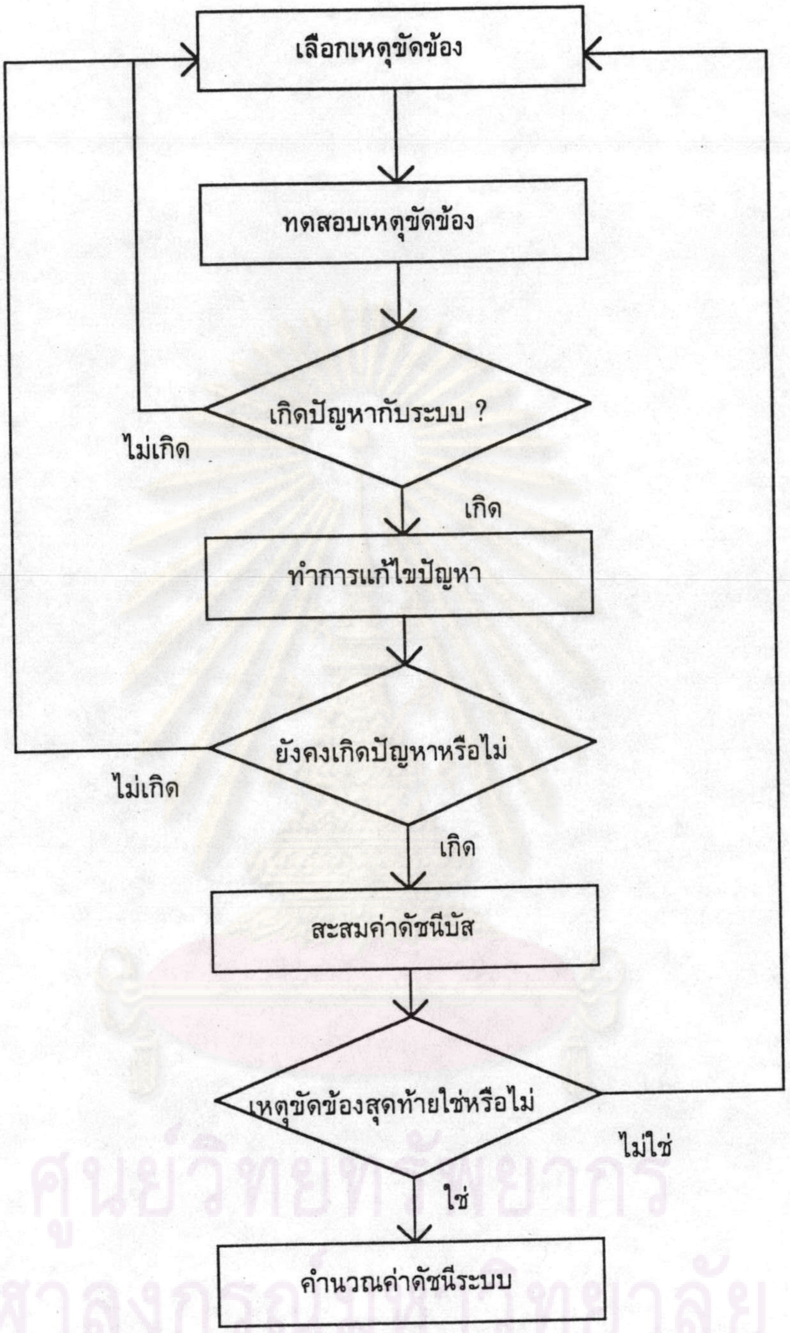
บทที่ 3

การหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม ด้วยวิธีระบุเหตุขัดข้อง

การหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมด้วยวิธีระบุเหตุขัดข้อง จะทำการเลือกเหตุขัดข้องอย่างเป็นระบบ และทำการทดสอบเหตุขัดข้องที่เลือกมาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load Flow) เพื่อตรวจสอบว่าจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่อระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่ ถ้าเหตุขัดข้องนั้นไม่ทำให้เกิดปัญหาใด ๆขึ้นแก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ก็จะทำการเลือกเหตุขัดข้องถัดไปเพื่อทำการทดสอบ แต่หากถ้าเกิดปัญหาขึ้นกับบางส่วนของระบบหรือทั้งหมดของระบบซึ่งปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้แก่ สายส่งมีโหลดเกิน กำลังผลิตไม่เพียงพอ เป็นต้น ก็จะทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว ถ้าหากวิธีการแก้ไขเหล่านี้ไม่สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ก็จะถือว่าบางส่วนของระบบหรือว่าทั้งหมดของระบบล้มเหลวแล้วแต่กรณี และจะทำการสะสมค่าดัชนีบัส (Bus Indices) ที่บัสซึ่งเกิดปัญหา จากนั้นก็จะทำการเลือกเหตุขัดข้องถัดไปมาทดสอบจนกว่าจะทดสอบครบทุกเหตุขัดข้อง เมื่อทดสอบเหตุขัดข้องจนครบทุกเหตุขัดข้องแล้วจะทำการคำนวณค่าดัชนีระบบ (System Indices) ต่อไป

รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนหลักของการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมโดยใช้วิธีระบุเหตุขัดข้อง (Contingency Enumeration)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนหลักของการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้

ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมโดยใช้วิธีระบุเหตุขัดข้อง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลสำหรับการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม

การหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม ซึ่งรวมระบบผลิตและระบบส่งกำลังไฟฟ้าเข้าด้วยกัน การคำนวณค่อนข้างจะซับซ้อนและใช้ข้อมูลมาก โดยข้อมูลที่ต้องการใช้ในการคำนวณค่าความเชื่อถือได้จะแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ข้อมูลดีเทอร์มินิสติก (Deterministic Data) และ ข้อมูลสโตคาสติก (Stochastic Data) [3,6]

1. <u>ข้อมูลดีเทอร์มินิสติก</u> (Deterministic Data)

ข้อมูลดีเทอร์มินิสติกแบ่งออกได้เป็นข้อมูลอุปกรณ์และข้อมูลระบบ โดยข้อมูลอุปกรณ์ได้แก่ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) และค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptance) ของสายส่ง ค่าพิกัดการนำกระแสของสายส่ง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และข้อมูลอื่นๆที่ใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ โดยปกติสามารถหาค่าข้อมูลต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วนี้ได้ไม่ยากนัก เนื่องจากเป็นข้อมูลทั่วๆไปที่ถูกใช้ในการศึกษาเรื่องอื่นๆอยู่แล้ว

สำหรับข้อมูลระบบ จะเป็นข้อมูลที่ใช้อธิบายผลตอบสนองของระบบภายใต้ภาวะเกิดเหตุขัดข้อง ตัวอย่างเช่น มีสายส่ง 2 สายส่งเดินขนานกันไป หากว่าสายส่งเกิดขัดข้อง จะมีวิธีการจัดการกับรับโหลดของสายส่งที่เหลือเป็นอย่างไร โดยอาจจะตัดสายส่งนั้นออกจากระบบไป หรือว่าปล่อยให้ทำงานต่อไปในภาวะโหลดเกินหรือว่ามีวิธีการแก้ไขอื่นๆที่จะจัดการเพื่อรักษาการทำงานของระบบโดยรวมให้สามารถทำงานต่อไปได้ ข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการศึกษาเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม

2. <u>ข้อมูลสโตคาสติก</u> (Stochastic Data)

ข้อมูลสโตคาสติก เป็นข้อมูลของตัวแปรสุ่ม (Random Variables) ซึ่งเป็นปริมาณที่มีค่าไม่แน่นอน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นข้อมูลอุปกรณ์และข้อมูลระบบ เช่นเดียวกับข้อมูลดีเทอร์มินิสติก ข้อมูลอุปกรณ์ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของการขัดข้อง (Failure Parameters) และ

ค่าพารามิเตอร์ของการซ่อมแซม (Repair Parameters) ของแต่ละอุปกรณ์ในระบบ ส่วนข้อมูลระบบได้แก่ การขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน (Common Mode Outages) หรือเป็นผลจากการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้า (Station Originated Outages)

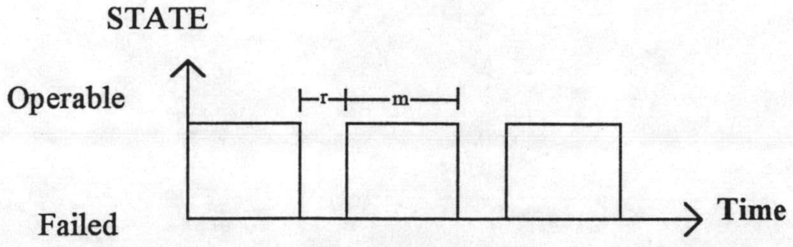
แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ

ในการศึกษาเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม อุปกรณ์ที่พิจารณาได้แก่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง และหม้อแปลง ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นช่วงตามคาบเวลาที่ไม่สม่ำเสมอ โดยจะประกอบไปด้วย 2 สถานะ คือสถานะทำงานปกติสลับกับสถานะขัดข้องไม่สามารถทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ในการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์เพื่อแทนการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวในระยะยาวสามารถประมาณช่วงระยะเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ยและมีช่วงการทำงานเป็นคาบเวลาที่สม่ำเสมอได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.2 การทำงานของอุปกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

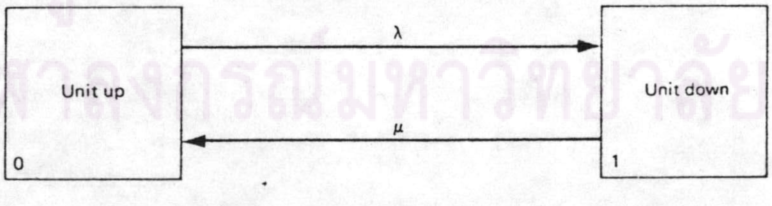


รูปที่ 3.3 การทำงานของอุปกรณ์เมื่อประมาณช่วงระยะเวลา
ที่อุปกรณ์อยู่ในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย

สำหรับวิธีการสร้างแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการมาร์คอฟ (Markov Process) [11] ซึ่งสามารถศึกษาได้ทั้งแบบต่อเนื่อง (Continuous) และไม่ต่อเนื่อง (Discrete) โดยที่สถานะต่อไปของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบัน และจะไม่เกี่ยวข้องกับสถานะในอดีต และจะมีค่าอัตราการเปลี่ยนสถานะคงที่ไม่ขึ้นกับช่วงเวลาที่พิจารณา

รูปที่ 3.4 แสดงแบบจำลองสถานะการทำงานของอุปกรณ์ โดยจะประกอบไปด้วยสถานะ 2 สถานะ คือสถานะดี (Up state) และสถานะเสีย (Down state)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 แบบจำลองสถานะการทำงานของอุปกรณ์แบบ 2 สถานะ

จากรูปที่ 3.4 เมื่อใช้ทฤษฎีของกระบวนการมาร์คอฟ [11] จะสามารถหาค่าความน่าจะเป็นสถานะอยู่ตัว (Steady State Probability) ที่อุปกรณ์จะอยู่ในแต่ละสถานะได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \tag{3.1}$$

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \tag{3.2}$$

โดยที่

P_0 = ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะอยู่ในสถานะดี (Up state) โดยจะเรียกว่า ค่าความพร้อมใช้งาน (Availability, A)

P_1 = ความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะอยู่ในสถานะเสีย (Down state) โดยจะเรียกว่า ค่าความไม่พร้อมใช้งาน (Unavailability, U) หรืออัตราการขัดข้องแบบถูกบังคับ (Forced Outage Rate, FOR)

λ = อัตราการขัดข้อง (Failure Rate)

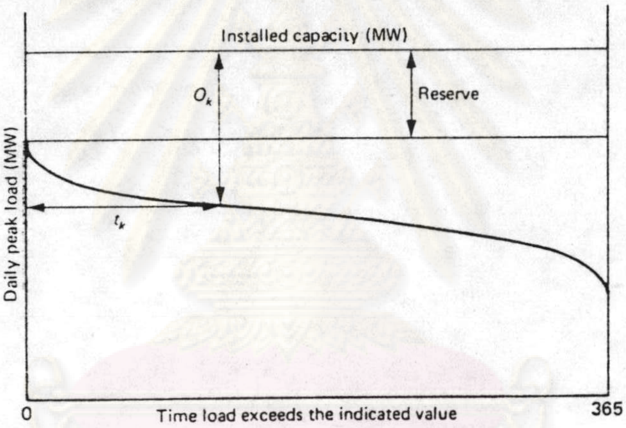
μ = อัตราการซ่อมแซม (Repair Rate)

แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า

ในการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม นอกจากจะสร้างแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แล้ว ยังจะต้องสร้างแบบจำลองของความต้องการใช้ไฟฟ้าด้วย โดยที่แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอาศัยข้อมูลค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดประจำวัน (Daily Peak Load) ส่วนระยะเวลาที่ทำการศึกษาอาจจะเป็นระยะเวลา 1 เดือน หรือ 1 ปี เป็นต้น รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดประจำวันกับระยะเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับแบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม จะเป็นแบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้ามีค่าคงที่ระดับเดียวตลอดระยะเวลาที่พิจารณาศึกษา โดยจะใช้ค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (Peak Load) เป็นค่าของความต้องการใช้ไฟฟ้าคงที่ไม่ขึ้นกับค่าระดับแรงดัน ส่วนระยะเวลาศึกษาจะใช้เวลา 1 ปี ดังนั้นค่าดัชนีที่คำนวณได้ จะเรียกว่าค่าดัชนีประจำปี (Annualized Indices)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างของกราฟแสดง Load Duration Curve
ของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดประจำวัน

ประเภทของการขัดข้อง

ในการศึกษาหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมจะแบ่งการขัดข้องออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. การขัดข้องแบบอิสระ (Independent Outages)
2. การขัดข้องแบบไม่อิสระ (Dependent Outages)
3. การขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน (Common Mode Outages)
4. การขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้า (Station Originated Outages)

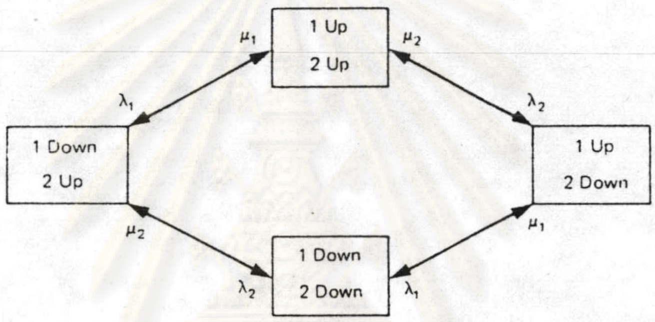
1. <u>การขัดข้องแบบอิสระ</u> (Independent Outages)

การขัดข้องแบบอิสระเป็นการขัดข้องที่เข้าใจง่ายที่สุดในการศึกษา การขัดข้องแบบนี้จะหมายถึงการที่อุปกรณ์ตั้งแต่สองอุปกรณ์ขึ้นไปเกิดขัดข้องพร้อม ๆกัน และการขัดข้องของแต่ละอุปกรณ์นี้จะเป็นอิสระต่อกัน ความน่าจะเป็นของการขัดข้องแบบนี้สามารถหาได้จากผลคูณของความน่าจะเป็นในการขัดข้องของแต่ละอุปกรณ์ สำหรับแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ใช้ในกรณีนี้ เป็นแบบ 2 สถานะ (Two-state Model) ซึ่งอุปกรณ์จะอยู่ในสถานะดี (Up-state) หรือสถานะเสีย (Down-state) สถานะใดสถานะหนึ่ง

อัตราการออกจากสถานะดีไปสู่สถานะเสียเรียกว่าอัตราการขัดข้อง (Failure Rate) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ λ มีหน่วยเป็นครั้งต่อปี ส่วนอัตราการออกจากสถานะเสียกลับไปสู่สถานะดีเรียกว่าอัตราการซ่อมแซม (Repair Rate) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ μ มีหน่วยเป็นครั้งต่อปี แต่ในบางครั้งจะแสดงอยู่ในรูปของเวลาเฉลี่ยของการขัดข้อง r มีหน่วยเป็นชั่วโมง สำหรับกระบวนการซ่อมแซมเพื่อให้อุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะเสียกลับคืนสู่สถานะดีมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะอยู่ในสถานะเสีย (Unavailability) มีค่าแตกต่าง ๆกัน ตัวอย่างของกระบวนการซ่อมแซมแบบต่าง ๆ ได้แก่ High Speed Automatically Re-closed ; Slow Speed Automatically Re-closed ; without Repair ; with Repair กระบวนการซ่อมแซม

แบบต่าง ๆเหล่านี้ จะมีค่าเวลาการขัดข้องที่ต่างกัน ทำให้ค่าอัตราการซ่อมแซมที่แตกต่างกัน แบบจำลองการขัดข้องแบบอิสระของอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์ มีลักษณะดังรูปที่ 3.6

โดยทั่วไปแล้ว การหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม จะพิจารณาการขัดข้องแบบอิสระเป็นหลัก



รูปที่ 3.6 แบบจำลองการขัดข้องแบบอิสระของอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. <u>การขัดข้องแบบไม่อิสระ</u> (Dependent Outages)

การขัดข้องแบบไม่อิสระเป็นการขัดข้องที่ขึ้นอยู่กับการเกิดขึ้นของการขัดข้องอื่นๆ ตัวอย่างเช่น การขัดข้องของสายส่งสายหนึ่งของวงจรคู่ (Double Circuit) ทำให้ต้องปลดสายส่งอีกสายส่งหนึ่งออกเนื่องจากมีโหลดเกิน โดยปกติแล้วในการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม จะไม่นำการขัดข้องแบบนี้มาพิจารณา [3,6]

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

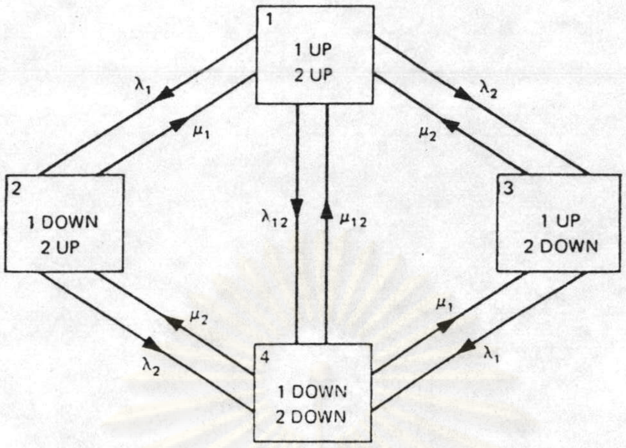
3. <u>การขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน</u> (Common Mode Outages)

การขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน (Common Mode Outages) เป็นการขัดข้องที่มีสาเหตุมาจากภายนอก แล้วส่งผลให้เกิดการขัดข้องของอุปกรณ์ขึ้นหลายส่วนพร้อมกัน โดยที่การขัดข้องของอุปกรณ์แต่ละส่วนนั้น ไม่ได้มีสาเหตุมาจากการขัดข้องของกันและกัน ตัวอย่างของการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันที่พบมากที่สุดได้แก่ การเกิดปัญหาขึ้นที่เสาส่งที่ได้ติดตั้งวงจรสายส่ง 2 วงจร ทำให้สายส่งทั้ง 2 วงจรเกิดการขัดข้อง ซึ่งการขัดข้องของสายส่งทั้ง 2 วงจรนี้ไม่ได้มีสาเหตุมาจากการขัดข้องของกันและกัน แต่มีสาเหตุมาจากเสาส่งซึ่งเป็นสาเหตุภายนอก ในกรณีนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบได้กับการขัดข้องแบบอิสระของวงจร 2 วงจร ซึ่งติดตั้งสายส่งอยู่บนเสาส่งที่แยกจากกัน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ความน่าจะเป็นของการขัดข้องแบบอิสระจะมีค่าเท่ากับผลคูณของความน่าจะเป็นของการขัดข้องของแต่ละอุปกรณ์ ถ้าหากว่าความน่าจะเป็นของการขัดข้องของแต่ละอุปกรณ์มีค่าต่ำ จะทำให้ผลคูณที่ได้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นของการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน ในการขัดข้องที่คล้ายกัน ดังนั้นการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน จึงมีผลต่อการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม

คณะทำงานของ IEEE (The Task Force on Common Mode Outages of Bulk Power Supply Facilities in the IEEE Subcommittee on the Application of Probability Methods) [12] ได้ทำการศึกษาและเสนอแบบจำลองของการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันสำหรับสายส่ง 2 สายส่ง ที่อยู่ในแนวเสาส่ง (Right of Way) เดียวกัน หรืออยู่บนเสาส่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แบบจำลองของการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันสำหรับสายส่ง 2 สายส่ง ที่อยู่ในแนวเสาส่ง (Right of Way) เดียวกัน หรืออยู่บนเสาส่งเดียวกัน

แบบจำลองในรูปที่ 3.7 จะมีสถานะขัดข้องสถานะเดียว (Single Down State) ถ้าหากว่ากระบวนการซ่อมแซมของอุปกรณ์ทั้งสองแยกอิสระจากกันและกลับคืนสู่สถานะทำงานปกติเป็นอิสระต่อกัน จะได้ว่าค่า μ_{12} มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือค่า μ_{12} ไม่ได้เป็นค่าส่วนกลับของเวลาซ่อมแซม แต่จะแสดงถึงสัดส่วนการซ่อมแซมซึ่งเกี่ยวข้องกับการกลับคืนสู่สถานะการทำงานพร้อมกันของอุปกรณ์ทั้งสอง

จากแบบจำลองแสดงในรูปที่ 3.7 จะสามารถคำนวณหาค่าอัตราการขัดข้อง (Failure Rate) λ_{pp} และเวลาขัดข้อง (Outage Time) r_{pp} ได้จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

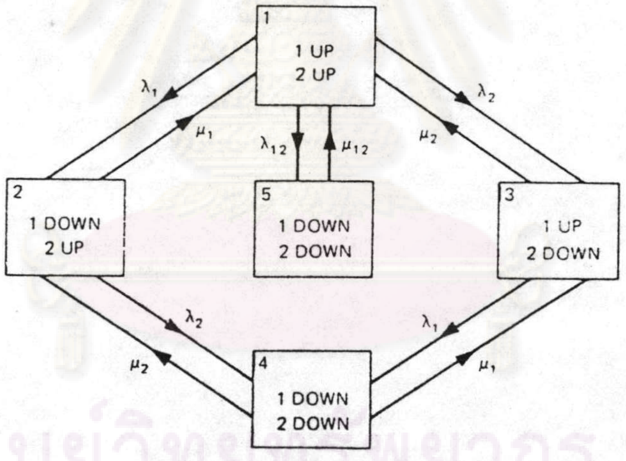
$$\lambda_{pp} = \lambda_1\lambda_2(r_1 + r_2) + \lambda_{12} \qquad (3.3)$$

$$r_{pp} = \frac{r_1 r_2 r_{12}}{r_1 r_2 + r_2 r_{12} + r_{12} r_1} \qquad (3.4A)$$

ในกรณีที่ค่า $\mu_{12} = 0$ จะได้ว่า

$$r_{pp} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{3.4B}$$

สำหรับในกรณีที่มีสถานะการขัดข้องแยกจากกัน (Separate Down State) จะเขียนแบบจำลองได้ดังรูปที่ 3.8 โดยจะแยกสถานะขัดข้องที่เกิดจากสาเหตุร่วมกันออกจากการขัดข้องแบบอิสระดังรูป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.8 แบบจำลองของการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน
เมื่อสถานะขัดข้องแยกออกจากกัน

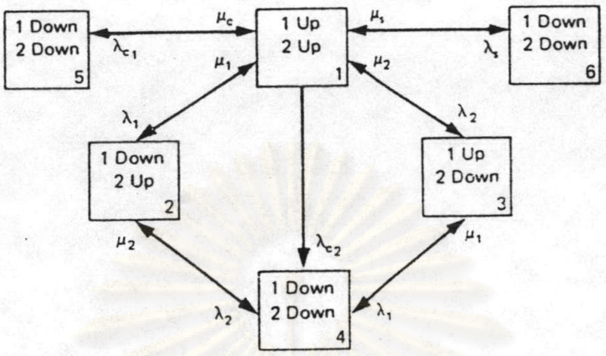
4. การขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้า (Station Originated Outages)

การขัดข้องของสายส่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อาจจะมีสาเหตุเนื่องมาจากมีการขัดข้องเกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้า การขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่าง ๆได้แก่ การเกิดข้อผิดพร่อง (Fault) ลงดินที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ การเกิดข้อผิดพร่องที่บัส เป็นต้น การขัดข้องต่าง ๆซึ่งเกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้าอาจจะส่งผลให้อุปกรณ์บางอุปกรณ์ไม่สามารถทำงานต่อไปได้

โดยปกติแล้วการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าจะถูกนับรวมเข้าไว้ในค่าอัตราการขัดข้องของสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะรวมอัตราการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าเหล่านี้เข้ากับอัตราการขัดข้องแบบอิสระ อย่างไรก็ตามการรวมค่าอัตราการขัดข้องแบบนี้จะทำให้ไม่สามารถจำแนกได้ว่าการขัดข้องของอุปกรณ์หลายอุปกรณ์พร้อม ๆกันนั้นมีสาเหตุมาจากสถานีไฟฟ้าหรือไม่ ดังนั้นจึงอาจจะแยกการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าออกมาพิจารณาต่างหาก ซึ่งการขัดข้องแบบนี้จะมีผลต่อค่าดัชนีความเชื่อถือได้เช่นเดียวกัน

รูปที่ 3.9 แสดงแบบจำลองซึ่งรวมทั้งการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันและการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้า

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพิจารณาเฉพาะการขัดข้องแบบอิสระและการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน เท่านั้น ส่วนการขัดข้องแบบไม่อิสระและการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้า จะไม่นำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



รูปที่ 3.9 แบบจำลองซึ่งรวมทั้งการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน
และการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้า

การเลือกเหตุขัดข้อง

ในการศึกษาเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม จะใช้แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆในระบบเป็น 2 สถานะ (2-State Model) คืออุปกรณ์จะอยู่ในสถานะดี (Up State) หรือสถานะเสีย (Down State) สถานะใดสถานะหนึ่ง โดยทั่วไปการขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบจะเป็นอิสระจากอุปกรณ์อื่น เป็นการขัดข้องแบบอิสระ (Independent Outage) ซึ่งแต่ละอุปกรณ์อาจจะเกิดการขัดข้องขึ้นพร้อม ๆกันได้ โดยไม่ได้มีความเกี่ยวข้องกันเลย เช่น มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสีย 1 เครื่อง ในขณะที่มีสายส่งหลุดออกจากระบบไป 1 สายส่งพร้อม ๆกัน เป็นต้น

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่ง รวมเป็นจำนวน n โดยที่แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆเหล่านี้เป็นแบบ 2 สถานะ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะได้ว่ามีเหตุขัดข้องที่จะต้องพิจารณาเป็นจำนวน 2^n-1 สถานะ โดยที่เหตุขัดข้องแต่ละสถานะจะมีค่าความน่าจะเป็นของการเกิดและความถี่ที่จะเกิดดังสมการที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ

$$P_s = \prod_{i=1}^{k} A_i \prod_{j=1}^{l} U_j \tag{3.5}$$

$$F_s = P_s(\sum_{i=1}^{k} \lambda_i + \sum_{j=1}^{l} \mu_j) \tag{3.6}$$

โดยที่ P_s = ความน่าจะเป็นของการอยู่ในสถานะ s

F_s = ความถี่ของการอยู่ในสถานะ s

A_i = ค่าความพร้อมใช้งานของอุปกรณ์ i

U_j = ค่าความไม่พร้อมใช้งานของอุปกรณ์ j

k = จำนวนอุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะทำงาน

l = จำนวนอุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะขัดข้อง

λ_i = อัตราการขัดข้องของอุปกรณ์ i

μ_j = อัตราการซ่อมแซมของอุปกรณ์ j

ถ้าหากว่าระบบไฟฟ้ากำลังที่จะทำการศึกษามีขนาดใหญ่ ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งจำนวนมาก ก็จะทำให้มีจำนวนเหตุขัดข้องที่ต้องพิจารณาเป็นจำนวนมาก การคำนวณหาค่าความเชื่อถือได้ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานมาก และเนื่องจากบางเหตุขัดข้องเป็นการขัดข้องของอุปกรณ์ต่าง ๆในระบบพร้อมกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งเหตุขัดข้องเหล่านี้มีโอกาสเกิดขึ้นน้อยมากจึงจำเป็นที่จะต้องลดจำนวนเหตุขัดข้องที่จะพิจารณาลง โดยเลือกเพียงบางเหตุขัดข้องเท่านั้นมาพิจารณา โดยการกำหนดอันดับของเหตุขัดข้อง (Contingency Level) [3,6,9,10] ออกเป็นอันดับต่าง ๆได้แก่ เหตุขัดข้องอันดับหนึ่ง,เหตุขัด

ข้องอันดับสอง,... โดยที่เหตุขัดข้องอันดับหนึ่งหมายถึงเหตุขัดข้องที่มีการขัดข้องของอุปกรณ์เพียงอุปกรณ์เดียวในเวลาที่พิจารณา เหตุขัดข้องอันดับสองหมายถึงเหตุขัดข้องที่มีการขัดข้องของอุปกรณ์สองอุปกรณ์พร้อม ๆกันในเวลาที่พิจารณา ส่วนเหตุขัดข้องอันดับสูง ๆก็นิยามได้ทำนองเดียวกัน เนื่องจากเหตุขัดข้องอันดับสูง ๆซึ่งประกอบไปด้วยการขัดข้องของอุปกรณ์ต่าง ๆเป็นจำนวนมากนั้น จะมีความน่าจะเป็นในการเกิดขึ้นต่ำมาก จึงสามารถตัดทิ้งได้ เพื่อเป็นการลดจำนวนเหตุขัดข้องที่จะต้องพิจารณาลง ทำให้สามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้มากโดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เกณฑ์ในการเลือกเหตุขัดข้องที่จะนำมาพิจารณาดังนี้ [6,7]

-การขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะคิดจนถึงอันดับสาม

-การขัดข้องของสายส่ง จะคิดจนถึงอันดับสอง

-การขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารวมกับสายส่ง จะคิดจนถึงอันดับสาม โดยที่ในแต่ละเหตุขัดข้องที่พิจารณานั้น จะมีการขัดข้องของสายส่งได้ไม่เกิน 2 สายส่ง

ส่วนเหตุขัดข้องที่มีอันดับสูงกว่านี้จะถูกตัดออกไป ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากจะมีค่าความน่าจะเป็นและความถี่ของการขัดข้องต่ำมาก นอกจากจะตัดเหตุขัดข้องที่มีอันดับสูงออกไปแล้ว ยังสามารถลดจำนวนเหตุขัดข้องที่ต้องพิจารณาได้อีก โดยใช้กฎเกณฑ์การตัดออก (Cut off Criteria) เพื่อตัดเหตุขัดข้องที่มีความน่าจะเป็นหรือมีความถี่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดออกไป ทำให้สามารถที่จะลดจำนวนเหตุขัดข้องที่จะต้องพิจารณาลงและจะช่วยลดเวลาในการคำนวณลงได้อีก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เกณฑ์การตัดออกเพื่อตัดเหตุขัดข้องที่มีความน่าจะเป็นต่ำกว่า 10^{-8} หรือเหตุขัดข้องที่มีความถี่ต่ำกว่า 10^{-6} ออกไป

นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่จะคัดเลือกเหตุขัดข้องที่จะนำมาทดสอบ โดยการจัดเรียงลำดับของเหตุขัดข้องตามความรุนแรงของการเกิดโหลดเกิน โดยจะกำหนดเป็นค่าดัชนี (Performance Index) PI [6,9] ซึ่งสามารถหาค่า PI ได้จากสมการที่ 3.7

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$PI = \sum_{i:all\ circuit} (\frac{P_i}{P_{li}})^2 \qquad (3.7)$$

โดยที่

P_i = กำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง i

P_{li} = ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของสายส่ง i

ในการทดสอบเหตุขัดข้องจะเลือกเหตุขัดข้องที่มีค่า *PI* สูงสุด มาทำการทดสอบก่อน จากนั้นจะเลือกเหตุขัดข้องที่มีค่า *PI* ถัดไปมาทดสอบ จนกระทั่งเหตุขัดข้องที่เลือกมาทดสอบไม่ทำให้ระบบเกิดปัญหา ก็จะสรุปว่าเหตุขัดข้องถัดไปซึ่งมีค่า *PI* ต่ำกว่า จะไม่ทำให้ให้ระบบเกิดปัญหา จึงสามารถหยุดการทดสอบได้

การทดสอบเหตุขัดข้อง

หลังจากที่ได้เลือกเหตุขัดข้องเพื่อพิจารณาแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบเหตุขัดข้องที่เลือกมาโดยการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load Flow) เพื่อตรวจสอบว่าเหตุขัดข้องนั้นจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่อระบบหรือไม่ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ขึ้นมาหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป เนื่องจากว่าเวลาส่วนใหญ่ในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมจะถูกใช้ไปในขั้นตอนของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ ซึ่งการวิเคราะห์โหลดโฟลว์จะทดสอบว่าแรงดันบัสที่แต่ละบัสมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้หรือไม่ สายส่งมีโหลดเกินหรือไม่ เป็นต้น ดังนั้นความแม่นยำสูงของคำตอบในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์จึงไม่ใช่สิ่งที่จำเป็นมากนักในที่นี้ แต่ว่าความเร็วของการคำนวณจะมีความสำคัญมากกว่า เนื่องจากมีเหตุขัดข้องที่จะต้องทำการทดสอบด้วยการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เป็นจำนวนมาก จึงควรใช้วิธีการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบประมาณซึ่งใช้เวลาในการหาคำตอบน้อยลง เพื่อเป็นการลดเวลาในการคำนวณค่าดัชนีลง

สำหรับวิธีการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบประมาณซึ่งมีความรวดเร็วและได้รับความนิยมได้แก่การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดี.ซี. (D.C. Load Flow) และเนตเวอร์คโฟลว์ (Network Flow) ซึ่งทั้งสองวิธีดังกล่าวนั้นจะทำการพิจารณาเฉพาะการไหลของกำลังจริง (Real Power) เท่านั้นและจะไม่พิจารณาถึงกำลังรีแอคทีฟ (Reactive Power) ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบเอ.ซี. (A.C.Load Flow) และให้ผลการคำนวณที่อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม

แต่เนื่องจากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดี.ซี.และเนตเวอร์คโฟลว์ ไม่ได้คำนึงถึงค่าแรงดันที่บัสต่าง ๆ ทำให้ไม่สามารถที่จะตรวจสอบได้ว่าแรงดันบัสที่บัสต่าง ๆมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ ในกรณีที่ไม่สนใจปัญหาเรื่องระดับแรงดันบัสที่บัสต่าง ๆแต่สนใจพิจารณาเพียงปัญหาสายส่งมีโหลดเกินก็สามารถใช้วิธีดังกล่าวในการทดสอบเหตุขัดข้องได้ แต่ถ้าต้องการที่จะทดสอบด้วยว่าแรงดันบัสมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ ก็จะต้องใช้การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบเอ.ซี. ซึ่งมีวิธีการวิเคราะห์อยู่หลายวิธีด้วยกันได้แก่ วิธีเกาส์ (Gauss Method) วิธีเกาส์-ไซเดิล (Gauss-Seidel Method) วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) [13,14] โดยที่วิธีนิวตัน-ราฟสัน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากสามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

อย่างไรก็ตามเนื่องจากการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมจะต้องทดสอบเหตุขัดข้องเป็นจำนวนมาก การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบเอ.ซี.โดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันจึงยังไม่เหมาะสม เนื่องจากว่าการคำนวณยังรวดเร็วไม่เพียงพอ จึงต้องมีการปรับปรุงวิธีนิวตัน-ราฟสันเพื่อให้สามารถหาคำตอบได้รวดเร็วขึ้น โดยอาศัยลักษณะบางประการของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อลดการคำนวณลง ทำให้สามารถลดเวลาในการคำนวณลงได้มาก โดยให้ผลการคำนวณที่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสดีคัปเปิล (Fast Decoupled Load Flow) [15]

ในการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ จะแบ่งบัสต่าง ๆในระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. บัสอ้างอิง (Reference Bus) หรือ บัสสวิง (Swing Bus) ที่บัสนี้จะกำหนดขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ส่วนกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟจะได้จากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์

2. บัสควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Bus) ที่บัสนี้จะกำหนดขนาดของแรงดันบัส และกำลังจริง ส่วนมุมเฟสของแรงดันบัสและกำลังรีแอคทีฟจะได้จากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์

3. บัสโหลด (Load Bus) ที่บัสนี้จะกำหนดขนาดของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟ ส่วนขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสจะได้จากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์

กำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่จ่ายเข้าไปยังบัส p ของระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยบัสจำนวน n บัส สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$P_p = \sum_{q=1}^{n} |V_p V_q Y_{pq}| Cos(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \qquad (3.8)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^{n} |V_p V_q Y_{pq}| Sin(\delta_p - \delta_q - \theta_{pq}) \qquad (3.9)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่

P_p, Q_p = กำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟที่จ่ายเข้าบัส P

$|V_p|, \delta_p$ = ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส P

$|V_q|, \delta_q$ = ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสที่บัส Q

$|Y_{pq}|, \theta_{pq}$ = สมาชิกตำแหน่ง (p,q) ของเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ

สมการที่ 3.8 และ 3.9 เรียกว่าสมการโหลดโฟลว์ (Load Flow Equation) ซึ่งเป็นสมการไม่เชิงเส้น การวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยการใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน จะเปลี่ยนสมการโหลดโฟลว์ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นโดยการใช้การกระจายของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series Expansion) กระจายฟังก์ชั่นของ P และ Q รอบจุดประมาณเริ่มต้นและไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟเป็นเมตริกซ์ ดังสมการที่ 3.10

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \hline \Delta V / V \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่

$\Delta P, \Delta Q$ = ค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังจริงและกำลังรีแอคทีฟ

$\Delta\delta, \Delta V$ = ค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสและขนาดของแรงดันบัส

J = เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix)

ลักษณะที่สำคัญประการหนึ่งของระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะอยู่ตัว (Steady State) คือ การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันบัสจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรีแอคทีฟน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังจริง ส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันบัสจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังจริงน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังรีแอคทีฟ [15] จากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้ประมาณได้ว่าค่าสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน $[J_2]$และ $[J_3]$ ในสมการที่ 3.10 มีค่าเป็น 0 ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ 3.10 ได้ใหม่ โดยเขียนแยกออกเป็น 2 สมการ คือสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$[\Delta P] = [J_1][\Delta\delta] \qquad (3.11)$$

$$[\Delta Q] = [J_4][\Delta V / V] \qquad (3.12)$$

โดยที่ค่าสมาชิกของเมตริกซ์จาโคเบียน $[J_1]$และ $[J_4]$ จะสามารถหาค่าได้จาก สมการที่ 3.13 ถึง 3.15

เมื่อ $p \neq q \quad J_{1pq} = J_{4pq} = V_p V_q (G_{pq} Sin\delta_{pq} - B_{pq} Cos\delta_{pq}) \qquad (3.13)$

เมื่อ $p = q \quad J_{1pp} = -B_{pp} V_p^2 - Q_{pp} \qquad (3.14)$

เมื่อ $p = q \quad J_{4pp} = -B_{pp} V_p^2 + Q_{pp} \qquad (3.15)$

โดยที่ $Q_{pp} = V_p \sum_{q=1, q\neq p}^{n} V_q (G_{pq} Sin\delta_{pq} - B_{pq} Cos\delta_{pq})$

สำหรับขั้นตอนการคำนวณ สามารถคำนวณสมการทั้งสองแยกกันได้ เมตริกซ์จาโคเบียนจะมีขนาดเล็กลงมาก สามารถคำนวณได้รวดเร็วขึ้น และจะเรียกการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบนี้ว่าการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดีคัปเปิล (Decoupled Load Flow)

นอกจากนี้ยังสามารถทำให้สมการโหลดโฟลว์อยู่ในรูปง่ายลงได้อีก โดยการใช้สมมติฐานต่อไปนี้

- ค่ามุมเฟสของแรงดันแต่ละบัสจะมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ค่า $Cos\delta_{pq}$ ในสมการที่ 3.13 มีค่าใกล้เคียง 1 และค่า $Sin\delta_{pq}$ มีค่าใกล้เคียง 0

ดังนั้น $Cos\delta_{pq} \approx 1$

- ค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) G_{pq} ของสายส่ง จะมีค่าน้อยกว่าค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptance) B_{pq} ของสายส่งมาก ประกอบกับค่า $Sin\delta_{pq}$ มีค่าใกล้เคียง 0

ดังนั้น $G_{pq}Sin\delta_{pq} << B_{pq}$

- ค่ากำลังรีแอคทีฟ Q_p มีค่าน้อยกว่าค่า $B_{pp}V_p^2$ มาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ดังนั้น $Q_p << B_{pp}V_p^2$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทำให้สามารถเขียนสมการโหลดโฟลว์ได้ใหม่ดังสมการที่ 3.16 และ 3.17

$$[\Delta P / V] = [B'][\Delta\delta] \quad (3.16)$$

$$[\Delta Q / V] = [B''][\Delta V] \quad (3.17)$$

ค่าสมาชิกของเมตริกซ์ $[B']$ และ $[B'']$ จะเป็นเลขจำนวนจริง ซึ่งประกอบไปด้วยค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptances) ของระบบเท่านั้น จึงมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ ดังนั้นจะต้องหาเมตริกซ์ $[B']$ และ $[B'']$ เพียงครั้งเดียวตอนเริ่มต้นเท่านั้น ทำให้การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ใช้เวลาลดลงมาก เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการสร้างเมตริกซ์จาโคเบียน การวิเคราะห์โหลดโฟลว์โดยใช้สมการที่ 3.16 และสมการที่ 3.17 เรียกว่าการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสดีคัปเปิล (Fast Decoupled Load Flow) ซึ่งสามารถหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วและให้ผลการคำนวณอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทดสอบเหตุขัดข้องในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกใช้การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสดีคัปเปิลในการทดสอบเหตุขัดข้องต่าง ๆ

อย่างไรก็ตาม บางเหตุขัดข้องเมื่อใช้การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสดีคัปเปิล จะไม่สามารถหาคำตอบได้ (Divergence) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเปลี่ยนมาใช้การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดี.ซี. เพื่อตรวจสอบการเกิดโหลดเกินของสายส่งแทน [9]

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดี.ซี. (D.C. Load Flow) [16]

การวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดี.ซี. (D.C. Load Flow) เป็นการหาคำตอบของระบบไฟฟ้ากำลังโดยประมาณ ซึ่งสามารถคำนวณได้รวดเร็ว เนื่องจากในการคำนวณไม่ต้องมีการทำการคำนวณซ้ำ (Non-iteration) โดยจะใช้หลักการดังนี้

-พิจารณาเฉพาะกำลังจริงเท่านั้น ส่วนกำลังรีแอคทีฟจะไม่มาพิจารณา

-กำหนดให้ขนาดของแรงดันบัสมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ

-ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไป จะมีค่ารีแอกแตนซ์ของสายส่งสูงกว่าค่าความต้านทานมาก $X_{ij} >> R_{ij}$

- ค่ามุมเฟสของแรงดันบัสที่แต่ละบัสมีค่าใกล้เคียงกัน

I16695940X

จากสมมติฐานเหล่านี้ ทำให้สามารถเขียนสมการของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจากบัส i ไปยังบัส j ได้ง่ายลงเป็นสมการที่ 3.18

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}} \tag{3.18}$$

โดยที่

θ_i = มุมเฟสของแรงดันที่บัส i

θ_j = มุมเฟสของแรงดันที่บัส j

X_{ij} = ค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่งระหว่างบัส i และบัส j

P_{ij} = ค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j

ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่บัส จะหาได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในทุก ๆสายส่งที่ต่อกับบัสนั้น ดังสมการที่ 3.19 และเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 3.20

$$P_i = \sum_{ij}^{n} P_{ij} = \sum_{ij}^{n} \frac{\theta_i - \theta_j}{X_{ij}} \tag{3.19}$$

$$[P] = [B][\theta] \tag{3.20}$$

โดยที่

$[B]$ = เมตริกซ์ซัสเซพแตนซ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการที่ 3.20 เป็นสมการเชิงเส้น ค่าสมาชิกในเมตริกซ์ [B] ส่วนใหญ่มีค่าเป็นศูนย์ เนื่องจากมีสายส่งเพียงจำนวนหนึ่งเท่านั้นที่ต่ออยู่กับแต่ละบัส สำหรับการคำนวณหาคำตอบของสมการ สามารถหาได้โดยตรงโดยไม่ต้องมีการคำนวณซ้ำเป็นรอบเหมือนในกรณีการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบเอ.ซี. ทำให้สามารถคำนวณหาค่ามุมเฟสที่แต่ละบัสได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทราบค่ามุมเฟสของแต่ละบัสแล้วก็จะคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสายส่งได้โดยใช้สมการที่ 3.18 ทำให้สามารถตรวจสอบการเกิดโหลดเกินของสายส่งได้อย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบดี.ซี.จะไม่คำนึงถึงเรื่องแรงดันบัส ดังนั้นจึงไม่สามารถตรวจสอบปัญหาทางด้านแรงดันได้

ปัญหาสายส่งมีโหลดเกินและวิธีการแก้ไข

ปัญหาหนึ่งที่สำคัญซึ่งเกิดขึ้นในการหาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม คือการที่สายส่งมีโหลดเกิน โดยอาจจะเกิดจากการที่สายส่งสายหนึ่งหลุดออกไปจากระบบ ทำให้กำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายส่งที่เหลือแทน จึงอาจทำให้สายส่งที่รับกำลังไฟฟ้าแทนนั้นเกิดโหลดเกินได้ ในทางปฏิบัติจะทำการแก้ไขได้โดยยอมให้สายส่งที่มีโหลดเกินนั้นทำงานต่อไปในภาวะโหลดเกินได้ จะทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่ดีกว่าความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่คำนวณได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง (Optimistic Indices) โดยเฉพาะกรณีที่โหลดเกินมากและเกินอยู่เป็นเวลานาน แต่ถ้าหากให้ทำการปลดสายส่งที่มีโหลดเกินนั้นออกไปจากระบบ แล้วจึงทำการวิเคราะห์ระบบที่เหลือจนกว่าจะไม่มีอุปกรณ์ใดมีโหลดเกินหรือจนกว่าระบบล้มเหลว จะทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้ที่แย่กว่าความเป็นจริง ซึ่งจะทำให้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Pessimistic Indices) อาจจะทำให้ต้องตัดสินใจที่จะปรับปรุงระบบให้มีความเชื่อถือได้สูงขึ้น โดยเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้มากขึ้น ทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำวิธีการดังกล่าวมาใช้สำหรับการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม

สำหรับวิธีการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้สำหรับการหาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม ได้แก่ การจัดสรรกำลังผลิตใหม่ และ/หรือ การตัดโหลด

วิธีการกำหนดรูปแบบของการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งวิธีการเหล่านี้ส่วนใหญ่จะใช้ออปติไมเซชั่นอัลกอริธึม (Optimization Algorithms) [17] เพื่อจะทำให้ต้นทุนการปฏิบัติการ (Operating Cost) มีค่าต่ำที่สุด ในขณะที่ลดค่ากำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งที่มีโหลดเกินลง ซึ่งวิธีการเหล่านี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการหาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมเนื่องจากเหตุผลหลายประการ ได้แก่

1.ในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ โดยการจำลองการขัดข้องของอุปกรณ์ต่าง ๆนั้น จะพิจารณาถึงระดับแรงดันที่บัสต่าง ๆ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง และอื่น ๆ แต่ไม่ได้คำนึงถึงต้นทุนการปฏิบัติการ การใช้ ออปติไมเซชั่นอัลกอริธึม จึงไม่มีความเหมาะสมและไม่มีความจำเป็น เนื่องจากต้องใช้เวลาในการคำนวณมากเกินความจำเป็น

2.ในบางกรณีไม่สามารถที่จะแก้ไขปัญหาโหลดเกินในสายส่งได้โดยการจัดสรรกำลังผลิตใหม่เพียงอย่างเดียว แต่จะต้องใช้ร่วมกับวิธีการตัดโหลดอย่างเหมาะสม จึงจะสามารถแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินนี้ได้

สำหรับรูปแบบการตัดโหลดในทางปฏิบัตินั้นจะขึ้นอยู่กับสัญชาติญาน,ประสบการณ์และความคุ้นเคยที่มีต่อระบบของผู้ปฏิบัติงานเป็นสำคัญซึ่งวิธีการเหล่านี้ไม่ได้มีการใช้พื้นฐานการคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการตัดโหลดจำนวนมากโดยไม่จำเป็นได้ เมื่อนำมาใช้ในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม จะทำให้ได้ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่สูงกว่าความเป็นจริง (Pessimistic Indices)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับวิธีการหารูปแบบการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลด เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินที่จะนำมาใช้ในที่นี้นั้นจะใช้ร่วมกับการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ด้วยวิธีนิวตัน–ราฟสันแบบฟาสดีคัปเปิล (Fast Decoupled Newton-Raphson Load Flow) โดยจะใช้หลักการที่ว่า การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งจะเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ส่วนการที่จะเปลี่ยนแปลงขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่ากำลังผลิตและโหลดที่บัสนั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงกำลังผลิตและโหลดที่บัสอย่างเหมาะสม ก็จะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งได้

สำหรับขั้นตอนของวิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลดเพื่อระงับปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น 2 ชุด [17,18] ได้แก่

1.ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกระแสเกินในสายส่งกับการเพิ่มของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส

2.ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเพิ่มของกำลังผลิตและโหลดกับการเพิ่มของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส

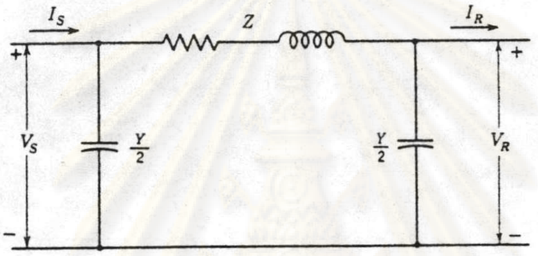
โดยในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัสเป็นตัวแปรสถานะ (State Variables)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างกระแสในสายส่งกับตัวแปรสถานะ

โดยทั่วไป การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง จะแทนสายส่งด้วยค่าพารามิเตอร์ 4 ค่า ได้แก่ค่าความต้านทานไฟฟ้า (Resistance) ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance) ค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) และค่าความนำไฟฟ้า (Conductance) โดยที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะรวมกันเป็นค่าอิมพีแดนซ์อนุกรม (Series Impedance) ของสาย

ส่งส่วนค่าความจุไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้า ก็จะรวมกันเป็นค่าแอดมิตแตนซ์ขนาน (Shunt Admittance) ของสายส่งไปยังนิวทรัล โดยปกติค่าความนำไฟฟ้าของสายส่งจะมีค่าน้อย จึงไม่นำมาคิดเมื่อคำนวณหากระแสและแรงดัน และจะแทนสายส่งด้วยวงจรสมมูลย์แบบพาย (π) ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลย์แบบพาย (π)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระแสที่ไหลในสายส่งจากบัส p ไปยังบัส q จะเป็นฟังก์ชั่นของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส ที่บัส p และบัส q ดังสมการที่ 3.21

$$\begin{aligned} I_{pq} &= [(V_p Cos\delta_p - V_q Cos\delta_q)G_{pq} - (V_p Sin\delta_p - V_q Sin\delta_q)B_{pq} - B_c V_p Sin\delta_p] \\ &\quad + j[(V_p Sin\delta_p - V_q Sin\delta_q)G_{pq} + (V_p Cos\delta_p - V_q Cos\delta_q)B_{pq} + B_c V_p Cos\delta_p] \\ &= I_r + jI_j \qquad (3.21) \end{aligned}$$

โดยที่

I_{pq} = กระแสที่ไหลในสายส่ง จากบัส p ไปยังบัส q

$G_{pq}+jB_{pq}$ = ค่าแอดมิตแตนซ์อนุกรม (Series Admittance) ของสายส่งที่ต่อระหว่างบัส p กับบัส q

B_c = ครึ่งหนึ่งของไลน์ชาร์จจิ้งแอดมิตแตนซ์ (Half Line Charging Admittance)

I_r, I_j = ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของ I_{pq}

ให้กระแสที่ไหลในสายส่งจากบัส p ไปยังบัส q มีค่าเป็น I'_{pq} ซึ่งมีตัวแปรสถานะเป็น $\delta'_p, \delta'_q, V'_p$ และ V'_q กำหนดให้ค่าพิกัดกระแสของสายส่งคือ I_{pqmax} สมมติว่า I'_{pq} มีค่ามากกว่า I_{pqmax} ดังนั้นจะต้องหาค่าตัวแปรสถานะใหม่เป็น δ_p, δ_q, V_p และ V_q เพื่อลดค่ากระแสที่ไหลในสายส่งลงจาก I'_{pq} เป็น I_{pqmax} เมื่อใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series Expansion) เพื่อกระจายฟังก์ชั่น I_{pq} รอบๆ $(\delta'_p, \delta'_q, V'_p, V'_q)$ และไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไปและกำหนดให้ $\Delta I_{pq} = I_{pqmax} - I'_{pq}$ เป็นกระแสเกิน จะได้ว่า ΔI_{pq} มีค่าดังสมการที่ 3.22

$$\begin{aligned}\Delta I_{pq} &= \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p}\right)\Delta\delta_p + \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_q}\right)\Delta\delta_q \\ &\quad + \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p}\right)\Delta V_p + \left(\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_q}\right)\Delta V_q\end{aligned} \qquad (3.22)$$

จาก $I_{pq} = \sqrt{I_r^2 + I_j^2}$ ดังนั้นจึงสามารถหา Partial Derivative ของ I_{pq} ได้จากสมการที่ 3.23 ถึง 3.26

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_p} = \frac{I_r}{I'_{pq}}(-G_{pq}V'_pSin\delta'_p - B_{pq}V'_pCos\delta'_p - B_cV'_pCos\delta'_p) + \frac{I_j}{I'_{pq}}(G_{pq}V'_pCos\delta'_p - B_{pq}V'_pSin\delta'_p - B_cV'_pSin\delta'_p) \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial \delta_q} = \frac{I_r}{I'_{pq}}(G_{pq}V'_qSin\delta'_q + B_{pq}V'_qCos\delta'_q) + \frac{I_j}{I'_{pq}}(-G_{pq}V'_qCos\delta'_q + B_{pq}V'_qSin\delta'_q) \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_p} = \frac{I_r}{I'_{pq}}(G_{pq}Cos\delta'_p - B_{pq}Sin\delta'_p - B_cSin\delta'_p) + \frac{I_j}{I'_{pq}}(G_{pq}Sin\delta'_p + B_{pq}Cos\delta'_p + B_cCos\delta'_p) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial I_{pq}}{\partial V_q} = \frac{I_r}{I'_{pq}}(-G_{pq}Cos\delta'_q + B_{pq}Sin\delta'_q) + \frac{I_j}{I'_{pq}}(-G_{pq}Sin\delta'_q - B_{pq}Cos\delta'_q) \quad (3.26)$$

พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งประกอบไปด้วยบัสจำนวน n บัส สายส่งจำนวน l สายส่ง โดยมีสายส่งที่มีโหลดเกินเป็นจำนวน j สายส่ง เมื่อเขียนสมการสำหรับสายส่งที่มีโหลดเกินทุกสายส่งทำนองเดียวกับสมการที่ 3.22 จะได้ชุดของสมการซึ่งเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ 3.27

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \vdots \\ \Delta I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ A \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ ----- \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมตริกซ์ A จะมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนสายส่งที่มีโหลดเกิน ส่วนจำนวนหลัก (Column) ของเมตริกซ์ A คือ $2n$-1 ค่าส่วนใหญ่ในเมตริกซ์ A จะเป็นศูนย์ โดยที่ในแต่ละแถวจะมีพจน์ที่มีค่าไม่เป็นศูนย์อยู่ไม่เกิน 4 พจน์ สำหรับเวกเตอร์ $[\Delta\delta,\Delta V]^T$ จะหมายถึงเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ เนื่องจากในการศึกษาระบบไฟฟ้ากำลัง จะให้บัสสวิง (Swing Bus) เป็นบัสอ้างอิง (Reference Bus) ดังนั้นจะไม่นำค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสของบัสสวิงมารวมไว้ในเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ ส่วนค่าที่เพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันของทุกบัสจะถูกรวมอยู่ในเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะในสมการที่ 3.27 ด้วย ดังนั้นเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะจึงมีขนาดเท่ากับ $2n$-1 เขียนสมการที่ 3.27 ใหม่ เพื่อใช้หาค่าเพิ่มขึ้นของตัวแปรสถานะได้ดังสมการที่ 3.28

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \text{----} \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ A \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \\ \Delta I \\ \\ \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

เนื่องจากเมตริกซ์ A ไม่ได้เป็นเมตริกซ์จตุรัส (Square Matrix) แต่จะเป็นเมตริกซ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular Matrix) โดยจะมีจำนวนแถวเท่ากับจำนวนสายส่งที่มีโหลดเกิน และจำนวนหลักเท่ากับ $2n$-1 จึงไม่สามารถหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ A ได้โดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากเมตริกซ์ที่สามารถหาอินเวอร์สได้จะต้องเป็นเมตริกซ์จตุรัสเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องใช้แนวคิดของอินเวอร์สเทียม (Pseudoinverse) [19] มาใช้ในการหาอินเวอร์สของเมตริกซ์ A โดยสามารถหาอินเวอร์สเทียมของเมตริกซ์ A ได้จากสมการที่ 3.29

$$A^{+} = A^{T}(AA^{T})^{-1} \tag{3.29}$$

โดยที่ A^{+} = อินเวอร์สเทียมของเมตริกซ์ A

2. ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเพิ่มของกำลังผลิตและโหลดกับการเพิ่มของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส

กำลังไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าสู่บัส จะเป็นฟังก์ชั่นของขนาดและมุมเฟสของแรงดันบัส สมมติว่ามุมเฟสและขนาดของแรงดันบัส $[\delta', V]^T$ สอดคล้องกับสมการโหลดโฟลว์เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ถูกจ่ายเข้าสู่บัส j มีค่า P'_j และ Q'_j โดยใช้การกระจายอนุกรมเทเลอร์ กระจายฟังก์ชั่น P_j และ Q_j รอบๆ $[\delta', V]^T$ และไม่คิดเทอมอันดับสองขึ้นไป จะได้ดังสมการที่ 3.30 และสมการที่ 3.31 ตามลำดับ

$$\Delta P_j = \frac{\partial P_j}{\partial \delta_1}\Delta\delta_1 + \ldots \frac{\partial P_j}{\partial V_1}\Delta V_1 + \ldots \qquad (3.30)$$

$$\Delta Q_j = \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_1}\Delta\delta_1 + \ldots \frac{\partial Q_j}{\partial V_1}\Delta V_1 + \ldots \qquad (3.31)$$

โดยที่

ΔP_j = ค่าเพิ่มขึ้นของกำลังจริงที่จ่ายเข้าบัส j ที่ต้องการ

ΔQ_j = ค่าเพิ่มขึ้นของกำลังรีแอคทีฟที่จ่ายเข้าบัส j ที่ต้องการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อเขียนสมการแบบเดียวกับสมการที่ 3.30 และสมการที่ 3.31 สำหรับทุกบัสยกเว้นบัสสวิง โดยแสดงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ จะได้ดังสมการที่ 3.32 และสมการที่ 3.33 โดยในสมการที่ 3.33 จะใช้ $\Delta V/V$ แทน V ในเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \hline \Delta Q \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \partial P/\partial\delta & \partial P/\partial V \\ \hline \partial Q/\partial\delta & \partial Q/\partial V \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \hline \Delta V \end{bmatrix} \qquad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ ---- \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ J' \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ ---- \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \qquad (3.33)$$

จากสมการที่ 3.33 เมื่อใช้หลักการของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์แบบฟาสดีคัปเปิล ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้สามารถแยกสมการที่ 3.33 ออกได้เป็นสมการ 2 ชุด คือ สมการที่ 3.34 และสมการที่ 3.35

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta\delta] \qquad (3.34)$$

$$[\Delta Q/V] = [B'''][\Delta V] \qquad (3.35)$$

โดยสมการที่ 3.34 จะมีลักษณะเหมือนกับสมการที่ 3.16 ส่วนสมการที่ 3.35 จะคล้ายกับสมการที่ 3.17 แต่จะมีการเพิ่มเติมสมการเข้าไปในส่วนของบัสควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Bus) ทำให้เมตริกซ์ $[B''']$ มีจำนวนสมาชิกมากกว่าเมตริกซ์ $[B'']$ สำหรับ ΔP และ ΔQ ที่ใช้ในสมการที่ 3.34 และ 3.35 จะหมายถึงค่าเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าที่จะจ่ายเข้าบัสที่ต้องการ เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน ไม่ได้หมายถึงค่าคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า (Power Mismatch)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัสใดๆ จะหมายถึงค่าแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตที่บัสนั้นกับโหลดที่ต่ออยู่กับบัสนั้น ค่าเพิ่มขึ้นของกำลังจริงที่จ่ายเข้าสู่บัส P_j ที่บัส j สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.36

$$\Delta P_j = \Delta P_{Gj} + \Delta P_{Lj}$$

$$= (P'_{Gj} - P''_{Gj}) - (P'_{Lj} - P''_{Lj}) \qquad (3.36)$$

เมื่อ $0 \le |\Delta P_{Gj}| \le |\Delta P_j|$ และ $0 \le |\Delta P_{Lj}| \le |\Delta P_j|$

โดยที่

P''_{Gj} = กำลังผลิตตามที่กำหนด (Scheduled Generation) ที่บัส j ก่อนจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

P''_{Lj} = โหลดที่ต่ออยู่กับบัส j ก่อนจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

P'_{Gj} = กำลังผลิตที่ต้องการที่บัส j เพื่อจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

P'_{Lj} = กำลังจริงซึ่งสามารถจ่ายให้แก่บัส j ได้ หลังจากที่ได้แก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินแล้ว

ΔP_{Gj} = ค่าเปลี่ยนแปลงของกำลังผลิตที่บัส j ที่ต้องการ เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมี โหลดเกิน

ΔP_{Lj} = ค่าเปลี่ยนแปลงของโหลดที่บัส j ที่ต้องการ เพื่อจะแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

สามารถแยกสมการที่ 3.36 ออกได้เป็นสมการที่ 3.37 และสมการที่ 3.38

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$P'_{Gj} = P''_{Gj} + \Delta P_{Gj} \qquad (3.37)$$

$$P'_{Lj} = P''_{Lj} - \Delta P_{Lj} \qquad (3.38)$$

ที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ จะเพิ่มกำลังผลิตขึ้นโดยใช้สมการที่ 3.37 ทั้งนี้กำลังผลิตจะเพิ่มขึ้นได้ไม่เกินค่ากำลังผลิตสำรองเดินเครื่อง (Spinning Reserve) สูงสุด จากนั้นจึงพิจารณาการตัดโหลดโดยใช้สมการที่ 3.38 ส่วนที่บัสโหลด ΔP_{Lj} จะมีค่าเท่ากับ ΔP_j และจะใช้สมการที่ 3.37 ในการคำนวณค่าโหลดที่จะถูกตัด ส่วนสมการที่ 3.38 จะไม่ถูกนำมาใช้ที่บัสโหลด

สำหรับกรณีของกำลังรีแอคทีฟ สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 3.39 และสมการที่ 3.40

$$Q'_{Gj} = Q''_{Gj} + \Delta Q_{Gj} \qquad (3.39)$$

$$Q'_{Lj} = Q''_{Lj} - \Delta Q_{Lj} \qquad (3.40)$$

เนื่องจากการผลิตกำลังรีแอคทีฟนั้น อาจจะไม่มีการผลิตที่บัสนั้นหรือหากผลิตได้ก็ไม่สามารถที่จะกำหนดกำลังผลิตได้ ดังนั้น ΔQ_{Gj} ที่ทุกบัส จึงมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้สมการที่ 3.39 ไม่มีความจำเป็นในที่นี้ ส่วนสมการที่ 3.40 จะใช้ในการหาโหลดรีแอกทีฟที่จะต้องถูกตัด โดยให้ ΔQ_{Lj} เท่ากับ ΔQ_j

3.9.3 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน

การแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินด้วยวิธีการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่และการตัดโหลด จะใช้สมการหลัก คือ สมการที่ 3.16 ,3.17 ,3.28 ,3.34 และ 3.35 ซึ่งจะนำมาเขียนรวมกันใหม่ในที่นี้ เป็นสมการที่ 3.41 ถึงสมการที่ 3.45 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta\delta] \tag{3.41}$$

$$[\Delta Q/V] = [B''][\Delta V] \tag{3.42}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ ---- \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta I \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

$$[\Delta P/V] = [B'][\Delta\delta] \tag{3.44}$$

$$[\Delta Q/V] = [B'''][\Delta V] \tag{3.45}$$

สำหรับขั้นตอนการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินโดยใช้วิธีการจัดสรรกำลังผลิตใหม่และการตัดโหลด จะมีขั้นตอนการคำนวณดังต่อไปนี้

1. คำนวณโหลดโฟลว์เริ่มต้น โดยใช้สมการที่ 3.41 และสมการที่ 3.42

2. คำนวณหากระแสในสายส่ง ถ้าไม่มีสายส่งใดมีโหลดเกิน ให้ข้ามไปยังขั้นที่ 10 ถ้าจำนวนรอบในการคำนวณเกินกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ ให้ข้ามไปยังขั้นที่ 9 ส่วนกรณีอื่นให้ทำในขั้นที่ 3

3. สร้างเมตริกซ์ A , เมตริกซ์ A^+ จากสมการที่ 3.29 และเวกเตอร์กระแสเกิน $[I]$

4. คำนวณหาค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสและขนาดของแรงดันบัส โดยใช้สมการที่ 3.43

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. คำนวณหา [$\Delta P/V$] และ [$\Delta Q/V$] โดยใช้สมการที่ 3.44 และ 3.45

6. คำนวณหาการจัดสรรกำลังผลิตและโหลดใหม่

7. คำนวณหาค่าของตัวแปรสถานะใหม่ โดยใช้ค่าเพิ่มขึ้นของมุมเฟสและขนาดของแรงดันบัสที่ได้จากขั้นที่ 4

8. คำนวณโหลดโฟลว์ โดยใช้ค่าแรงดันบัส,กำลังผลิตและโหลดค่าล่าสุด แล้วกลับไปยังขั้นที่ 2

9. ตัดโหลดที่บัสที่ต่ออยู่กับสายส่งที่มีโหลดเกินซึ่งกำลังไฟฟ้าไหลเข้าสู่บัสนั้น เป็นจำนวนเท่ากับ MVA ที่เกิน และลดกำลังผลิตที่บัสที่ต่อกับสายส่งนั้นซึ่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสายส่งเป็น จำนวน MVA ที่เกิน

10. คำนวณหากำลังผลิตที่บัสสวิง ถ้าไม่เกินค่าพิกัดจะจบการคำนวณ แต่ถ้าเกินค่าพิกัด ให้ตัดโหลดที่บัสสวิง และ/หรือ บัสที่กำลังไฟฟ้าไหลไปจากบัสสวิง

การคำนวณจากขั้นที่ 2 ถึงขั้นที่ 8 จะถือว่าเป็นรอบของการแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกิน ซึ่งในการคำนวณจะกำหนดจำนวนรอบสูงสุดเอาไว้ค่าหนึ่ง เพื่อเป็นการจำกัดเวลาในการคำนวณ สำหรับการคำนวณหาการจัดสรรกำลังผลิตและโหลดใหม่ในขั้นที่ 6 นั้นสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 3.46 ถึง 3.49

- ที่บัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ i (ยกเว้นบัสสวิง)

$$P_{Ginew} = P_{Giold} + P_i \tag{3.46}$$

$$P_{Linew} = P_{Liold} - [P_i - (P_{Ginew} - P_{Gimax})] \tag{3.47}$$

เมื่อ $P_{Ginew} > P_{Gimax}$

โดยที่ $0 < P_{Ginew} < P_{Gimax}$ และ $0 < P_{Linew} < P_{Limax}$

- ที่บัสโหลด i

$$P_{Linew} = P_{Liold} - P_i \tag{3.48}$$

โดยที่ $0 < P_{Linew} < P_{Limax}$

- ที่บัสใดๆ (ยกเว้นบัสสวิง)

$$Q_{Linew} = Q_{Liold} - Q_i \tag{3.49}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยที่ $0 < Q_{Linew} < Q_{Limax}$ เมื่อโหลดกำหนดเริ่มต้นเป็นแบบอินดักทีฟ

$Q_{Limin} < P_{Linew} < 0$ เมื่อโหลดกำหนดเริ่มต้นเป็นแบบคะปาซิทีฟ

กำหนดให้ P_{Gimax} คือผลรวมของกำลังผลิตและกำลังผลิตสำรองเดินเครื่อง ที่บัส i

P_{Limax} คือโหลดกำลังจริงที่กำหนดเริ่มต้น ที่บัส i

การคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้

ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ค่าดัชนีบัส (Bus Indices) และ ค่าดัชนีระบบ (System Indices) ซึ่งค่าดัชนีทั้ง 2 ชุดจะถูกนำมาใช้ร่วมกันเพื่อแสดงถึงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม โดยค่าดัชนีบัสจะแสดงถึงความเพียงพอของกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ถูกจ่ายให้กับบัสแต่ละบัส จะแสดงให้เห็นบัสที่เป็นจุดอ่อนของระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบหรือปรับปรุงระบบต่อไป ส่วนค่าดัชนีระบบจะแสดงถึงความสามารถของระบบที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าผ่านระบบส่งไปยังบัสต่าง ๆทั้งหมดของระบบ

ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยบัสรับกำลังไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งแต่ละบัสเหล่านี้จะมีชุดของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ที่แตกต่างกันออกไป สำหรับค่าดัชนีพื้นฐานได้แก่ ความน่าจะเป็นของการขัดข้อง (Probability of Failure) และ ความถี่ของการขัดข้อง (Frequency of Failure) ซึ่งจากค่าพื้นฐานนี้ จะสามารถสร้างค่าดัชนีค่าอื่น ๆเพิ่มเติมได้อีกหลายค่า โดยเรียกชุดของค่าดัชนีเหล่านี้ว่าค่าดัชนีบัส แต่ละบัสก็จะมีค่าดัชนีบัสที่ต่างกัน เมื่อนำค่าดัชนีบัสของแต่ละบัสมาประกอบเข้าด้วยกันก็จะได้ชุดของค่าดัชนีอีกชุดหนึ่ง เรียกว่าค่าดัชนีระบบ ซึ่งจะแสดงถึงความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวมทั้งหมด ค่าดัชนีบัสและค่าดัชนีระบบไม่สามารถนำมาใช้แทนกันได้ แต่จะใช้ประกอบกันเป็นค่าดัชนีที่สมบูรณ์ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม โดยที่ค่าดัชนีบัสจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้ากำลัง และใช้ในการเปรียบเทียบรูปแบบของระบบไฟฟ้ากำลังที่ต่างกันและการขยายระบบไฟฟ้าเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังใช้เป็นค่าดัชนีด้านเข้า (Input Indices) ในการศึกษาเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) อีกด้วย ส่วนค่าดัชนีระบบจะถูกนำมาใช้ในการจัดการและวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง โดยจะเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของระบบที่จะจ่ายโหลดได้ตามความต้องการ

1. <u>ค่าดัชนีบัส</u> (Bus Indices)

- Probability of Failure (Q_K)

$$Q_K = \sum P_j P_{Kj} \tag{3.50}$$

- Expected Frequency of Failure (F_K)

$$F_K = \sum P_j P_{Kj} \tag{3.51}$$

โดยที่

j = การเกิดเหตุขัดข้องในระบบ

P_j = ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุขัดข้องที่ j

F_j = ความถี่ของการเกิดเหตุขัดข้องที่ j

P_{Kj} = ความน่าจะเป็นที่โหลดที่บัส K จะมีค่าเกินกว่าค่าโหลดสูงสุด ซึ่งสามารถจ่ายให้แก่บัสนั้น ในขณะที่เกิดเหตุขัดข้อง j

- Expected Number of Voltage Violation ($ENVV$)

$$ENVV = \sum_{j \in V} F_j \tag{3.52}$$

- Expected Number of Load Curtailments ($ENLC$)

$$ENLC = \sum_{j \in x,y} F_j \tag{3.53}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- **Expected Load Curtailed** (*ELC*)

$$ELC = \sum_{j \in x,y} L_{Kj} F_j \ \text{MW} \tag{3.54}$$

- **Expected Energy not Supplied** (*EENS*)

$$EENS = \sum_{j \in x,y} L_{Kj} D_{Kj} F_j \ \text{MWh} \tag{3.55}$$

- **Expected Duration of Load Curtailment** (*EDLC*)

$$\begin{aligned} EDLC &= \sum_{j \in x,y} D_{Kj} F_j \quad \text{hours} \\ &= \sum_{j \in x,y} P_j \times 8760 \quad \text{hours} \end{aligned} \tag{3.56}$$

โดยที่ $j \in V$ หมายถึง ทุกเหตุขัดข้องที่ทำให้แรงดันบัสที่บัส K ไม่อยู่ในช่วงที่ได้กำหนดไว้

$j \in x$ หมายถึง ทุกเหตุขัดข้องที่ทำให้สายส่งมีโหลดเกิน ซึ่งจะถูกแก้ไขโดยการตัดโหลดที่บัส K

$j \in y$ หมายถึง ทุกเหตุขัดข้องที่ทำให้บัส K แยกออกจากระบบ

L_{Kj} หมายถึง โหลดที่ถูกตัดออกที่บัส K เพื่อแก้ไขปัญหาสายส่งมีโหลดเกินเนื่องจากการเกิดเหตุขัดข้อง j ; หรือโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายที่บัส K ซึ่งแยกออกจากระบบ เนื่องจากการเกิดเหตุขัดข้อง j

D_{Kj} หมายถึง ระยะเวลาเป็นชั่วโมงของการตัดโหลดที่บัส K เนื่องจากการเกิดเหตุขัดข้อง j ; หรือ ระยะเวลาเป็นชั่วโมงของการตัดโหลดที่บัส K ซึ่งแยกออกจากระบบ เนื่องจากการเกิดเหตุขัดข้อง j

- Maximum Load Curtailed (*MLC*)

$$MLC = \text{Max}\{L_{K1}, L_{K2}, \ldots, L_{Kj}, \ldots\} \qquad (3.57)$$

- Maximum Energy Curtailed (*MEC*)

$$MEC = \text{Max}\{L_{K1}D_{K1}, L_{K2}D_{K2}, \ldots, L_{Kj}D_{Kj}, \ldots\} \qquad (3.58)$$

- Maximum Duration of Load Curtailment (*MDLC*)

$$MDLC = \text{Max}\{D_{K1}, D_{K2}, \ldots, D_{Kj}, \ldots\} \qquad (3.59)$$

- Average Load Curtailed (*ALC*)

$$ALC = \frac{\sum_{j \in x,y} L_{Kj} F_j}{\sum_{j \in x,y} F_j} \quad \text{MW / curtailment} \qquad (3.60)$$

- Average Energy not Supplied (*AENS*)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$AENS = \frac{\sum_{j \in x,y} L_{Kj} D_{Kj} F_j}{\sum_{j \in x,y} F_j} \quad \text{MWh / curtailment} \qquad (3.61)$$

- Average Duration of Load Curtailment (*ADLC*)

$$ADLC = \frac{\sum_{j \in x,y} D_{Kj} F_j}{\sum_{j \in x,y} F_j} \quad \text{hours / curtailment} \qquad (3.62)$$

2. ค่าดัชนีระบบ (System Indices)

- Bulk Power Interruption Index

$$BPII = \frac{\sum_{K}\sum_{j\in x,y} L_{Kj}F_j}{L_S} \tag{3.63}$$

โดยที่ L_S หมายถึง โหลดรวมของระบบ

- Bulk Power Supply Average MW Curtailment/Disturbance

$$BPAC = \frac{\sum_{K}\sum_{j\in x,y} L_{Kj}F_j}{\sum_{j\in x,y} F_j} \tag{3.64}$$

- Bulk Power Energy Curtailment Index

$$BPECI = \frac{\sum_{K}\sum_{j\in x,y} L_{Kj}D_{Kj}F_j}{L_S} \tag{3.65}$$

- Modified Bulk Power Energy Curtailment Index

$$MPECI = \frac{\sum_{K}\sum_{j\in x,y} L_{Kj}D_{Kj}F_j}{8760 L_S} \tag{3.66}$$

- Severity Index

$$SI = \frac{\sum_{K}\sum_{j\in x,y} 60 L_{Kj}D_{Kj}F_j}{L_S} \tag{3.67}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย