บทที่ 2

การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยวิธีความน่าจะเป็น

จากบทที่ 1 ได้กล่าวไปแล้วว่าการประเมินความเชื่อถือได้อาศัยกฎเกณฑ์ที่สำคัญ 2 ประการได้แก่ กฎเกณฑ์การตัดสินใจ และกฎเกณฑ์ความน่าจะเป็น ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าโดยใช้กฎเกณฑ์ความน่าจะเป็นที่อาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็นมาใช้ในการคำนวณ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน [9,10]

2.1 ความจำเป็นและแนวคิดของการประเมินความเชื่อถือได้

ปัจจุบันในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ เยอรมัน ญี่ปุ่น ฯลฯ นั้น หน่วยงานการไฟฟ้าที่กำลังดำเนินกิจการอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมทั้งทางเศรษฐกิจ สังคมและการเมืองได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากจากเมื่อหลายสิบปีที่แล้ว (ช่วงปี ค.ศ. 1945 ถึงปลายปี ค.ศ. 1950) [10] ในยุคต้นหลังสงครามโลกครั้งที่สองนั้น การวางแผนสร้างโรงไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่น ๆ มักจะทำกันได้อย่างไม่ยากเย็นนัก การที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มอย่างคงที่ในช่วงทุกปีที่ทำการศึกษาหรือพิจารณา รวมทั้งโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสมัยก่อนยังไม่ยุ่งยากและมีขนาดไม่ใหญ่เมื่อเทียบกับกำลังผลิตทั้งหมดนั้นทำให้การเตรียมจัดหากำลังผลิตทำได้ง่าย หลังจากนั้นความต้องการใช้ไฟฟ้าค่อย ๆ เพิ่มสูงมากขึ้นจนกระทั่งประมาณกลางปี ค.ศ. 1970 สถานการณ์ได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างฉับพลัน เนื่องจากเกิดวิกฤตการณ์ทางด้านพลังงานทำให้ราคาน้ำมันสูงขึ้นและเกิดสภาวะเงินเฟ้อ ทำให้แนวโน้มในด้านต่าง ๆ เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการทำนายความต้องการใช้ไฟฟ้าจึงมีความผิดพลาดมากเนื่องจากมีการอนุรักษ์พลังงานทำให้มีการใช้พลังงานน้อยลง กำลังการผลิตที่ติดตั้งเผื่อไว้ตั้งแต่ต้นจึงเป็นส่วนที่เหลือใช้อยู่ในระบบ ภาพรวมในตอนนั้นจึงมีแต่เฉพาะการแก้ไขสภาวะเงินเฟ้อและเศรษฐกิจที่ถดถอย โดยแนวคิดความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังยังไม่เข้ามามีบทบาทสำคัญมากนัก

แนวคิดของความเชื่อถือได้เริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อทางการไฟฟ้าในประเทศต่าง ๆ รวมทั้งประเทศไทยเมื่อเศรษฐกิจเริ่มดีขึ้นทำให้การใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนการขยายระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่สามารถดำเนินการได้ทันตามความต้องการใช้ไฟฟ้า และเป็นสาเหตุให้เกิด

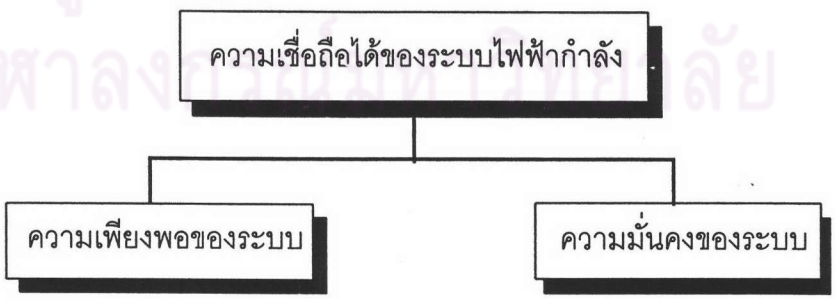
ไฟฟ้าดับบ่อยขึ้นเมื่อเกิดอุปกรณ์ขัดข้อง ดังนั้นรัฐบาล และองค์กรต่าง ๆ รวมทั้งประชาชนทั่วไปจึงเริ่มให้ความสนใจและแสดงความคิดเห็นต่อการปฏิบัติงานของการไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งไม่เคยปรากฏมาก่อนเมื่อช่วงยี่สิบกว่าปีที่แล้ว สิ่งเหล่านี้เป็นเหตุให้เกิดการคิดและการพัฒนาหลักเกณฑ์ และเทคนิคในการประเมินความเชื่อถือได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการทำความเข้าใจและสามารถระบุถึงขอบเขตของปัญหาในแง่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเชื่อถือได้ รวมทั้งการทราบถึงข้อมูลต่าง ๆ เทคนิคและวิธีการคำนวณ จึงนับว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อบุคลากรในการไฟฟ้าอย่างยิ่ง นอกจากนี้การทำให้ประชาชนมีแนวคิดแบบเดียวกันก็นับว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นเช่นกัน

2.2 ความหมายของความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

หน้าที่หลักของแต่ละการไฟฟ้า คือ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ในราคาถูกเท่าที่จะทำได้โดยให้มีคุณภาพและความต่อเนื่องของกระแสไฟฟ้าอยู่ในระดับที่เหมาะสม ความสามารถของระบบที่จะจ่ายกำลังผลิตให้ได้อย่างเพียงพอนั้น โดยปกติจะวัดกันในรูปของความเชื่อถือได้ อย่างไรก็ตามแนวคิดของความเชื่อถือได้นั้นกว้างและครอบคลุมแทบทุกสาขาของทุกระบบ

ความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น หมายถึงแนวคิดทั่ว ๆ ไปซึ่งได้รวบรวมเอาสิ่งที่บ่งชี้ความสามารถในการส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังจุดต่าง ๆ ในระบบด้วยปริมาณที่เพียงพอกับความต้องการและมีมาตรฐานหรือคุณภาพอันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไป

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [2,9,10,12] คือ ความเพียงพอของระบบ (System adequacy) และความมั่นคงของระบบ(System security) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ประเภทของความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ความเพียงพอของระบบ (System adequacy) [2,9,10,12] หมายถึงความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าและพลังงานทั้งหมดได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า โดยที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังยังคงทำงานภายในพิกัดและมีระดับแรงดันอยู่ในช่วงที่กำหนด ในการศึกษาความเชื่อถือได้ที่เกี่ยวข้องกับความเพียงพอของระบบ จะเป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะอยู่ตัว (Steady-state condition) เพื่อทำการตรวจสอบปัญหาที่จะเกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้ากำลัง โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายวงจรแบบอยู่ตัว (Steady-state network model) เช่น การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load flow analysis) สำหรับปัญหาที่จะทำการตรวจสอบได้แก่ การมีกำลังผลิตไม่เพียงพอ (Insufficient generation) อุปกรณ์ระบบส่งมีโหลดเกินพิกัด (Overload) และแรงดันไฟฟ้าที่บัสไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด (Voltage violation) เป็นต้น

ความมั่นคงของระบบ (System security) [2,9,10,12] หมายถึงความสามารถของระบบไฟฟ้ากำลังที่จะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดซึ่งเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น เกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง หรืออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดขัดข้องแบบทันทีทันใดโดยไม่ทราบล่วงหน้า เป็นต้น การศึกษาความเชื่อถือได้ในด้านความมั่นคงของระบบจะทำการวิเคราะห์ระบบในสภาวะพลวัต (Dynamic condition) โดยใช้แบบจำลองพลวัต (Dynamic models) เพื่อตรวจสอบปัญหาที่อาจเกิดขึ้น โดยที่ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้น ได้แก่ ความไม่มีเสถียรภาพ (Instability) การเกิดโหลดเกินแบบต่อเนื่อง (Overload cascading) และการพังทลายของแรงดัน (Voltage collapse) เป็นต้น

สิ่งสำคัญที่ควรทราบอีกสิ่งหนึ่งก็คือ เทคนิคทางความน่าจะเป็นส่วนใหญ่ที่มีใช้อยู่ในระบบปัจจุบันจะเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับความเพียงพอ เช่น การเตรียมกำลังการผลิตและระบบสายส่งให้เหมาะสมเป็นต้น ส่วนที่เกี่ยวข้องกับความมั่นคงมักจำกัดอยู่กับการหาปริมาณความต้องการของกำลังผลิตสำรองที่พร้อมจ่าย (Spinning reserve) หรือ กำลังผลิตสำรองสำหรับการปฏิบัติงาน (Operating reserve) เป็นต้น

