บทที่ 3

การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการผลิตและระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยวิธีการเดิม

ในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการผลิต (HL1) จะเป็นดัชนีบ่งชี้ว่ากำลังการผลิตของระบบสามารถจะตอบสนองความต้องการกำลัง และพลังงานไฟฟ้าได้มากน้อยเพียงไร โดยไม่คำนึงถึงว่าถ้าสายส่งขนาดใหญ่ในระบบเกิดขัดข้อง หรือโครงสร้างของระบบสายส่ง (Network topology) เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อการส่งกำลังและพลังงานไฟฟ้าไปสู่สถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) หรือจุดผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างไร ดังนั้นการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการผลิตและสายส่งกำลังไฟฟ้า (Composite generation and transmission systems) จึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการนำมาประกอบการออกแบบวางแผนระยะยาว หรือในการปฏิบัติการระบบ แบบจำลองที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ระดับนี้จึงควรประกอบด้วยข้อมูลสำหรับการพิจารณาทั้งในด้านสแตติด (Static) และไดนามิค (Dynamic)

การวิเคราะห์ค่าดัชนีในด้านสแตติค เป็นการศึกษาถึงความสามารถของระบบในด้านการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับความต้องการโหลดของระบบตามที่ได้รับการออกแบบ หรือกำหนดไว้ เรียกการวิเคราะห์ในลักษณะนี้ว่า "การประเมินค่าความเพียงพอ" (Adequacy evaluation) ส่วนการวิเคราะห์ในด้านไดนามิคเรียกว่า "การประเมินค่าความมั่นคง" (Security evaluation) เกี่ยวข้องกับการพิจารณาถึงความสามารถในการตอบสนองของระบบกรณีเกิดเหตุการณ์ขัดข้องในสถานการณ์ต่างๆ กัน [1,3,4] ซึ่งแบบจำลองสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ค่าดัชนีทั้งสองประเภทดังกล่าวจะแตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจเฉพาะการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในด้านความเพียงพอเท่านั้น

การหาค่าดัชนีความเชื่อได้ของระบบการผลิตและสายส่งกำลังไฟฟ้า ในด้านความเพียงพอ โดยวิธีความน่าจะเป็นที่ใช้กันอยู่ปกติทั่วไปจะเป็นวิธีการ "Analytical enumeration method" นอกจากนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ (Large power sys-

tems) แล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเชื่อมโยง (Interconnected systems) ได้อีกด้วย เนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทนี้จะเสนอหลักการแนวความคิด วิธีการและผลที่ต้องการในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการผลิตและสายส่งกำลังไฟฟ้า แบบวิธีการเดิมที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบัน (Conventional method) และหลักการดังกล่าวจะถูกนำไปประยุกต์ใช้ในวิธีการแอดดิเควชีอิควิวาเล็นตส์

3.1 ข้อสมมุติฐานของแบบจำลอง

องค์ประกอบย่อยในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ของระบบการผลิตและสายส่งกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่งขนาดใหญ่ และหม้อแปลงไฟฟ้า การสร้างแบบจำลองสำหรับองค์ประกอบย่อยแต่ละองค์ประกอบ หรือกลุ่มขององค์ประกอบย่อยที่ส่งผลเกี่ยวเนื่องกันในขณะเกิดเหตุการณ์ขัดข้องชนิดต่าง ๆ และรวมผลของการซ่อมบำรุงรักษา (Scheduled maintenance) ในแต่ละองค์ประกอบย่อยสามารถหาได้โดยใช้วิธีการคำนวณดังอธิบายในหัวข้อ 2.3 ปกติในการคำนวณจะกำหนดให้แบบจำลองขององค์ประกอบย่อย ประกอบด้วย 2 สถานะ คือ สถานะดี(0) และสถานะเสีย(1) ค่าความน่าจะเป็นของแต่ละองค์ประกอบย่อยที่อยู่ในสถานะเสียจะถูกกำหนดด้วยค่า FOR (Forced outage rate) โดยค่า FOR สำหรับแต่ละองค์ประกอบย่อยจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทขององค์ประกอบนั้น ๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทเดียวกันเมื่อขนาดกำลังผลิตสูงขึ้น ค่า FOR จะเพิ่มขึ้น หรือค่า FOR ควรจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดความยาวของสายส่งยาวขึ้น เป็นต้น

เมื่อได้แบบจำลองขององค์ประกอบย่อยแล้ว ปัญหาที่สำคัญก็คือ เนื่องจากในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ที่มีองค์ประกอบย่อยเป็นจำนวนมาก พฤติกรรมในกรณีเกิดเหตุการณ์ขัดข้องที่ประกอบด้วยการเกิดขัดข้องในองค์ประกอบย่อยพร้อมกันมากกว่า 1 องค์ประกอบขึ้นไป อาจจะเป็นผลสืบเนื่องกันหรือไม่เกี่ยวข้องกันก็ได้ การสรุปพฤติกรรมในลักษณะกล่าวลงไปชัดเจนอย่างใดอย่างหนึ่งในการคำนวณอาจให้ผลที่ไม่สมบูรณ์นัก แต่ถ้าเป็นการใช้ศึกษาหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในลักษณะเป็น Relative indices แล้ว ผลการคำนวณเป็นที่ยอมรับได้ สำหรับเงื่อนไขในการประเมินค่าความเชื่อถือได้โดยวิธีความน่าจะเป็น ในกรณีเกิดขัดข้องในองค์ประกอบย่อยหลายองค์ประกอบพร้อมกันที่ใช้กันอยู่ทั่วไปคือ การเกิดขัดข้องในแต่ละองค์ประกอบย่อยเป็นอิสระ

ต่อกัน (Independent outages) ในแต่ละสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้อง องค์ประกอบย่อย สามารถเกิดการขัดข้องพร้อมกัน (Overlap)ได้หลายองค์ประกอบโดยไม่เกี่ยวเนื่องกัน สมมุติฐานดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการกำหนดจำนวนสถานะของระบบต่อไป

3.2 สถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องในระบบ

ระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยองค์ประกอบย่อยแทนด้วยแบบจำลอง 2 สถานะ จำนวนรวม e องค์ประกอบย่อย และการเกิดขัดข้ององค์ประกอบย่อยในแต่ละสถานะเป็นอิสระต่อกัน จะมีแบบจำลองรวมของระบบที่เป็นไปได้จำนวน 2^e สถานะ โดยแต่ละสถานะมีความน่าจะเป็นและความถี่ที่จะเกิดดังสมการที่ 3.1-3.3 เมื่อ k เป็นจำนวนองค์ประกอบย่อยที่ทำงานในสถานะปกติ(0) และจำนวน l องค์ประกอบย่อยอยู่ในสถานะเกิดขัดข้อง(1) นอกจากนี้เพื่อเป็นการลดจำนวนสถานะที่จะใช้คำนวณต่อไป ถ้าสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องได้ส่งผลกระทบต่อระบบเหมือนกัน สามารถรวมสถานะดังกล่าวเข้าด้วยกันโดยสมการที่ 3.4-3.5

$$p_s = \prod_{i=1}^{k} R_i \prod_{j=1}^{l} Q_j \qquad \text{....(3.1)}$$

$$f_s = p_s * (\text{Departure rate from state s}) \qquad \text{....(3.2)}$$

$$\text{Departure rate from state s} = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i + \sum_{j=1}^{l} \mu_j \qquad \text{....(3.3)}$$

$$\text{Departure rate to up state} = \lambda_+ = \sum_{j=1}^{l} \mu_j$$

$$\text{Departure rate to down state} = \lambda_- = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i$$

$$P_s = \sum_{i=1}^{n} p_i \qquad \text{....(3.4)}$$

$$F_s = \sum_{i=1}^{n} f_i \qquad \text{....(3.5)}$$

โดย R_i หมายถึง ความพร้อมใช้งานในระยะยาว (Long term availability) ของสถานะ"ดี"(0) ขององค์ประกอบย่อย i

Q_j หมายถึง ความไม่พร้อมใช้งานในระยะยาว (Long term unavailability) ของสถานะ"เสีย"(1) หรือ FOR ขององค์ประกอบย่อย j

λ_i หมายถึง อัตราการเสีย (Failure rate) ขององค์ประกอบย่อย i

μ_j หมายถึง อัตราการซ่อมแซม (Repair rate) ขององค์ประกอบย่อย j

P_s, p_s หมายถึง ความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่จะเกิดสถานะ S,s

F_s, f_s หมายถึง ความถี่ที่จะเกิดสถานะ S,s

สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่จะมีองค์ประกอบย่อยในระบบเป็นจำนวนมาก เช่น ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE-RTS [10] 24 บัส ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 32 หน่วย สายส่งกำลังไฟฟ้าขนาดใหญ่ 33 หน่วย และหม้อแปลงไฟฟ้า 5 หน่วย จะมีจำนวนสถานะทั้งหมด $2^{(32+33+5)}$ สถานะ ซึ่งมีค่าสูงมาก ทำให้การคำนวณหาโหลดโฟลว์และค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในแต่ละสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องโดยคอมพิวเตอร์ต้องใช้เวลานานมากเกินไป และเกินความจำเป็น ในบางสถานะซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดสถานะนั้นต่ำมากหรือโอกาสที่เกิดการขัดข้องในองค์ประกอบย่อยพร้อมกันเป็นจำนวนมากซึ่งในทางปฏิบัติคงเป็นไปไม่ได้ ดังนั้นจึงต้องกำหนดระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้อง (Contingency level)เพื่อลดสถานะดังกล่าว การกำหนดระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องในระบบให้เหมาะสม จะขึ้นอยู่กับขนาดของระบบ ค่าความน่าจะเป็นและความถี่ที่เหตุการณ์นั้นจะเกิดขึ้น การกำหนดระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องที่ต่ำเกินไปจะทำให้ความน่าจะเป็นรวมของสถานะที่ได้รับการพิจารณาผิดพลาดไปจากความจริงมาก ขณะเดียวกันเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณจะสูงขึ้นมากเมื่อเลือกระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องสูงขึ้น

ดังนั้นการเลือกสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้อง เพื่อพิจารณาในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้เกณฑ์การตัดออก(Cut off criteria) ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบที่ใช้ในการพิจารณา

อุปกรณ์ที่เกิดเหตุขัดข้อง	ระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของสายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า
1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	1-4	-
2. สายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า	-	1-2
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้า*	1-3	1-2

*ระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่งหรือหม้อแปลงไฟฟ้าไม่เกิน 4

1. กำหนดระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องดังแสดงในตารางที่ 3.1 การกำหนดระดับดังกล่าวได้จากเอกสารอ้างอิง [11] ศึกษาผลของการกำหนดระดับการเกิดเหตุการณ์ขัดข้อง ที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนสถานะรวมที่ได้รับการพิจารณาในระบบ IEEE-RTS สถานะที่มีการเกิดขัดข้องขององค์ประกอบย่อยมากกว่าค่าในตารางที่ 3.1 จะไม่ถูกนำมาพิจารณา

2. เมื่อรวมค่าความน่าจะเป็น ความถี่ ของสถานะที่เหมือนกัน (Identical states) โดยสมการที่ 3.4-3.5 แล้ว ถ้าสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องนั้นมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นต่ำกว่า 10^{-8} และความถี่ที่จะเกิดขึ้นต่ำกว่า 10^{-6} จะถูกตัดออกจากการพิจารณา

3.3 เนทเวอร์คโฟลว์ (Network Flow) และขั้นตอนการหากำลังการไหลสูงสุด (Maximum Flow Algorithm)

การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งจากแหล่งผลิตไปยังโหลดบัสต่าง ๆ ภายในระบบ ปกติแล้วสามารถเลือกใช้เทคนิคการหาโหลดโฟลว์ให้เหมาะสมและสอดคล้องกับผลที่ต้องการ ซึ่งอาจจะเป็น A.C.load flow, D.C.load flow หรือเนทเวอร์คโฟลว์ก็ได้ แต่เนื่องจากในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ จำนวนสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องที่จะต้องพิจารณามีอยู่เป็นจำนวนมาก การใช้วิธี A.C. load flow จะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากเกินไป การใช้ D.C. load flow หรือเนทเวอร์คโฟลว์ ซึ่งพิจารณาเฉพาะค่ากำลังไฟฟ้าจริง สามารถให้ผลการคำนวณอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [5,6] ขณะที่เวลาที่ใช้ในการคำนวณของคอมพิวเตอร์จะต่ำกว่าวิธี A.C. load flow ค่อนข้างมาก

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิธีการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้าส่วนย่อย โดยแทนส่วนของระบบไฟฟ้าที่อยู่นอกเหนือจากระบบไฟฟ้าส่วนย่อยที่สนใจด้วยแบบจำลองแอดดิเควชีอิควิวาเล็นตส์ ซึ่งในการหาโหลดโฟลว์ของระบบไฟฟ้าส่วนย่อย และแบบจำลองจะแยกออกจากกันอย่างเด็ดขาด การใช้วิธี A.C.load flow และ D.C.load flow ในการคำนวณแต่ละครั้งจะต้องเกี่ยวข้องกับค่าตัวแปรต่าง ๆ ของทั้งระบบ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์กับวิธีการคำนวณโดยการสร้างแบบจำลองดังกล่าว และเพื่อให้เกิดความสะดวกในการเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้โดยวิธีแอดดิเควชีอิควิวาเล็นตส์ และวิธีการเดิมซึ่งคำนวณทั้งระบบ เทคนิคการหาโหลดโฟลว์โดยวิธีเนทเวอร์คโฟลว์หรือลิเนียร์กราฟโฟลว์จึงถูกเลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นอกเหนือจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณของคอมพิวเตอร์จะต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการหาโหลดโฟลว์โดยวิธีอื่นแล้ว เนทเวอร์คโฟลว์ยังสะดวกต่อการใช้แก้ปัญหาของเหตุการณ์ที่เกิดเหตุขัดข้องบางเหตุการณ์ซึ่งเป็นปัญหาเมื่อใช้วิธีอื่น เช่น เหตุการณ์ขัดข้องที่ก่อให้เกิดโครงสร้างของระบบเป็นแบบ Islanding [3] แต่ข้อเสียของเนทเวอร์คโฟลว์คือ ในการคำนวณจะยึดหลักกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟเท่านั้น ไม่คำนึงถึงปัญหาเรื่องแรงดันที่บัสต่าง ๆ ในระบบ ดังนั้นจึงมีข้อบกพร่องเมื่อใช้คำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ที่มีสายส่งยาว และไม่มีการชดเชยกำลังรีแอคทีฟทำให้เกิดปัญหาแรงดันตก (Voltage drop) ซึ่งส่งผลให้การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้เนื่องจากปัญหาแรงดันไม่ได้รับการพิจารณา

การหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้รับในแต่ละโหลดบัสโดยวิธีเนทเวอร์คโฟลว์ในที่นี้จะใช้ขั้นตอนวิธีการหากำลังไฟฟ้าไหลในระบบสูงสุด (Maximum-Flow / Minimum-Cut Algorithm) [12,13] ดังมีรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1

3.3.1 วิธีเนทเวอร์คโฟลว์ (Network flow method)

แบบจำลองลิเนียร์เนทเวอร์คโฟลว์ หรือ แบบจำลองทรานสปอร์ตเตชั่นเนทเวอร์ค (Transportation network model)เป็นแบบจำลองเนทเวอร์คที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายวัตถุสิ่งของ หรืออื่น ๆ จากส่วนหนึ่งของเนทเวอร์คที่เรียกว่า Source ไปยังอีกส่วนหนึ่งของเนทเวอร์คที่เรียกว่า Sink การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถประมาณเป็นแบบจำลองลิเนียร์เนทเวอร์คโฟลว์ได้ การหาคำตอบจะเกี่ยวข้องกับความต่อเนื่องของการส่งกำลังการผลิตจากส่วนการผลิตของระบบ (Sources) ไปยังโหลดบัสของระบบ (Sinks) ข้อจำกัด (Constraints) ของระบบประกอบด้วยขนาดกำลังการผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขนาดของสายส่ง (Transmission capacity)

การหาคำตอบของวิธีเนทเวอร์คโฟลว์ที่นิยมใช้มี 2 วิธีหลัก คือ การหากำลังการไหลสูงสุด (Maximum Flow Problem) และ Linear Programming Problem [5] ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ขั้นตอนวิธีการหากำลังไฟฟ้าไหลในระบบสูงสุด สมการคณิตศาสตร์และข้อจำกัดของวิธีการดังกล่าวจะอธิบายในรายละเอียดต่อไป

กำหนดให้กราฟเนทเวอร์คของระบบไฟฟ้ากำลัง G = [N;L] เมื่อ N แทนเซ็ตของปม (Nodes/Vertexs=Busbars) ของระบบ, L แทนเซ็ตของเส้นกราฟเชื่อม (Links\ Arcs

= Transmission Lines or/and Transformer Links) และเส้นกราฟเชื่อม (i,j) เชื่อมระหว่างปม i และ j มีความสามารถในการผลิต หรือส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุด C(i,j) โดยสมมุติว่าให้เนทเวอร์คประกอบด้วย แหล่งผลิตกำลังไฟฟ้าเพียงแห่งเดียว (Source) s จุดรวมโหลดแหล่งเดียว (Sink) t และกำลังไฟฟ้า v ไหลจาก s ไป t ในเนทเวอร์ค G เป็นกำลังไฟฟ้าจริง การไหลรวมของกำลังไฟฟ้าที่ปมต่าง ๆ ในเนทเวอร์คแสดงด้วยฟังก์ชั่น f ในสมการที่ 3.6 ภายใต้เงื่อนไข (Constraints) ในสมการที่ 3.7-3.9

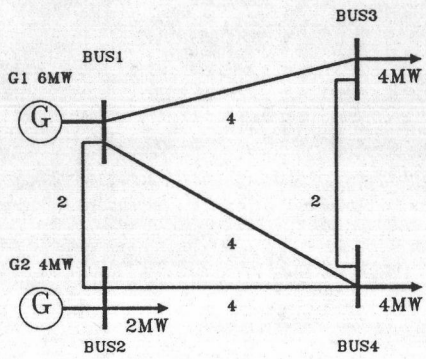
$$\sum_{j\in A(i)} f(i,j) - \sum_{j\in B(i)} f(j,i) = \begin{cases} v, & i = s \\ 0, & i \neq s,\ i \neq t \\ -v, & i = t \end{cases} \qquad \ldots.(3.6)$$

$$|f(i,j)| \leqslant |c(i,j)| \quad \text{for all } (i,j)\in L \qquad \ldots.(3.7)$$

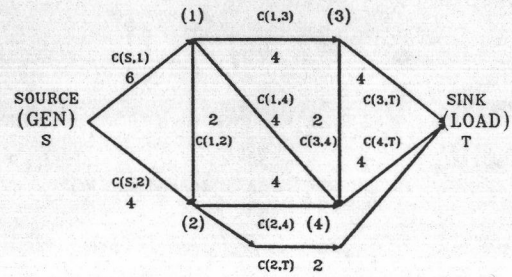
$$A(i) = (j\in N \mid (i,j)\in L);\ \text{inflow} \qquad \ldots.(3.8)$$

$$B(i) = (j\in N \mid (j,i)\in L);\ \text{outflow} \qquad \ldots.(3.9)$$

ในทางปฏิบัติระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบด้วย บัสแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้า (Sources) และโหลดบัส (Sinks) มากกว่า 1 แหล่ง แต่ปัญหาดังกล่าวไม่ใช่อุปสรรคในการใช้วิธีเนทเวอร์คโฟลว์ ปมที่เป็นแหล่งผลิตหรือปมที่เป็นโหลดบัสสามารถรวมเข้าด้วยกันเป็นปมเดียว และใช้วิธีการและเงื่อนไขเช่นเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ค่าขนาดของโหลด สายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกกำหนดในหน่วย MW.



รูปที่ 3.1ก. ตัวอย่างของระบบไฟฟ้า 4 บัส



รูปที่ 3.1ข.กราฟแสดงเนทเวอร์ค ของระบบไฟฟ้า 4 บัส

วิธีการแก้ปัญหาของเนทเวอร์คโฟลว์ โดยการหากำลังไฟฟ้าไหลสูงสุด (Maximum flow) คือ การหาค่ากำลังไฟฟ้า v สูงสุดที่สามารถผ่านเส้นกราฟเชื่อมต่าง ๆ ภายใต้ข้อจำกัดในสมการที่ 3.6-3.9 ดังนั้นขั้นตอนวิธีในการหากำลังไฟฟ้าไหลสูงสุดคือ กระบวนการคำนวณหาค่าการเพิ่มของกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านเส้นกราฟจากแหล่งผลิตไปยังโหลด (Flow augmenting paths) จนกระทั่งค่ากำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านเป็นค่าสูงสุด โดยขั้นตอนการคำนวณจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก

ขั้นที่ 1 ขั้นตอนวิธีการเขียนกำกับ (Labeling algorithm)

คือการเขียนกำกับ (Label) ปม (Node) ที่มีเส้นกราฟเชื่อมต่อจากปมรวมแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้า (S) ไปยังปมรวมของโหลด (T) โดยเส้นทางระหว่างปมเหล่านั้นยังสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าส่งผ่านได้ เริ่มต้นขั้นตอนด้วยการเขียนกำกับปมของเส้นทางใด ๆ ซึ่งสามารถต่อจากปมแหล่งผลิตกำลังไฟฟ้า (S)ไปยังปมของโหลด (T)ได้ โดยปมรวมแหล่งผลิตจะเป็นปมแรกที่ถูกเขียนกำกับเสมอ กระบวนการนี้จะสิ้นสุดต่อเมื่อปมที่อยู่ติดกับปมแหล่งผลิต และปมโหลด (T) ไม่สามารถเขียนกำกับได้ ซึ่งกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ปมรวมโหลดทั้งหมดจะเป็นกำลังไฟฟ้าไหลสูงสุด รายละเอียดของขั้นตอนมีดังนี้

กำหนดให้ปมที่ถูกเขียนกำกับ (Labeled node) ประกอบด้วยค่า i และ Δ เขียนกำกับเป็น (i,Δ) โดย i หมายถึง หมายเลขของปมซึ่งปมที่ถูกเขียนกำกับเชื่อมอยู่และสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านได้ และ Δ หมายถึง ค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถส่งผ่านเพิ่มขึ้นได้จากปม i สู่ปมที่ถูกเขียนกำกับ ซึ่งจะเป็นส่วนใช้ในการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านจากปมรวมแหล่งผลิตไปสู่ปมรวมโหลด

ขั้นตอนที่ 1.1) เลือกปม i (เริ่มต้นที่ปม s เสมอ เขียนกำกับเป็น (s,α)) ที่ถูกเขียนกำกับ $(k,\Delta i)$และยังไม่ได้ถูกตรวจสอบ (Unscaned) พร้อมกับเลือกปม j ทั้งหมดที่เชื่อมต่ออยู่กับปม i และเขียนกำกับปม j เหล่านั้นเป็น $(i,\Delta j)$ โดย Δj จะถูกคำนวณได้จากหลักเกณฑ์ 2 ประการดังนี้

ก. ถ้ากราฟระหว่าง i และ j มีทิศทางที่กำหนดไปสู่ j (เขียนเป็น (i,j)) แล้ว

$$\Delta j = \min(\Delta i,\ C(i,j) - X(i,j)) \qquad \ldots.(3.10)$$

ข. ถ้ากราฟระหว่าง i และ j มีทิศทางที่กำหนดไปสู่ i (เขียนเป็น(j,i)) แล้ว

$$\Delta j = \min(\Delta i,\ C(j,i) + X(j,i)) \qquad \ldots.(3.11)$$

เมื่อ C(i,j) เป็นขนาดของสายส่งที่เชื่อมระหว่างปม i และปม j

X(i,j) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากปม i ไปสู่ปม j

เมื่อเสร็จขั้นตอนดังกล่าว ปม j ถูกเขียนกำกับแล้วแต่ยังไม่ได้ถูกตรวจสอบ (Unscaned)

ขั้นตอนที่ 1.2) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1.1 จนกระทั่งปมโหลดถูกเขียนกำกับ หรือไม่สามารถเขียนกำกับได้

ตัวอย่างการใช้ขั้นตอนการเขียนกำกับ จากกราฟแสดงเนทเวอร์ครูปที่ 3.1ข. มีดังนี้ เริ่มต้นโดยให้กำลังไฟฟ้าที่ไหลในแต่ละสายส่งมีค่าเป็นศูนย์ก่อน เขียนกำกับปม S เป็น (s,α) เขียนกำกับปมที่เชื่อมโยงกับปม S เริ่มต้นที่ปม 1 เขียนกำกับเป็น (s,Δ1) ค่า Δ1 คำนวณได้จากสมการที่ 3.10

$$\Delta 1 = \min(\alpha, C(s,1) - X(s,1)) = \min(\alpha, 6-0) = 6$$

และ $$\Delta 2 = \min(\alpha, C(s,2) - X(s,2)) = \min(\alpha, 4-0) = 4$$

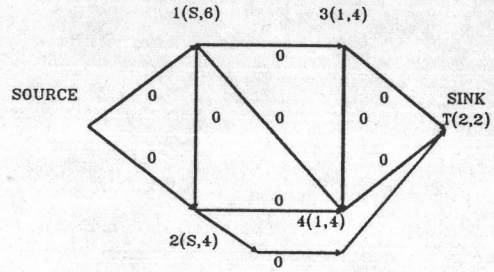
เมื่อปมที่เชื่อมโยงกับปม S ถูกเขียนกำกับทั้งหมด จะถือว่าปม S ได้ถูกตรวจสอบ (Scaned) แล้ว ขั้นตอนต่อไป ปมที่ถูกกำกับแล้วแต่ยังไม่ได้ถูกตรวจสอบคือ ปม 1 และปม 2 จะเริ่มขั้นตอนการถูกตรวจสอบโดยเขียนกำกับปมที่เชื่อมโยงกับปม 1 และ 2 ตามลำดับ ปม 3 ซึ่งต่ออยู่กับปม 1 และยังไม่ได้ถูกเขียนกำกับ จะถูกเขียนกำกับเป็น (1,Δ3) ค่า Δ3 คำนวณได้จากสมการที่ 3.10

$$\Delta 3 = \min(\Delta 1, C(1,3) - X(1,3)) = \min(6, 4-0) = 4$$

$$\Delta 4 = \min(\Delta 1, C(1,4) - X(1,4)) = \min(6, 4-0) = 4$$

$$\Delta T = \min(\Delta 2, C(2,T) - X(2,T)) = \min(4, 2-0) = 2$$

ปม 1 และปม 2 ถูกตรวจสอบแล้ว และปม T ถูกเขียนกำกับเป็น (2,2) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 เป็นการเสร็จขั้นตอนวิธีการเขียนกำกับ เพื่อใช้ในขั้นตอนวิธีการเพิ่มต่อไป



รูปที่ 3.2 กราฟที่ถูกเขียนกำกับของระบบไฟฟ้า 4 บัส ในรอบแรก

ขั้นที่ 2 ขั้นตอนวิธีการเพิ่ม (Augmentation algorithm)

คือการเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างปมรวมแหล่งผลิตและปมรวมโหลด ซึ่งจะถูกกำหนดในขั้นตอนการเขียนกำกับ เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างปมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ปมที่ถูกเขียนกำกับไว้จะถูกลบออกหมด แล้วจึงย้อนกลับไปยังขั้นตอนการเขียนกำกับอีก รายละเอียดของขั้นตอนมีดังนี้

ปมสุดท้าย (T) ซึ่งถูกเขียนกำกับมาแล้ว จากขั้นตอนวิธีการเขียนกำกับ (Labeling algorithm) เป็น $(i,\Delta T)$ นั้น กำลังที่ส่งผ่านจากปมแหล่งผลิตไปยังปมรวมโหลดซึ่งเพิ่มขึ้นจำนวน ΔT ได้ด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 2.1) เริ่มต้นจากปมโหลดโดยกำหนดให้ $j = T$

ขั้นตอนที่ 2.2) ปม j ซึ่งถูกเขียนกำกับเป็น $(i,\Delta j)$ โดยกำลังไหลเพิ่มขึ้นระหว่างปม i และ j จะคำนวณได้จากหลักเกณฑ์ 2 ประการดังนี้

ก. ถ้ากราฟระหว่างปม i และ j มีทิศทางไปยัง j แล้ว

$$X(i,j) = X(i,j) + \Delta T \qquad \ldots.(3.12)$$

ข. ถ้ากราฟระหว่างปม i และ j มีทิศทางไปยัง i แล้ว

$$X(j,i) = X(j,i) - \Delta T \qquad \ldots.(3.13)$$

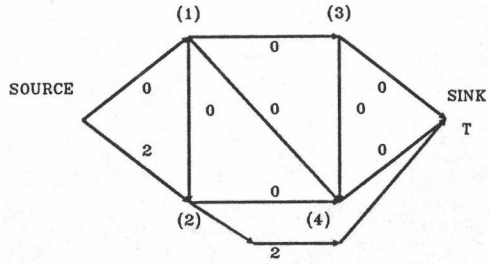
โดย $X(i,j)$ คือกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากปม i ไปปม j

ขั้นตอนที่ 2.3) ขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดต่อเมื่อปม i คือ ปมแหล่งผลิต (S) และปมที่ถูกเขียนกำกับไว้จะถูกลบออกทั้งหมด จากนั้นขั้นตอนวิธีการเขียนกำกับจะถูกใช้อีก ในกรณีที่ปม i ยังไม่ใช่ปมแหล่งผลิต กำหนดให้ $j = i$ แล้วย้อนกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 2.2

ตัวอย่างของขั้นตอนวิธีการเพิ่ม จะใช้ระบบในรูปที่ 3.1 เช่นเดิม โดยการพิจารณาจากรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นกราฟที่ถูกเขียนกำกับแล้ว ปม T ซึ่งถูกเขียนกำหนดเป็น (2,2) ทำให้ค่า $i = 2$ และ $\Delta T = 2$ กำลังที่ไหลเพิ่มขึ้นระหว่างปม 2 และปม T จะคำนวณได้ด้วยสมการที่ 3.12

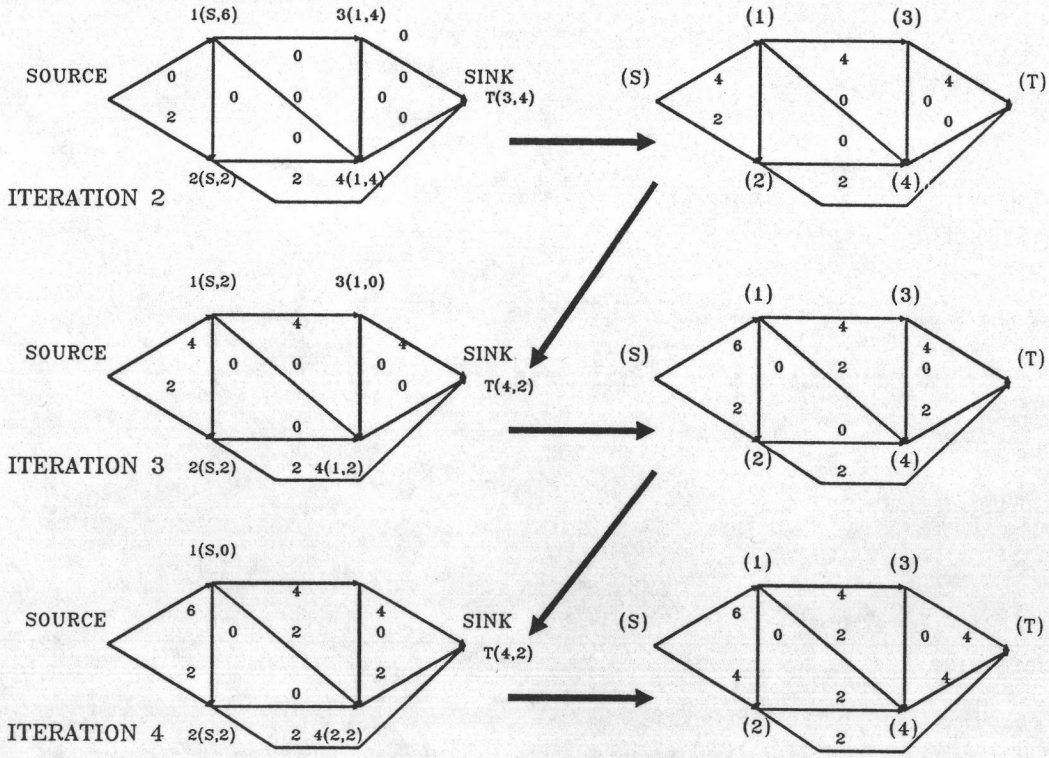
โดย $X(2,T) = 0+2 = 2$

เนื่องจากปม 2 ยังไม่ใช่ปม S ดังนั้นขั้นตอนวิธีการเพิ่มยังคงดำเนินการต่อไป ในขั้นตอนที่ 2.2 $j = 2$ กำลังไฟฟ้าที่ไหลเพิ่มระหว่างปม S ไปปม 2 จะมีค่าเท่ากับ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การเพิ่มกำลังไฟฟ้าไหลผ่านสายส่ง ในรอบแรก

การหาค่ากำลังไฟฟ้าไหลสูงสุดได้จากขั้นตอนการทำซ้ำสลับระหว่างขั้นที่ 1 และ 2 จนกระทั่งการเขียนกำกับ หรือหาเส้นทางการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจากปมรวมแหล่งผลิตไปปมรวมโหลดอีกไม่ได้แล้ว ขั้นตอนการคำนวณเพิ่มเติมของระบบตัวอย่างรูปที่ 3.1 ดังแสดงในรูปที่ 3.4



ขั้นตอนการเขียนกำกับ ขั้นตอนวิธีการเพิ่ม หากำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่าน

รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนหาค่ากำลังไฟฟ้าไหลสูงสุดของระบบตัวอย่างรูปที่ 3.1

จากรูปที่ 3.4 ขั้นตอนสุดท้าย ไม่สามารถเขียนกำกับปมที่อยู่ติดกับปมแหล่งผลิตรวม S คือ ปม1 และปม2 ได้แล้ว ดังนั้นจึงเป็นการสิ้นสุดกระบวนการการหากำลังไฟฟ้าไหลสูงสุด โดยค่ากำลังไฟฟ้าไหลสูงสุด (Fmax) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ปม T ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Fmax = \Sigma X(i,T) \qquad ....(3.14)$$

จากระบบตัวอย่างรูปที่ 3.1ก. Fmax = 4+4+2 = 10 MW ซึ่งมีค่าเท่ากับโหลดของระบบ

3.4 วิธีการตัดโหลด (Load curtailment philosophy)

ในสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่บางสถานะ ซึ่งมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลายหน่วยเกิดขัดข้องพร้อมกัน ทำให้กำลังการผลิตรวมของระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการโหลดของระบบ หรือประกอบกับการเกิดเหตุขัดข้องในระบบสายส่ง ทำให้เกิดการตีบตันในการส่งกำลังไฟฟ้ายังไปโหลดบัสที่รับกำลังไฟฟ้าจากสายส่งดังกล่าว ในทางปฏิบัติการแก้สถานการณ์ดังกล่าว (Remedial action) สามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรประกอบสำคัญหลายอย่าง เช่น ความสำคัญของโหลดบัสในแต่ละโหลดบัสหรือพื้นที่ ขนาดของโหลดบัสแต่ละบัสที่สามารถถูกรบกวนได้ (Interruptable load) เป็นต้น โดยตัวแปรดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในการกำหนดมาตรการการจัดสรรกำลังการผลิตใหม่ (Generation rescheduling) การปลดโหลดบางส่วนออกจากระบบ (Load shedding) เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาการเกิดโอเวอร์โหลดในสายส่ง และรักษาสถานภาพการผลิตและความต้องการของระบบให้สมดุลย์ ซึ่งมาตรการโดยทั่วไปดังกล่าว เพื่อใช้แก้ไขในกรณีกำลังการผลิตไม่เพียงพอเรียกว่า " วิธีการตัดโหลด "(Load curtailment philosophy) ดังนั้นวิธีการตัดโหลดในระบบไฟฟ้าแต่ละระบบจะมีวิธีการเฉพาะที่เหมาะสม แต่แนวความคิดหลักยังคงมีหลักการที่คล้ายกัน การเปรียบเทียบค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด จะแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อกำหนดวิธีการตัดโหลดไม่เหมือนกัน การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการตัดโหลดดังแสดงในเอกสารอ้างอิง [11] และใช้วิธีการดังกล่าวตลอดการศึกษานี้ ซึ่งข้อกำหนดและวิธีการตัดโหลดมีดังต่อไปนี้

1. ให้ความสำคัญของโหลดที่แต่ละโหลดบัสมีค่าเท่ากัน และโหลดที่แต่ละบัสสามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วนคือ โหลดหลัก (Firm load)และโหลดที่สามารถตัดออกได้ (Curtailable load) ในการคำนวณให้กำหนดค่าโหลดที่สามารถตัดออกได้ ประมาณเป็นค่าร้อยละของโหลดบัส เช่น 15%, 20% เป็นต้น

2. กรณีสถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องทำให้กำลังการผลิตรวมของระบบไม่เพียงพอต่อความต้องการโหลดของระบบ โหลดที่สามารถตัดออกได้ (Curtailable load) จะถูกตัดออกก่อน แล้วตามด้วยโหลดหลัก

3. กรณีเกิดการขัดข้องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เฉพาะบัสที่ติดกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสถัดไปที่เชื่อมด้วย 1 ระยะสายส่งกับบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งโหลดบัสดังกล่าวรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดการขัดข้อง จะถูกตัดโหลดออกบางส่วน

4. กรณีเกิดการขัดข้องในสายส่งกำลังไฟฟ้า บัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง (Receiving end bus(es)) และบัสถัดไปที่เชื่อมด้วย 1 ระยะสายส่ง ซึ่งรับกำลังไฟฟ้าจากบัสที่เชื่อมต่อด้านปลายของสายส่งที่เกิดการขัดข้อง จะถูกตัดโหลดออกบางส่วน

5. กรณีเกิดการขัดข้องทั้งในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งกำลังไฟฟ้า วิธีการตัดโหลดจะครอบคลุมในกรณีที่แสดงในข้อ 3 และ 4

6. กรณีที่บัสมีทั้งโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาดของโหลดหลัก (Firm load) จะถูกตัดเฉพาะส่วนที่เกินกำลังการผลิตของบัสนั้น ๆ หรืออีกนัยหนึ่ง บัสประเภทนี้จะไม่มีการตัดโหลดหลัก ถ้ากำลังการผลิตของบัสมากกว่าค่าโหลดหลัก แต่ถ้าในการผลิตของบัสน้อยกว่าค่าโหลดหลัก โหลดหลักส่วนเกินจะถูกตัดออกเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับบัสข้างเคียง

3.5 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบและโหลดบัส

การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบกำลังการผลิตและสายส่งกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน [2] คือ

1. ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลดหรือโหลดบัส (Load point indices) แสดงถึงความน่าจะเป็น และความถี่ที่บัสนั้น ๆ จะเกิดเหตุการณ์ขัดข้อง โดยไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าอย่างเพียงพอเพื่อการตอบสนองโหลดที่บัส ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลดนี้ นอกจากจะขึ้น

อยู่กับคุณสมบัติของระบบไฟฟ้าแล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของเนทเวอร์ค (Network topology) และวิธีการตัดโหลด (Load curtailment philosophy) เป็นสำคัญ

2. ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของทั้งระบบ (Overall system indices) ได้จากการรวมผล (Aggregate) ของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของโหลดบัสทั้งระบบ อย่างไรก็ตามหลักการดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับพื้นที่ขนาดเล็กหรือส่วนย่อยของระบบเพื่อหาค่า Area indices

ปกติค่าทั้งสองนี้ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าร่วมกัน โดยค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลดจะแสดงถึงความพอเพียงของกำลัง และพลังงานที่จะจ่ายให้กับโหลดที่แต่ละบัสในระบบ ชี้ให้เห็นบัสที่เป็นจุดอ่อนจุดแข็งของระบบ ส่วนค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจะแสดงถึงความเพียงพอของกำลังการผลิตของระบบ ที่สามารถส่งผ่านระบบสายส่งไปจ่ายให้กับโหลดทั้งหมดของระบบ

ในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ถ้าแบบจำลองโหลดแทนด้วยค่าโหลดเพียงระดับเดียว ซึ่งอ้างอิงบนแบบจำลองของคาบเวลา 1 ปีที่ทำการศึกษา ค่าดัชนีที่ได้เรียกว่า ค่าดัชนีประจำปี (Annualized indices)และปกติแล้วค่าโหลดระดับเดียวที่กำหนดจะเป็นค่าโหลดสูงสุดประจำปี ค่าดัชนีที่คำนวณได้จะสูงกว่าค่าดัชนีในระยะหนึ่งปี (Annual Indices) ซึ่งคำนวณโดยใช้แบบจำลองโหลดชนิดหลายระดับ ส่วนวิธีการยังคงเหมือนกับการหาค่าดัชนีประจำปี เพียงแต่วงรอบและเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะสูงเป็นสัดส่วนโดยตรงขึ้นอยู่กับจำนวนของระดับโหลดที่ใช้ในการคำนวณ

การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ด้วยค่าดัชนีประจำปีเป็นการมองภาพของระบบในสภาวะที่เลวร้ายสุด ดังนั้นการหาค่าดังกล่าวจึงใช้เพื่อการเปรียบเทียบกับระบบอื่น หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในระบบ ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์การลงทุน ขยายระบบ หรือวางแผนระยะยาว อย่างไรก็ตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นในขั้นตอนวิธีการคำนวณ (Methodology) การแทนแบบจำลองโหลดด้วยค่าโหลดสูงสุดประจำปี เพื่อหาค่าดัชนีประจำปีถือว่าเป็นการเพียงพอ

ตารางที่ 3.2 และ 3.3 แสดงค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลด และของระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน[2] แต่เนื่องจากข้อจำกัดของวิธีเนทเวอร์คโฟลว์ที่ไม่สามารถให้คำตอบเกี่ยวกับปัญหาแรงดันของระบบ ดังนั้นการคำนวณหาค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพแรงดันของระบบไม่สามารถกระทำได้ เช่น จำนวนครั้งของการเกิดปัญหาในระบบเนื่องจากแรงดันผิดปกติ (Expect

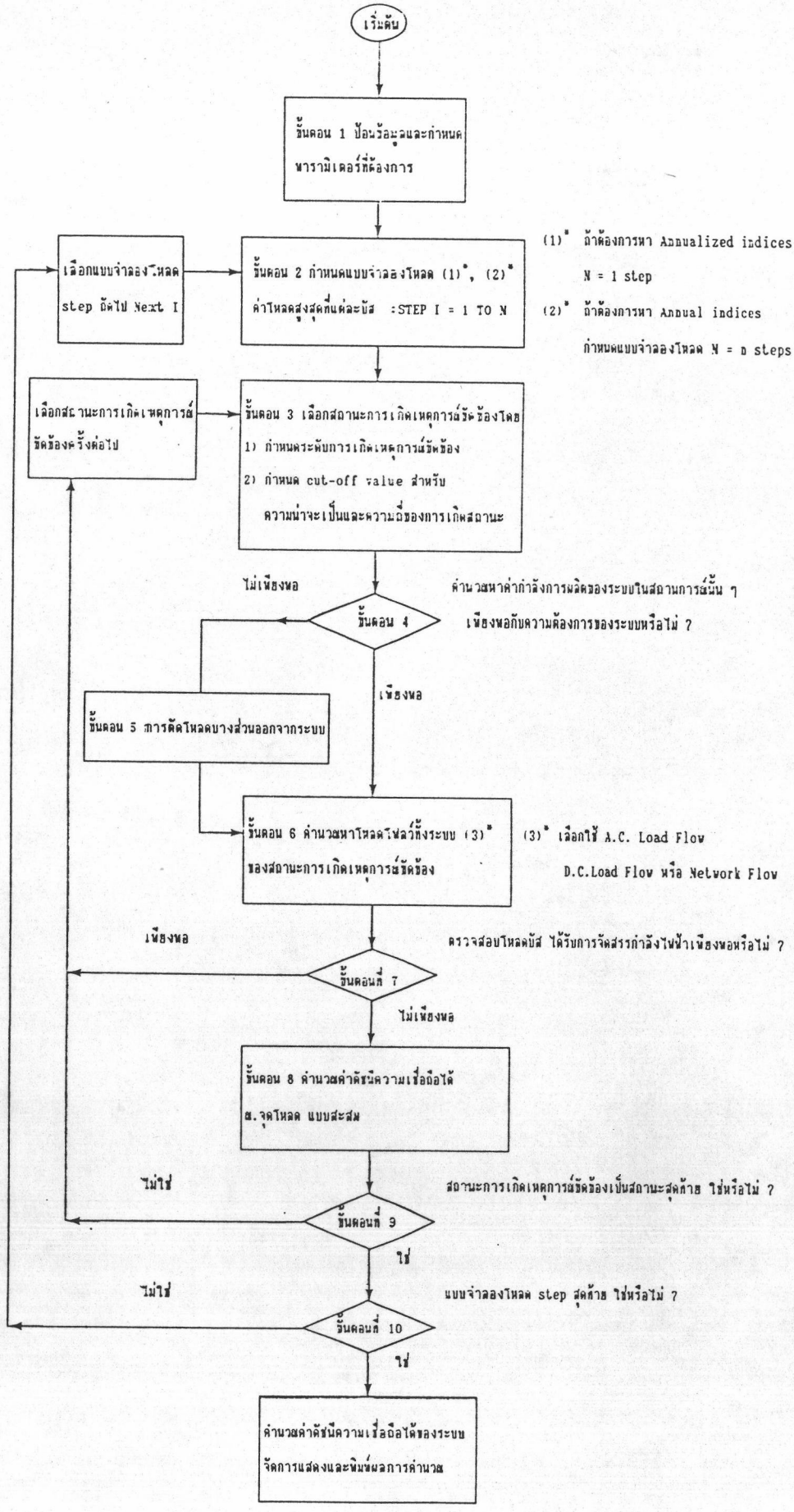
Number of Voltage Violations) เป็นต้น อย่างไรก็ตามค่าดัชนีดังกล่าวไม่ใช่ค่าดัชนีหลักในการพิจารณาค่าความเชื่อถือได้ของระบบ ค่าดัชนีที่นิยมใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบร่วมกันทั้งของจุดโหลดและระบบ สามารถคำนวณได้ดังสมการแสดงในหัวข้อ 3.5.1 และ 3.5.2 ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้โดยวิธีการเดิมแสดงไว้ในรูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.2 ค่าดัชนีประจำปีของจุดโหลด(Annualized load point indices)

Basic values
Probability of failure
Expected frequency of failure
Expected number of voltage violations
Expected number of load curtailments
Expected load curtailed
Expected energy not supplied
Expected duration of load curtailment
Maximum values
Maximum load curtailed
Maximum energy curtailed
Maximum duration of load curtailment
Average values
Average load curtailed
Average energy not supplied
Average duration of curtailment
Bus isolation values
Expected number of curtailments
Expected load curtailed
Expected energy not supplied
Expected duration of load curtailment

ตารางที่ 3.3 ค่าดัชนีประจำปีของระบบ (Annualized system indices)

Basic values
Bulk power interruption index
Bulk power supply average MW curtailment/disturbance
Bulk power energy curtailment index
Modified bulk power energy curtailment index
Average values
Average number of curtailments/load point
Average load curtailed/load point
Average energy curtailed/load point
Average duration of load curtailed/load point
Average number of voltage violations/load point
Maximum values
Maximum system load curtailed under any contingency condition
Maximum system energy not supplied under any contingency condition



รูปที่ 3.5 โฟลว์ชาร์ทแสดงการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการผลิตและระบบสายส่ง
โดยวิธีการเดิมที่ใช้อยู่ทั่วไป (Conventional method)

3.5.1 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลด (Load point indices)

3.5.1.1 ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวที่บัส K (Probability of Failure at bus K)

$$Q_K = \Sigma P_j P_{Kj} \quad \ldots.(3.15)$$

3.5.1.2 ความถี่ที่จะเกิดความล้มเหลวที่บัส K (Frequency of Failure at bus K)

$$F_K = \Sigma F_j P_{Kj} \quad \text{(occ/year)} \quad \ldots.(3.16)$$

เมื่อ j คือ สถานะการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของระบบ

P_j คือ ความน่าจะเป็นที่จะเกิดของสถานะที่ j

F_j คือ ความถี่ของการเกิดของสถานะที่ j

P_{Kj} คือ ความน่าจะเป็นของโหลดที่บัส K ซึ่งมีค่าเกินกว่าโหลดสูงสุดที่บัสจะสามารถได้รับจากสถานะที่ j

3.5.1.3 ค่าโหลดที่คาดว่าจะถูกตัดลดลง

(Expected Load Curtailed)

$$\text{ELC(MW/year)} = \sum_{j \epsilon X} L_{Kj} F_j \quad \ldots.(3.17)$$

3.5.1.4 ค่าพลังงานที่คาดว่าไม่สามารถจัดสรรให้โหลดได้

(Expected Energy Not Supplied)

$$\text{EENS(MWh/year)} = \sum_{j \epsilon X} L_{Kj} P_j x8760 \quad \ldots.(3.18)$$

3.5.1.5 ช่วงเวลาที่คาดว่าระบบจะได้รับกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอ

(Expected Duration of Load Curtailment)

$$\text{EDLC(hours)} = \sum_{j \epsilon X} P_j x8760 \quad \ldots.(3.19)$$

เมื่อ $j \epsilon x$ หมายถึง ผลจากสถานะเหตุการณ์ขัดข้อง j ซึ่งทำให้โหลดที่บัส K ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าลดลง เพื่อใช้แก้ปัญหาโอเวอร์โหลดของสายส่ง หรือกำลังการผลิตของระบบน้อยกว่าความต้องการโหลดของระบบ

$L_{K,j}$ หมายถึง ค่าลดลงของโหลด (Curtailed Load) ที่บัส K เพื่อช่วยแก้ปัญหาโอเวอร์โหลดของสายส่ง, กำลังการผลิตของระบบน้อยกว่าความต้องการโหลดของระบบ หรือโหลดบัสที่ไม่ได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเกิด Isolation ที่บัส K จากเหตุการณ์ขัดข้องที่สถานะ j

3.5.2 ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของทั้งระบบ (Overall system indices)

3.5.2.1 Bulk Power Interruption Index

$$BPII(MW/MW\text{-}year) = \Sigma_K \sum_{j \epsilon X} L_{K,j} F_j / L_s \quad ....(3.20)$$

3.5.2.2 Bulk Power-System Average MW Curtailment Index

$$BPACI(MW/disturbance) = \Sigma_K \sum_{j \epsilon X} L_{K,j} F_j / \sum_{j \epsilon X} F_j \quad ....(3.21)$$

3.5.2.3 Bulk Power/Energy Curtailment Index

$$BPECI(MWh/MW\text{-}year) = \Sigma_K \sum_{j \epsilon X} L_{K,j} P_j * 8760 / L_s \quad ....(3.22)$$

3.5.2.4 Modified Bulk Power Energy Curtailment Index

$$MBECI = \Sigma_K \sum_{j \epsilon X} L_{K,j} P_j / L_s \quad ....(3.23)$$

3.5.2.5 Severity Index

$$SI\ (System\text{-}Mins) = \Sigma_K \sum_{j \epsilon X} L_{K,j} P_j * 8760 * 60 / L_s \quad ..(3.24)$$

เมื่อ L_s คือโหลดทั้งหมดของระบบ