บทที่ 4

การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้วิธีจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

4.1 คำจำกัดความ

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า [4,5] หมายถึง ความคาดหวังว่าระบบไฟฟ้าจะสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับลูกค้าได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องโดยมีกระแสไฟฟ้าขัดข้องน้อยที่สุด

ดัชนีความเชื่อถือได้(Reliability indices) ของระบบไฟฟ้า หมายถึง ตัวชี้บอกถึงคุณภาพของระบบไฟฟ้าว่ามีความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องในระบบมากน้อยเพียงใด ค่าดัชนีจะสะท้อนให้เห็นถึงความพอเพียงและความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในส่วนต่างๆ

ในการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าในแต่ละระดับชั้นนั้นจะต้องคำนึงถึงสถิติการทำงานหรือการคาดการณ์การทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นในระบบว่าจะเกิดเหตุขัดข้องขึ้นบ่อยครั้งหรือเมื่อเกิดแล้วต้องใช้เวลาซ่อมแซมนานหรือไม่ ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถทำการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ได้ตามปกติอีกครั้ง

จากสถิติต่าง ๆ สามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่

อัตราการเกิดเหตุขัดข้อง (Outage rate) หมายถึง จำนวนครั้งที่เกิดเหตุขัดข้องในช่วงเวลาที่กำหนด เช่น ในช่วงเวลา 1 เดือน หรือ 1 ปี เป็นต้น

อัตราล้มเหลว (Failure Rate : λ) หมายถึง ความถี่ของการล้มเหลวหรือการไม่ทำงานตามที่กำหนดไว้ของอุปกรณ์ที่อยู่ในระบบ ความถี่ดังกล่าวมักจะพูดกันเป็นจำนวนครั้งต่อหนึ่งปี

ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้อง (Outage Time : r) คือ ช่วงระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุขัดข้องแต่ละครั้งจนเข้าสู่ภาวะปกติ

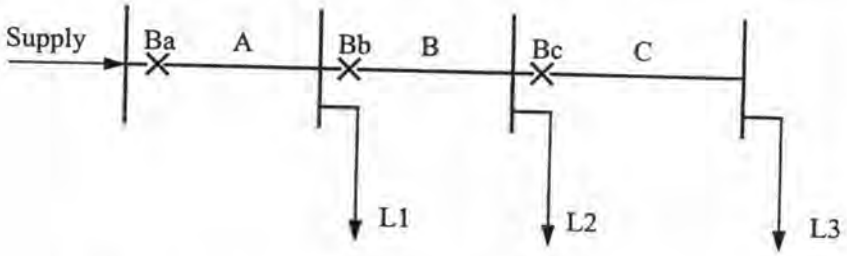
ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุขัดข้องในหนึ่งปี (Average Annual Outage Time : U) หมายถึง ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องรวมกันทั้งหมดในหนึ่งปี

โดยค่า λ , r และ U ต่างเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

4.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด (Reliability indices at load point)

ความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดใด ๆ [5] จะขึ้นอยู่กับความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ที่ต่อระหว่างจุดจ่ายไฟ (Supply) กับจุดโหลดนั้น ๆ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่จะทำให้อุปกรณ์ที่เกิดขัดข้องกลับคืนสู่สภาวะทำงานได้ตามปกติและต่อเข้ากับระบบได้อีกด้วย

ตัวอย่างตามรูปที่ 4.1 เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial distribution system) ที่ประกอบด้วย สายไฟฟ้า เบรคเกอร์ บัสบาร์ ต่ออนุกรมกันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละจุดโหลด การคำนวณความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด L1 จะขึ้นอยู่กับความเชื่อถือได้ของสายไฟ A รวมทั้งเบรคเกอร์ Ba ด้วย ความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด L2 จะขึ้นอยู่กับความเชื่อถือได้ของสายไฟ A และสายไฟ B ส่วนความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด L3 จะขึ้นอยู่กับความเชื่อถือได้ของสายไฟ A B และ C



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างของระบบที่มีสายส่งไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียลและมีจุดโหลด 3 จุด

สมมติให้อัตราการล้มเหลวและช่วงเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับแต่ละครั้งเฉลี่ยของสายไฟ A,B และ C ตามตารางที่ 4.1 โดยให้ความเชื่อถือได้ของเบรคเกอร์ Ba,Bb และ Bc เป็น 100 %

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลพื้นฐานของอุปกรณ์ในระบบตัวอย่าง

สายไฟฟ้า	อัตราการล้มเหลว (ครั้ง/ปี)	ระยะเวลาที่เกิดการขัดข้อง (ชั่วโมง/ครั้ง)
A	0.2	6
B	0.1	5
C	0.15	8

การคำนวณค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของระบบที่ต่อแบบอนุกรม สามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\lambda_s = \sum \lambda_i \tag{4.1}$$

$$U_s = \sum \lambda_i r_i \tag{4.2}$$

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum \lambda_i r_i}{\sum \lambda_i} \tag{4.3}$$

เมื่อ i คือ จำนวนอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรม

λ คือ อัตราล้มเหลวของอุปกรณ์

r คือ ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้องของอุปกรณ์

U คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุขัดข้องในหนึ่งปีของอุปกรณ์

จากระบบตัวอย่างตามรูปที่ 4.1 และข้อมูลอัตราการล้มเหลวกับระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับแต่ละครั้งเฉลี่ยของอุปกรณ์ตามตารางที่ 4.1 สามารถคำนวณความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดต่างๆได้ โดยใช้สมการที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดของระบบตัวอย่างในรูปที่ 4.1

จุดโหลด	อัตราการล้มเหลว (ครั้ง/ปี)	ระยะเวลาที่เกิดเหตุขัดข้อง (ชั่วโมง/ครั้ง)	ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุขัดข้องในหนึ่งปี (ชั่งโมงต่อปี)
L1	0.2	6	1.2
L2	0.3	5.7	1.7
L3	0.45	6.4	2.9

การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลด เป็นดัชนีที่มีประโยชน์สำหรับจุดโหลดแต่ละจุดและทำให้ทราบคุณภาพของการจ่ายไฟฟ้า ณ จุดโหลดนั้น แต่ยังไม่สามารถใช้วัดคุณภาพของระบบโดยรวมได้ ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดเป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้ที่อ้างอิงผู้ใช้ไฟ (Customer-oriented Indices) ต่อไป ซึ่งดัชนีดังกล่าวสามารถใช้วัดคุณภาพของระบบโดยรวมได้

4.3 ดัชนีความเชื่อถือได้ที่อ้างอิงผู้ใช้ไฟฟ้า (Customer-oriented Index)

เนื่องจากความพอใจของผู้ใช้ไฟซึ่งเป็นลูกค้าของการไฟฟ้าแต่ละรายที่จะได้รับการบริการที่ดี มีจำนวนครั้งของการเกิดไฟฟ้าดับหรือไฟตกน้อยที่สุด เป็นเรื่องที่สำคัญ ดังนั้นในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้จึงนิยมอ้างอิงถึงผู้ใช้ โดยการใช้ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ไฟดับและจำนวนเวลาที่ไฟดับต่อปีต่อผู้ใช้ 1 ราย ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบกันระหว่างระบบต่างๆ ได้ และยังทำให้สามารถตั้งเป้าหมายจำนวนครั้งหรือเวลาที่จะปรับปรุงให้ดีขึ้นและดำเนินการให้เป็นตามเป้าหมายได้ ดัชนีดังกล่าวได้แก่

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) หมายถึง ดัชนีความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบโดยเฉลี่ย มีหน่วยเป็น ครั้งต่อปีต่อราย

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{ผลรวมของจำนวนครั้งที่ไฟดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายตลอดปี}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}}$$

$$= \frac{\Sigma \lambda_i N_i}{\Sigma N_i} \qquad (4.4)$$

เมื่อ N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

SAIDI (System Average Interruption Duration Index) หมายถึง ดัชนีชี้บอกจำนวนเวลาที่ไฟดับเฉลี่ยของทั้งระบบ มีหน่วยเป็น ชั่วโมง/ปี-ราย

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{ผลรวมของระยะเวลาที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายเกิดไฟดับตลอดปี}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}}$$

$$= \frac{\Sigma U_i N_i}{\Sigma N_i} \qquad (4.5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index) หมายถึง ดัชนีความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ไฟดับเฉลี่ยของผู้ใช้ไฟฟ้า

$$CAIFI = \frac{\text{จำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดไฟดับรวมกันตลอดปี}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟดับ}}$$

CAIFI แตกต่างจาก SAIFI คือตัวหาร SAIFI ใช้จำนวนผู้ใช้ไฟทั้งหมด แต่ CAIFI ใช้จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดผลกระทบ คือที่มีไฟดับเท่านั้น ดังนั้นค่า CAIFI จึงเป็นค่าที่ไม่นิยมหาเนื่องจากหาค่อนข้างยาก

CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) หมายถึง ดัชนีแสดงจำนวนเวลาที่มีไฟดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยต่อครั้ง

$$CAIDI = \frac{\text{จำนวนเวลาที่ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดไฟดับรวมกันตลอดปี}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟดับ}}$$

$$= \frac{\Sigma U_i N_i}{\Sigma \lambda_i N_i} \qquad (4.6)$$

เมื่อ N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

ASAI (Average Service Availability Index) หมายถึง ดัชนีชี้บอกการมีไฟฟ้าให้บริการแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย

$$ASAI = \frac{\text{จำนวนชั่วโมงเฉลี่ยที่มีไฟให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายใช้}}{\text{จำนวนชั่วโมงที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายต้องการไฟฟ้าใช้}}$$

$$= \frac{\Sigma N_i x8760 - \Sigma U_i N_i}{\Sigma N_i x8760} \qquad (4.7)$$

เมื่อ N คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อ ณ จุดโหลด

i คือ จุดโหลดลำดับที่ i

ASUI (Average Service Unavailability Index) หมายถึง ดัชนีแสดงการไม่มีไฟฟ้าใช้ของลูกค้าเฉลี่ย

$$ASUI = \frac{\text{จำนวนชั่วโมงเฉลี่ยที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายไม่มีไฟฟ้าใช้}}{\text{จำนวนชั่วโมงที่ผู้ใช้ไฟแต่ละรายต้องการไฟฟ้าใช้}}$$

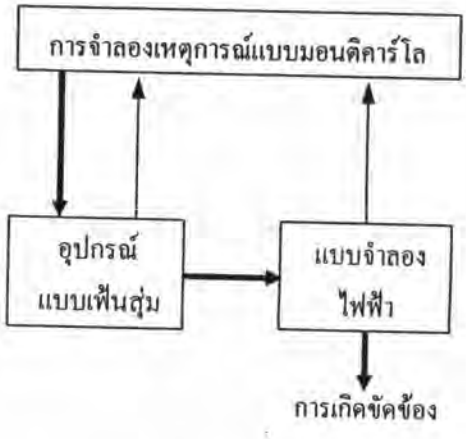
$$= 1 - ASAI \qquad (4.8)$$

ในการวิจัยนี้จะเน้นไปที่ค่า SAIFI และ SAIDI เพื่อดูผลของแรงดันตกที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งจะส่งผลถึงค่าทั้งสองโดยตรง

4.4 การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยใช้การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

4.4.1 แนวทางในการวิเคราะห์

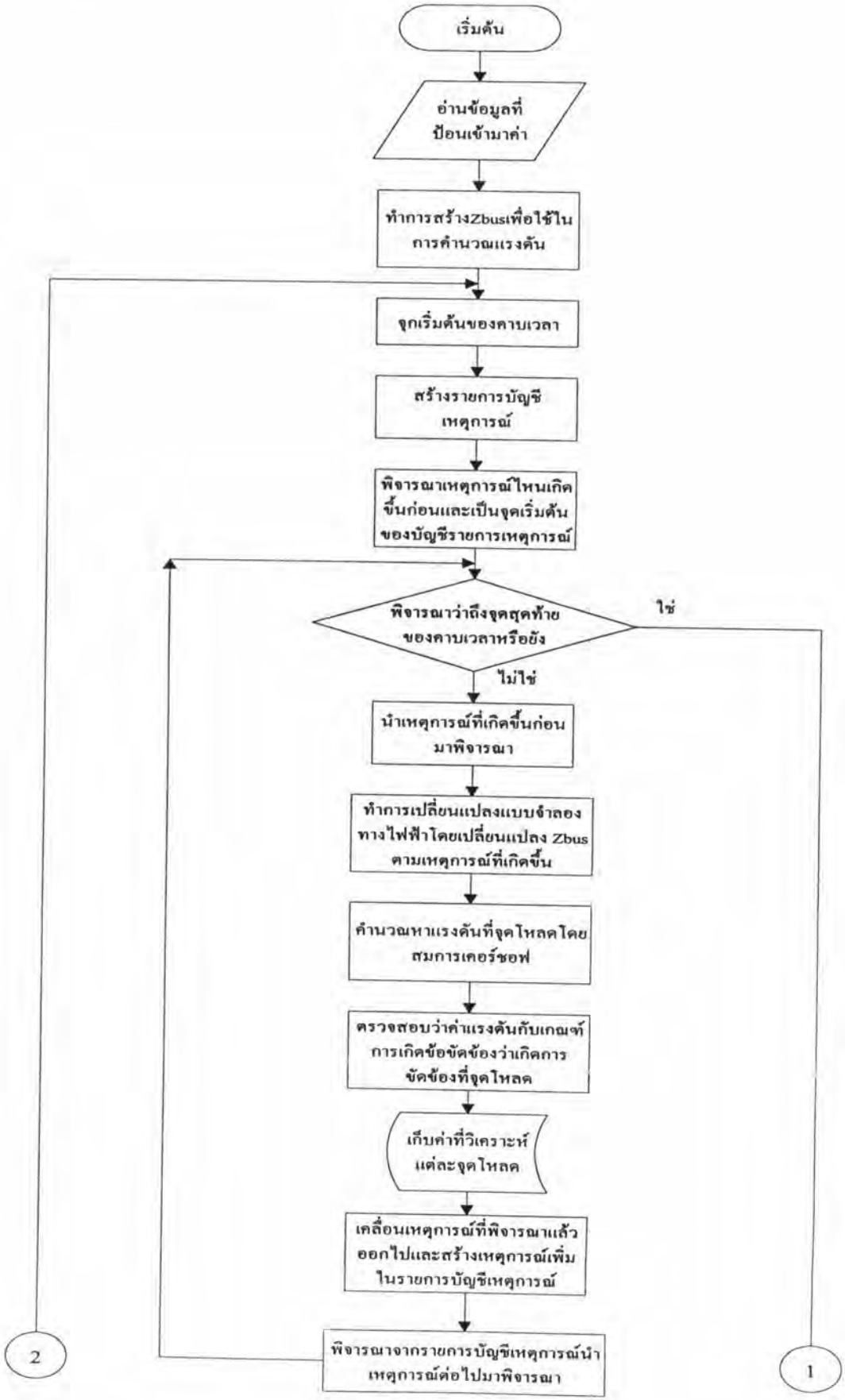
แนวทางในการวิเคราะห์จะเป็นการใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลร่วมกับแบบจำลองระบบทางไฟฟ้า โดยวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลจะถูกนำมาใช้ในการจำลองเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์แบบเฟ้นสุ่ม เช่นเหตุการณ์ที่เกิดลัดวงจรที่ส่วนต่างๆของระบบ การที่ระบบป้องกันเคลียร์ส่วนที่เกิดผิดพร่องออกจากระบบ เป็นต้น เนื่องด้วยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นดังที่ยกตัวอย่างไว้จะทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบ หรือทำให้ต้องนำอุปกรณ์เข้าสู่ระบบเมื่อซ่อมแซมเสร็จแล้ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระบบทำให้แรงดันที่จุดโหลดหลังเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลง รูปแบบของแรงดันที่เกิดขึ้นที่จุดโหลดดังกล่าวนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การเกิดข้อขัดข้องที่จุดโหลดนั้นๆเพื่อพิจารณาว่าจะเกิดการตัดวงจรที่จุดโหลดหรือไม่ โดยการคำนวณหาแรงดันที่จุดโหลดหลังเกิดเหตุการณ์ต่างๆ เราจะใช้แบบจำลองไฟฟ้าของระบบสำหรับการคำนวณ ซึ่งตัวแบบจำลองไฟฟ้าจะปรับเปลี่ยนตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น แนวทางวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

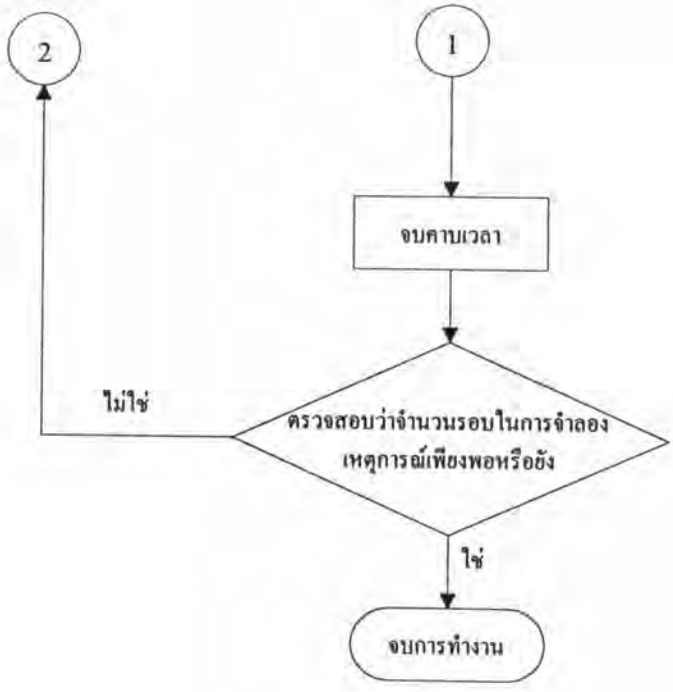


รูปที่ 4.2 โครงสร้างโดยรวมของวิธีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ที่นำมาใช้

การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลจะอาศัยกระบวนการเฟ้นสุ่มโดยการจำลองเหตุการณ์ในช่วงเวลาหนึ่งที่เราจะนำไปวิเคราะห์ระบบ เป็นจำนวนหลายครั้งเพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของระบบจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระบบที่ได้จากการจำลอง โดยวิธีการนี้สามารถนำไปใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนได้ดี

แผนผังแสดงการวิเคราะห์เหตุการณ์จากจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 โดยเริ่มต้นจะต้องอ่านข้อมูลที่ใส่เข้าไปเป็นค่า อิมพีแดนซ์ของแต่ละอุปกรณ์ โครงสร้างการต่อเชื่อมของแต่ละอุปกรณ์เพื่อนำไปใช้ในการสร้าง Zbus และข้อมูลด้านความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์แต่ละตัวในระบบ รวมทั้งข้อมูลการทำงานของระบบป้องกัน เพื่อจะนำไปจำลองเหตุการณ์ดังวิธีที่แสดงไว้ในบทที่3 ในหัวข้อ 3.2.1 , 3.2.2 โดยที่ข้อมูลที่ได้จากการสุ่มซึ่งนำมาใช้ในการจำลองเหตุการณ์จะมีการกระจายแบบต่างๆเหมาะสมกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง เช่น การกระจายแบบWeibullกับระยะเวลาในการทำงานก่อนเกิดล้มเหลว และการกระจายแบบปกติกับระยะเวลาในการซ่อมแซมเป็นต้น แล้วทำให้ได้เหตุการณ์ที่อุปกรณ์แต่ละตัวอยู่ในช่วงเวลาทำงาน และช่วงเวลาในการล้มเหลวของอุปกรณ์ และเก็บสะสมเหตุการณ์ที่ได้จากการจำลองไว้ในช่วงเวลาที่เราจะนำไปวิเคราะห์ระบบ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอีกที การจำลองเหตุการณ์ในเวลา 1 คาบเวลาจะถูกพิจารณาซ้ำหลายๆรอบจนกระทั่งได้จำนวนข้อมูลแบบเฟ้นสุ่มที่เพียงพอที่จะนำไปใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆซึ่งใช้ในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบจ่ายไฟฟ้า


เริ่มต้น
อ่านข้อมูลที่
ป้อนเข้ามาค่า
ทำการสร้างZbusเพื่อใช้ใน
การคำนวณแรงดัน
จุกเริ่มต้นของคาบเวลา
สร้างรายการบัญชี
เหตุการณ์
พิจารณาเหตุการณ์ไหนเกิด
ขึ้นก่อนและเป็นจุดเริ่มต้น
ของบัญชีรายการเหตุการณ์
พิจารณาว่าถึงจุดสุดท้าย
ของคาบเวลาหรือยัง
ใช่
ไม่ใช่
นำเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นก่อน
มาพิจารณา
ทำการเปลี่ยนแปลงแบบจำลอง
ทางไฟฟ้าโดยเปลี่ยนแปลง Zbus
ตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น
คำนวณหาแรงดันที่จุดโหลดโดย
สมการเกอร์ชอฟ
ตรวจสอบว่าค่าแรงดันกับเกณฑ์
การเกิดข้อขัดข้องว่าเกิดการ
ขัดข้องที่จุดโหลด
เก็บค่าที่วิเคราะห์
แต่ละจุดโหลด
เคลื่อนเหตุการณ์ที่พิจารณาแล้ว
ออกไปและสร้างเหตุการณ์เพิ่ม
ในรายการบัญชีเหตุการณ์
พิจารณาจากรายการบัญชีเหตุการณ์นำ
เหตุการณ์ต่อไปมาพิจารณา
2
1



รูปที่ 4.3 แผนผังแสดงวิธีการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ด้วยวิธีจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล

หลังจากที่ได้ทำการจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบจนครบทุกอุปกรณ์แล้ว เมื่อมาถึงจุดนี้ เมื่อพิจารณาไปที่แผนผังในรูปที่ 4.3 ก็จะอยู่ที่สถานะ"จุดเริ่มต้นบัญชีรายการของเหตุการณ์" ขั้นต่อไป เราจะทำการพิจารณาถึงลำดับของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นใน 1 คาบเวลา โดยเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นก่อนจะถูกยกขึ้นมาพิจารณาก่อนจนหมดช่วงเวลาที่ใช้ในการพิจารณา เหตุการณ์ที่จะถูกหยิบขึ้นมาพิจารณา เช่น การทำงานล้มเหลวของอุปกรณ์ซึ่งเป็นเหตุมาจากการเกิดลัดวงจร(เป็นสาเหตุของการเกิดแรงดันตก) เป็นต้น

ระหว่างการจำลองเหตุการณ์ใน 1 คาบเวลา เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นไปจะถูกหยิบขึ้นมาจากบัญชีรายการของเหตุการณ์ ซึ่งทำให้แบบจำลองทางไฟฟ้าของระบบเปลี่ยนแปลงไปโดยการเคลื่อนย้ายหรือการแทรกเข้าของอุปกรณ์ของวงจร(Branches) หรือ โนด (Node) ซึ่งก็คือจะมีการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ที่บรรจุอยู่บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ของระบบ (Bus Impedance Matrix : Zbus) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้แรงดันที่จุดโหลดเปลี่ยนแปลง(นั้นก็คือการเกิดแรงดันตกที่จุดโหลด)ไปทำให้ต้องคำนวณแรงดันที่จุดโหลดเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การเกิดข้อขัดข้องในบทที่ 2 หัวข้อที่2.6 ในการคำนวณแรงดันเราจะใช้วงจรสมมูลของอุปกรณ์ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่างๆของระบบ ค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทุกตัวในระบบ และจะต้องให้โหลดแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์คงที่ เพื่อใช้ในการ

สร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็จะให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่มีค่าแรงดันคงที่ และเราจะสามารถคำนวณค่าแรงดันที่จุดโหลดจากสมการเคอร์ชอฟ(Kirchhoff equations)ได้ดังนี้คือ

$$[V] = [Z][I] \tag{4.9}$$

เมื่อเหตุการณ์หนึ่งได้ถูกทำการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบเรียบร้อยแล้วก็จะถูกนำออกไปจากการพิจารณาดังที่แสดงไว้ในแผนผังในรูปที่ 4.3 แล้วก็กลับไปจำลองเหตุการณ์เพิ่มสำหรับเหตุการณ์ที่ได้พิจารณาไปแล้ว แล้วก็นำไปใส่ไว้ในรายการบัญชีเหตุการณ์ ต่อจากนั้นเหตุการณ์ใหม่ในลำดับถัดไปซึ่งอยู่ในรายการบัญชีเหตุการณ์จะถูกนำขึ้นมาพิจารณา ซึ่งเหตุการณ์เหล่านั้นจะต้องเกิดขึ้นก่อนถึงจุดสุดท้ายของคาบเวลา จุดสุดท้ายของคาบเวลา 1 คาบของการจำลองเหตุการณ์ คือ ไม่มีเหตุการณ์ที่จะต้องพิจารณาเกิดขึ้นก่อนจุดสุดท้ายของคาบเวลา

การจำลองเหตุการณ์ในเวลาหนึ่งคาบจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งได้ค่าความถูกต้องตามที่ต้องการ โดยมีสูตรการคำนวณ ค่าความผิดพลาดสูงสุด (δ) กับจำนวนครั้งในการจำลองเหตุการณ์ (N) ดังนี้คือ

$$N = 1/\delta^2 \tag{4.10}$$

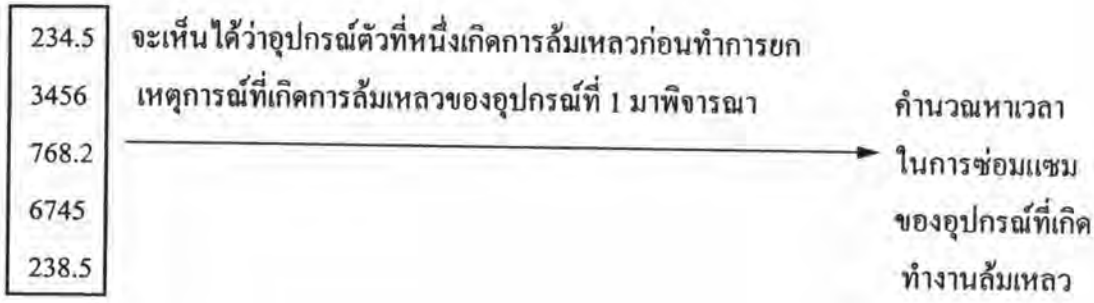
เนื่องจากสมการที่ 4.10 ได้มาจากรายการอ้างอิงที่ 11 ซึ่งเหมาะสมเฉพาะระบบที่เป็นเครือข่าย ซึ่งการเกิดแรงดันตกจะเป็นผลต่อระบบโดยรวมทั้งหมด ดังนั้นในระบบที่เป็นเรเดียล ซึ่งมีการเชื่อมโยงกันน้อยกว่า เราจะใช้การคำนวณหา relative uncertainty แทน เพื่อนำมาใช้ตรวจสอบกับค่าที่ตั้งไว้เพื่อใช้ในการหยุดการจำลองเหตุการณ์ และจะต้องกำหนดค่าที่ใช้ในการหยุดการจำลองเหตุการณ์ให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ซึ่งได้แสดงค่าไว้ในบทที่ 5 และการคำนวณหา relative uncertainty แสดงไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2.4

4.4.2 การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โลที่เกิดขึ้นในระบบและการจัดลำดับของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปพิจารณา

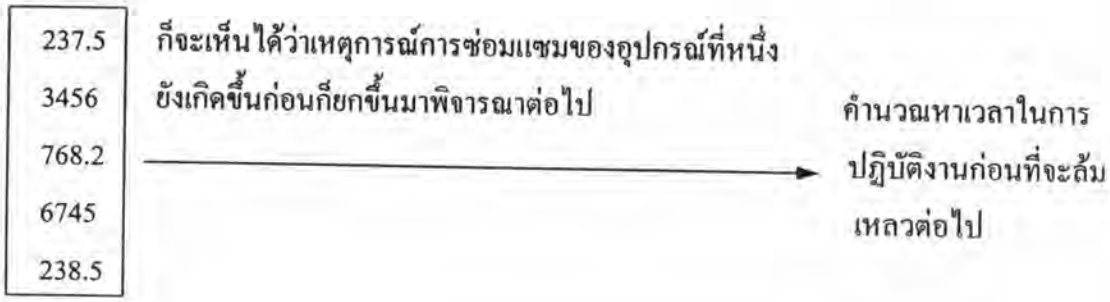
เริ่มจากที่เราได้ทำกระบวนการสุ่มตัวเลขและกระบวนการเปลี่ยนค่าตัวเลขไปเพื่อให้ได้ค่าเวลาในการทำงานก่อนที่อุปกรณ์จะทำงานล้มเหลวของอุปกรณ์ทุกตัวในระบบ ต่อจากนั้นก็จะทำการพิจารณารายการบัญชีของเหตุการณ์ว่าอุปกรณ์ตัวไหนเกิดการทำงานล้มเหลวก่อนตัวอื่น เมื่ออุปกรณ์ตัวนั้นเกิดการล้มเหลวจะต้องทำการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนตัวเพื่อให้อุปกรณ์ตัวนั้นกลับเข้ามาทำงานในระบบต่อไป เราก็ทำการสุ่มตัวเลขและเปลี่ยนค่าตัวเลขไปเพื่อให้ได้ค่าเวลาในการซ่อมแซม จากนั้นเราก็นำค่าเวลาในการซ่อมแซมไปรวมกับเวลาในการทำงานครั้งก่อนของอุปกรณ์ตัวนั้นซึ่งอยู่ในรายการบัญชีเหตุการณ์ แล้วทำการพิจารณาว่าเหตุการณ์ของอุปกรณ์ตัวไหนเกิดขึ้นก่อนจากรายการบัญชีเหตุการณ์อีกครั้ง ถ้าเหตุการณ์การซ่อมแซมของอุปกรณ์ตัวนั้นเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นก่อนก็จะ

ทำการยกเหตุการณ์นั้นขึ้นมาพิจารณา แต่ถ้าเหตุการณ์การล้มเหลวของอุปกรณ์ตัวอื่นเกิดขึ้นก่อนก็จะทำการยกเหตุการณ์นั้นขึ้นมาพิจารณา ดังแสดงไว้ในตัวอย่างที่ 4.2

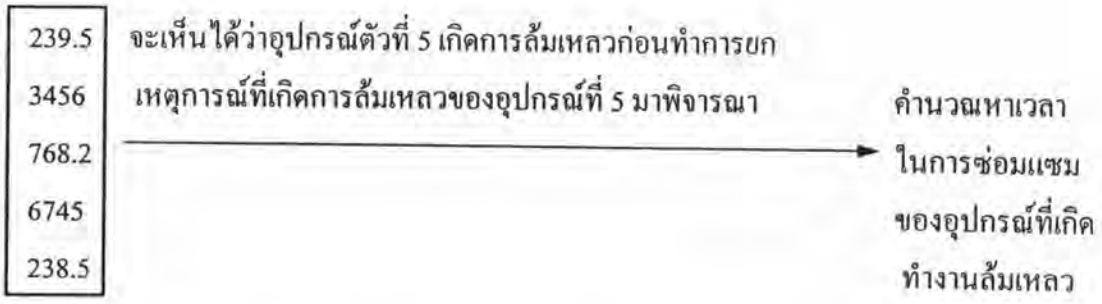
ตัวอย่างที่ 4.2 ในระบบซึ่งมีอุปกรณ์ 5 ตัวจะมีรายการบัญชีเหตุการณ์ซึ่งแสดงเวลาในการทำงานก่อนที่จะเกิดล้มเหลวขึ้นของอุปกรณ์นั้นในระบบ โดยมีค่าเป็นชั่วโมง ดังต่อไปนี้



การคำนวณหาเวลาในการซ่อมแซมของอุปกรณ์แสดงไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.2.2 ถ้าเวลาที่คำนวณได้มีค่าเป็น 3 ชั่วโมง นำไปรวมกับเวลาการปฏิบัติงานของอุปกรณ์ที่ 1 ซึ่งอยู่ในรายการบัญชีเหตุการณ์ ก็จะได้เป็น 234.5+3 = 237.5 ชั่งโมง ก็จะได้รายการบัญชีเหตุการณ์ใหม่ดังนี้



ซึ่งการคำนวณหาเวลาในการทำงานก่อนที่จะล้มเหลวแสดงไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.2.2 แต่ถ้าเวลาในการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 1 หาออกมาได้เป็น 5 ชั่งโมงนำไปรวมกับเวลาการปฏิบัติงานของอุปกรณ์ที่ 1 ซึ่งอยู่ในรายการบัญชีเหตุการณ์ ก็จะได้เป็น 234.5+5 = 239.5 ชั่งโมง ก็จะได้รายการบัญชีเหตุการณ์ใหม่ดังนี้



จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้อุปกรณ์ที่ 5 เกิดล้มเหลวก่อนที่อุปกรณ์ที่ 1 จะซ่อมเสร็จก็จะต้องพิจารณาเหตุการณ์ที่อุปกรณ์ที่ 5 เกิดการล้มเหลว แล้วทำการหาค่าเวลาในการซ่อมแซมของอุปกรณ์ที่ 5

เมื่อทำตามนี้ก็จะสามารถจัดลำดับของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ ทำการจัดลำดับอย่างนี้ต่อไปจนหมดช่วงเวลาที่ต้องการศึกษา เป็นการเสร็จสิ้น 1 รอบการพิจารณา ซึ่งจะเห็นได้ว่า ก่อนที่จะทำการหาเวลาในการซ่อมแซมของอุปกรณ์จะต้องมีเวลาในการทำงานก่อนเกิดการล้มเหลวของอุปกรณ์ก่อนเสมอ

4.4.3 วิธีการคำนวณแรงดันที่จุดโหลด

ในการคำนวณแรงดันที่จุดโหลดนั้นจะทำได้ 2 วิธีหลัก คือ 1. การคำนวณโดยใช้โหลดโฟลว์ 2. ใช้การสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ แล้วคำนวณหาแรงดันที่จุดโหลดโดยใช้สมการเคอร์ชอฟ ซึ่งวิธีทั้งสองมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน วิธีที่ 1 สามารถหากำลังไหลในสายส่ง ขนาดแรงดัน และขนาดกระแสไหลได้ครบแต่มีข้อเสียที่จะใช้เวลาในการคำนวณที่นานกว่าวิธีที่ 2 เนื่องจากในการจำลองเหตุการณ์โดยวิธีนี้จะต้องใช้การคำนวณแรงดันหลายครั้งโดยเฉพาะในระหว่างที่เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบและหลังจากที่อุปกรณ์ป้องกันเข้าทำงานตัดวงจร วิธีที่ 2 มีความสะดวกและเร็วกว่าแต่สามารถพิจารณาได้แต่เฉพาะแรงดัน ซึ่งเหมาะสำหรับการที่จะต้องจำลองเหตุการณ์หลายเหตุการณ์และช่วยลดเวลาในการคำนวณที่เกิดขึ้น ในการวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการที่ 2 ในการคำนวณแรงดันที่จุดโหลด เนื่องจากในการวิจัยนี้จะพิจารณาถึงแรงดันตกเป็นสาเหตุสำคัญ

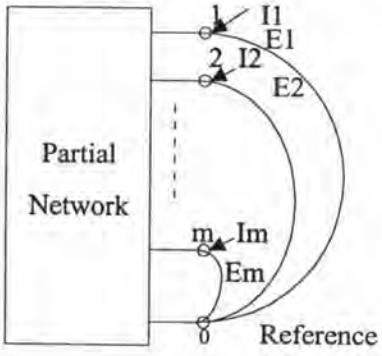
4.4.3.1 กระบวนการในการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ (Algorithm for formation of bus impedance matrix)[23]

โดยการสมมติ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ Z_{BUS} ของระบบย่อยหนึ่งซึ่งมี m บัส และ มีโนดอ้างอิงหนึ่งโนด (Node 0) สมการที่แสดงคุณลักษณะของระบบซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 คือ

$$E_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS} \tag{4.12}$$

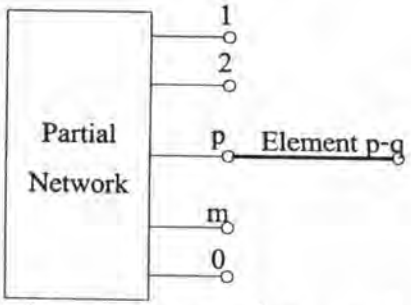
โดยที่ E_{BUS} = เป็นเวกเตอร์ขนาด m x1 ของ แรงดันบัสซึ่งวัดอ้างอิงกับโนดอ้างอิง

I_{BUS} = เป็นเวกเตอร์ขนาด m x 1 ของกระแสที่ไหลเข้าสู่บัส

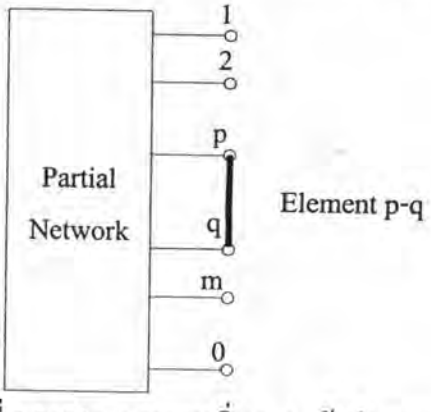


รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของระบบก่อนที่จะมีการเพิ่มชิ้นส่วน

เมื่อมีการเพิ่มชิ้นส่วน p-q เข้ากับระบบดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งมันอาจจะเป็น branch หรือ link ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.5(ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 (ก) แสดงการเพิ่ม branch เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 4.5 (ข) แสดงการเพิ่ม link เข้าสู่ระบบ

ถ้าชิ้นส่วนที่เพิ่มเป็น branch ก็จะเป็นการเพิ่มบัส q ให้กับระบบเดิม ทำให้ขนาดของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์เพิ่มขึ้นเป็น $(m + 1) \times (m + 1)$ และเพิ่มขนาดของเวกเตอร์กระแส และแรงดันเป็น $(m + 1) \times 1$ จะทำการหาบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ใหม่จะคำนวณเพิ่มเพียงในตำแหน่งของแถวหรือคอลัมน์ใหม่เท่านั้น

ถ้าชิ้นส่วนที่เพิ่มเป็น link ก็จะไม่มีบัสใหม่ที่เพิ่มให้กับระบบ ในกรณีนี้ขนาดของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ทุกตำแหน่งในบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์จะต้องถูกคำนวณใหม่เพื่อรวมผลของการเพิ่ม link เข้าไป

4.4.3.1.1 การเพิ่ม branch (Addition of a branch)

สมการที่แสดงคุณลักษณะของระบบที่มีการเพิ่ม branch p-q เป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdots \\ E_p \\ \cdots \\ E_m \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1p} & \cdots & Z_{1m} & Z_{1q} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2p} & \cdots & Z_{2m} & Z_{2q} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{p1} & Z_{p2} & \cdots & Z_{pp} & \cdots & Z_{pm} & Z_{pq} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mp} & \cdots & Z_{mm} & Z_{mq} \\ Z_{q1} & Z_{q2} & \cdots & Z_{qp} & \cdots & Z_{qm} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_p \\ \cdots \\ I_m \\ I_q \end{bmatrix} \qquad (4.13)$$

ในการสร้างบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในการวิจัยนี้จะไม่คิดผลของการคับปิ้ง(Coupling)ของชิ้นส่วนต่างๆที่มีต่อกัน โดยสมมติว่าในระบบนี้ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่เป็น bilateral passive element คือ $Z_{qi} = Z_{iq}$ และ $i = 1,2,\ldots,m$ เป็นหมายเลขของบัสในระบบซึ่งเป็นระบบเดิมก่อนที่จะเพิ่ม branch ใหม่ p-q

โดยที่ Z_{qi} สามารถคำนวณได้โดยการใส่กระแสไหลเข้าที่บัส i และคำนวณหาแรงดันที่บัส q ซึ่งเทียบกับโนดอ้างอิง โดยสมมติให้ ค่ากระแสที่ไหลเข้าบัสที่เหลือเป็น 0 จากสมการที่ 4.13 จะได้

$E_1 = Z_{1i}I_i$

$E_2 = Z_{2i}I_i$

.....

$$E_p = Z_{pi}I_i \qquad (4.14)$$

.....

$$E_m = Z_{mi}I_i$$

$$E_q = Z_{qi}I_i$$

โดยให้ค่า I_i ในสมการที่ 4.14 มีค่าเท่ากับ 1 p.u ดังนั้น Z_{qi} สามารถคำนวณหาได้โดยตรงจากค่าแรงดัน E_q แต่แรงดันที่บัส q สามารถคำนวณได้จากแรงดันที่บัส p และแรงดันที่ตกคร่อมชิ้นส่วน p-q ซึ่งจะได้ค่าแรงดันที่บัส q ตามสมการที่ (4.15)

$$E_q = E_p - v_{pq} \qquad (4.15)$$

เนื่องจากค่ากระแสในชิ้นส่วนใหม่ มีค่าเป็น 0 ($I_{pq} = 0$) และชิ้นส่วนที่เพิ่มเข้าไปใหม่ไม่มีการคับปิ้งกับชิ้นส่วนอื่นในระบบ ดังนั้น $v_{pq} = 0$ และ $E_q = E_p$ ดังนั้นทำให้ได้ค่า

$$Z_{qi} = Z_{pi} \qquad (4.16)$$

และ $Z_{qi} = Z_{iq}$ โดยที่ $i = 1,2,\ldots,m \quad i \neq q$

ส่วนค่า Z_{qq} สามารถคำนวณได้โดยการใส่กระแสไหลเข้าที่บัส q และคำนวณแรงดันที่บัส q โดยให้ค่ากระแสที่ไหลเข้าที่บัสอื่นๆ มีค่าเป็น 0 จากสมการที่ 4.13 จะได้

$$E_1 = Z_{1q}I_q$$

$$E_2 = Z_{2q}I_q$$

.....

$$E_p = Z_{pq}I_q \qquad (4.17)$$

.....

$$E_m = Z_{mq}I_q$$

$$E_q = Z_{qq}I_q$$

โดยให้ค่า $I_q = 1$ p.u แล้วหาค่า Z_{qq} จะหาได้จากค่าแรงดัน E_q ซึ่งแรงดันที่บัส p และ q จะมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 4.15 และค่ากระแสที่ไหลในชิ้นส่วน p-q คือ $i_{pq} = -I_q = -1$ เนื่องจากชิ้นส่วน p-q ไม่มีการคับปิ้ง ดังนั้น $v_{pq} = i_{pq}z_{pq}$ ซึ่งค่า z_{pq} เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นส่วน p-q

เนื่องจาก $E_q = E_p - v_{pq}$

จะได้ $E_q = E_p - i_{pq}z_{pq}$ โดยที่ $E_q = Z_{qq}I_q$ และ $E_p = Z_{pq}I_q$

เราก็จะสรุปได้ว่า $Z_{qq}I_q = Z_{pq}I_q - i_{pq}z_{pq}$ โดยที่ $I_q = -i_{pq} = 1$

จะได้ว่า $$Z_{qq} = Z_{pq} + z_{pq} \tag{4.18}$$

แต่ถ้า p เป็นโนดอ้างอิง ก็จะได้

$$Z_{pi} = 0 \qquad i = 1,2,\ldots,m \quad , i \neq q \tag{4.19}$$
$$Z_{qi} = 0 \qquad i = 1,2,\ldots,m \quad , i \neq q$$

ดังนั้น $Z_{pq} = 0$ เราก็จะได้ $Z_{qq} = z_{pq}$

4.4.3.1.2 การเพิ่ม link (Addition of a link)

ถ้าการเพิ่มชิ้นส่วน p-q เป็นการเพิ่ม link กระบวนการสำหรับการคำนวณหาค่าส่วนประกอบของบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ใหม่โดยการสมมติว่ามีแหล่งจ่ายแรงดัน e_l ต่ออนุกรมเข้ากับชิ้นส่วน p-q ก่อนที่จะเพิ่มชิ้นส่วน p-q เข้าที่ บัส p-q แล้วทำการสร้างโนดปลอม l ขึ้น ซึ่งสามารถจำกัดได้ในภายหลัง และขนาดของแรงดันของแหล่งจ่ายแรงดัน e_l จะถูกเลือกเพื่อปรับให้ค่ากระแสที่ไหลในชิ้นส่วน p-q มีค่าเป็น 0

ดังนั้นสมการที่แสดงคุณลักษณะของระบบที่มีการเพิ่มชิ้นส่วน p-l และแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่ออนุกรมเข้าไปเป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdots \\ E_p \\ \cdots \\ E_m \\ e_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1p} & \cdots & Z_{1m} & Z_{1l} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2p} & \cdots & Z_{2m} & Z_{2l} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{p1} & Z_{p2} & \cdots & Z_{pp} & \cdots & Z_{pm} & Z_{pl} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mp} & \cdots & Z_{mm} & Z_{ml} \\ Z_{l1} & Z_{l2} & \cdots & Z_{lp} & \cdots & Z_{lm} & Z_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_p \\ \cdots \\ I_m \\ I_l \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

ดังนั้น $$e_l = E_l - E_q$$

ค่า Z_{li} สามารถคำนวณหาได้โดยการใส่กระแสไหลเข้าที่บัส i แล้วคำนวณหาแรงดันที่บัส l เทียบกับบัส q โดยที่ ค่ากระแสที่ไหลเข้าที่บัสที่เหลือ เท่ากับ 0 เมื่อนำพิจารณากับสมการที่ 4.20 จะได้

$$E_k = Z_{ki}I_i \qquad k = 1,2,\ldots,m \tag{4.21}$$
$$e_l = Z_{li}I_i$$

โดยให้ค่า $I_i = 1$ p.u. ในสมการที่ 4.21 Z_{li} สามารถคำนวณได้โดยตรงจากการคำนวณค่า e_l ดังนั้นค่า e_l จะได้ค่า

$$e_l = E_p - E_q - v_{pl} \tag{4.22}$$

เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่าน link p-q มีค่าเป็น 0 ($i_{pq} = 0$) เนื่องจากชิ้นส่วน p-q ที่เพิ่มเข้าไปไม่การคับปิ้งกับชิ้นส่วนอื่นในระบบ และ $i_{pq} = i_{pl} = 0$ ดังนั้นจะได้ค่า $v_{pq} = 0$ ทำให้ได้ค่า

$$Z_{li}I_i = Z_{pi}I_i - Z_{qi}I_i$$

เนื่องจาก $I_i = 1$ จะได้ $\quad Z_{li} = Z_{pi} - Z_{qi} \qquad$ โดย $i = 1,2,\ldots,m, i \neq 1$ (4.23)

และ $\quad Z_{li} = Z_{il}$

ส่วนค่า Z_{ll} สามารถคำนวณได้โดยการใส่กระแสเข้าที่บัส l แล้วคำนวณหาค่าแรงดันที่บัส l เทียบกับ บัส q โดยให้ค่ากระแสที่ไหลเข้าบัสที่เหลือเท่ากับ 0 เมื่อพิจารณากับสมการที่ 4.20จะได้

$$E_k = Z_{kl}I_l \qquad k = 1,2,\ldots,m \tag{4.24}$$
$$e_l = Z_{ll}I_l$$

โดยให้ค่า $I_l = 1$ p.u. ในสมการที่ 4.24 Z_{ll} จะสามารถคำนวณได้โดยตรงจากการคำนวณค่า e_l ค่ากระแสในชิ้นส่วน p-l จะไปเป็นดังนี้คือ $I_{pl} = -I_l = -1$ เนื่องจากชิ้นส่วน p-l ไม่มีการคับปิ้ง ดังนั้น $v_{pl} = i_{pl}z_{pl}$ ซึ่งค่า z_{pl} เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นส่วน p-l และค่า $z_{pq} = z_{pl}$ ดังนั้นจะได้ผลดังนี้

เนื่องจาก $\quad e_l = E_p - E_q - v_{pl}$

จะได้ $\quad e_l = E_p - E_q - i_{pl}z_{pl} \qquad$ โดยที่ $E_q = Z_{ql}I_l$, $E_p = Z_{pl}I_l$ และ $e_l = Z_{ll}I_l$

เราก็จะสรุปได้ว่า $Z_{ll}I_l = Z_{pl}I_l - Z_{ql}I_l - i_{pl}z_{pl}$ โดยที่ $I_q = -i_{pq} = 1$ และ $z_{pq} = z_{pl}$

แล้วจะได้ว่า $\quad Z_{ll} = Z_{pl} - Z_{ql} + z_{pq}$ (4.25)

แต่ถ้า p เป็นโนดอ้างอิง ก็จะได้

$$Z_{pi} = 0 \qquad i = 1,2,\ldots,m \quad , i \neq q \tag{4.26}$$
$$Z_{li} = -Z_{qi} \qquad i = 1,2,\ldots,m \quad , i \neq q$$

ดังนั้น $Z_{pl} = 0$ เราก็จะได้ $Z_{ll} = -Z_{ql} + z_{pq}$

เนื่องจากโนด 1 เป็นโนดปลอมที่สร้างขึ้น เพื่อการคำนวณผลของการเพิ่ม link เมื่อคำนวณเสร็จก็จะทำการกำจัดโนด 1 ออกจากบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ ก็คือการกำจัดสมาชิกในแถวที่ 1 และคอลัมน์ที่ 1 ออกจากบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์

การกำจัดโนด 1 ซึ่งเป็นโนดปลอมออกจากบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์โดยทำการลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน e_1 จากสมการที่ 4.20 จะได้ว่า

$$E_{BUS} = Z_{BUS}I_{BUS} + Z_{i1}I_1 \tag{4.27}$$

และ $$e_1 = Z_{1j}I_{BUS} + Z_{11}I_1 \tag{4.28}$$

ซึ่ง i,j = 1,2,...,m แก้สมการที่ 4.28 เพื่อหาค่า I_1 นำไปแทนค่าในสมการที่ 4.27 จะได้

$$E_{BUS} = \left(Z_{BUS} - \frac{\overline{Z}_{i1}\overline{Z}_{1j}}{Z_{11}} \right) I_{BUS} \tag{4.29}$$

ดังนั้นค่าบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์หลังจากกำจัดโนด 1 จะได้ดังนี้คือ

$$Z_{BUS\,(modified)} = Z_{BUS} - \frac{\overline{Z}_{i1}\overline{Z}_{1j}}{Z_{11}} \tag{4.30}$$

4.4.3.1.3 การเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนออกจากระบบ

จากกระบวนการที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้เป็นการเพิ่มชิ้นส่วนเข้าสู่ระบบ ในส่วนนี้จะพิจารณาถึงการเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนออกจากระบบทำให้ค่าบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์เปลี่ยนค่าไป ส่วนกระบวนการในการเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนออกจากระบบ ก็คล้ายกระบวนการในการเพิ่มชิ้นส่วนเข้าสู่ระบบ ซึ่งถ้าต้องการเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนออกจากระบบ และชิ้นส่วนดังกล่าวไม่มีการคลับปิ้งกับชิ้นส่วนอื่นๆในระบบ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์จะถูกคำนวณหาค่าใหม่โดยการต่ออิมพีแดนซ์เข้าคร่อมชิ้นส่วนที่ต้องการเคลื่อนย้ายออกจากระบบซึ่งก็คือการเพิ่ม link เข้าสู่ระบบ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่ link เข้าไปใหม่จะมีค่าเป็นลบของค่าอิมพีแดนซ์ของชิ้นส่วนที่ต้องการนำออกจากระบบ ซึ่งหลักการเพิ่ม link ดูได้จากหัวข้อการเพิ่ม link

โดยเราจะใช้หลักการเพิ่มและลดชิ้นส่วนในระบบ เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ในเหตุการณ์ดังต่อไปนี้

1.)ระหว่างที่เกิดการลัดวงจรโดยการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเข้าสู่ระบบ

2.)หลังจากที่ระบบป้องกันเข้าเคลียร์การเกิดลัดวงจรโดยการนำเอาอุปกรณ์ที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบ

3.)เมื่ออุปกรณ์นั้นทำการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนตัวเสร็จก็นำอุปกรณ์นั้นกลับคืนเข้าสู่ระบบ

4.4.3.2 หลักการในการคำนวณแรงดันโดยใช้สมการเคอร์ชอฟ

การคำนวณแรงดันที่จุดโหลดเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ในการเกิดข้อขัดข้องโดยเราใช้สมการที่ 4.9 คือ $V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS}$

ก่อนที่เราจะใช้สมการที่ 4.9 เราจะต้องมีการตั้งข้อกำหนดเพื่อใช้ในการคำนวณก่อนคือ

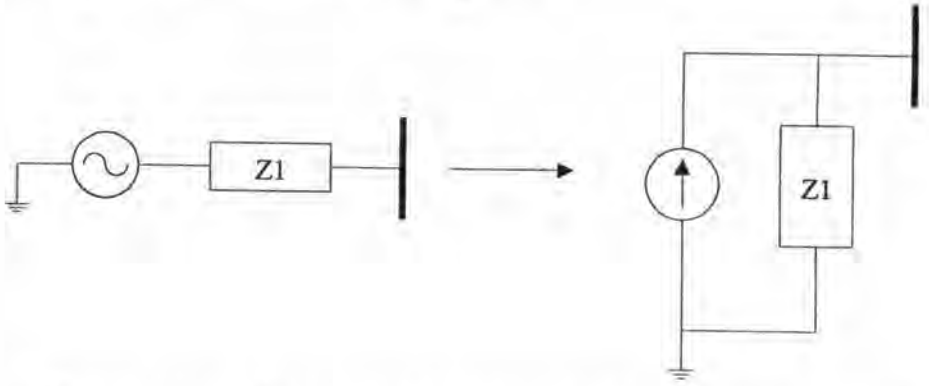
1.) ให้โหลดที่จุดโหลดแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์คงที่ค่าหนึ่งซึ่งต่อลงโนดอ้างอิง

2.) ส่วนด้านที่ได้รับการจ่ายไฟเข้ามาจะแทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งมีขนาดของแรงดันคงที่

จากนั้นทำการคำนวณโดยการเปลี่ยนจากแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแหล่งจ่ายกระแส โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของที่ต่ออยู่กับบัสที่ได้การจ่ายไฟ ซึ่งค่าขนาดของกระแสของแหล่งจ่ายกระแสจะคำนวณได้จาก

$$I_{sourse} = V_{sourse}/Z1 \qquad (4.31)$$

ส่วนอิมพีแดนซ์ที่ต่อคร่อมแหล่งจ่ายกระแส จะมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายแรงดัน และรูปลักษณะการเปลี่ยนแสดงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนจากแบบจำลองแหล่งจ่ายแรงดันเป็นแหล่งจ่ายกระแส

เมื่อได้ค่าขนาดของกระแสของแหล่งจ่ายกระแสแล้วจึงนำไปใช้ในเป็นค่า I_{BUS} ซึ่งจะมีค่ากระแสที่ไหลเข้าที่บัสเฉพาะบัสที่มีการต่อกับแหล่งจ่ายไฟเท่านั้น จากนั้นใช้สมการที่ 4.9 คำนวณหาค่าแรงดันที่จุดโหลดได้ โดยเราจะคำนวณค่าแรงดันในสภาวะที่เกิดลัดวงจรโดยการใส่ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรเข้าที่ระบบซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ แล้วทำการคำนวณแรงดันที่จุดโหลดโดยใช้สมการที่ 4.9 เมื่ออุปกรณ์ป้องกันทำงานจะมีการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบก็จะทำการเปลี่ยนแปลงบัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์อีก แล้วก็ทำการคำนวณแรงดันที่จุดโหลดโดยใช้สมการที่ 4.9 ซึ่งทำให้เราได้รูปแบบของแรงดันที่แต่ละจุดโหลดระหว่างการเกิดลัดวงจรและระหว่างที่อุปกรณ์ป้องกันของระบบเข้าไปตัดวงจร เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ในการเกิดข้อ

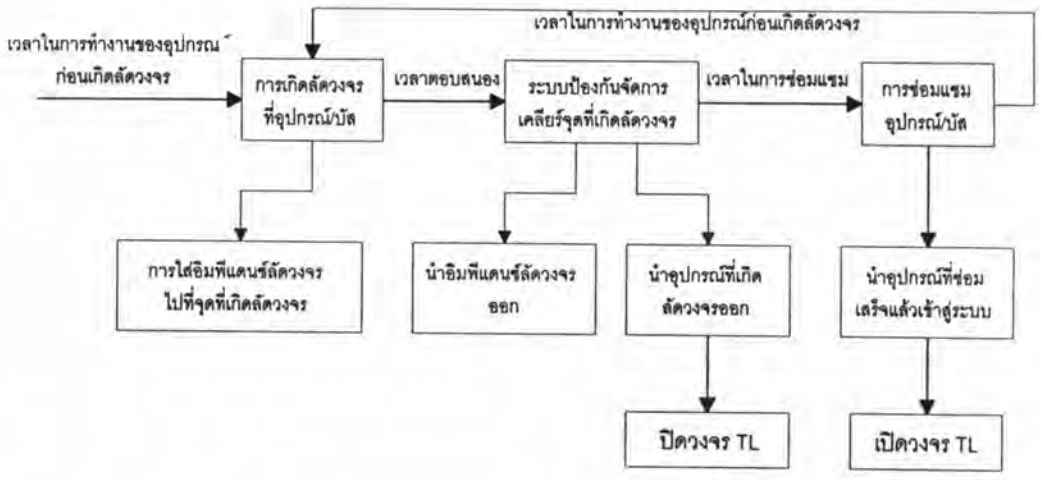
ขัดข้องที่แต่ละจุดโหลด เพื่อวิเคราะห์ว่าที่จุดโหลดนั้นเกิดการขัดข้องหรือไม่ โดยวิธีการนี้ทำให้เราสามารถคำนวณแรงดันที่จุดโหลดได้ในสภาวะที่แตกต่างกันได้

4.4.4 อุปกรณ์แบบเฟ้นสุ่ม(Stochastic components)

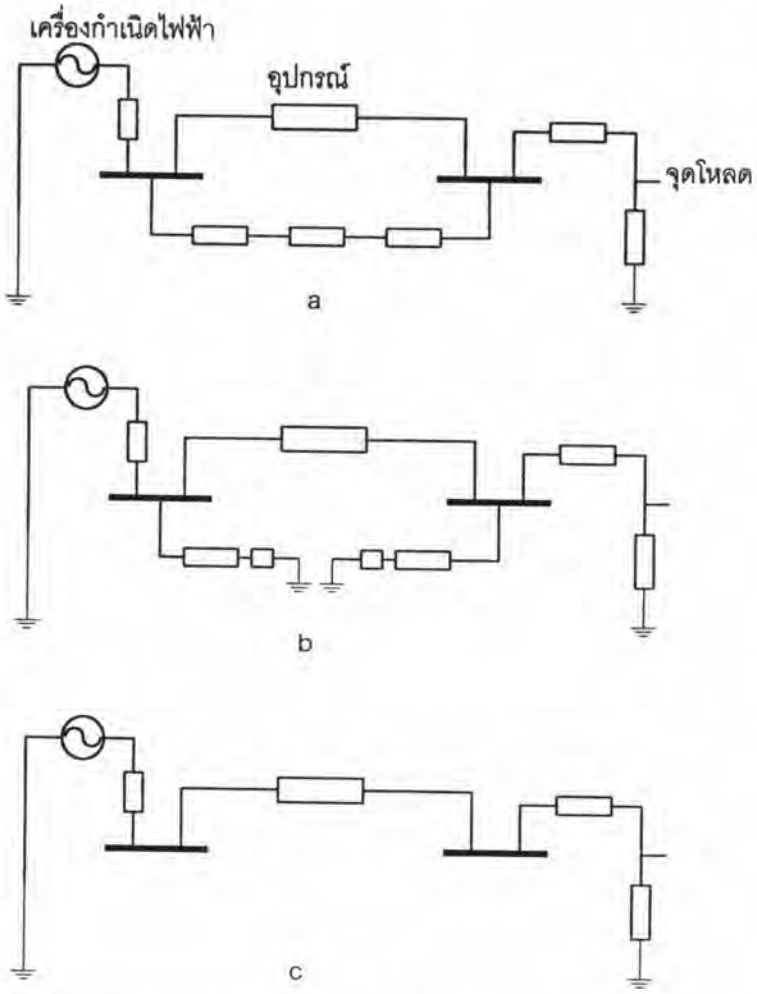
อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่จัดเป็นอุปกรณ์แบบเฟ้นสุ่มในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่ สายส่ง เคเบิล หม้อแปลง บัส

4.4.5 เหตุการณ์ระหว่างการเกิดการลัดวงจร [11,12]

จากรูปที่ 4.7 แสดงลำดับขั้นตอนของเหตุการณ์ต่าง ๆ ระหว่างการเกิดลัดวงจรของระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ ก่อนที่จะเข้าสู่เหตุการณ์ต่างๆระหว่างการเกิดลัดวงจร เราจะต้องทราบเวลาในการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดการลัดวงจรก่อน(TTF) ซึ่งระหว่างที่เกิดเหตุลัดวงจรขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของการลัดวงจร(Short-circuit branch , มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก) จะถูกนำเข้ามาแทรกไว้ในตำแหน่งที่เกิดการผิดพร่อง และตำแหน่งการเกิดลัดวงจรของอุปกรณ์ที่ไม่ใช่จุดโนดจะใช้การสุ่มหาจากตัวเลข (0,1) เป็นตัวกำหนดว่าจะเกิดลัดวงจรที่ตำแหน่งใดในอุปกรณ์ตัวนั้น ต่อจากนั้นเซอร์กิตเบรคเกอร์เข้ามาทำงานโดยใช้ช่วงเวลาตอบสนอง(Reaction time:ช่วงเวลาในการตัดสินใจและเข้าทำงานของรีเลย์) ก่อนที่จะมีการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบ และอิมพีแดนซ์ลัดวงจรก็จะถูกนำออกจากระบบด้วย ซึ่งเบรคเกอร์ตัวใดจะเข้ามาทำงานและมีช่วงเวลาตอบสนองนานเพียงใดจะพิจารณาจากการทำงานของระบบป้องกันซึ่งเราจะป้อนเข้าไปให้ทราบ และถ้ามีระบบถ่ายโอนโหลด (Transfer load) เมื่อมีการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่เกิดลัดวงจรออก ตัวมันก็จะทำงาน(ปิดวงจร)เพื่อรับการจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งอื่น หลังจากเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ที่เกิดการลัดวงจร เราจะคำนวณหาค่าเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซม(Repair time) หลังจากนั้นก็จะเข้าสู่กระบวนการการซ่อมแซม และในระหว่างกระบวนการซ่อมแซม อุปกรณ์ที่ซ่อมเสร็จแล้วจะถูกนำกลับคืนสู่ระบบ ส่วนระบบถ่ายโอนโหลดก็จะถูกนำออกจากระบบ(เปิดวงจร) และเหตุการณ์การลัดวงจรครั้งใหม่จะถูกนำเข้ามาในลำดับขั้นตอนของเหตุการณ์ต่อไป ส่วนรูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของส่วนแบบจำลองไฟฟ้าของระบบเมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจร โดยที่รูป a จะเป็นสภาพของระบบก่อนเกิดลัดวงจร รูป b เป็นสภาพของระบบระหว่างที่เกิดลัดวงจรซึ่งจะมีการใส่อิมพีแดนซ์ลัดวงจรไปที่จุดที่เกิดลัดวงจร และรูป c เป็นสภาพของระบบเมื่อระบบป้องกันเข้ามาจัดการนำอุปกรณ์ที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบ และเมื่อการซ่อมแซมเสร็จก็จะกลับไปมีสภาพเหมือนรูป a ดังเดิม



รูปที่ 4.7 แสดงถึงลำดับขั้นตอนของเหตุการณ์เนื่องจากเกิดการลัดวงจรที่ส่วนต่างๆ หรือ บัส

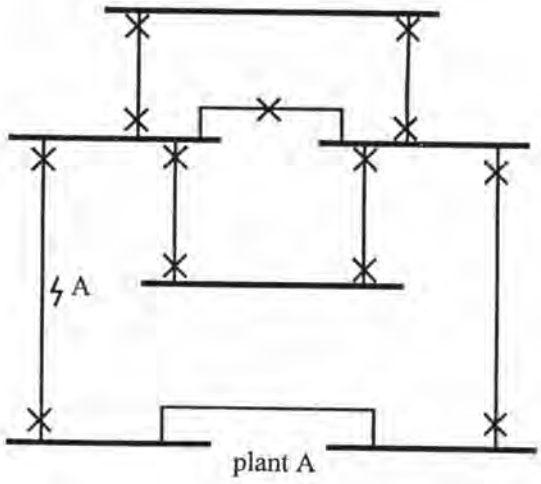


รูปที่4.8 แสดงระบบไฟฟ้าก่อน(รูปบน),ระหว่าง(รูปตรงกลาง),หลัง(รูปด้านล่าง)การเกิดลัดวงจร

4.4.6 การทำงานเซอร์กิตเบรคเกอร์และระบบป้องกัน [13]

ในระบบป้องกันเราจะคิดผลการทำงานของเซอร์กิตเบรคเกอร์ และโครงสร้างของระบบป้องกัน ซึ่งจะนำมาใช้เพื่อจำลองพฤติกรรมการทำงานของระบบป้องกันที่คำนึงถึงทั้งการทำงานที่ถูกต้องและผิดพลาดได้ เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือเมื่อมีการสั่งงานทริปที่ผิดพลาด (Mal-trip) รีเลย์(คิดผลของรีเลย์รวมกับเซอร์กิตเบรคเกอร์)จะเข้าไปสั่งงานให้เซอร์กิตเบรคเกอร์ตัดวงจรในระบบให้มีการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์หนึ่งตัวหรือหลายตัวออกจากระบบ นอกจากนั้นรีเลย์สั่งงานให้ทริปแต่เซอร์กิตเบรคเกอร์ไม่ทำงานเมื่อเกิดการลัดวงจร(Stuck Breaker) ซึ่งเหล่านี้เป็นรูปแบบต่างๆของการทำงานของเซอร์กิตเบรคเกอร์ที่เกิดขึ้นในระบบ

ส่วนโครงสร้างระบบป้องกัน ในกรณีที่เกิดการลัดวงจร ระบบป้องกันขั้นต้น(Primary Protection)จะทำการสั่งให้มีการตัดส่วนที่เกิดลัดวงจรออกจากระบบ แต่ถ้าระบบป้องกันในขั้นต้นไม่ทำงาน ส่วนของระบบป้องกันสำรอง(Back-up Protection)จะเข้ามาสั่งงานแทนเพื่อให้เกิดการป้องกันระบบ ในกรณีจะคิดระบบป้องกันสำรองเพียง 1 ขั้นเท่านั้นโดยให้ระบบป้องกันสำรองทำงาน 100 % ส่วนหลักการในการป้องกันคือ เมื่อเซอร์กิตเบรคเกอร์ตัวหนึ่งซึ่งถูกสั่งงานให้ตัดวงจรในระบบป้องกันขั้นต้นไม่ทำงานเนื่องจากเกิด stuck breaker เราก็จะใช้เซอร์กิตเบรคเกอร์ตัวถัดไปซึ่งอยู่ใกล้ที่สุดกับเซอร์กิตเบรคเกอร์ตัวที่ไม่ทำงาน ทำการตัดวงจรแทนในระบบป้องกันสำรอง โดยจะต้องตัดวงจรเพื่อไม่ให้กระแสไหลผ่านจุดที่เกิดลัดวงจร ซึ่งอาจจะต้องใช้เซอร์กิตเบรคเกอร์หลายตัวในการตัดวงจรสำหรับระบบป้องกันสำรอง นอกจากนั้นยังจะต้องมีการพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการเคลียร์การเกิดลัดวงจรทั้งในระบบป้องกันขั้นต้นและระบบป้องกันสำรองซึ่งทั้งสองส่วนจะต้องมีความสัมพันธ์กันด้วย



รูปที่ 4.9 แสดงการวางตำแหน่งของเบรคเกอร์ในระบบตัวอย่าง