บทที่ 6

ตัวอย่างการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า

บทนี้จะแสดงการคำนวณและผลการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า (ATC) ระหว่างคู่ผู้ซื้อขายซึ่งเป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถของระบบที่ยังสามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของโหลด ณ ผู้ซื้อ และกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น ณ ผู้ขายได้มากขึ้นกว่าค่าในปัจจุบัน ในที่นี้ระบบทดสอบที่เลือกใช้เป็นระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยเขตภาคเหนือซึ่งได้รับข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ลำดับในการเสนอของบทนี้จะเริ่มต้นจากการกำหนดสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า จากนั้นจะได้อธิบายถึงรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้คำนวณค่า ATC ซึ่งในที่นี้แสดงไว้ทั้งหมด 3 วิธี และส่วนถัดไปจะแสดงตัวอย่างผลการคำนวณค่า TTC และ TRM ที่ได้รับวิธีการคำนวณทั้ง 3 พร้อมทั้งอธิบายประกอบความเข้าใจเป็นรายกรณี และสุดท้ายจากผลการคำนวณทั้งหมดจะสรุปรวมแล้วกำหนดเป็นความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าต่อไป

6.1 ข้อสมมติฐานเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า

โดยทั่วไปการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจะเป็นหน้าที่ของศูนย์ควบคุมอิสระ อย่างไรก็ดี การแปรรูปอุตสาหกรรมไฟฟ้าในประเทศไทยในปัจจุบันยังคงอยู่ในช่วงเตรียมการ ดังนั้นไม่ว่าจะเป็น ข้อกำหนดตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้า หลักเกณฑ์ในการจัดการระบบส่ง รวมถึงข้อบังคับที่เกี่ยวข้องยังไม่เสร็จสมบูรณ์ ด้วยเหตุดังกล่าว เพื่อคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าในที่นี้จึงจำเป็นต้องอาศัยสมมติฐานจำนวนหนึ่ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. แบบจำลองที่ใช้มีโครงสร้างแบบ Pool Model ซึ่งอนุญาตให้มีการซื้อขายไฟฟ้าแบบ Bilateral Contract ได้โดยศูนย์ควบคุมระบบอิสระ (ISO) เป็นผู้รับผิดชอบการควบคุมระบบทั้งหมด
2. ระบบทดสอบที่ใช้ในการคำนวณ คือ ระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยเขตภาคเหนือ ซึ่งได้รับข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
3. การคำนวณจะพิจารณาความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าระหว่างคู่ผู้ขายและผู้ซื้อไฟฟ้าเฉพาะคู่ใดคู่หนึ่งเท่านั้น ดังนั้นความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจะเป็นค่าในลักษณะจุดต่อจุด (point to point)
4. ผู้ขาย คือ บัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเชื่อมอยู่พร้อมทั้งยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มเติมขึ้นกว่าค่าที่จ่ายอยู่ในสถาวะปัจจุบัน และ ผู้ซื้อ คือ โหลดบัส

5. แบบจำลองโหลดที่เลือกใช้เป็นแบบค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ และค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างระบบไฟฟ้าเขตภาคเหนือกับระบบข้างเคียงจะถูกกำหนดเป็นค่าโหลดคงที่
6. การเพิ่มขึ้นของการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะเกิดขึ้นเนื่องจากโหลดที่เพิ่มขึ้น ณ ผู้ซื้อ และกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น ณ ผู้ขาย ซึ่งการเพิ่มขึ้นจะเป็นแบบค่าตัวประกอบกำลังคงที่และมีค่าเท่ากับของโหลดในกรณีพื้นฐาน นอกจากนี้ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะกำหนดจากค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยที่ยังไม่เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขขีดจำกัด
7. ขีดจำกัดในระบบไฟฟ้าที่พิจารณาคือ เงื่อนไขพิกัดอุณหภูมิของสายส่ง ค่าขนาดแรงดันไฟฟ้า และ ค่าพิกัดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
8. การคำนวณค่ากำลังส่งรวมมีการพิจารณาผลของเหตุขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นได้
9. ในที่นี้ค่า TRM จะทำการคำนวณจากค่ากำลังส่งรวมที่ลดลงเมื่อความจุของสายส่งถูกลดค่าลง 3% จากค่าพิกัด ส่วนค่า CBM จะถูกละเลยออกจากในการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า
10. มีการกำหนดบัสหนึ่งบัสในระบบให้เป็น slack ในระบบเพื่อทำหน้าที่รองรับการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังสูญเสีย อีกทั้งยังทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าช่วยเหลือระบบในสภาวะที่ระบบเกิดเหตุขัดข้องขึ้น
11. ค่าแท็ปของหม้อแปลงและระดับการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุถือว่าคงที่ตลอดการคำนวณ

6.2 รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้คำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า

โปรแกรมที่ใช้คำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าและองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยชุดคำสั่ง Matlab และโปรแกรมคำนวณเพาเวอร์โฟลว์ที่ได้ดัดแปลงจาก MatPower [16] ให้เหมาะสมกับการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า จากวิธีในการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่เสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ เราจะสามารถแยกออกเป็นวิธีหลัก 3 วิธีโดยอาศัยวิธีในการหาค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ได้ดังนี้คือ

1. การคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า ที่การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดคำนวณจากวิธีในหัวข้อที่ 5.1.1 และเลือกความละเอียดของคำตอบที่ 1% ของค่าโหลดพื้นฐาน ซึ่งในเนื้อหาส่วนถัดไปวิธีนี้จะถูกเรียกว่า วิธีที่ 1

2. การคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า ที่การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดคำนวณจากวิธีในหัวข้อที่ 5.1.2 และเลือกความละเอียดของคำตอบที่ 1% ของค่าโหลดพื้นฐาน ซึ่งในเนื้อหาส่วนถัดไปวิธีนี้จะถูกเรียกว่า วิธีที่ 2
3. การคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า ที่การคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดคำนวณจากวิธีในหัวข้อที่ 5.1.3 ซึ่งความละเอียดของคำตอบขึ้นอยู่กับการคำนวณ MPF ซึ่งในที่นี้เลือกค่า 10^{-9} เป็นเกณฑ์ในการหยุดการคำนวณ ซึ่งในเนื้อหาส่วนถัดไปวิธีนี้จะถูกเรียกว่าวิธีที่ 3

นอกจากนี้เวลาในการคำนวณที่แสดงไว้ในแต่ละตัวอย่างเป็นผลจากการคำนวณโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนคอมพิวเตอร์ Pentium III 350 MHz RAM 64 MB

6.3 การเลือกเหตุขัดข้องเพื่อใช้ประกอบการคำนวณค่ากำลังส่งรวม

เนื่องจากการคำนวณค่ากำลังส่งรวม [1] จำเป็นต้องพิจารณาเหตุขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบ (contingency) ดังนั้นก่อนที่จะเริ่มต้นการคำนวณค่ากำลังส่งรวมดังที่จะกล่าวต่อไป ในหัวข้อนี้ จะนำเสนอเกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกเหตุขัดข้องเพื่อใช้ในการคำนวณค่ากำลังส่งรวมดังนี้

1. ในที่นี้เหตุขัดข้องที่เลือกใช้จะเป็นเหตุขัดข้องที่เกิดจากการขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบเพียงอุปกรณ์เดียวเท่านั้น
2. กรณีที่อุปกรณ์มีลักษณะเหมือนกันและทำหน้าที่เช่นเดียวกัน จะถือว่าเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นที่จำเป็นต้องพิจารณามีเพียงกรณีเดียว ตัวอย่างเช่น ถ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 50 MW ที่จ่ายกำลังที่ค่าพิกัด จำนวน 5 เครื่องต่ออยู่ ณ บัส A เหตุขัดข้องที่เกิดจากการชำรุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้จะถือว่ามีกรณีเดียวคือ มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เครื่องขนาด 50 MW ณ บัส A เกิดการขัดข้อง เป็นต้น
3. เหตุขัดข้องที่เลือกจะเป็นเหตุขัดข้องที่ระบบยังคงอยู่ในสภาวะที่ปลอดภัย กล่าวคือไม่ก่อให้เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนขีดจำกัดขนาดแรงดันไฟฟ้า ค่าพิกัดสายส่งและหม้อแปลง และค่าพิกัดกำลังการผลิตของบัสที่กำหนดให้เป็น slack ของระบบ

จากเกณฑ์ทั้ง 3 ที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น เราจะมีเหตุขัดข้องที่จำเป็นต้องเป็นต้องคำนึงถึงในการคำนวณค่ากำลังส่งรวมทั้งหมด 48 กรณีซึ่งจะได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค ซึ่งเมื่อรวมกับกรณีพื้นฐานในการคำนวณค่ากำลังส่งรวมแต่ละครั้ง จะต้องมีการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดจำนวน 49 กรณี

6.4 ตัวอย่างการคำนวณค่ากำลังส่งรวม

ระบบทดสอบที่ใช้ในบทนี้ คือ ระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยเขตภาคเหนือซึ่งเป็นระบบทดสอบที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ คือ มีทั้งหมด 51 บัส สายส่ง 72 เส้น หม้อแปลงไฟฟ้า 25 เครื่อง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 33 เครื่อง ซึ่งมีขนาด 14-300 MW โดยมีกำลังผลิตติดตั้งรวม 3,992 MW และโหลดเท่ากับ 2,655 MW ส่วนรายละเอียดของระบบและแผนภาพเส้นเดี่ยว ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

นอกจากนี้เพื่อความสะดวกในการทำความเข้าใจผลการคำนวณต่างๆ ในที่นี้การอ้างอิงถึงบัสต่างๆ จะเรียกตามรหัสที่ทางการไฟฟ้ากำหนดซึ่งมีแสดงไว้บนแผนภาพเส้นเดี่ยว แต่สำหรับกรณีการอ้างอิงถึงสายส่งและหม้อแปลงจะใช้ลำดับของอุปกรณ์ที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข เป็นการระบุ นอกจากนี้เงื่อนไขขีดจำกัดในผลการคำนวณจะใช้ลักษณะดังนี้

Vxxxxx คือ เงื่อนไขขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด ณ บัส xxxxx เป็นเงื่อนไขขีดจำกัด

Tyy คือ เงื่อนไขพิกัดขนาดสายส่งหรือหม้อแปลง ของอุปกรณ์ลำดับที่ yy เป็นเงื่อนไขขีดจำกัด

Pzzzzz คือ เงื่อนไขพิกัดกำลังการผลิต ณ บัสผู้ขาย zzzzz เป็นเงื่อนไขขีดจำกัด

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการหาค่าการส่งผ่านกำลังส่งรวม ทั้งหมด 3 ตัวอย่างดังนี้ คือ

กรณีที่ 1 ผู้ขายคือ บัส 41933 และ ผู้ซื้อ คือ 41741 และ slack ของระบบคือ บัส 41833

กรณีที่ 2 ผู้ขายคือ บัส 41933 และ ผู้ซื้อ คือ 41750 และ slack ของระบบคือ บัส 41833

กรณีที่ 3 ผู้ขายคือ บัส 41833 และ ผู้ซื้อ คือ 41716 และ slack ของระบบคือ บัส 41933

6.4.1 การคำนวณค่ากำลังส่งรวมกรณีที่ 1 ผู้ขายคือ บัส 41933 และ ผู้ซื้อ คือ 41741 และ slack ของระบบคือ บัส 41833

เนื่องจากการคำนวณค่าการส่งรวมจำเป็นต้องมีการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับสภาวะพื้นฐานและสภาวะที่เกิดเหตุขัดข้องซึ่งมีคำตอบรวมกันทั้ง 49 กรณี อย่างไรก็ดี การแสดงผลการคำนวณสำหรับทุกกรณีคงไม่เหมาะสมนัก ดังนั้นในที่จะเลือกเฉพาะกรณีที่น่าสนใจขึ้นมาประกอบการอธิบาย อย่างไรก็ดี ผลการคำนวณทั้งหมดจะแสดงรวมไว้ในภาคผนวก ง

จากการคำนวณด้วยวิธีที่ 1 ถึง 3 ค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังส่งรวม ซึ่งแสดงด้วยค่าโหลดสูงสุด ณ บัสผู้ซื้อมีค่าดังนี้

ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังส่งรวมระหว่างบัส 41933 และ 41741 โดยที่บัส 41833 เป็น slack ของระบบ

สภาวะระบบ	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR		เงื่อนไขจำกัด
ปกติ	207.8244	128.8925	207.6153	128.7628	207.6153	128.7628	V41754
เหตุขัดข้องกรณีที่ 17	135.7669	84.2025	135.6810	84.1492	135.6810	84.1492	V41740
เหตุขัดข้องกรณีที่ 18	119.0706	73.8475	119.3395	74.0142	119.3395	74.0142	V41754
เหตุขัดข้องกรณีที่ 21	210.4606	130.5275	210.0809	130.2920	210.0808	130.2919	V41754
เหตุขัดข้องกรณีที่ 29	190.2494	117.9925	190.4969	118.1460	190.4969	118.1460	V41740
เหตุขัดข้องกรณีที่ 48	206.9456	128.3475	207.3630	128.6063	207.3629	128.6063	V41754
ค่ากำลังส่งรวม	119.0706	73.8475	119.3395	74.0142	119.3395	74.0142	V41754
เวลาคำนวณ	56.46 วินาที		15.16 วินาที		10.38 วินาที		

จากผลการคำนวณที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 ในที่นี้เราจะทำการอธิบายใน 3 ประเด็นคือ ในเชิงเปรียบเทียบความสามารถและประสิทธิภาพของแต่ละวิธีที่เสนอขึ้น ความละเอียดของคำตอบ และ ในเชิงการวิเคราะห์คำตอบที่คำนวณได้ ซึ่งทั้ง 2 ประเด็นมีรายละเอียดดังนี้

1. จากตารางที่ 6.1 เราจะสามารถสังเกตได้ว่าคำตอบที่คำนวณได้จากแต่ละวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงถึงความสามารถของแต่ละวิธีที่เสนอขึ้น อย่างไรก็ดี จากเวลาที่ใช้ในการคำนวณของแต่ละวิธี เราจะสามารถสังเกตได้ว่าเวลาในการคำนวณของวิธีที่ 1 มีค่ามากที่สุดและมีค่ามากกว่าของวิธีที่ 2 และ 3 เป็นจำนวนประมาณ 4 ถึง 5 เท่าตามลำดับที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากขั้นตอนในการคำนวณของวิธีที่ 1 นั้นใช้การคำนวณเพาเวอร์โฟลว์จำนวนมาก อย่างไรก็ดี หากพิจารณาเวลาวิธีที่ 2 และ 3 ที่มีค่าต่างกัน 5 วินาทีคงจะเป็นการเร็วไปที่จะสรุปว่าวิธีที่ 3 คำนวณได้เร็วกว่าวิธีที่ 2 ดังนั้นการเปรียบเทียบดังกล่าวจะถูกแสดงไว้ในบทถัดไป

2. เมื่อพิจารณาในแง่ความละเอียดของคำตอบในที่นี้จะแยกพิจารณาเป็นของแต่ละวิธีดังนี้ เนื่องวิธีที่ 1 ความละเอียดของคำตอบจะขึ้นอยู่กับส่วนการเพิ่มรายละเอียดของคำตอบซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 และ 5.1 ซึ่งในที่นี้เลือกความละเอียดของคำตอบที่ 1 % ของค่าโหลดกรณีพื้นฐานดังนั้นคำตอบที่ได้จากวิธีที่ 1 จะมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 0.703 MW, 0.0436 MVAR และเมื่อพิจารณาถึงการคำนวณของวิธีที่ 2 ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ในที่นี้เราเลือกความละเอียดของการคำนวณจากการพิจารณาว่าคำตอบที่คำนวณได้เมื่อเทียบกับรอบก่อนหน้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 % ของค่าโหลดในกรณีพื้นฐาน ตรงจุดนี้ค่า 1 % ดังกล่าวไม่ได้เป็นการสรุปว่าคำตอบที่คำนวณได้ผิดพลาดไม่เกิน 1% จากคำตอบที่แท้จริง อย่างไรก็ดี จากผล

การคำนวณที่ได้การสรุปดังกล่าวพอที่จะยอมรับได้เนื่องจากคำตอบที่ได้จากวิธีที่ 2 ในทุกๆ กรณี และในทุกๆ ตัวอย่างมีค่าแตกต่างกับวิธีที่ 3 ซึ่งให้ความละเอียดของคำตอบสูงที่สุด น้อยกว่า 1% และสุดท้ายสำหรับเหตุผลที่วิธีที่ 3 เป็นวิธีที่ให้ความละเอียดสูงที่สุดก็เพราะวิธีนี้ใช้ MPF ที่เลือกความละเอียดเท่ากับ 10^{-9} นั้นเอง ดังนั้นการวิเคราะห์ในส่วนถัดๆ ไปการอ้างถึงคำตอบจะใช้คำตอบที่ได้จากวิธีที่ 3 เป็นตัวแทนจากทั้ง 3 วิธี

3. จากตารางที่ 6.1 เราจะสามารถสังเกตได้ว่าที่สภาวะปกติ โหลด ณ บัส 41741 จะสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 207.62 MW 128.76 MVAR โหลดค่านี้จะทำให้แรงดัน ณ บัส 41754 มีค่าลดลงถึงระดับต่ำสุดที่ยอมรับได้ (0.95 p.u.) อย่างไรก็ดี เงื่อนไขนี้ไม่จำเป็นจะต้องเป็นเงื่อนไขที่ใช้กำหนดระดับโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้มากสุดซึ่งในที่นี้ ตัวอย่างคือกรณีที่ระบบเกิดเหตุขัดข้องกรณีที่ 17 และ 29 ขึ้น เงื่อนไขขีดจำกัดจะคือระดับแรงดัน ณ บัส 41740 นอกจากนี้ในบางกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องขึ้นค่าโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้มากสุด ณ บัสผู้ซื้ออาจมีค่ามากกว่าในสภาวะปกติก็ได้ ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะขัดข้องดังกล่าวก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทางของกำลังไฟฟ้าซึ่งมีผลกระทบต่อระบบโดยรวม ซึ่งตัวอย่างหนึ่งคือ เหตุขัดข้องกรณีที่ 21 นั้นเอง จากการคำนวณที่สภาวะปกติและสภาวะเกิดเหตุขัดข้องทั้งหมด 49 กรณี เราจะพบได้ว่าเหตุขัดข้องกรณีที่ 18 ค่าโหลด ณ บัส 41741 จะสามารถเพิ่มขึ้นได้น้อยที่สุดคือ 119.34 MW 74.01 MVAR ซึ่งค่านี้จะถูกกำหนดเป็นค่ากำลังส่งรวมของคู่ค้านี้

6.4.2 การคำนวณค่ากำลังส่งรวมกรณีที่ 2 ผู้ขายคือ บัส 41933 และ ผู้ซื้อ คือ 41750 และ slack ของระบบคือ บัส 41833

ตารางที่ 6.2 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังส่งรวมระหว่างบัส 41933 และ 41750 โดยที่บัส 41833 เป็น slack ของระบบ

สภาวะระบบ	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR		เงื่อนไขจำกัด
ปกติ	143.0625	88.5938	142.9519	88.5253	142.9519	88.5253	T53
เหตุขัดข้องกรณีที่ 13	56.4075	34.9312	56.1612	34.7787	56.1611	34.7787	V41748
เหตุขัดข้องกรณีที่ 20	64.5825	39.9938	64.4998	39.9425	64.4998	39.9425	V41750
เหตุขัดข้องกรณีที่ 22	151.2375	93.6563	150.9915	93.5039	151.0374	93.5324	V41750
เหตุขัดข้องกรณีที่ 44	138.1575	85.5563	138.2224	85.5965	138.2224	85.5965	T53
เหตุขัดข้องกรณีที่ 48	143.0625	88.5938	143.0204	88.5677	143.0204	88.5677	T53
ค่ากำลังส่งรวม	56.4075	34.9312	56.1612	34.7787	56.1611	34.7787	V41748
เวลาคำนวณ	63.49 วินาที		16.14วินาที		14.22วินาที		

จากผลการคำนวณที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.2 เราจะสามารถสังเกตได้ว่าที่สภาวะปกติ โหลด ณ บัส 41750 จะสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 142.95 MW 88.52 MVAR โหลดค่านี้จะทำให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งเส้นที่ 53 ที่ค่าพิกัดพอดี และเมื่อพิจารณาสภาวะที่เกิดเหตุขัดข้องขึ้นในระบบเราจะสังเกตได้ว่าเงื่อนไขขีดจำกัดอาจเป็นเงื่อนไขขีดจำกัดเดียวกับในสภาวะปกติหรืออาจเปลี่ยนไปก็ได้ จากการคำนวณค่าในสภาวะปกติและเหตุขัดข้องรวมทั้งหมด 49 กรณี (ตารางที่ 6.2 เลือกมาแสดง 6 กรณี) เราจะกำหนดค่ากำลังส่งรวมสำหรับคู่ค้าจากคำตอบต่ำสุดที่คำนวณได้ซึ่งในที่นี้คือ 56.16 MW 34.78 MVAR

6.4.3 การคำนวณค่ากำลังส่งรวมกรณีที่ 3 ผู้ขายคือ บัส 41833 และ ผู้ซื้อ คือ 41716 และ slack ของระบบคือ บัส 41933

ตารางที่ 6.3 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังส่งรวมระหว่างบัส 41833 และ 41716 โดยที่บัส 41933 เป็น slack ของระบบ

สภาวะระบบ	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR		เงื่อนไขจำกัด
ปกติ	180.1	111.4762	180.1	111.4762	180.1	111.4762	P41833
เหตุขัดข้องกรณีที่ 1	146.8694	90.9075	146.7257	90.8186	146.7257	90.8186	V41767
เหตุขัดข้องกรณีที่ 16	84.5156	52.3125	84.2076	52.1219	84.2136	52.1255	T43
เหตุขัดข้องกรณีที่ 33	89.7744	55.5675	89.8481	55.6132	89.8481	55.6132	V41768
เหตุขัดข้องกรณีที่ 34	180.1	111.4762	180.1	111.4762	180.1	111.4762	P41833
เหตุขัดข้องกรณีที่ 48	180.1	111.4762	180.1	111.4762	180.1	111.4762	P41833
ค่ากำลังส่งรวม	84.5156	52.3125	84.2076	52.1219	84.2136	52.1255	T43
เวลาคำนวณ	43.34วินาที		7.25วินาที		7.03วินาที		

จากผลการคำนวณที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.3 เราจะสามารถสังเกตได้ว่าที่สภาวะปกติ โหลด ณ บัส 41716 จะสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 180.1 MW 111.48 MVAR ซึ่งโหลดค่านี้จะทำให้ผู้ขายจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัดของตนเอง อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาเหตุขัดข้องที่สามารถเกิดขึ้นได้ เราจะสามารถสังเกตได้ว่าเงื่อนไขขีดจำกัดอื่นๆ อาจเข้ามามีผลที่รุนแรงกว่าเงื่อนไขค่าพิกัดกำลังการผลิตดังนั้นโหลดที่สามารถเพิ่มขึ้นได้มากที่สุด ณ สภาวะเกิดเหตุขัดข้องบางกรณีจึงมีค่าลดลงซึ่งจากการคำนวณเราพบว่าสภาวะของระบบที่ก่อให้เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ปริมาณน้อยที่สุด คือ สภาวะเหตุขัดข้องกรณีที่ 16 และเงื่อนไขขีดจำกัดคือพิกัดขนาดสายส่งเส้นที่ 43 โดยโหลด ณ บัสผู้ซื้อสามารถเพิ่มได้ถึง 84.21 MW 52.13 MVAR นอกจากคำตอบที่ได้จากการคำนวณแล้วหากพิจารณาถึงเวลาในการคำนวณของตัวอย่างนี้เราจะสังเกตได้ว่าเวลาการคำนวณของวิธีที่ 2 และ 3

มีค่าใกล้เคียงกันมากเนื่องจาก 44 กรณีจากทั้งหมด 49 กรณีเงื่อนไขขีดจำกัดคือค่ากำลังการผลิตสูงสุดของผู้ขาย ขีดจำกัดนี้สามารถหาคำตอบได้รวดเร็วโดยเมื่อทำการประมาณแบบเชิงเส้นแล้วพบว่าเงื่อนไขขีดจำกัดเป็นเงื่อนไขพิกัดกำลังการผลิตแล้ว เราจะทดสอบว่าหากเพิ่มโหลดของผู้ซื้อให้สอดคล้องกับค่ากำลังการผลิตสูงสุดของผู้ขายแล้ว ถ้าไม่เกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขขีดจำกัดอื่นแสดงว่าเงื่อนไขพิกัดกำลังการผลิตคือเงื่อนไขขีดจำกัดที่รุนแรงที่สุดจริง อย่างไรก็ดี หากพบว่าเกิดการขัดแย้งกับเงื่อนไขขีดจำกัดอื่นเราก็มีความจำเป็นต้องลดค่าโหลดลงเพื่อให้เงื่อนไขขีดจำกัดเป็นเงื่อนไขแรกต่อไป

6.5 ตัวอย่างการคำนวณค่า TRM

ในที่นี้ค่า TRM จะทำการกำหนดจากค่า TTC ที่ลดลงเมื่อทำการพิจารณาว่าค่าความจุของสายส่งมีค่าลดลง 3 % ดังนั้นในการคำนวณ TRM นั้นงานที่เพิ่มเติมขึ้นก็คือการคำนวณค่า TTC ซ้ำโดยกำหนดให้ขนาดของสายส่งมีค่าลดลง 3 % โดยผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 6.4-6.6

6.5.1 การคำนวณค่ากำลังส่งรวมกรณีที่ 1 ผู้ขายคือ บัส 41933 และ ผู้ซื้อ คือ 41741 และ slack ของระบบคือ บัส 41833 โดยมีการลดค่าพิกัดสายส่งลง 3 %

ตารางที่ 6.4 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังส่งรวมระหว่างบัส 41933 และ 41741 โดยที่บัส 41833 เป็น slack ของระบบโดยมีการลดค่าพิกัดสายส่งลง 3 %

สภาวะระบบ	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR		เงื่อนไขจำกัด
ปกติ	207.8244	128.8925	207.6153	128.7628	207.6153	128.7628	V41754
เหตุขัดข้องกรณีที่ 17	135.7669	84.2025	135.681	84.1492	135.681	84.1492	V41740
เหตุขัดข้องกรณีที่ 18	119.0706	73.8475	118.8568	73.7149	118.8618	73.718	T49
เหตุขัดข้องกรณีที่ 21	210.4606	130.5275	210.0809	130.292	210.0808	130.2919	V41754
เหตุขัดข้องกรณีที่ 29	190.2494	117.9925	190.4969	118.146	190.4969	118.146	V41740
เหตุขัดข้องกรณีที่ 48	206.9456	128.3475	207.363	128.6063	207.3629	128.6063	V41754
ค่ากำลังส่งรวม	119.0706	73.8475	118.8568	73.7149	118.8618	73.718	T49
เวลาคำนวณ	56.46 วินาที		15.55 วินาที		10.54วินาที		

จากตารางที่ 6.4 เราจะสามารถสรุปได้ว่ากำลังส่งรวมที่คำนวณด้วยเงื่อนไขที่มีการลดค่าความจุสายส่งลง 3 % นี้คือ 118.86 MW 73.72 MVAR ซึ่งเงื่อนไขขีดจำกัดคือสายส่งที่ 49 ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด นอกจากนี้สิ่งพบได้อีกประการหนึ่งก็คือ เมื่อทำการลดค่าความจุของสายส่งลงเงื่อนไขขีดจำกัดอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ตัวอย่างของเหตุการณ์นี้คือ เงื่อนไขขีดจำกัดเปลี่ยนจากขนาดแรงดัน ณ บัส 41754 มีค่าเท่ากับ 0.95 p.u. เป็นสายส่งที่ 49 ทำการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ค่าพิกัด (ที่ลดลง 3 %) เมื่อระบบเกิดเหตุขัดข้องกรณีที่ 18

6.5.2 การคำนวณค่ากำลังส่งรวมกรณีที่ 2 ผู้ขายคือ บัส 41933 และ ผู้ซื้อ คือ 41750 และ slack ของระบบคือ บัส 41833 โดยมีการลดค่าพิกัดสายส่งลง 3 %

ตารางที่ 6.5 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังส่งรวมระหว่างบัส 41933 และ 41750 โดยที่บัส 41833เป็น slack ของระบบ โดยมีการลดค่าพิกัดสายส่งลง 3 %

สภาวะระบบ	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR		เงื่อนไขจำกัด
ปกติ	139.2475	86.2313	139.0203	86.0906	139.0203	86.0906	T53
เหตุขัดข้องกรณีที่ 13	56.4075	34.9312	56.1612	34.7787	56.1611	34.7787	V41748
เหตุขัดข้องกรณีที่ 20	64.5825	39.9938	64.4998	39.9425	64.4998	39.9425	V41750
เหตุขัดข้องกรณีที่ 22	150.1475	92.9813	150.1024	92.9533	150.1024	92.9533	T53
เหตุขัดข้องกรณีที่ 44	134.3425	83.1938	134.2911	83.1619	134.2911	83.1619	T53
เหตุขัดข้องกรณีที่ 48	139.2475	86.2313	139.0861	86.1313	139.0861	86.1313	T53
ค่ากำลังส่งรวม	56.4075	34.9312	56.1612	34.7787	56.1611	34.7787	V41748
เวลาคำนวณ	63.13วินาที		16.15วินาที		13.78วินาที		

เมื่อเทียบตารางที่ 6.2 และ 6.5 เราสามารถสังเกตได้ว่าค่าโหลดที่เพิ่มขึ้นได้มากสุด ณ บัสผู้ซื้อจะมีค่าลดลงในกรณีที่เงื่อนไขขีดจำกัด คือ ขนาดพิกัดของสายส่งซึ่งตัวอย่างของเหตุการณ์นี้ก็คือระบบในสภาวะปกติ หรือในกรณีเกิดเหตุขัดข้องที่ 44 , 48 อย่างไรก็ดี ค่าที่ลดลงนี้ไม่จำเป็นต้องเท่ากับ 3 % ทั้งนี้เนื่องจากการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามิได้ส่งผ่านสายส่งเพียงเส้นเดียว นอกจากนี้อีกสิ่งหนึ่งที่สังเกตได้คือ เมื่อเงื่อนไขขีดจำกัดยังคงเป็นเงื่อนไขเดิมแต่ไม่ใช่เงื่อนไขพิกัดของสายส่ง ค่าโหลดที่เพิ่มได้มากสุดจะมีค่าเท่าเดิมตัวอย่างของเหตุการณ์นี้คือ กรณีเกิดเหตุขัดข้องที่ 13 , 20 ดังแสดงในตารางที่ 5.2 และ 5.5 สำหรับตัวอย่างนี้ค่ากำลังส่งรวมคือ 56.16 MW, 34.78 MVAR ซึ่งเกิดในสภาวะที่เกิดเหตุขัดข้องที่ 13 ซึ่งถูกจำกัดด้วยเงื่อนไขขนาดแรงดัน ณ บัส 41748

6.5.3 การคำนวณค่ากำลังส่งรวมกรณีที่ 3 ผู้ขายคือ บัส 41833 และ ผู้ซื้อ คือ 41716 และ slack ของระบบคือ บัส 41933 โดยมีการลดค่าพิกัดสายส่งลง 3 %

ตารางที่6.6 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและค่ากำลังส่งรวมระหว่างบัส 41833 และ 41716 โดยที่บัส 41933เป็น slack ของระบบโดยมีการลดค่าความจุสายส่งลง 3 %

สภาวะระบบ	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR		เงื่อนไขจำกัด
ปกติ	180.1	111.4762	180.1	111.4762	180.1	111.4762	P41833
เหตุขัดข้องกรณีที่ 1	146.8694	90.9075	146.7257	90.8186	146.7257	90.8186	V41767
เหตุขัดข้องกรณีที่ 16	70.9931	43.9425	71.1431	44.0353	71.1481	44.0384	T43
เหตุขัดข้องกรณีที่ 33	89.7744	55.5675	89.8481	55.6132	89.8481	55.6132	V41768
เหตุขัดข้องกรณีที่ 34	180.1	111.4762	180.1	111.4762	180.1	111.4762	P41833
เหตุขัดข้องกรณีที่ 48	180.1	111.4762	180.1	111.4762	180.1	111.4762	P41833
ค่ากำลังส่งรวม	70.9931	43.9425	71.1431	44.0353	71.1481	44.0384	T43
เวลาคำนวณ	42.73วินาที		7.19วินาที		7.09วินาที		

จากตารางที่ 6.3 และ 6.6 สังเกตได้ว่าในทุกสภาวะของระบบเงื่อนไขขีดจำกัดยังคงเป็นเงื่อนไขเดิมในกรณีที่เงื่อนไขขีดจำกัดเป็นค่าพิกัดกำลังการผลิตและค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ยอบรับได้ โหลดจะสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยปริมาณเดียวกันทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของค่าพิกัดสายส่ง 3 % ไม่กระทบต่อการคำนวณนั้นๆ แต่สำหรับกรณีที่ค่าพิกัดของสายส่งเป็นค่าขีดจำกัด ค่าโหลด ณ บัสผู้ซื้อจะลดลงจาก 84.21 MW 52.12 MVA เป็น 71.14 MW 44.04 MVAR ค่าทั้งสองนี้เป็นค่าต่ำสุดของตารางที่ 6.3 และ 6.6 ตามลำดับ ด้วยเหตุผลนี้ค่ากำลังส่งรวมของคู่ค้านี้เมื่อทำการคำนวณที่ 97 % ของพิกัดสายส่ง คือ 71.14 MW 44.04 MVAR นั่นเอง

6.5.4 ผลการคำนวณค่า TRM

จากผลการคำนวณค่ากำลังส่งรวมจากตารางที่ 6.1–6.6 สำหรับกรณีที่ใช้ค่าพิกัดสายส่ง 100% จะแทนผลการคำนวณด้วยค่า TTC1 และสำหรับกรณีที่มีการลดค่าพิกัดลง 3 % เหลือ 97 % จะแทนผลการคำนวณด้วย TTC2 จากค่าทั้งสองค่าดังกล่าวนี้ผลการคำนวณค่า TRM คือผลต่างระหว่างค่า TTC1 และ TTC2 ที่คำนวณได้สำหรับกรณีแต่ละกรณี แสดงไว้ในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 ผลการคำนวณค่า TRM สำหรับกรณีตัวอย่างที่ 1 ถึง 3

ตัวอย่างที่ 1	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR	
TTC1	119.0706	73.8475	119.3395	74.0142	119.3395	74.0142
TTC2	119.0706	73.8475	118.8568	73.7149	118.8618	73.718
TRM	0	0	0.4827	0.2993	0.4777	0.2962
ตัวอย่างที่ 2	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR	
TTC1	56.4075	34.9312	56.1612	34.7787	56.1611	34.7787
TTC2	56.4075	34.9312	56.1612	34.7787	56.1611	34.7787
TRM	0	0	0	0	0	0
ตัวอย่างที่ 3	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR	
TTC1	84.5156	52.3125	84.2076	52.1219	84.2136	52.1255
TTC2	70.9931	43.9425	71.1431	44.0353	71.1481	44.0384
TRM	13.5225	8.37	13.0645	8.0866	13.0655	8.0871

จากตารางที่ 6.7 เราจะสามารถสังเกตได้ว่าการผลการคำนวณที่ได้จากทั้ง 3 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ดี สิ่งหนึ่งที่น่าสนใจก็คือ ผลการคำนวณของตัวอย่างที่ 1 พบว่าหากคำนวณด้วยวิธีที่ 1 นั้นค่า TRM ที่คำนวณได้จะแตกต่างกับวิธีที่ 2 และ 3 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ เกิดขึ้นเนื่องจากความละเอียดของคำตอบที่เลือกซึ่งสำหรับตัวอย่างที่ 1 ความละเอียดของวิธีที่ 1 คือ 0.703 MW, 0.436 MVAR นอกจากนี้สำหรับตัวอย่างที่ 2 เราจะสามารถสังเกตได้ว่าค่า TRM จะมีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งนี้เนื่องจากการลดค่าพิกัดของสายส่งลง 3% ไม่มีผลต่อการคำนวณค่ากำลังส่งรวม และในตัวอย่างที่ 3 เราจะสังเกตได้ว่าค่า TRM ที่คำนวณได้มีค่าสูง ทั้งนี้เนื่องจากเงื่อนไขขีดจำกัดที่เป็นตัวกำหนดค่ากำลังส่งรวมคือเงื่อนไขค่าพิกัดสายส่ง ดังนั้นการลดค่าพิกัดสายส่งลงจึงมีผลโดยตรงต่อการคำนวณค่า TTC ด้วยเหตุนี้ค่า TRM สำหรับตัวอย่างที่ 3 จึงมีค่าสูงมากเมียงเทียบกับตัวอย่างที่ 1 และ 2

6.6 ผลการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า

จากผลการคำนวณค่ากำลังส่งรวม (TTC) ในหัวข้อที่ 6.4 ผลการคำนวณค่า TRM ในหัวข้อที่ 6.5 และ ค่าโหลดดั้งเดิม (ETC) ที่แสดงไว้ในภาคผนวก เราจะสามารถคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า (ATC) ซึ่งคำนวณได้จากค่ากำลังส่งรวมหักออกด้วยค่าโหลดดั้งเดิมและ TRM ได้ผลตามตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ผลการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า สำหรับตัวอย่างที่ 1ถึง 3

ตัวอย่างที่ 1	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR	
TTC	119.0706	73.8475	119.3395	74.0142	119.3395	74.0142
ETC	70.3	43.6	70.3	43.6	70.3	43.6
TRM	0	0	0.4827	0.2993	0.4777	0.2962
ATC	48.7706	30.2475	48.5568	30.1149	48.5618	30.118
ตัวอย่างที่ 2	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR	
TTC	56.4075	34.9312	56.1612	34.7787	56.1611	34.7787
ETC	43.6	27	43.6	27	43.6	27
TRM	0	0	0	0	0	0
ATC	12.8075	7.9312	12.5612	7.7787	12.5611	7.7787
ตัวอย่างที่ 3	วิธีที่ 1 MW, MVAR		วิธีที่ 2 MW, MVAR		วิธีที่ 3 MW, MVAR	
TTC	84.5156	52.3125	84.2076	52.1219	84.2136	52.1255
ETC	60.1	37.2	60.1	37.2	60.1	37.2
TRM	13.5225	8.37	13.0645	8.0866	13.0655	8.0871
ATC	10.8931	6.7425	11.0431	6.8353	11.0481	6.8384

ความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จะเป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถของระบบส่งในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเพิ่มเติมขึ้นมากกว่าค่าในปัจจุบัน อย่างไรก็ดี ผลการคำนวณความสามารถถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าที่แสดงไว้ ตารางที่ 6.8 เป็นผลที่ได้จากการคำนวณภายใต้ข้อสมมติฐานที่กำหนดขึ้น อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติข้อสมมติฐานบางประการอาจจำเป็นต้องมีการแก้ไข ยกตัวอย่างเช่น อาจลดค่าพิกัดของสายส่งหรือหม้อแปลงลงเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการดำเนินงานที่มากขึ้น หรือ ระบบอาจจะมีหลาย slack เพื่อสามารถจัดการกับเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ดีกว่าการกำหนดให้เป็นหน้าที่ของ 1 บัส หรือวิธีในการกำหนดค่า TRM อาจเลือกใช้วิธีการอื่นๆ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ซึ่งการปรับข้อสมมติฐานนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึง กฎของตลาดกลางซื้อขายไฟฟ้าและหลักเกณฑ์ในการจัดการระบบส่ง ซึ่งต้องทำการกำหนดให้เหมาะสมเพื่อความเสมอภาคของผู้มีส่วนร่วมในตลาดทุกๆ ราย