2.3 การจัดแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อใช้ในการประเมินค่าความเชื่อถือได้

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบันมีโครงสร้างวงจรที่ซับซ้อนและประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายชนิด ดังนั้นเพื่อให้สะดวกแก่การวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเชื่อถือได้จึงจัดแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบส่วนย่อยที่เหมาะสม ได้แก่ ระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย เป็นต้น การจัดแบ่งระบบออกเป็นส่วนย่อยดังกล่าวอาจจำแนกตามลักษณะองค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่รวมอยู่ในระบบส่วนย่อย หรือลักษณะการทำงานของตัวระบบไฟฟ้าเอง ตัวอย่าง

การจัดแบ่งระบบส่วนย่อยเพื่อใช้ในการแยกวิเคราะห์หาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ ตามเอกสารอ้างอิง [10,12] สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. สถานีผลิตกำลังไฟฟ้า (Generating station) สามารถแยกวิเคราะห์รายละเอียดลงไปในระดับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละเครื่อง (Generating unit) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกเครื่องในสถานีนั้น ๆ

2. กำลังการผลิตรวมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generating capacity) พิจารณาถึงสถานะของกำลังผลิตรวมในแต่ละสถานะการเกิดเหตุขัดข้องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อความต้องการกำลังไฟฟ้าของระบบ เมื่ออุปกรณ์ต่าง ๆ และระบบสายส่งทำงานปกติ

3. ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าและระบบสายส่งขนาดใหญ่ (Composite generation and transmission system) ซึ่งอาจรวมหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงไว้ด้วย

4. ระบบสายส่งย่อย/ระบบจำหน่าย (Network of distribution system)

5. ระบบเชื่อมโยงไฟฟ้ากำลัง (Interconnected system)

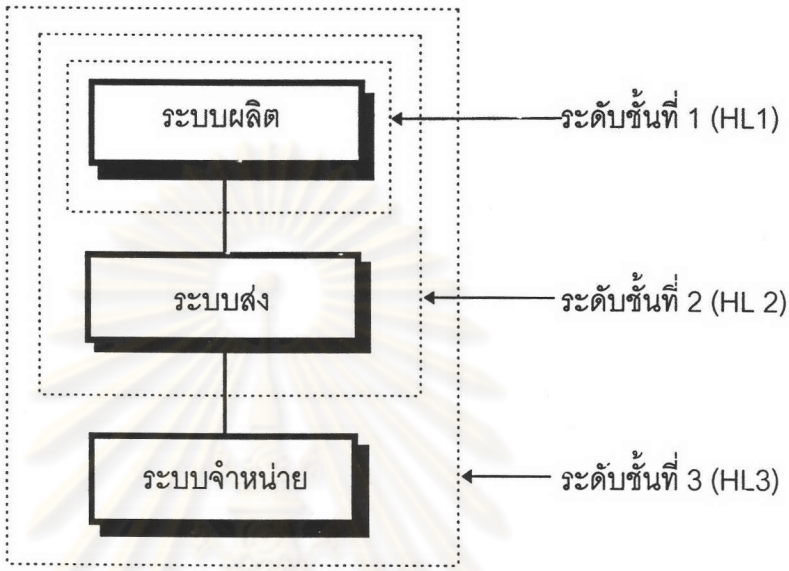
6. สถานีไฟฟ้าย่อยและสถานีสวิทชิ่ง (Substation and switching stations)

7. ระบบป้องกัน (Protection systems)

จากการจัดแบ่งระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบส่วนย่อยดังกล่าวมาเบื้องต้น สามารถนำมาสรุปรวมดังในรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงขอบเขตของการพิจารณาหาค่าความเชื่อถือได้ในระดับ (Hierarchical Level) ต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ระบบการผลิตกำลังไฟฟ้า ระบบสายส่งขนาดใหญ่ และระบบสายส่งย่อย/ระบบจำหน่าย จนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า การจัดแบ่งดังกล่าวเพื่อวัตถุประสงค์ในการพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าอันเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปในปัจจุบัน [10,12] ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

ระดับชั้นที่ 1 (Hierarchical Level One,HL1) พิจารณาเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าเพียงระบบเดียว โดยเป็นการศึกษาถึงความสามารถของระบบผลิตไฟฟ้าที่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้า เป็นการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากสถานะการเกิดเหตุขัดข้องในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจทำให้กำลังการผลิตรวมของระบบไม่เพียงพอกับความต้องการของโหลด ปัจจุบันค่าดัชนีความเชื่อถือได้ต่าง ๆ ในระดับนี้ได้เป็นที่ยอมรับกันมากขึ้นทั้งในด้านวิธีการ คำจำกัดความ และความหมายของค่าดัชนีสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกันได้ [12] การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระดับ HL1 นี้ไม่

ซับซ้อนมากนักโดยในการสร้างแบบจำลองจะพิจารณารายละเอียดเฉพาะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและแบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าเท่านั้น



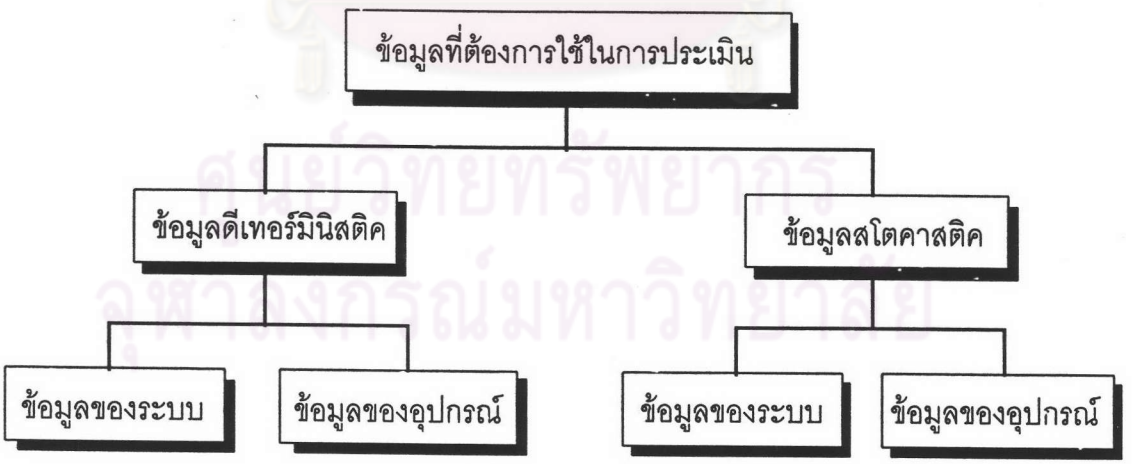
รูปที่ 2.2 การจัดแบ่งระบบไฟฟ้าออกเป็น 3 ระดับชั้น (Three Hierarchical Level)

ระดับชั้นที่ 2 (Hierarchical Level Two,HL2) เป็นการพิจารณารวมระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าและระบบส่งไฟฟ้าเข้าด้วยกัน โดยจะเรียกว่าระบบไฟฟ้าผสม (Composite systems) หรือระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ (Bulk power systems) [10,12] ซึ่งจะรวมผลของแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระดับ HL1 เข้ากับแบบจำลองระบบสายส่งขนาดใหญ่ (Bulk transmission model) และรวมถึงหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) จากนั้นใช้เทคนิคการคำนวณโหลดโฟลว์เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ระบบสามารถจ่ายให้กับโหลดบัสต่าง ๆ ในแต่ละสถานะการเกิดเหตุขัดข้อง กรณีที่กำลังการผลิตในสถานะการเกิดเหตุขัดข้องนั้นไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้กับโหลดบัสต่าง ๆ ในระบบหรือเกิดการชำรุดของสายส่ง/หม้อแปลงไฟฟ้า หรือเกิดโหลดเกินพิกัดขึ้นในสายส่ง "วิธีการแก้ไขปัญหา" (Remedial action) [2,13,14] จะถูกนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวก่อนการคำนวณค่าความเชื่อถือได้ ซึ่งค่าความเชื่อถือได้นั้นอาจพิจารณาได้ทั้งในระดับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของจุดโหลด (Load point indices) และค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของทั้งระบบ (Overall system indices) วิธีการคำนวณได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ระดับชั้นที่ 3 (Hierarchical Level Three,HL3) **เป็นการพิจารณารวมระหว่างระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งไฟฟ้าและระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยนำผลของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ระดับโหลดบัส ณ บัสต่าง ๆ จากการคำนวณในระดับ HL2 มาประกอบร่วมกับการหาค่าความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย (Distribution system) ค่าดัชนีต่าง ๆ ที่คำนวณได้ส่วนใหญ่จะแสดงถึงคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังที่สามารถจะส่งกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าตามที่ต้องการ**

2.4 ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

การประเมินหรือการวิเคราะห์พฤติกรรมความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยอาศัยวิธีความน่าจะเป็นเพิ่งได้รับการยอมรับในช่วงทศวรรษ 1930 ที่ผ่านมา [9] เหตุผลที่วิธีการดังกล่าวไม่เป็นที่แพร่หลายในช่วงก่อนเวลาดังกล่าวคือ การขาดแคลนข้อมูลอันนอกเหนือจากเหตุผลในด้านข้อจำกัดของเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งยังไม่ได้รับการพัฒนา และขาดเทคนิควิธีการประเมินค่าความเชื่อถือได้ที่เหมาะสม สำหรับปัจจุบันเหตุผลดังกล่าวทั้งหมดข้างต้นมิใช่ปัญหาอีกต่อไป เนื่องจากข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการประเมินได้รับการจัดเก็บโดยการไฟฟ้า (Electric utility) ไว้อย่างเพียงพอแล้ว โดยข้อมูลที่ต้องการใช้ในการประเมินดัชนีความเชื่อถือได้สามารถจัดแบ่งได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การจัดแบ่งประเภทข้อมูลสำหรับใช้ในการประเมินค่าดัชนีความเชื่อถือได้

2.4.1 **ข้อมูลดีเทอร์มินิสติค** (Deterministic data) [2,9]

ข้อมูลดีเทอร์มินิสติคประกอบด้วยข้อมูลของอุปกรณ์ (Component data) และข้อมูลของระบบ (System data) โดยข้อมูลของอุปกรณ์เป็นข้อมูลที่ได้จากการกำหนด หรือคำนวณผลจากคุณสมบัติเฉพาะของข้อมูลในอุปกรณ์ เช่น ค่าอิมพิแดนซ์ (Impedance) ค่าซัสซัพแตนซ์ (Susceptance) ของสายส่ง ขนาดของสายส่ง ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตลอดจนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณโหลดโฟลว์ เป็นต้น ซึ่งค่าดังที่กล่าวมาข้างต้นเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ใช้อยู่ทั่วไปแล้วในการคำนวณทางวิศวกรรม สำหรับข้อมูลของระบบเป็นข้อมูลที่ใช้อธิบายผลตอบสนองของระบบและวิธีการแก้ไข (Remedial action) ภายใต้สภาวะการเกิดเหตุขัดข้อง ตัวอย่างเช่น มีสายส่ง 2 สายส่งเดินขนานกันไปหากว่ามีสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่งเกิดขัดข้อง จะมีวิธีการจัดการกับการรับโหลดของสายส่งที่เหลืออย่างไร โดยอาจจะตัดสายส่งเส้นนั้นออกจากระบบไปด้วยหรือว่าปล่อยให้ทำงานต่อไปในภาวะโหลดเกินพิกัดซึ่งถ้าสายส่งเส้นนั้นรับโหลดเกินพิกัดนาน ๆ อาจจะทำให้เกิดการหลุดออกจากระบบไปด้วยได้ หรือว่ามีวิธีการแก้ไขอื่น ๆ ที่จะจัดการเพื่อรักษาการทำงานของระบบโดยรวมให้สามารถทำงานต่อไปได้ ข้อมูลเหล่านี้จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการศึกษาเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังในระดับ HL2

2.4.2 **ข้อมูลสโตคาสติค** (Stochastic data) [2,9]

ข้อมูลประเภทนี้เป็นข้อมูลของตัวแปรสุ่ม (Random Variables) ซึ่งจะใช้ในการจำลองพฤติกรรมหรือความน่าจะเป็นสำหรับสถานะการทำงานที่แตกต่างกันโดยมีค่าไม่แน่นอน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทเช่นเดียวกับข้อมูลดีเทอร์มินิสติค โดยที่ข้อมูลของอุปกรณ์ (Component data) ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับโอกาสที่จะเกิดการล้มเหลว (Failure parameters) ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับระยะเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมของอุปกรณ์แต่ละชิ้นในระบบ (Repair parameters) เป็นต้น ส่วนข้อมูลของระบบ (System data) จะเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกรณีเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบตั้งแต่ 2 อุปกรณ์ขึ้นไป เช่น ผลของการเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน (Common mode outages) เป็นต้นซึ่งรายละเอียดของการเกิดข้อขัดข้องจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

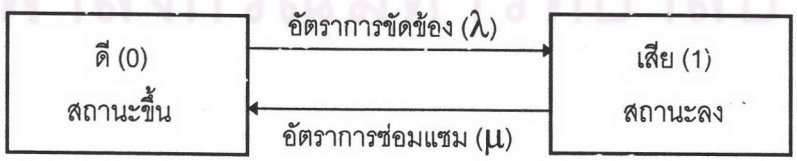
2.5 ประเภทของการเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์ในระบบตั้งแต่สองอุปกรณ์ขึ้นไป

ในการศึกษาหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังสามารถจัดแบ่งประเภทของการเกิดข้อขัดข้องได้ออกเป็น 4 ลักษณะดังนี้ [9,12]

1.การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์เป็นอิสระต่อกัน
(Independent outages)
2.การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ไม่เป็นอิสระต่อกัน
(Dependent outages)
3.การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์ที่มีสาเหตุร่วมกัน
(Common mode outages/Common cause outages)
4.การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์ที่มีสาเหตุมาจากการทำงานของสถานีไฟฟ้า
(Station originated outages)

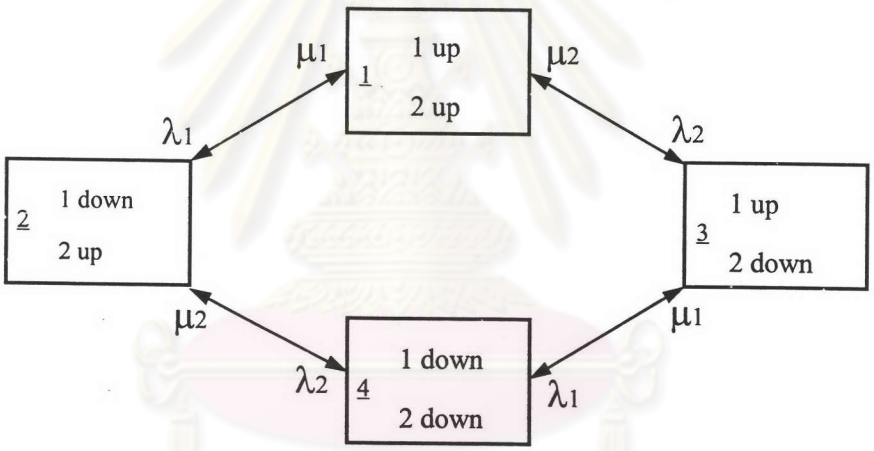
2.5.1 การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์เป็นอิสระต่อกัน

การเกิดข้อขัดข้องประเภทนี้อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการเกิดข้อขัดข้องแบบอิสระเป็นการเกิดข้อขัดข้องที่เข้าใจง่ายที่สุดในการศึกษา การเกิดข้อขัดข้องแบบนี้จะหมายถึงการที่อุปกรณ์ตั้งแต่สองอุปกรณ์ขึ้นไปเกิดขัดข้องพร้อม ๆ กัน และการขัดข้องของแต่ละอุปกรณ์นี้จะเป็นอิสระต่อกัน ความน่าจะเป็นของการขัดข้องแบบนี้สามารถหาได้จากผลคูณของความน่าจะเป็นในการขัดข้องของแต่ละอุปกรณ์ สำหรับแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ใช้ในกรณีนี้ เป็นแบบ 2 สถานะ (Two-state model) ซึ่งอุปกรณ์จะอยู่ในสถานะดี (Up-state) หรือสถานะเสีย (Down-state) สถานะใดสถานะหนึ่งดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองสถานะ (State space diagram)

อัตราการออกจากสถานะดีไปสู่สถานะเสียเรียกว่าอัตราการขัดข้อง (Failure rate) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ λ มีหน่วยเป็นครั้งต่อปี ส่วนอัตราการออกจากสถานะเสียกลับไปสู่สถานะดีเรียกว่าอัตราการซ่อมแซม (Repair rate) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ μ มีหน่วยเป็นครั้งต่อปี แต่ในบางกรณีอาจจะนำแสดงในรูปของเวลาเฉลี่ยของการขัดข้อง r มีหน่วยเป็นชั่วโมง สำหรับกระบวนการซ่อมแซมเพื่อให้อุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะเสียกลับคืนสู่สถานะดีมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์จะอยู่ในสถานะใช้งานไม่ได้ (Unavailability) มีค่าแตกต่างกัน ตัวอย่างของกระบวนการซ่อมแซมแบบต่าง ๆ ได้แก่ High speed automatically re-closed ; Slow speed automatically re-closed ; without repair ; with repair กระบวนการซ่อมแซมแบบต่าง ๆ เหล่านี้จะมีค่าเวลาการขัดข้องที่ต่างกันทำให้ค่าอัตราการซ่อมแซมที่แตกต่างกัน แบบจำลองการเกิดข้อขัดข้องแบบอิสระของอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์ มีลักษณะดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการเกิดข้อขัดข้องแบบอิสระของอุปกรณ์ 2 อุปกรณ์

จากแบบจำลองในรูปที่ 2.5 สามารถอธิบายได้ดังนี้

ก) <u>สถานะที่ 1</u> (1 up, 2 up) หมายถึงสถานที่อุปกรณ์ที่ 1 และอุปกรณ์ที่ 2 ยังไม่เกิดข้อขัดข้อง ดังนั้นอุปกรณ์ที่ 1 มีโอกาสเกิดขัดข้องเพียงอุปกรณ์เดียวด้วยค่าอัตราการขัดข้อง λ_1 ในขณะที่อุปกรณ์ที่ 2 ยังไม่เกิดขัดข้องดังสถานะที่ 2 หรือโอกาสที่อุปกรณ์ที่ 2 จะเกิดขัดข้องเพียงอุปกรณ์เดียวด้วยค่าอัตราการขัดข้อง λ_2 ในขณะที่อุปกรณ์ที่ 1 ยังไม่เกิดขัดข้องดังสถานะที่ 3

ข) <u>สถานะที่ 2</u> (1 down, 2 up) ที่สถานะนี้โอกาสที่อุปกรณ์ที่ 1 จะกลับมาทำงานได้ตามปกติดังสถานะที่ 1 ด้วยค่าอัตราการซ่อมแซม μ_1 ส่วนอุปกรณ์ที่ 2 มีโอกาสเกิดขัดข้องเป็นสถานะที่ 4 ด้วยค่าอัตราการขัดข้อง λ_2

ค) <u>สถานะที่ 3</u> (1 up, 2 down) ที่สถานะนี้โอกาสที่อุปกรณ์ที่ 1 จะเกิดขัดข้องเป็นสถานะที่ 4 ด้วยค่าอัตราการขัดข้อง λ_1 ส่วนอุปกรณ์ที่ 2 มีโอกาสกลับมาทำงานได้ตามปกติดังสถานะที่ 1 ด้วยค่าอัตราการซ่อมแซม μ_2

ง) <u>สถานะที่ 4</u> (1 down, 2 down) ที่สถานะนี้โอกาสที่อุปกรณ์ที่ 1 จะกลับมาทำงานได้ตามปกติดังสถานะที่ 3 ด้วยค่าอัตราการซ่อมแซม μ_1 ส่วนอุปกรณ์ที่ 2 มีโอกาสกลับมาทำงานได้ตามปกติดังสถานะที่ 2 ด้วยค่าอัตราการซ่อมแซม μ_2

โดยทั่วไปแล้ว การหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสม จะพิจารณาการเกิดข้อขัดข้องแบบอิสระเป็นหลัก

2.5.2 การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ไม่เป็นอิสระต่อกัน

การเกิดข้อขัดข้องชนิดนี้จะหมายถึงการขัดข้องที่ขึ้นอยู่กับการเกิดขึ้นของการขัดข้องอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น การขัดข้องของสายส่งสายหนึ่งของวงจรคู่ (Double circuit) จนทำให้สายส่งเส้นที่เหลือรับโหลดแทน ถ้าเกิดการรับโหลดเกินพิกัดนานเกินไปจะทำให้สายส่งเส้นที่เหลือนั้นเกิดการขัดข้องได้ ซึ่งจะเห็นว่าการขัดข้องของสายส่งเส้นที่สองก็เนื่องมาจากการขัดข้องของสายส่งเส้นแรก โดยปกติแล้วในการประเมินค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังในระดับ HL2 จะไม่นำการขัดข้องแบบนี้มาพิจารณา [9,12]

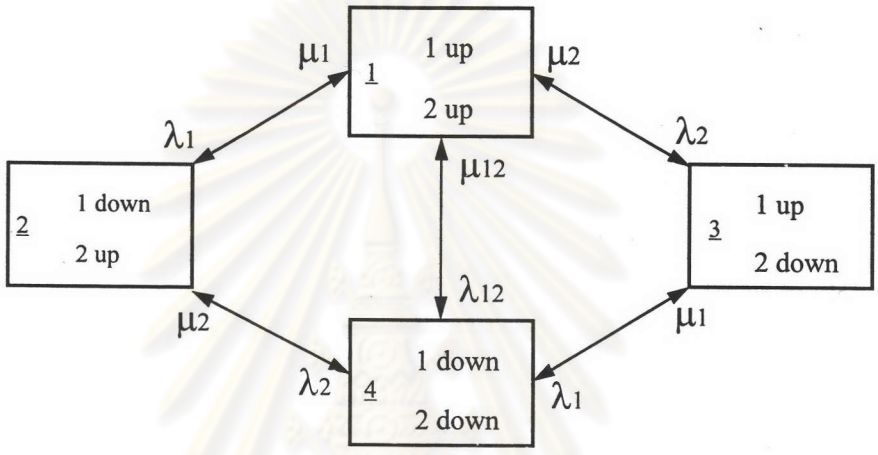
2.5.3 การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์ที่มีสาเหตุร่วมกัน

เป็นการขัดข้องที่มีสาเหตุมาจากภายนอก แล้วส่งผลให้เกิดการขัดข้องของอุปกรณ์ขึ้นหลายส่วนพร้อมกัน โดยที่การขัดข้องของอุปกรณ์แต่ละส่วนนั้นไม่ได้มีสาเหตุมาจากการขัดข้องของกันและกัน ตัวอย่างของการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันที่พบมากที่สุดได้แก่ การเกิดปัญหาขึ้นที่เสาส่งที่ได้ติดตั้งวงจรสายส่ง 2 วงจร ทำให้สายส่งทั้ง 2 วงจรเกิดการขัดข้อง ซึ่งการขัดข้องของสายส่งทั้ง 2 วงจรนี้ ไม่ได้มีสาเหตุมาจากการขัดข้องของกันและกัน แต่มีสาเหตุมาจากเสาส่งซึ่งเป็นสาเหตุภายนอก ในกรณีนี้สามารถนำไปเปรียบเทียบได้กับการขัดข้องแบบอิสระของวงจร 2 วงจร ซึ่งติดตั้งสายส่งอยู่บนเสาส่งที่แยกจากกัน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ความน่าจะเป็นของการขัดข้องแบบอิสระจะมีค่าเท่ากับผลคูณของความน่าจะเป็นของการขัดข้องของแต่ละอุปกรณ์ ถ้าหากว่าความน่าจะเป็นของการขัด

ข้องของแต่ละอุปกรณ์มีค่าต่ำ จะทำให้ผลคูณที่ได้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นของการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน ในการขัดข้องที่คล้ายกัน ดังนั้นการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน จึงมีผลต่อการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังในระดับ HL2

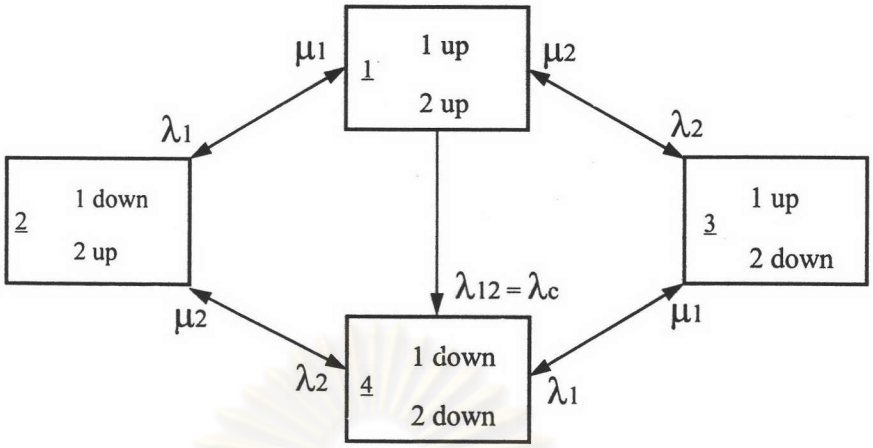
แบบจำลองของการเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันสำหรับสายส่ง 2 สายส่ง ที่อยู่ในแนวสายส่ง (Right of way) เดียวกัน หรืออยู่บนเสาส่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของการเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันสำหรับสายส่ง 2 สายส่ง ที่อยู่ในแนวสายส่ง (Right of way) เดียวกัน หรืออยู่บนเสาส่งเดียวกัน

ลักษณะการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ของการเกิดข้อขัดข้องประเภทนี้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดข้อขัดข้องแบบอิสระ แต่จะแตกต่างกันตรงที่อุปกรณ์ทั้งสองตัวสามารถที่จะเกิดขัดข้องพร้อม ๆ กันได้โดยมีอัตราการขัดข้องเป็น λ_{12} และมีอัตราการซ่อมเซมเป็น μ_{12}

แบบจำลองในรูปที่ 2.6 จะมีสถานะขัดข้องสถานะเดียว (Single down state) ถ้าหากว่ากระบวนการซ่อมแซมของอุปกรณ์ทั้งสองแยกอิสระจากกัน และกลับคืนสู่สถานะทำงานปกติเป็น (Up state)อิสระต่อกัน จะได้ว่าค่า μ_{12} มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือค่า μ_{12} ไม่ได้เป็นค่าส่วนกลับของเวลาซ่อมแซม แต่จะแสดงถึงสัดส่วนการซ่อมแซมซึ่งเกี่ยวข้องกับการกลับคืนสู่สถานะการทำงานพร้อมกันของอุปกรณ์ทั้งสอง ดังนั้นแบบจำลองในรูปที่ 2.6 จะกลายเป็นแบบจำลองในรูปที่ 2.7 [9] โดยที่ค่า λ_c หมายถึงอัตราการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน

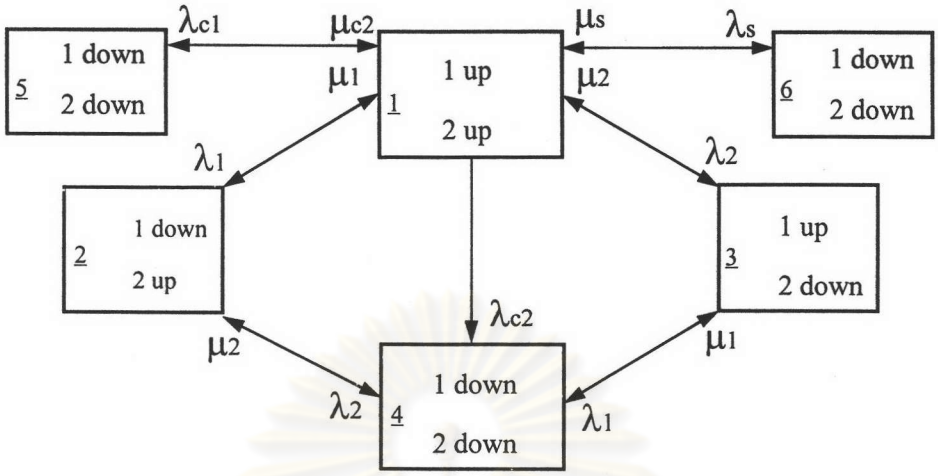


รูปที่ 2.7 แบบจำลองของการเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันเมื่อ $\mu_{12}=0$

2.5.4 การเกิดข้อขัดข้องของอุปกรณ์ที่มีสาเหตุมาจากการทำงานของสถานีไฟฟ้า

การขัดข้องของสายส่งหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ในการประเมินจะคิดว่าการเกิดขัดข้องของ เซอร์กิตเบคเกอร์ หม้อแปลง และบัส เป็นอุปกรณ์เดียวกับสายส่ง) อาจจะมีสาเหตุเนื่องมาจากมีการขัดข้องเกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้า การขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ การเกิดข้อผิดพร่อง (Fault) ลงดินที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ การเกิดข้อผิดพร่องที่บัสเป็นต้น การขัดข้องต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นที่สถานีไฟฟ้าอาจจะส่งผลให้อุปกรณ์บางอุปกรณ์ไม่สามารถทำงานต่อไปได้

โดยปกติแล้วการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าจะถูกนับรวมเข้าไว้ในค่าอัตราการขัดข้องของสายส่งและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะรวมอัตราการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าเหล่านี้เข้ากับอัตราการขัดข้องแบบอิสระ อย่างไรก็ตามการรวมค่าอัตราการขัดข้องแบบนี้จะทำให้ไม่สามารถจำแนกได้ว่าการขัดข้องของอุปกรณ์หลายอุปกรณ์พร้อม ๆ กันนั้นมีสาเหตุมาจากสถานีไฟฟ้าหรือไม่ ดังนั้นจึงอาจจะแยกการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าออกมาพิจารณาต่างหาก ซึ่งการขัดข้องแบบนี้จะมีผลต่อค่าดัชนีความเชื่อถือได้เช่นเดียวกัน



รูปที่2.8 แบบจำลองซึ่งรวมทั้งการเกิดข้อขัดข้องแบบอิสระ การเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน และการเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุมาจากการทำงานของสถานีไฟฟ้า

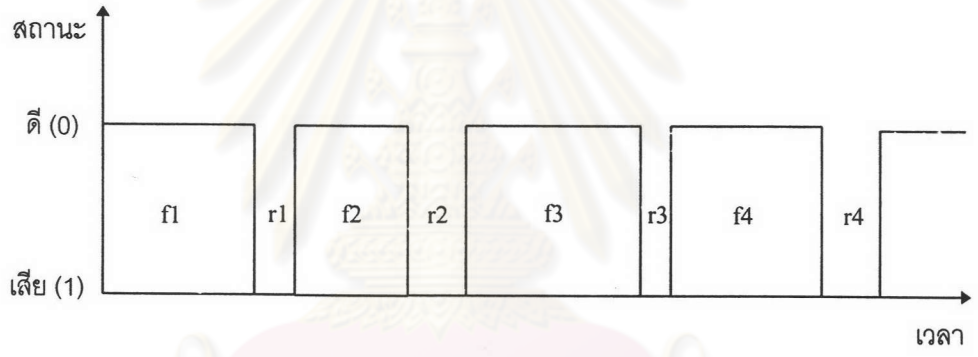
สำหรับลักษณะการเปลี่ยนสถานะของอุปกรณ์ของการเกิดข้อขัดข้องประเภทนี้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดข้อขัดข้องแบบอิสระ และการเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน โดยที่การเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่ 1 ไปสู่สถานะที่ 4 เป็นการขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันด้วยอัตราการขัดข้อง λ_{c2} ส่วนการเปลี่ยนสถานะจากสถานะที่ 1 ไปสู่สถานะที่ 5 เป็นการขัดข้องแบบอิสระด้วยอัตราการขัดข้อง λ_{c1} และกลับคืนสู่สถานะเดิมด้วยอัตราซ่อมแซม μ_{c1} นอกจากนี้การเกิดขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าจะทำให้อุปกรณ์เกิดขัดข้องด้วยอัตราการขัดข้อง λ_s และกลับคืนสู่สถานะเดิมด้วยอัตราการซ่อมแซม μ_s

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการพิจารณาเฉพาะการขัดข้องที่เป็นอิสระต่อกัน และ การขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกัน ส่วนการขัดข้องที่ไม่เป็นอิสระต่อกันและการขัดข้องที่มีสาเหตุจากสถานีไฟฟ้าจะไม่นำมาพิจารณา

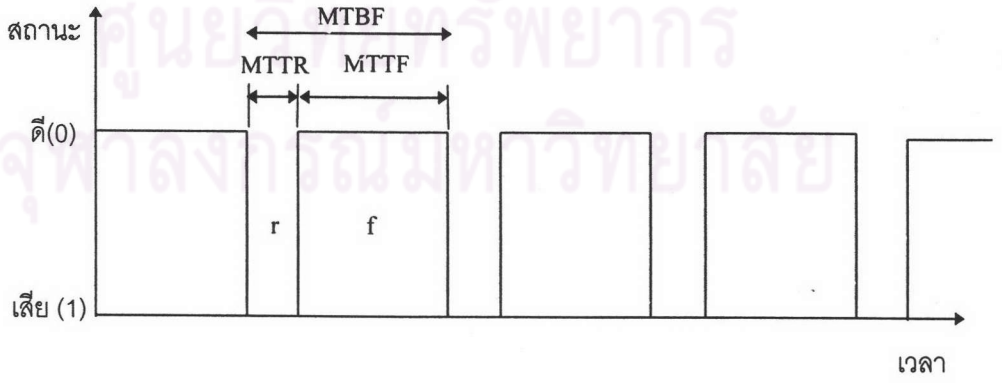
2.6 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์ในระบบ

ในการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้โดยอาศัยวิธีความน่าจะเป็น ขั้นตอนที่สำคัญคือการสร้างแบบจำลองเพื่อแทนพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชิ้น เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หรือตัวพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการคำนวณของระบบ เช่น สภาวะอากาศ

(Weather) หรือฤดูกาล (Season) ที่ต่างกันซึ่งจะทำให้โอกาสที่ระบบจะเกิดการขัดข้องแตกต่างกัน การสร้างแบบจำลองจะเป็นการจำลองพฤติกรรม หรือโอกาสความน่าจะเป็นที่อุปกรณ์หรือตัวพารามิเตอร์หนึ่ง ๆ ทางานในแต่ละสถานะที่แตกต่างกัน ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองจะเป็นข้อมูลประเภทสโตคาสติค ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าการทำงานปกติของอุปกรณ์มีลักษณะเป็นช่วงตามคาบเวลาที่ไม่สม่ำเสมอ (Non-periodic) ประกอบด้วยสถานะทำงานปกติ "สถานะดี" (Operable state) สลับกับสถานะขัดข้อง "สถานะเสีย" (Failed state) แต่การสร้างแบบจำลอง 2 สถานะ "ดี-เสีย" เพื่อแทนการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวในช่วงระยะเวลายาว (Long term) จะสามารถประมาณช่วงระยะเวลาในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย และช่วงคาบเวลาแสดงพฤติกรรมของอุปกรณ์มีลักษณะเป็นคาบเวลาที่สม่ำเสมอ (Periodic) ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 สถานะการทำงานปกติของอุปกรณ์



รูปที่ 2.10 ช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์เมื่อประมาณช่วงระยะเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในแต่ละสถานะเป็นค่าเฉลี่ย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ r1,r2,r3,r4 = ช่วงเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะเสียช่วงที่ 1,2,3 และ 4 ตามลำดับ

f1,f2,f3,f4 = ช่วงเวลาที่อุปกรณ์อยู่ในสถานะดีช่วงที่ 1,2,3 และ 4 ตามลำดับ

r = MTTR = ช่วงเวลาโดยเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะเสีย หรือ Mean Time To Repair

f = MTTF = ช่วงเวลาโดยเฉลี่ยของอุปกรณ์ที่อยู่ในสถานะดี หรือ Mean Time To Failure

MTBF = f + r = ช่วงเวลาโดยเฉลี่ยระหว่างการเกิดสถานขัดข้อง หรือ Mean Time Between Failure

เทคนิคที่ใช้ในขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์หรือของระบบ มีหลายวิธีแต่เทคนิคหลักสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา และได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาคือ "วิธีการมาร์คอฟ" (Markov approach) หรือ การสร้างแบบจำลองมาร์คอฟ (Markov modelling) วิธีการดังกล่าวถูกประยุกต์ใช้ในการจำลองพฤติกรรมแบบสุ่มของระบบหรืออุปกรณ์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time) หรือสถานะ (Space) จะมีลักษณะแบบต่อเนื่อง (Continuous) หรือไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ก็ได้ แต่เงื่อนไขสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้กับวิธีนี้มี 2 ประการ

ประการที่หนึ่งพฤติกรรมของระบบจะต้องไม่ถูกควบคุมโดยหน่วยความจำ (Lack of memory) กล่าวคือสถานะที่จะเกิดต่อไปของระบบ (Future state) จะไม่ขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นผ่านมาในอดีต ยกเว้นสถานะที่เกิดก่อนสถานะที่กำลังจะเกิดขึ้นเท่านั้น

ประการที่สองพฤติกรรมของระบบจะต้องคงที่สม่ำเสมอตลอดเวลาไม่ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่กำลังพิจารณา

โดยปกติแล้วสถานะ (State or space) ของระบบ หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการประเมินค่าความเชื่อถือได้จะมีลักษณะเป็นฟังก์ชั่นไม่ต่อเนื่อง (Discrete function) ขณะที่เวลาที่พิจารณาจะเป็นแบบฟังก์ชั่นต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ได้ ถ้ากรณีที่ฟังก์ชั่นสัมพันธ์กับเวลาเป็นแบบไม่ต่อเนื่องจะมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า "วิธีมาร์คอฟเชน" (Markov chain) ถ้าเป็นกรณีที่ฟังก์ชั่นสัมพันธ์กับเวลาแบบต่อเนื่องจะเรียกว่า "กระบวนการมาร์คอฟ" (Markov process) [2,15]

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับการสร้างแบบจำลองเพื่อหาดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังจะใช้วิธีกระบวนการมาร์คอฟ [2,15] สมการที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองที่มี m สถานะ ได้แก่

$$\left[P_1(t)\ \ P_2(t)\ \ \dots\ \ P_m(t)\right]=\left[P_1(t)\ \ P_2(t)\ \ \dots\ \ P_m(t)\right]\begin{bmatrix} -\sum_{n\neq 1}^{m}\lambda_{1n} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1m} \\ \lambda_{21} & -\sum_{n=1,n\neq 2}^{m}\lambda_{2n} & \cdots & \lambda_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{m1} & \lambda_{m2} & \cdots & -\sum_{n=1,n\neq m}^{m}\lambda_{mn} \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

$$\sum P_m(0)=1.0 \tag{2.2}$$

โดยที่ m = จำนวนสถานะในแบบจำลอง (State or space)

λ_{mn} = ความถี่ของการย้ายสถานะ (Transition rate) จากสถานะ m ไปสู่สถานะ n
= (จำนวนครั้งของการย้ายสถานะจากสถานะ m ไปสู่สถานะ n)/(ระยะเวลาที่อยู่ในสถานะ m ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา) หน่วยเป็น ครั้ง/ปี

$P'_m(t)$ = สมการดิฟเฟอร์เรนเชียลฟังก์ชั่นความน่าจะเป็นของสถานะ m ณ เวลา t

$P_m(t)$ = ฟังก์ชั่นความน่าจะเป็นของสถานะ m ณ เวลา t

$P_m(0)$ = ความน่าจะเป็นของสถานะ ณ เวลาจุดเริ่มต้น t = 0 ปกติจะกำหนดให้สถานะการทำงานปกติ "ดี" มีค่าความน่าจะเป็นเริ่มต้น = 1.0

จากสมการทั้งสองสามารถหาคำตอบโดยการแก้สมการดิฟเฟอร์เรนเชียล และใช้เทคนิคลาปลาสทรานสฟอร์ม (Laplace transform) ตัวอย่างการสร้างแบบจำลอง 2 สถานะ ของอุปกรณ์ชนิดสามารถซ่อมแซมได้ (Single repairable component) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 มีขั้นตอนการคำนวณ ดังต่อไปนี้

กำหนดให้

F=$1/T$ = ความถี่ของวงรอบสถานะ (Cycle frequency)

$\lambda=1/f$ = อัตราการขัดข้อง (Failure rate) หรือความถี่ของการย้ายสถานะจากสถานะดี (0)ไปสู่สถานะเสีย (1)

$\mu=1/r$ = อัตราการซ่อมแซม (Repair rate) หรือความถี่ของการย้ายสถานะจากสถานะเสีย (1) ไปสู่สถานะดี (0)

จากสมการ 2.1 จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} P_0'(t) & P_1'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0(t) & P_1(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

แก้สมการโดยใช้ ลาปลาสทรานสฟอร์ม จะได้ว่า

$$sP_0(s) - P_0(0) = -\lambda P_0(s) + \mu P_1(s) \tag{2.4 ก.}$$

$$sP_1(s) - P_1(0) = \lambda P_0(s) - \mu P_1(s) \tag{2.4 ข.}$$

และจากสมการ 2.4 ก. และ 2.4 ข. จัดรูปจะได้

$$P_0(s) = \frac{\mu}{s+\lambda} P_1(s) + \frac{1}{s+\lambda} P_0(0) \tag{2.5 ก.}$$

$$P_1(s) = \frac{\lambda}{s+\mu} P_0(s) + \frac{1}{s+\mu} P_1(0) \tag{2.5 ข.}$$

แก้สมการ 2.5 ก., 2.5 ข. แล้วแปลงอินเวอร์สลาปลาสทรานสฟอร์ม จะได้

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu}\left[P_0(0) + P_1(0)\right] + \frac{e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda+\mu}\left[\lambda P_0(0) - \mu P_1(0)\right] \tag{2.6 ก.}$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\left[P_0(0) + P_1(0)\right] + \frac{e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda+\mu}\left[\mu P_1(0) - \lambda P_0(0)\right] \tag{2.6 ข.}$$

จากสมการ 2.2 $\sum P_m(0) = P_0(0) + P_1(0) = 1.0$

กำหนดให้ความน่าจะเป็นของสถานะ ณ เวลา t = 0 $P_0(0) = 1$, $P_1(0) = 0$

แทนค่า $P_0(0)$, $P_1(0)$ ในสมการ 2.6 ก., 2.6 ข.

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda+\mu} \qquad (2.7\ \text{ก})$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\mu} - \frac{\lambda e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda+\mu} \qquad (2.7\ \text{ข.})$$

สมการ 2.7 แสดงความน่าจะเป็นของสถานะในแบบจำลอง 2 สถานะ ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของเวลาที่เริ่มต้น ณ เวลา t = 0 ในสถานะทำงานปกติ เมื่อ t มีค่ามาก ($t \rightarrow \infty$) สมการ 2.7 สามารถลดรูปเหลือเพียง

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

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

และสามารถให้คำจำกัดความสำหรับค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมได้ ดังต่อไปนี้

$A = P_0$ = ความพร้อมมูลในระยะยาว (Long-term availability) หรือ "สถานะดี"

$U = P_1$ = ความไม่พร้อมมูลในระยะยาว (Long-term unavailability) หรือ "สถานะเสีย" หรือ อัตราการออกจากระบบ (Forced Outage Rate, FOR)

วิธีการคำนวณหาความน่าจะเป็นของสถานะในแบบจำลองดังกล่าวข้างต้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการสร้างแบบจำลองสถานะที่มีสถานะในอุปกรณ์มากกว่า 2 สถานะขึ้นไป หรือมีอุปกรณ์มากกว่า 1 อุปกรณ์ขึ้นไป ภายใต้เงื่อนไขของการเกิดข้อขัดข้องต่าง ๆ กัน ดังประเภทที่จำแนกไว้ในหัวข้อ 2.5 อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่มีจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลายหน่วย ซึ่งจะส่งผลให้จำนวนสถานะในแบบจำลองที่ต้องพิจารณามากขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดความยุ่งยากในด้านการแก้สมการหรือขั้นตอนการคำนวณ

สรุปขั้นตอนหลักในการสร้างแบบจำลองสำหรับอุปกรณ์ที่มีหลายสถานะ หรือมีอุปกรณ์มากกว่า 1 หน่วยขึ้นไป

1. สร้างแบบจำลองสถานะ (State space diagram) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10

2. หาความถี่การย้ายสถานะจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง (Transition rate) จากข้อมูลบันทึกพฤติกรรมการทำงานจริงในระยะยาว โดยให้สอดคล้องกับแบบจำลองสถานะในข้อ 1

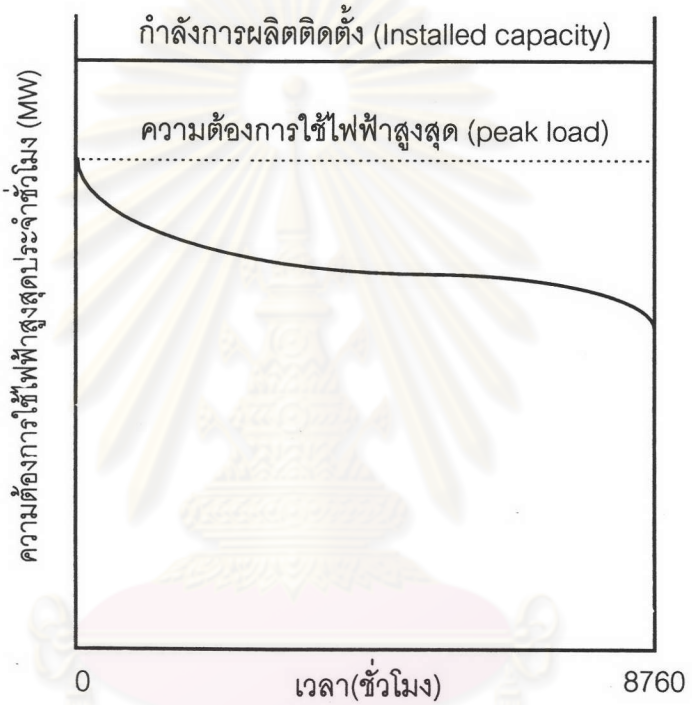
3. แก้สมการ 2.1, 2.2 หาคำตอบ โดยกำหนดความน่าจะเป็นของแต่ละสถานะ ณ เวลา t=0 ให้เหมาะสม

2.7 แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า (แบบจำลองโหลด)

ในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือโดยวิธีความน่าจะเป็นนอกจากจะสร้างแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์แล้วยังมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างแบบจำลองความต้องการโหลดของทั้งระบบหรือจุดโหลด ให้สอดคล้องกับการนำมาวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองของอุปกรณ์อื่น ๆ แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่ที่ใช้จะอาศัยข้อมูลค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดประจำวัน (Daily peak load) หรือประจำชั่วโมง (Hourly peak load) [9,10,12] ในช่วงระยะเวลาที่ทำการศึกษาซึ่งอาจเป็นระยะเวลา 1 เดือน 1 ปี หรือแปลงช่วงระยะเวลาที่ศึกษาเป็น 1 หน่วยเวลา (Per Unit) ก็ได้ ถ้านำความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดประจำวันกับเวลามาพล็อตกราฟเราจะเรียกว่า Daily peak load variation curve และถ้าเป็นค่าความสัมพันธ์ของความต้องการใช้ไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงจะเรียกเส้นโค้งที่ได้ว่า Load duration curve ดังแสดงในรูปที่ 2.11 สำหรับการเลือกใช้แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ ดังกล่าวมาข้างต้น ขึ้นอยู่กับการที่จะนำไปใช้วิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ชนิดใด เช่น ในการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบการผลิต เช่น ค่า Loss of load expectation (LOLE) ปกติจะใช้ Daily peak load variation curve ส่วน Load duration curve จะใช้ในการหาค่า Loss of energy expectation (LOEE) หรือ Expected energy not supplied (EENS) เป็นต้น [9,10] อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เกิดความสะดวกใน การคำนวณอาจจะประมาณแบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้าให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด และเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (เส้นประ)

นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ เพื่อการวางแผนระบบไฟฟ้าในอนาคต จำเป็นต้องมีการคาดคะเนค่าของความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยอาจคาดคะเนเป็นร้อยละของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งหาได้จากการสร้างสมการคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความต้องการใช้ไฟฟ้ากับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ระยะเวลา ข้อมูลด้าน

เศรษฐกิจ เป็นต้น โดยอาศัยข้อมูลที่ผ่านมาในอดีต และเนื่องจากการคาดคะเนความต้องการใช้ไฟฟ้ามีความไม่แน่นอน (Uncertainty) รวมอยู่ด้วย ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางสถิติ ซึ่งแทนด้วยโค้งการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) [9,10] จะถูกนำมาใช้คำนวณประกอบเพื่อให้ผลการคาดคะเนความต้องการใช้ไฟฟ้าถูกต้องยิ่งขึ้น แต่รายละเอียดดังกล่าวจะไม่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



รูปที่ 2.11 แบบจำลองความต้องการใช้ไฟฟ้า

2.8 การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยวิธีความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข

ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์ย่อย (Component) ต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์อื่น ๆ ดังนั้นการเกิดข้อขัดข้องที่อุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งก็ย่อมจะส่งกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวม [1]

การพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบ จะทำการพิจารณาข้อขัดข้อง (Failure) ณ บัสที่มีโหลดต่ออยู่ (Load bus) ซึ่งจะเรียกว่าจุดโหลด (Load point) ข้อขัดข้องที่จุดโหลด (Load point

failure) จะหมายถึง สภาวะที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่บัสนั้นจะมีมากกว่าที่ระบบส่งจ่ายจะรับได้ ซึ่งอาจดูได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ก็คือการหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดข้อขัดข้อง (Probability of existence)และความถี่ของการเกิดข้อขัดข้อง (Frequency of occurrence) ณ จุดโหลดต่าง ๆนั่นเอง

เนื่องจากการเอาท์เตจ หรือขัดข้อง (Outage) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการขัดข้องของระบบส่งต่างก็เป็นเหตุการณ์ (Event) ที่เป็นอิสระต่อกันที่ก่อให้เกิดข้อขัดข้องในระบบเมื่อไม่มีการคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมที่อยู่รอบ ๆ ระบบ [9] ดังนั้นความน่าจะเป็นจึงมีลักษณะเป็นแบบมีเงื่อนไข (Conditional) ซึ่งอาจเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$P(bus_k) = \sum P(B_j)P(A / B_j) \qquad (2.8)$$

เมื่อ bus_k = จุดโหลด k

$P(bus_k)$ = ความน่าจะเป็นของการเกิดข้อขัดข้องที่จุดโหลด k (Probability of failure at load point k)

B_j = เงื่อนไขการขัดข้องที่ j ในระบบสายส่ง (Outage condition j in the transmission network

$P(B_j)$ = ความน่าจะเป็นของการเกิดข้อขัดข้อง B_j (Probability of existence of outage B_j)

$P(A|B_j)$ = ความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขที่จะเกิดข้อขัดข้องที่จุดโหลด ถ้าสายส่ง B_j ขัดข้อง (Condition probability fo load point failure given line B_j is out)

$$P(A|B_j) = (1-Pgj)Plj + (1-Plj)Pgj + PgjPlj$$
$$= Pgj + Plj - PgjPlj \qquad (2.9)$$

เมื่อ Pgj = ความน่าจะเป็นของกำลังผลิตที่เกิดขัดข้องจะมีค่าเกินกำลังผลิตสำรอง (Probability of the generating capacity outage exceeding the reserve capacity)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Plj = ความน่าจะเป็นของโหลดที่บัสจะมีค่าเกินกว่าค่าของโหลดสูงสุดที่จะถูกจ่ายให้แก่บัสนั้นได้ โดยไม่เกิดข้อขัดข้อง (Probability of load at bus exceeding the maximum load that can be supplied at that bus without failure)

ดังนั้น จากสมการที่ 2.8 จะได้ว่า

$$P(bus_k) = \sum_j [P(B_j)(Pgj + Plj - PgjPlj)] \qquad (2.10)$$

ในทำนองเดียวกัน ความถี่ของการเกิดข้อขัดข้องที่บัส k มีค่า

$$F(bus_k) = \sum_j [F(B_j)(Pgj + Plj - PgjPlj)] \qquad (2.11)$$

เมื่อ $F(bus_k)$ = ความถี่ของการเกิดข้อขัดข้องที่จุดโหลด k (Frequency of existence at bus k)

$F(bus_k)$ = ความถี่ของการเกิดขัดข้อง B_j (Frequency of occurrence of outage B_j)

โดยทั่วไปในการหาค่าความเชื่อถือได้ที่จุดโหลดจะมีข้อสมมติฐานว่ามีกำลังการผลิตที่เพียงพอกับโหลด [1,9] ดังนั้น Pgj = 0 และสมการที่ 2.10 และ 2.11 อาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P(bus_k) = \sum_j [P(B_j)Plj)] \qquad (2.12)$$

$$F(bus_k) = \sum_j [F(B_j)Plj)] \qquad (2.13)$$

สำหรับเงื่อนไขที่ถือว่า โหลดบัส หรือจุดโหลดล้มเหลว (Fail) ได้แก่ [1]

ก) แรงดันไฟฟ้าที่บัสมีค่าน้อยกว่าค่าต่ำสุดที่กำหนด (ไม่เป็นไปตามมาตรฐานด้านคุณภาพ (Quality standard) ณ บัสนั้น

ข) สายส่ง หรือหม้อแปลงไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดบัสมีโหลดเกินพิกัด (Overload)

ค) กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลดบัสมีค่าน้อยกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าที่โหลดบัสนั้น ๆ

2.9 วิธีการที่ใช้ในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยอาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็น

สำหรับวิธีการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยใช้กฎเกณฑ์ความน่าจะเป็น (Probabilistic criteria) จะอาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็น (Probabilistic theory) มาใช้ในการคำนวณหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งวิธีการศึกษาออกได้เป็น 2 วิธีพื้นฐาน [6,12,16] ได้แก่ วิธีระบุเหตุขัดข้อง (Contingency enumeration approach) และวิธีจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation approach) ซึ่งทั้ง 2 วิธีต่างก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.9.1 วิธีระบุเหตุขัดข้อง (Contingency enumeration approach) [9,16]

การวิเคราะห์หาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมด้วยวิธีระบุเหตุขัดข้อง จะทำการเลือกเหตุขัดข้องอย่างเป็นระบบ และทำการทดสอบเหตุขัดข้องเหล่านั้นว่าจะส่งผลให้เกิดปัญหาต่อระบบไฟฟ้ากำลังหรือไม่ ถ้าเหตุขัดข้องนั้นทำให้ระบบเกิดปัญหาขึ้นก็จะสะสมเป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ต่อไป ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนเหตุขัดข้องที่จะต้องเลือกเพื่อทำการทดสอบเป็นจำนวนมาก แต่ว่าสามารถที่จะลดจำนวนเหตุขัดข้องที่ต้องทดสอบลงได้ โดยการใช้กฎเกณฑ์ต่าง ๆ ในการเลือกเหตุขัดข้อง ทำให้สามารถเลือกเพียงบางเหตุขัดข้องเท่านั้นมาพิจารณา จึงช่วยลดเวลาในการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ลงได้มาก ดังนั้นการใช้วิธีระบุเหตุขัดข้องจึงมีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้วิธีนี้ในการคำนวณ

สำหรับขั้นตอนรายละเอียดต่าง ๆ ของการคำนวณในการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ด้วยวิธีระบุเหตุขัดข้อง จะกล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป

2.9.2 วิธีจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation approach) [16]

การหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมด้วยวิธีจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation) จะทำการสุ่มตัวอย่างหาสถานะการทำงานเพื่อจะจำลองการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยสามารถสร้างแบบจำลองสภาวะก่อนเกิดข้อขัดข้อง การขัดข้องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่ง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ได้อย่างละเอียด

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งจะกำหนดสถานะการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ความต้องการใช้ไฟฟ้า(โหลด) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และสายส่ง จะถูกเลือกโดยการสุ่มตัวอย่างแบบแรนดอม (Random sampling) ตามการกระจายความน่าจะเป็นของค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น เพื่อจำลองการทำงานของระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อได้สถานะการทำงานของระบบแล้ว ก็จะทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังตามกฎเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ต่อไป

หัวใจสำคัญของการหาค่าความเชื่อถือได้โดยการใช้วิธีจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation) คือขั้นตอนการสุ่มตัวอย่างแบบแรนดอม โดยจะใช้คอมพิวเตอร์ทำการสุ่มตัวเลข x ขึ้นมาจากช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1 ดังนั้นเพื่อให้ได้ระดับความแม่นยำของค่าดัชนีที่ยอมรับได้ จึงต้องทำการสุ่มตัวอย่างเป็นจำนวนมาก ๆ ทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานมาก แต่เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ได้รับการพัฒนาให้มีก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ทำให้สามารถคำนวณได้รวดเร็วขึ้น วิธีจำลองแบบมอนติคาร์โลจึงได้รับความสนใจที่จะนำมาใช้ในการหาค่าความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังแบบผสมเพิ่มมากขึ้น

กล่าวโดยสรุปแล้วในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีระบุเหตุขัดข้องเพื่อคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้และจะพิจารณาเฉพาะการเกิดข้อขัดข้องที่เป็นอิสระต่อกัน และการเกิดข้อขัดข้องที่มีสาเหตุร่วมกันเท่านั้น กรณีอื่น ๆ จะไม่นำมาพิจารณา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย