9	0.0024	0.0305	1.162	5	0.1482	11.7
8	5	0	0.0267	0	5	0.1298	11.7
9	10	0.0026	0.0322	1.23	5	0.1565	11.7
4	11	0.0209	0.0688	0.0175	1.75	0.3344	11.7
5	11	0.0203	0.0682	0.0174	1.75	0.3315	11.7
11	12	0.006	0.0196	0.005	1.75	0.0953	11.7
2	12	0.0187	0.0616	0.0157	1.75	0.2994	11.7
3	12	0.0484	0.16	0.0406	1.75	0.7776	250
7	12	0.0086	0.034	0.0087	1.75	0.1652	11.7
11	13	0.0222	0.0731	0.0188	1.75	0.3553	11.7
12	14	0.0215	0.0707	0.0182	1.75	0.3436	11.7
13	15	0.0744	0.2444	0.0627	1.75	1.1878	547
14	15	0.0595	0.195	0.0502	1.75	0.9478	547
12	16	0.0212	0.0834	0.0214	1.75	0.4053	11.7
15	17	0.0132	0.0437	0.0444	3	0.2124	11.7
16	17	0.0454	0.1801	0.0466	1.75	0.8753	547
17	18	0.0123	0.0505	0.013	1.75	0.2454	11.7
18	19	0.0112	0.0493	0.0114	1.75	0.2396	11.7
19	20	0.0252	0.117	0.0298	1.75	0.5687	250
15	19	0.012	0.0394	0.0101	1.75	0.1915	11.7
20	21	0.0183	0.0849	0.0216	1.75	0.4126	11.7

ตารางที่ ๓.3(ต่อ) ข้อมูลระบบส่งของระบบ IEEE 118 bus Test System

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (p.u.)	λ (f/yr)	μ (f/yr)
21	22	0.0209	0.097	0.0246	1.75	0.4714	250
22	23	0.0342	0.159	0.0404	1.75	0.7728	250
23	24	0.0135	0.0492	0.0498	1.75	0.2391	11.7
23	25	0.0156	0.08	0.0864	5	0.3888	11.7
26	25	0	0.0382	0	3	0.1857	11.7
25	27	0.0318	0.163	0.1764	3	0.7922	250
27	28	0.0191	0.0855	0.0216	1.75	0.4156	11.7
28	29	0.0237	0.0943	0.0238	1.75	0.4583	250
30	17	0	0.0388	0	5	0.1886	11.7
8	30	0.0043	0.0504	0.514	1.75	0.2450	11.7
26	30	0.008	0.086	0.908	5	0.4180	250
17	31	0.0474	0.1563	0.0399	1.75	0.7597	250
29	31	0.0108	0.0331	0.0083	1.75	0.1609	11.7
23	32	0.0317	0.1153	0.1173	3	0.5604	250
31	32	0.0298	0.0985	0.0251	1.75	0.4787	250
27	32	0.0229	0.0755	0.0193	1.75	0.3670	11.7
15	33	0.038	0.1244	0.0319	1.75	0.6046	250
19	34	0.0752	0.247	0.0632	1.75	1.2005	547
35	36	0.0022	0.0102	0.0027	1.75	0.0496	11.7
35	37	0.011	0.0497	0.0132	1.75	0.2416	11.7
33	37	0.0415	0.142	0.0366	1.75	0.6902	250
34	36	0.0087	0.0268	0.0057	1.75	0.1303	11.7
34	37	0.0026	0.0094	0.0098	3	0.0457	11.7
38	37	0	0.0375	0	5	0.1823	11.7
37	39	0.0321	0.106	0.027	1.75	0.5152	250
37	40	0.0593	0.168	0.042	1.75	0.8165	547
30	38	0.0046	0.054	0.422	1.75	0.2625	11.7

ตารางที่ ๗.3(ต่อ) ข้อมูลระบบส่งของระบบ IEEE 118 bus Test System

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (p.u.)	λ (f/yr)	μ (f/yr)
39	40	0.0184	0.0605	0.0155	1.75	0.2940	11.7
40	41	0.0145	0.0487	0.0122	1.75	0.2367	11.7
40	42	0.0555	0.183	0.0466	1.75	0.8894	547
41	42	0.041	0.135	0.0344	1.75	0.6561	250
43	44	0.0608	0.2454	0.0607	1.75	1.1927	547
34	43	0.0413	0.1681	0.0423	1.75	0.8170	547
44	45	0.0224	0.0901	0.0224	1.75	0.4379	250
45	46	0.04	0.1356	0.0332	1.75	0.6591	250
46	47	0.038	0.127	0.0316	1.75	0.6173	250
46	48	0.0601	0.189	0.0472	1.75	0.9186	547
47	49	0.0191	0.0625	0.016	1.75	0.3038	11.7
42	49	0.0715	0.323	0.086	1.75	1.5699	786
42	49	0.0715	0.323	0.086	1.75	1.5699	786
45	49	0.0684	0.186	0.0444	1.75	0.9040	547
48	49	0.0179	0.0505	0.0126	1.75	0.2454	11.7
49	50	0.0267	0.0752	0.0187	1.75	0.3655	11.7
49	51	0.0486	0.137	0.0342	1.75	0.6659	250
51	52	0.0203	0.0588	0.014	1.75	0.2858	11.7
52	53	0.0405	0.1635	0.0406	1.75	0.7947	250
53	54	0.0263	0.122	0.031	1.75	0.5930	250
49	54	0.073	0.289	0.0738	1.75	1.4046	786
49	54	0.0869	0.291	0.073	1.75	1.4143	786
54	55	0.0169	0.0707	0.0202	1.75	0.3436	11.7
54	56	0.0027	0.0095	0.0073	1.75	0.0464	11.7
55	56	0.0049	0.0151	0.0037	1.75	0.0734	11.7
56	57	0.0343	0.0966	0.0242	1.75	0.4695	250
50	57	0.0474	0.134	0.0332	1.75	0.6513	250

ตารางที่ ๓.3(ต่อ) ข้อมูลระบบส่งของระบบ IEEE 118 bus Test System

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (p.u.)	λ (f/yr)	μ (f/yr)
56	58	0.0343	0.0966	0.0242	1.75	0.4695	250
51	58	0.0255	0.0719	0.0179	1.75	0.3495	11.7
54	59	0.0503	0.2293	0.0598	1.75	1.1145	547
56	59	0.0825	0.251	0.0569	1.75	1.2199	786
56	59	0.0803	0.239	0.0536	1.75	1.1616	547
55	59	0.0474	0.2158	0.0565	1.75	1.0488	547
59	60	0.0317	0.145	0.0376	1.75	0.7047	250
59	61	0.0328	0.15	0.0388	1.75	0.7290	250
60	61	0.0026	0.0135	0.0146	3	0.0656	11.7
60	62	0.0123	0.0561	0.0147	1.75	0.2727	11.7
61	62	0.0082	0.0376	0.0098	1.75	0.1827	11.7
63	59	0	0.0386	0	5	0.1876	11.7
63	64	0.0017	0.02	0.216	5	0.0972	11.7
64	61	0	0.0268	0	1.75	0.1303	11.7
38	65	0.009	0.0986	1.046	5	0.4792	250
64	65	0.0027	0.0302	0.38	5	0.1468	11.7
49	66	0.018	0.0919	0.0248	3	0.4467	250
49	66	0.018	0.0919	0.0248	3	0.4467	250
62	66	0.0482	0.218	0.0578	1.75	1.0595	547
62	67	0.0258	0.117	0.031	1.75	0.5687	250
65	66	0	0.037	0	1.75	0.1798	11.7
66	67	0.0224	0.1015	0.0268	1.75	0.4933	250
65	68	0.0014	0.016	0.638	1.75	0.0778	11.7
47	69	0.0844	0.2778	0.0709	1.75	1.3502	786
49	69	0.0985	0.324	0.0828	1.75	1.5747	786
68	69	0	0.037	0	5	0.1798	11.7
69	70	0.03	0.127	0.122	3	0.6173	250

ตารางที่ ๓.3(ต่อ) ข้อมูลระบบส่งของระบบ IEEE 118 bus Test System

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (p.u.)	λ (f/yr)	μ (f/yr)
24	70	0.0022	0.4115	0.102	1.75	2.0000	876
70	71	0.0088	0.0355	0.0088	1.75	0.1725	11.7
24	72	0.0488	0.196	0.0488	1.75	0.9526	547
71	72	0.0446	0.18	0.0444	1.75	0.8748	547
71	73	0.0087	0.0454	0.0118	1.75	0.2207	11.7
70	74	0.0401	0.1323	0.0337	1.75	0.6430	250
70	75	0.0428	0.141	0.036	1.75	0.6853	250
69	75	0.0405	0.122	0.124	3	0.5930	250
74	75	0.0123	0.0406	0.0103	1.75	0.1973	11.7
76	77	0.0444	0.148	0.0368	1.75	0.7193	250
69	77	0.0309	0.101	0.1038	1.75	0.4909	250
75	77	0.0601	0.1999	0.0498	1.75	0.9716	547
77	78	0.0038	0.0124	0.0126	1.75	0.0603	11.7
78	79	0.0055	0.0244	0.0065	1.75	0.1186	11.7
77	80	0.017	0.0485	0.0472	3	0.2357	11.7
77	80	0.0294	0.105	0.0228	1.75	0.5103	250
79	80	0.0156	0.0704	0.0187	1.75	0.3422	11.7
68	81	0.0018	0.0202	0.808	1.75	0.0982	11.7
81	80	0	0.037	0	3	0.1798	11.7
77	82	0.0298	0.0853	0.0817	1.75	0.4146	11.7
82	83	0.0112	0.0367	0.038	1.75	0.1781	11.7
83	84	0.0625	0.132	0.0258	1.75	0.6416	250
83	85	0.043	0.148	0.0348	1.75	0.7193	250
84	85	0.0302	0.0641	0.0123	1.75	0.3115	11.7
85	86	0.035	0.123	0.0276	1.75	0.5978	250
86	87	0.0283	0.2074	0.0445	1.75	1.0080	547
85	88	0.02	0.102	0.0276	1.75	0.4957	250

ตารางที่ ๗.3(ต่อ) ข้อมูลระบบส่งของระบบ IEEE 118 bus Test System

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (p.u.)	λ (f/yr)	μ (f/yr)
85	89	0.0239	0.173	0.047	1.75	0.8408	547
88	89	0.0139	0.0712	0.0193	3	0.3461	11.7
89	90	0.0518	0.188	0.0528	1.75	0.9137	547
89	90	0.0238	0.0997	0.106	3	0.4846	250
90	91	0.0254	0.0836	0.0214	1.75	0.4063	11.7
89	92	0.0099	0.0505	0.0548	5	0.2454	11.7
89	92	0.0393	0.1581	0.0414	1.75	0.7684	250
91	92	0.0387	0.1272	0.0327	1.75	0.6182	250
92	93	0.0258	0.0848	0.0218	1.75	0.4122	11.7
92	94	0.0481	0.158	0.0406	1.75	0.7679	250
93	94	0.0223	0.0732	0.0188	1.75	0.3558	11.7
94	95	0.0132	0.0434	0.0111	1.75	0.2109	11.7
80	96	0.0356	0.182	0.0494	1.75	0.8846	547
82	96	0.0162	0.053	0.0544	1.75	0.2576	11.7
94	96	0.0269	0.0869	0.023	1.75	0.4224	250
80	97	0.0183	0.0934	0.0254	1.75	0.4539	250
80	98	0.0238	0.108	0.0286	1.75	0.5249	250
80	99	0.0454	0.206	0.0546	1.75	1.0012	547
92	100	0.0648	0.295	0.0472	1.75	1.4338	786
94	100	0.0178	0.058	0.0604	1.75	0.2819	11.7
95	96	0.0171	0.0547	0.0147	1.75	0.2659	11.7
96	97	0.0173	0.0885	0.024	1.75	0.4301	250
98	100	0.0397	0.179	0.0476	1.75	0.8700	547
99	100	0.018	0.0813	0.0216	1.75	0.3951	11.7
100	101	0.0277	0.1262	0.0328	1.75	0.6134	250
92	102	0.0123	0.0559	0.0146	1.75	0.2717	11.7
101	102	0.0246	0.112	0.0294	1.75	0.5444	250

ตารางที่ ๓.3(ต่อ) ข้อมูลระบบส่งของระบบ IEEE 118 bus Test System

From Bus	To Bus	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)	Rating (p.u.)	λ (f/yr)	μ (f/yr)
100	103	0.016	0.0525	0.0536	3	0.2552	11.7
100	104	0.0451	0.204	0.0541	1.75	0.9915	547
103	104	0.0466	0.1584	0.0407	1.75	0.7699	250
103	105	0.0535	0.1625	0.0408	1.75	0.7898	250
100	106	0.0605	0.229	0.062	1.75	1.1130	547
104	105	0.0099	0.0378	0.0099	1.75	0.1837	11.7
105	106	0.014	0.0547	0.0143	1.75	0.2659	11.7
105	107	0.053	0.183	0.0472	1.75	0.8894	547
105	108	0.0261	0.0703	0.0184	1.75	0.3417	11.7
106	107	0.053	0.183	0.0472	1.75	0.8894	547
108	109	0.0105	0.0288	0.0076	1.75	0.1400	11.7
103	110	0.0391	0.1813	0.0461	1.75	0.8812	547
109	110	0.0278	0.0762	0.0202	1.75	0.3704	11.7
110	111	0.022	0.0755	0.02	1.75	0.3670	11.7
110	112	0.0247	0.064	0.062	1.75	0.3111	11.7
17	113	0.0091	0.0301	0.0077	1.75	0.1463	11.7
32	113	0.0615	0.203	0.0518	1.75	0.9866	547
32	114	0.0135	0.0612	0.0163	1.75	0.2974	11.7
27	115	0.0164	0.0741	0.0197	1.75	0.3601	11.7
114	115	0.0023	0.0104	0.0028	1.75	0.0505	11.7
68	116	0.0003	0.004	0.164	5	0.0197	11.7
12	117	0.0329	0.14	0.0358	1.75	0.6804	250
75	118	0.0145	0.0481	0.012	1.75	0.2338	11.7
76	118	0.0164	0.0544	0.0136	1.75	0.2644	11.7

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณพฤกษ์ พิมป์सार เกิดวันที่ 20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จ การศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2548 และได้เข้า ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย