บทที่ 2

แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง ทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าที่ส่งมาจากระบบผลิตไฟฟ้า (Generating System) โดยผ่านระบบส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission System) เพื่อทำการจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังต่อไป โดยทั่วไปแล้วระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าประกอบด้วย สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย(Substation) สายป้อน(Feeder) หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) และสายจำหน่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำ

หน้าที่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่สำคัญประการหนึ่งคือการส่งจ่ายพลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา มีความมั่นคงในการส่งมากที่สุด หากเกิดเหตุขัดข้องก็สามารถแก้ไขให้ไฟฟ้ากลับคืนในเวลารวดเร็วหรือทำให้มีระยะเวลาการขัดข้องน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยอาศัยอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ซึ่งเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการลัดวงจร(Short Circuit)ในสายป้อน หรือ หม้อแปลง การเกิดลัดวงจรนี้อาจเกิดได้ใน 2 ลักษณะ คือ แบบถาวร(Permanent Failure) และ แบบชั่วคราว(Temporary Failure) ที่อาจส่งผลให้เกิดแรงดันตก หรือ ไฟกระพริบ แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นสาเหตุในการเกิดไฟฟ้าดับแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งมีการใช้อุปกรณ์ที่มีความไวต่อแรงดันตก ซึ่งจะพบบ่อยในย่านผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม หากการทำหน้าที่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่สมบูรณ์หรือ ไม่สามารถทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้เนื่องจากเกิดการขัดข้องของอุปกรณ์แล้วก็จะมีผลต่อความเชื่อถือได้ต่อระบบโดยรวมได้ เช่นกรณีของการเกิดแรงดันตกแล้วทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้องในการรับพลังงานไฟฟ้าซึ่งจะส่งผลถึงความเชื่อถือได้ด้านความมั่นคง ด้วยเหตุดังกล่าวการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายที่ผ่านมาจึงจำเป็นต้องทราบภาวะการทำงานและล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ นอกจากนี้เมื่อเราต้องการวิเคราะห์ผลรวมถึงผลของแรงดันตกต่อระบบและรวมถึงการทำงานของระบบป้องกันในระบบ จึงจำเป็นที่ต้องรู้ถึงแรงดันที่จุดโหลด(Load Point)ของผู้ใช้ไฟฟ้าในขณะเกิดแรงดันตก เกณฑ์ในการขัดข้องที่จุดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า รวมถึงการทำงานของระบบป้องกัน ซึ่งทั้ง 3 อย่างที่กล่าวมาส่งผลถึงการเกิดขัดข้องต่อผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดลัดวงจรขึ้น

โดยทั่วไปเมื่อสถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยได้รับแรงดันไฟฟ้าจากสายส่งย่อยก็จะแปลงแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงแล้วส่งแรงดันไฟฟ้าผ่านสายป้อนไปยังหม้อแปลงหม้อแปลงจำหน่ายซึ่งมีหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลง หลังจากนั้นจึงส่งแรงดันไฟฟ้าผ่านสายจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ไปยังบ้านเรือน หรือ ธุรกิจห้างร้านทั่วไป แต่บางกรณีอาจส่งแรงดันไฟฟ้าผ่านสายป้อนไปยังหม้อแปลงของโรงงานโดยตรง โดยไม่ผ่านหม้อแปลงระบบจำหน่าย และมีโรงงานบางแห่งซื้อไฟฟ้าแรงสูงจากการไฟฟ้าแล้วสร้างสถานีจ่ายไฟฟ้าเป็นของตัวเอง สิ่งที่ยกตัวอย่างไปนี้เป็นลักษณะในแบบต่างๆระบบจำหน่ายที่มีอยู่โดยทั่วไป

2.1 รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เดินในอากาศ (Overhead Aerial System) และระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดิน (Underground Cable System) การเลือกใช้ระบบประเภทใดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น ความปลอดภัยสิ่งแวดล้อม และความประหยัด เป็นต้น แต่ที่พบเห็นโดยทั่วไปในประเทศไทยจะเป็นระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าเหนือหัวเนื่องจาก มีราคาต่ำกว่าระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินมาก แต่อย่างไรก็ตามในบริเวณที่มีบ้านเรือนหนาแน่น ต้องเดินสายไฟข้ามแม่น้ำ หรือภายในนิคมอุตสาหกรรม นิยมใช้ระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าใต้ดินเนื่องจากสายใต้ดินเป็นสายที่มีฉนวนหุ้ม ย่อมมีความปลอดภัยและความมั่นคงสูงกว่าการใช้สายจำหน่ายเหนือหัวซึ่งมักเป็นสายเปลือย

สำหรับลักษณะรูปแบบของระบบจำหน่ายนั้น สามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภทหลักคือ

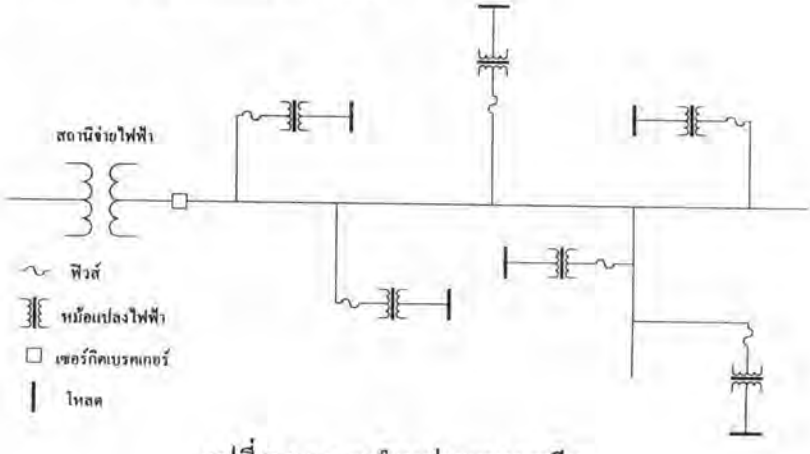
1.) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial Network)

2.) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวน (Ring Network)

3.) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบร่างแห (Mesh Network)

รายละเอียดเพิ่มเติมของแต่ละระบบมีดังนี้

2.1.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล



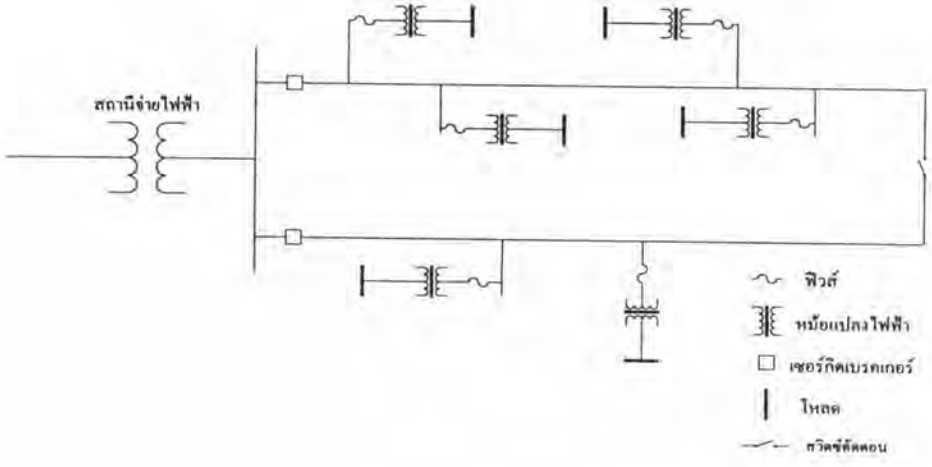
รูปที่ 2.1 ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลคือระบบที่มีการป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าไปในสายจำหน่ายเพียงด้านเดียวและมีสาขาแยกต่อออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.1 การวางแผนใช้ระบบจำหน่ายแบบนี้หากมีโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในอนาคตก็สามารถที่จะเพิ่มระบบจำหน่ายแบบเรเดียลให้กลายเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวน หรือ ระบบจำหน่ายแบบร่างแห ต่อไปได้

ระบบจำหน่ายแบบเรเดียลนิยมใช้สำหรับจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟในพื้นที่ทั่วไปหรือในชนบทเนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าประเภทนี้ลงทุนต่ำ มีการป้องกันระบบได้โดยวิธีง่ายๆ และลักษณะของการวางสายแบบนี้สามารถเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าต่ำ

2.1.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวงแหวน

ลักษณะระบบจำหน่ายแบบนี้จะทำเป็นรูปแบบวงแหวนกล่าวคือมีการจ่ายไฟเข้าที่ต้นทางและปลายทางโดยสถานีจ่ายไฟฟ้าแห่งเดียวกันตามรูปที่ 2.2 ระบบจำหน่ายแบบนี้ในการใช้งานจริงบางครั้งจะเปิดวงจรออกทำให้ระบบเป็นวงจรแบบเรเดียลก็ได้ การทำเช่นนี้จะทำให้การป้องกันระบบนั้นทำได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 2.2 ระบบจำหน่ายแบบวงแหวน

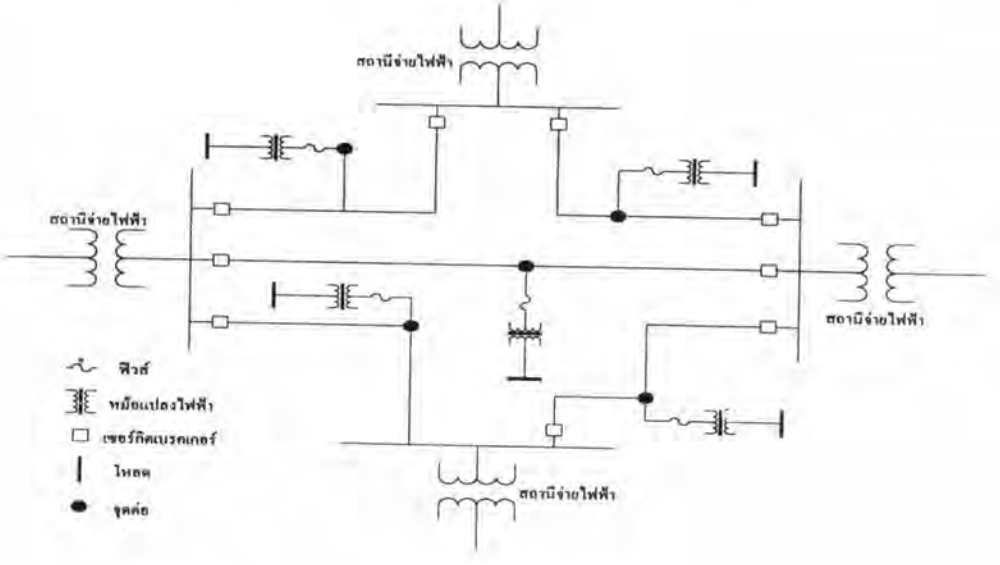
ระบบจำหน่ายแบบวงแหวนนี้สามารถนำไปใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับชุมชนใหญ่และโรงงานอุตสาหกรรมได้ ข้อดีของระบบนี้คือ เมื่ออุปกรณ์ตัวหนึ่งตัวใดเกิดขัดข้องก็สามารถทำการตัดส่วนนั้นออกไปและวงจรส่วนที่เหลืออยู่ก็สามารถทำการจ่ายไฟฟ้าต่อไปอีกได้ ทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้สูงขึ้นกว่าระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แต่ข้อเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบวง

แหวนคือ การจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะกระทำได้โดยผ่านสถานีจ่ายไฟฟ้าเพียงสถานีเดียว ดังนั้นถ้าเกิดขัดข้องขึ้นภายในสถานีจ่ายไฟฟ้า ย่อมทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง และระบบป้องกันระบบจำหน่ายวงแหวนก็ยังมีขีดความสามารถสูงขึ้นกว่าระบบแบบเรเดียลเนื่องจากระบบป้องกันต้องตรวจสอบให้ทราบว่าเกิดการลัดวงจรขึ้นที่อุปกรณ์ตัวใดเพื่อที่จะได้ตัดอุปกรณ์ส่วนนั้นออกจากการจ่ายพลังงานไฟฟ้า

2.1.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบร่างแห

ตามรูปที่ 2.3 เป็นรูปของระบบจำหน่ายแบบร่างแห สังเกตได้ว่าการต่อกันของสายจำหน่ายจะมีลักษณะเหมือนแหที่กระจายออกไปครอบคลุมแหล่งผู้ใช้ไฟฟ้าต่างๆ และมีสถานีจ่ายไฟฟ้าเข้าในระบบจำหน่ายได้หลายจุด

ข้อดีของระบบนี้คือระบบจำหน่ายแบบนี้มีความเชื่อถือได้สูงกว่าทุกระบบที่กล่าวมาและสามารถสร้างสถานีจ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้ง่ายเมื่อโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่ระบบจำหน่ายแบบนี้ต้องลงทุนในการก่อสร้างระบบค่อนข้างสูงเช่นกัน เนื่องจากระบบดังกล่าวต้องสร้างสายส่งและอุปกรณ์ป้องกันเป็นจำนวนมาก และในขณะทำการจ่ายไฟฟ้าเมื่อเกิดลัดวงจร(short Circuit) จะทำให้กระแสลัดวงจรขนาดสูงมากได้



รูปที่ 2.3 ระบบจำหน่ายแบบร่างแห

2.2 อุปกรณ์หลักในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ตามมาตราฐานการก่อสร้าง วัสดุ อุปกรณ์ และระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าทั้งการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค[6] ระบบจำหน่ายจะทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ก็ต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักต่างๆ ดังนี้

1. สายไฟฟ้า (Conductor) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ สายเปลือยและสายหุ้มฉนวน การเลือกใช้สายไฟฟ้าแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ หากต้องการระบบไฟฟ้าที่มีความเชื่อถือได้สูงควรใช้สายเคเบิลใต้ดิน แต่ก็จะลงทุนสูงตามไปด้วย

2. หม้อแปลงจำหน่าย (Distribution Transformer) เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้ต่ำลงเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ผู้ใช้ประเภทต่างๆ ด้วยระบบแรงดันต่ำต่อไป

3. เซอร์กิตเบรคเกอร์ (Circuit Breaker) โดยทั่วไปใช้ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ป้องกัน ใช้ในการกำจัดการเกิดผิดพร่องในระบบหรือตัดส่วนของอุปกรณ์ที่เกิดผิดพร่องออกจากระบบ

4. รีโครสเซอร์ (Recloser)

4.1ใช้ติดตั้งในระบบจำหน่ายที่มีปัญหาเกิดฟอลท์แบบชั่วคราวบ่อยๆ

4.2ใช้ติดตั้งในสายเมนหรือสายแยกอยู่ที่อยู่ห่างจากสถานีไฟฟ้าตั้งแต่ 10 กิโลเมตรขึ้นไป และในสายเมนหรือสายแยกใดที่มีปัญหาการเกิดฟอลท์แบบชั่วคราวบ่อยครั้งหรือเป็นสายจำหน่ายที่มีความสำคัญก็อาจพิจารณาติดตั้งได้ตามความเหมาะสม

4.3อาจพิจารณาติดตั้งรีโครสเซอร์ที่สถานีไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ป้องกันแทนเซอร์กิตเบรคเกอร์

4.4ตำแหน่งที่ติดตั้งรีโครสเซอร์ต้องพิจารณาให้สะดวกในการเข้าไปปฏิบัติงานและบำรุงรักษา และค่ากระแสฟอลท์ซึ่งอาจเกิดขึ้น ณ. จุดนี้ จะต้องมีค่าไม่มากกว่าพิกัดการตัดกระแสของรีโครสเซอร์

5. ดรอพเอาท์ฟิวส์คัทเอาท์ (Dropout Fuse Cutout) เป็นอุปกรณ์ป้องกันอีกชนิดหนึ่ง

5.1 ติดตั้งในสายแยกที่มีระยะทางเกินกว่า 1 กิโลเมตร และในสายย่อยที่มีระยะทางเกินกว่า 5 กิโลเมตร

5.2 กรณีสายแยกที่มีระยะทางไม่เกินกว่า 1 กิโลเมตร และสายย่อยที่มีระยะทางไม่เกิน 5 กิโลเมตร อาจติดตั้งดรอพเอาท์ฟิวส์ได้ถ้าพิจารณาเห็นว่าเหมาะสมเพียงพอเช่น มีต้นไม้อยู่ในแนวสายไฟฟ้ามาก

5.3 ในสายเมนไม่ควรติดตั้งดรอพเอาท์ฟิวส์ หรือถ้าจะติดตั้งก็ควรมีน้อยที่สุดโดยพิจารณาแล้วเห็นว่ามีความจำเป็น

5.4 ดรอพเอาท์ฟิวส์ที่ติดตั้งจะต้องทำงานสัมพันธ์กับเซอร์กิตเบรคเกอร์รีโครสเซอร์หรือดรอพเอาฟิวส์ด้วยกัน

6. สวิตซ์สำหรับตัดโหลด(Load Break Switch) และสวิตซ์แบบน้ำมัน (Oil Switch)

6.1 ใช้ติดตั้งในสายเมนหรือสายแยกก่อนเข้าเมืองที่สำคัญ อาจติดตั้งทุก ๆ 20 กิโลเมตรก็ได้

6.2 ติดตั้งในสายเชื่อมตำแหน่งที่จะมีการเชื่อมโยงระหว่างฟีดเดอร์หรือระหว่างสถานีไฟฟ้า

6.3 กรณีสายแยกใดที่โหลดมากและต้องติดตั้งสวิตซ์ตัดตอนให้พิจารณาติดตั้งได้ตามความเหมาะสม

7. สวิตซ์ตัดตอน (Disconnecting Switch)

7.1 ติดตั้งเป็นสวิตซ์ตัดตอนที่สถานีไฟฟ้าและก่อนเข้าสายเคเบิลแรงสูง

7.2 ติดตั้งเป็นสวิตซ์ตัดตอนก่อนเข้าและออกจากรีโครสเซอร์ และโวลท์เตจเรคกูเลเตอร์

7.3 ติดตั้งเป็นสวิตซ์บายพาสที่รีโครสเซอร์

7.4 ติดตั้งในสายเมนหรือสายแยกก่อนออกจากเมืองที่สำคัญ

8. สวิตซ์แบบอากาศ (Air Switch)

8.1 ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าเพื่อเป็นสวิตซ์สำหรับทำบายพาส

8.2 ติดตั้งในสายเมนหรือสายแยกแทนตำแหน่งของสวิตซ์ตัดตอนเมื่อต้องการปิดหรือเปิดวงจรขณะที่มีโหลด

9. เสาไฟฟ้า คอนสาย และลูกถ้วย (Pole,Crossarm and Insulator)

สำหรับการศึกษาความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นโดยทั่วไปจะพิจารณาอุปกรณ์หลักๆอยู่ 2 ชนิด [19,20] ได้แก่ หม้อแปลง และ สายส่ง แต่อาจนำ อุปกรณ์อื่นๆในระบบมาพิจารณาก็ได้ เช่น บัสบาร์ การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย เป็นต้น

2.3 สภาวะการทำงานและการล้มเหลวของอุปกรณ์

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งสถานะการทำงานที่สำคัญของอุปกรณ์ต่างๆในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น เซอร์กิตเบรคเกอร์ สายไฟฟ้า และหม้อแปลง ได้เป็น 3 ประเภทคือ การทำงานปกติ การล้มเหลวแบบเปิดวงจร (Open circuit) และการล้มเหลวแบบลัดวงจร (Closed circuit) ซึ่งเราอาจแบ่งย่อยการล้มเหลวแบบลัดวงจรได้อีก 2 ประเภท [5] คือ

1. การล้มเหลวแบบถาวร (Permanent failure)
2. การล้มเหลวแบบชั่วคราว (Temporary failure)

ในการล้มเหลวแบบถาวรเมื่อเกิดขึ้นจะนำมาซึ่งความเสียหายแก่อุปกรณ์ ซึ่งทำให้ต้องทำการซ่อมแซมหรือทำการถอดเปลี่ยนอุปกรณ์ดังกล่าว ส่วนการล้มเหลวแบบชั่วคราวจะไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ซึ่งทำให้เราไม่ต้องซ่อมแซมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ เราสามารถกำจัดการล้มเหลวแบบนี้โดยใช้การทริปของเบรคเกอร์หรือการหลอมละลายของฟิวส์ ซึ่งถ้าเกิดในช่วงเวลาสั้นก็จะสามารถกำจัดได้โดยใช้ รีโครสเซอร์ อย่างไรก็ตามการล้มเหลวทั้งสองแบบจะนำมาซึ่งการเกิดไฟตกหรือไฟกระพริบในระบบจำหน่ายได้

สำหรับการทำงานของเซอร์กิตเบรคเกอร์ทั้งแบบปกติปิด(Normally closed)และปกติเปิด(Normally open) ซึ่งมีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนกว่าอุปกรณ์อื่นๆ นั้นพอที่จะกล่าวสรุปถึงตัวอย่างการทำงานได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ในกรณีของเซอร์กิตเบรคเกอร์แบบปกติปิด(Nomally closed) ประกอบด้วยการทำงานในลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

- มีสถานะทำงานแบบปิดแล้วอยู่ในสภาวะปกติ
- เปิดวงจรด้วยความสำเร็จเมื่อควรจะเปิดวงจร
- ล้มเหลวที่จะเปิดวงจรเมื่อควรจะเปิดวงจร
- เปิดวงจรอย่างไม่ตั้งใจเมื่อไม่ควรจะเปิดวงจร
- ล้มเหลวแล้วทำให้เกิดการเปิดวงจรทีตัวมันเอง
- ล้มเหลวแล้วทำให้เกิดการลัดวงจรทางด้านบัสบาร์
- ล้มเหลวแล้วทำให้เกิดการลัดวงจรทางด้านสายส่ง

สำหรับกรณีของเซอร์กิตเบรคเกอร์แบบปกติเปิด (Nomally open) พอจะสรุปลักษณะการทำงานได้ดังนี้

- ปิดวงจรสำเร็จเมื่อควรจะปิดวงจร
- ล้มเหลวที่จะปิดวงจรเมื่อควรจะปิด

- ล้มเหลวแล้วทำให้เกิดการลัดวงจรทางด้านบัสบาร์

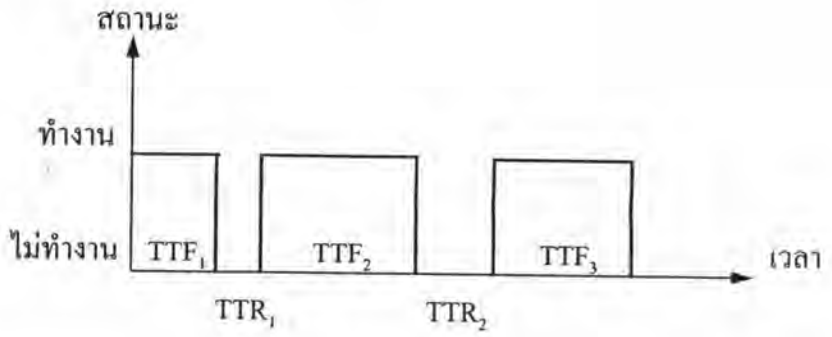
- ล้มเหลวแล้วทำให้เกิดการลัดวงจรทางด้านสายส่ง

ในกรณีการทำงานของรีโครสเซอร์จะมีการทำงานคล้ายกับการทำงานของเซอร์กิตเบรคเกอร์ จะทำงานประมาณ 2-3 ครั้งต่อการเกิดลัดวงจรขึ้น 1 ครั้ง แต่จะมีเวลาสวิตช์ซิ่ง (Switching time)คือช่วงเวลาระหว่างการตัดวงจรจนถึงกลับคืนสู่การปิดวงจร แต่มีช่วงเวลาที่สั้นกว่ามาก โดยมีเวลาสวิตช์ซิ่งครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 3 ประมาณ 3,15 และ 60 วินาทีตามลำดับแล้วแต่การปรับตั้งรีเลย์ เมื่อครบทั้งสามครั้งแล้วยังไม่สามารถตัดการเกิดผิดพร่องได้ก็จะทำการตัดวงจรแบบถาวร เมื่อรีโครสเซอร์ทำงานถึงตรงนี้แล้วก็จะทำงานเหมือนกับเซอร์กิตเบรคเกอร์ หน้าที่หลักของรีโครสเซอร์ใช้ในการกำจัดการเกิดลัดวงจรแบบชั่วคราว

การทำงานในลักษณะต่างๆ ดังกล่าวเป็นเพียงสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งในความเป็นจริงแล้ว การที่ระบบทั้งระบบล้มเหลวนั้นสาเหตุดังกล่าวอาจเป็นเพียงสาเหตุทางอ้อมเท่านั้น

2.4 การกระจายความน่าจะเป็นในการทำงานของอุปกรณ์

ในทางปฏิบัติพารามิเตอร์ต่างๆ ในการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบโดยรวมนั้นจะสัมพันธ์ใกล้ชิดอยู่กับการกระจายความน่าจะเป็นที่แสดงถึงพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เช่น ระยะเวลาการทำงานอย่างต่อเนื่องของอุปกรณ์ตัวหนึ่งก่อนที่จะเกิดการล้มเหลวหรือเหตุการณ์ขัดข้องขึ้น (Time to failure : TTF) ค่า TTF ของอุปกรณ์แต่ละชิ้นในระบบอาจมีการกระจายที่ต่างกันไปขึ้นอยู่กับสถิติการทำงานของอุปกรณ์ นั่นคือสำหรับอุปกรณ์ตัวหนึ่ง ๆ อาจจะมีค่า TTF ได้หลายค่าต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 2.4

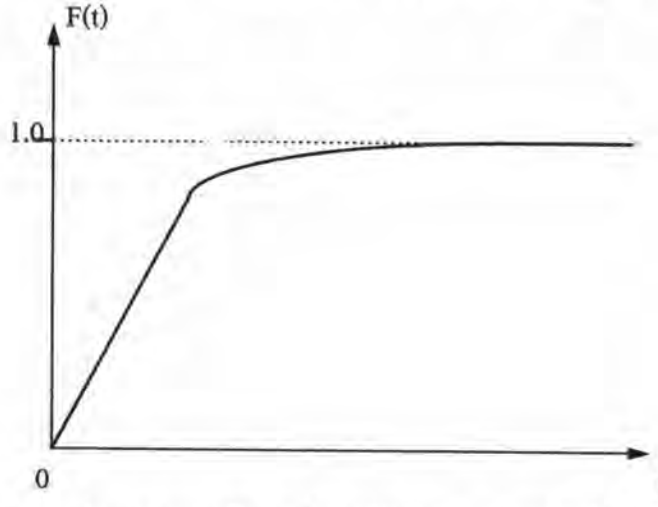


รูปที่ 2.4 แสดงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา

จากค่า TTF ในช่วงต่างๆ จากรูปที่ 2.4 นี้เราสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยของ TTF ได้เรียกว่า MTTF (Mean time to failure) ซึ่งถือเป็นตัวแทนของระยะเวลาที่อุปกรณ์ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนระยะเวลาการซ่อมแซม (Time to repair : TTR) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่อุปกรณ์เกิดการขัดข้องก็สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยได้ทำนองเดียวกันเรียกว่า MTTR (Mean time to repair)

ในทางปฏิบัติค่า TTF และ TTR ของอุปกรณ์แต่ละชนิดอาจมีการกระจายที่แตกต่างกันและไม่ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบ ดังนั้นค่าดังกล่าวจึงได้จากการศึกษาและทดสอบตัวอย่างตลอดจนจากตารางบันทึกข้อมูลซึ่งสัมพันธ์กับการทำงานของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือระบบนั้น ๆ

การศึกษาถึงการพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิดนั้นโดยทั่วไปจะใช้ฟังก์ชั่นการกระจายความน่าจะเป็นแบบสะสม (Cumulative probability distribution function) ซึ่งจะเป็นฟังก์ชั่นที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าตัวแปรสุ่มจาก 0 ถึง 1 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (t) และฟังก์ชั่นการกระจายสะสม (F(t))

หากเราลองพิจารณาถึงการทำงานของอุปกรณ์ตัวหนึ่งซึ่งกำลังทำงานอยู่ ณ เวลาเริ่มต้น ($t = 0$) นั้นความน่าจะเป็นของความล้มเหลว ณ เวลาดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์ ขณะที่เวลาผ่านไปจนกระทั่งเวลานานมาก $t \longrightarrow \infty$ ความน่าจะเป็นของความล้มเหลวของอุปกรณ์นั้นจะมีค่าเป็น 1 เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วอุปกรณ์ดังกล่าวจะล้มเหลวหรือขัดข้องอย่างแน่นอนหลังจากใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง ลักษณะธรรมชาติของอุปกรณ์นี้จึงเทียบเคียงได้กับฟังก์ชั่นการกระจายสะสม และการวัดความน่าจะเป็นของความล้มเหลวก็เป็นฟังก์ชั่นของเวลา การประเมินความเชื่อถือได้ในลักษณะดังกล่าวนี้ก็คือระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ (t) นั่นเอง ส่วนฟังก์ชั่นการกระจายการสะสมที่แสดงถึงการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์หลังจากใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่งก็คือ

ฟังก์ชั่นการกระจายความล้มเหลวสะสม หรือการกระจายความล้มเหลวสะสมนั่นเอง ใช้สัญลักษณ์เป็น Q(t) ส่วนฟังก์ชั่นของอุปกรณ์ที่แสดงถึงความสามารถในการทำงาน (Survior function) คือ R(t) สามารถคำนวณได้จาก

$$R(t) = 1 - Q(t) \tag{2.1}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลง (Derivative)ของฟังก์ชั่นการกระจายสะสมของตัวแปรสุ่มต่อเนื่องคือฟังก์ชั่นความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function : PDF) หรือเรียกว่าฟังก์ชั่นความหนาแน่นของความล้มเหลว ใช้สัญลักษณ์เป็น f(t) สามารถคำนวณได้จาก

$$f(t) = \frac{d(Q)}{dt} = -\frac{d(R)}{dt} \tag{2.2}$$

หรือ

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{2.3}$$

และ

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \tag{2.4}$$

จากทฤษฎีความน่าจะเป็นพื้นที่ภายใต้ฟังก์ชั่นความหน่าแน่นของความล้มเหลวจะต้องเป็น 1 ดังนั้นจากสมการที่ 2.4 เขียนใหม่ได้เป็น

$$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt \tag{2.5}$$

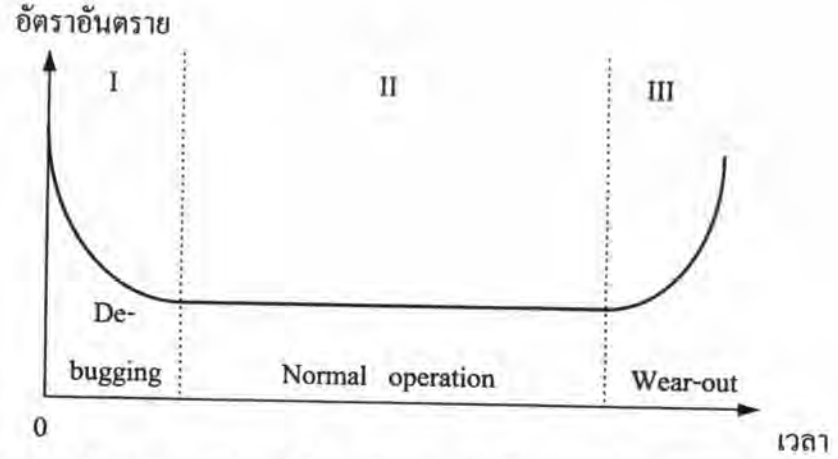
เรามักใช้อัตราอันตราย (Hazard rate : h(t)) อธิบายการทำงานของอุปกรณ์ในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะ (Transition rate) ซึ่งขึ้นอยู่กับโอกาสซึ่งแสดงถึงเหตุการณ์เฉพาะที่เกิดขึ้น เช่น ซ่อมแซม ล้มเหลว หรือสวิตชิ่ง โดยที่อัตราอันตรายดังกล่าวมีความหมายครอบคลุมถึงการล้มเหลวหรือการซ่อมแซมได้ สำหรับ h(t) นี้ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของอุปกรณ์ตัวอย่างชนิดหนึ่งมีจำนวน 100 ชิ้น และอุปกรณ์ตัวอย่างอีกชนิดหนึ่งมีจำนวน 1,000 ชิ้น ถ้าจำนวนครั้งที่อุปกรณ์ตัวอย่างแต่ละชนิดมีค่าเท่ากันย่อมแสดงว่าอุปกรณ์ชนิดแรกมีอัตราอันตรายสูงกว่าภายใต้การศึกษาที่ระยะเวลาเท่ากัน ดังนั้น h(t) จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$h(t) = \frac{NF}{NC} \tag{2.6}$$

โดยที่ NF หมายถึงจำนวนความล้มเหลวต่อหน่วยเวลา

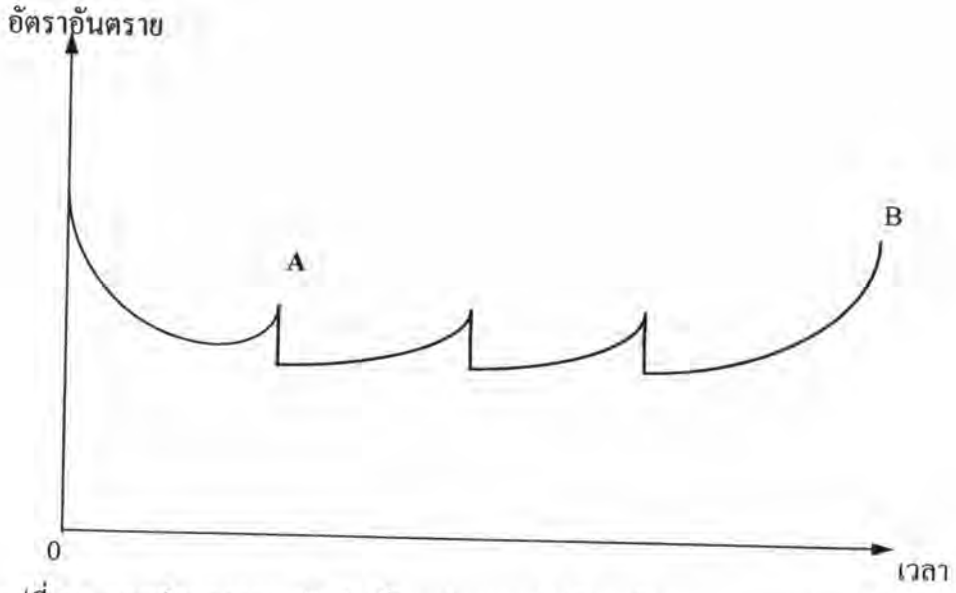
และ NC หมายถึงจำนวนอุปกรณ์ศึกษา

ตามปกติอุปกรณ์จะมีอัตราอันตรายต่างกันในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการใช้งานดังแสดงดังรูปที่ 2.6 [4,16,21]



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอัตราอันตรายของอุปกรณ์ที่ซ่อมไม่ได้

จากรูปที่ 2.6 เราพอจะแบ่งช่วงเวลาออกได้เป็น 3 เขต คือ I แสดงเขตของการเริ่มใช้งาน อัตราอันตรายในเขตนี้จะลดลงเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มักจะพบความผิดพลาดเนื่องจากการออกแบบหรือการผลิตที่ไม่เหมาะสม ในเขต II เป็นเขตของการทำงานตามปกติ ในเขตนี้จะมีอัตราอันตรายคงที่ และเขต III เป็นเขตที่อัตราอันตรายจะเพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องจากความเสื่อมตามอายุการใช้งานของอุปกรณ์ แต่ใ นกรณีที่อุปกรณ์นั้นซ่อมแซมได้แล้วโดยทั่วไปค่าอัตราอันตรายจะเป็นไปในลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7 [21]



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าวเวลากับอัตราอันตรายของอุปกรณ์ที่ซ่อมได้

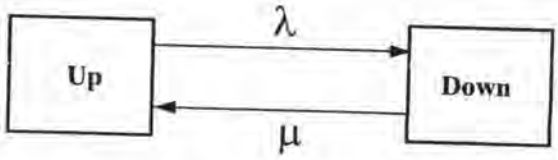
จากรูปที่ 2.7 นี้มีลักษณะคล้ายกับการนำกราฟจากรูปที่ 2.6 หลาย ๆ รูปมาต่อกันเพียงแต่ที่จุด A นั้นอัตราอันตรายจะไม่สูงมากนักเนื่องจากมีการซ่อมแซม หลังจากการซ่อมแซมนี้อัตราอันตรายก็จะลดลงเนื่องจากมีการตรวจสอบแก้ไขจุดบกพร่องของอุปกรณ์และอัตราอันตรายนี้ก็จะคงที่ไปช่วงระยะเวลาการใช้งานหนึ่งทำนองเดียวกับช่วง II ของกราฟในรูปที่ 2.6 เมื่อใช้งานไปด้วยระยะเวลาหนึ่งอุปกรณ์ก็จะเริ่มเสื่อมทำให้อัตราอันตรายล้มเหลวเริ่มสูงขึ้นทำนองเดียวกับช่วง III ของกราฟในรูปที่ 2.6 แต่อัตรานี้จะไม่สูงมากเช่นเดียวกับที่จุด A อุปกรณ์จะมีอัตราอันตรายมากน้อยสลับกันเช่นนี้กระทั่งการซ่อมแซมเริ่มไม่คุ้มค่าหรือไม่สามารถซ่อมแซมได้อัตราอันตรายของอุปกรณ์จึงสูงขึ้นที่จุด B หรือเทียบได้กับช่วง III ในกราฟรูปที่ 2.6 นั่นเอง

จากรูปที่ 2.6 นั้นในเขต I และ III เราสามารถใช้ฟังก์ชั่นการกระจายแบบ Weibull ที่มีค่าพารามิเตอร์บอกรูปทรง (α) ต่างกัน ส่วนในเขตที่ II จะใช้ฟังก์ชั่นแบบเอ็กโปเนนเชียลด้วยค่าคาดหวัง(Expected value) เท่ากับ 1/MTTF ซึ่งหมายถึงการกระจายแบบ Weibull ที่ $\alpha = 1$

2.5 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์

ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ต่างๆ ก็จะทำหน้าที่ต่างๆ กันดังกล่าวข้างต้น แต่เมื่อต้องการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังนั้นจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองสถานะ (State model) เพื่อจำลองพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด สำหรับใช้พิจารณาถึงโอกาสที่จะเกิดขัดข้องของอุปกรณ์ชนิดนั้น ๆ ขึ้นในระหว่างปฏิบัติงาน

โดยทั่วไปเราอาจจำลองสถานะการทำงานของอุปกรณ์แบ่งได้เป็น 2 สถานะคือสถานะที่อุปกรณ์ทำงานได้ตามปกติ (Up) และสถานะที่ อุปกรณ์ขัดข้องใช้งานไม่ได้ (Down) ดังนั้นแบบจำลองพื้นฐานก็คือแบบจำลอง 2 สถานะดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบจำลอง 2 สถานะของอุปกรณ์

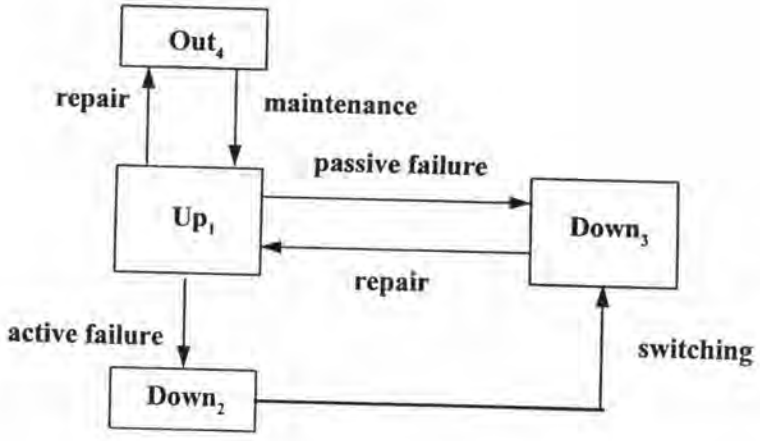
แบบจำลองดังกล่าวประกอบด้วย 2 สถานะซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยอัตราการล้มเหลว (λ) และอัตราการซ่อมแซม (μ) กล่าวคือในการเปลี่ยนสถานะจากการทำงานตามปกติไปเป็นสถานะล้มเหลวจะเป็นไปตามอัตราการล้มเหลว และการเปลี่ยนสถานะในทางกลับกันจะเป็นไปตามอัตราการ

ซ่อมแซม แบบจำลองนี้มีข้อดีที่เป็นแบบจำลองที่ง่ายต่อการเข้าใจและวิเคราะห์ หากแต่เมื่อนำไปใช้พิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์บางชนิดที่มีลักษณะการทำงานที่ซับซ้อน เช่น อุปกรณ์ในระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลังนั้น แบบจำลองดังกล่าวจะไม่สามารถจำลองถึงลักษณะการทำงานที่ซับซ้อนได้ตามความเป็นจริงบางประการ เช่นการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรคเกอร์แบบแอคทีฟ และแบบพาสสีฟ

ความล้มเหลวแบบพาสสีฟ (Passive failure) เป็นความล้มเหลวที่อุปกรณ์ไม่ทำงานและไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่เหลือซึ่งยังทำงานได้ตามปกติ อุปกรณ์ที่เกิดการล้มเหลวดังกล่าวสามารถทำให้ใช้งานได้อีก โดยการซ่อมหรือเปลี่ยนตัวอุปกรณ์ที่เกิดการล้มเหลวนั้น ตัวอย่างเช่นการเปิดวงจรของเซอร์กิตเบรคเกอร์อย่างที่ไม่ควรเป็น

ความล้มเหลวแบบแอคทีฟ (Active Failure) เป็นความล้มเหลวซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ในเขตการป้องกันขั้นปฐม (Primary Zone) ที่อยู่รอบ ๆ อุปกรณ์ที่ล้มเหลวนั้น จากนั้นจึงทำการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์และส่วนที่ยังปกติอยู่ออกจากการใช้งาน โดยทั่วๆ ไปอุปกรณ์ที่ล้มเหลวแบบแอคทีฟจะถูกแยกออกไปและเซอร์กิตเบรคเกอร์จะปิดวงจรกลับอีกมาครั้ง ทำให้การใช้งานทั้งหมดหรือบางส่วนกลับคืนมา จะสังเกตได้ว่าอุปกรณ์ที่ล้มเหลวนั้นจะกลับมาใช้งานได้อีกครั้งต้องมีการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนตัวด้วยเช่นกัน

เพื่อที่จะพิจารณาถึงพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีลักษณะที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลอง 4 สถานะ[22] ดังรูปที่ 2.5 ขึ้นเพื่อที่จะพิจารณาประเภทการล้มเหลวของอุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสมกว่าแบบ 2 สถานะ โดยที่แบบจำลอง 4 สถานะ ประกอบด้วยความล้มเหลวแบบพาสสีฟ ความล้มเหลวแบบแอคทีฟและการซ่อมบำรุงอุปกรณ์



รูปที่ 2.9 แบบจำลอง 4 สถานะของอุปกรณ์

แบบจำลอง 4 สถานะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์อาจมีการล้มเหลวและการกลับคืนสู่การทำงานแบบต่างๆกัน หากพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองดังกล่าวกับการทำงานจริงของอุปกรณ์นั้นจะพบว่าโดยทั่วไปอุปกรณ์จะทำงานในสถานะปกติ คือสถานะที่ 1 แล้วต่อมาอาจล้มเหลวแบบแอคทีฟ เช่นการเกิดลัดวงจร อุปกรณ์ทำงานเข้าสู่สภาวะที่ 2 จากนั้นเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานสามารถทำการสวิตชิงเพื่อนำอุปกรณ์ออกจากระบบซึ่งเปรียบเทียบเสมือนการเข้าสู่สถานะที่ 3 แล้วจึงทำการซ่อมแซมให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติในสถานะที่ 1 หรือ บางกรณีจากการทำงานปกติในสถานะที่ 1 อุปกรณ์อาจเกิดการล้มเหลวแบบพาสสีฟ เช่นการเปิดวงจร ทำให้อุปกรณ์เข้าสู่สภาวะที่ 3 หลังจากนั้นจึงซ่อมแซมให้กลับมาสู่สถานะที่ 1 อีกครั้ง หรือจากสถานะที่ 1 อาจมีการซ่อมบำรุงทำให้เข้าสูสถานะที่ 4 หลังจากปฏิบัติงานเสร็จเรียบร้อยจึงกลับเข้าสู่สถานะที่ 1 ตามเดิม แต่อย่างไรก็ดี อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจำหน่ายอาจไม่จำเป็นต้องมีสถานะการทำงานครบทั้ง 4 สถานะ หากแต่ขึ้นกับลักษณะการทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ หรือบางอุปกรณ์จะใช้แบบจำลองเพียง 2 สถานะก็ได้

2.6 เกณฑ์การเกิดข้อขัดข้อง(Interruption criterion)

โหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมและการพาณิชย์โดยทั่วไปนั้นสามารถทนต่อเหตุการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าตกหรือลดลงไปเป็นศูนย์ได้เพียงในช่วงเวลาที่จำกัดเท่านั้น ส่วนกรณีที่ระดับแรงดันตกแต่ไม่เป็นศูนย์จะสามารถทนได้ในช่วงเวลาที่นานขึ้นและในระดับแรงดันตกไปเพียงเล็กน้อยก็จะไม่ส่งผลต่ออุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าเหล่านั้น เมื่อนำค่าแรงดันตกในระดับต่างๆซึ่งเกิดขึ้นที่จุดโหลดไป เปรียบเทียบกับช่วงเวลาที่เกิดแรงดันตกแล้วอุปกรณ์ที่จุดโหลดยังสามารถทำงานได้จะได้กราฟที่เรียกว่าแรงดันตกสูงสุดที่เกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดขัดข้องขึ้น(Maximum permissible voltage sags) เส้นกราฟดังกล่าวแสดงไว้โดยเส้นหนาในรูปที่ 2.10 [11,12] ซึ่งจะใช้กำหนดเป็นแรงดันตกสูงสุดที่โหลดจะทนได้โดยไม่เกิดข้อขัดข้องในการทำงานและใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการตัดวงจรที่จุดโหลด และช่วงเวลาที่อนุญาตให้เกิดแรงดันตกจะขึ้นอยู่กับประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้ ณ จุดโหลดนั้นๆ ดังนั้นเส้นกราฟดังกล่าวในแต่ละพื้นที่อาจจะแตกต่างกันไป จากกราฟที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 เมื่อระดับแรงดันที่จุดโหลดตกต่ำกว่าเกณฑ์การเกิดข้อขัดข้องซึ่งแสดงด้วยเส้นหนาจะทำให้เกิดการขัดข้องขึ้นที่จุดโหลด หรือเกิดการตัดวงจรที่จุดโหลด

สิ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างกราฟแรงดันตกที่เกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดขัดข้องขึ้นที่จุดโหลดต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังต่อไปนี้

- ขนาดแรงดันตกที่ทนรับได้ของระบบคอมพิวเตอร์

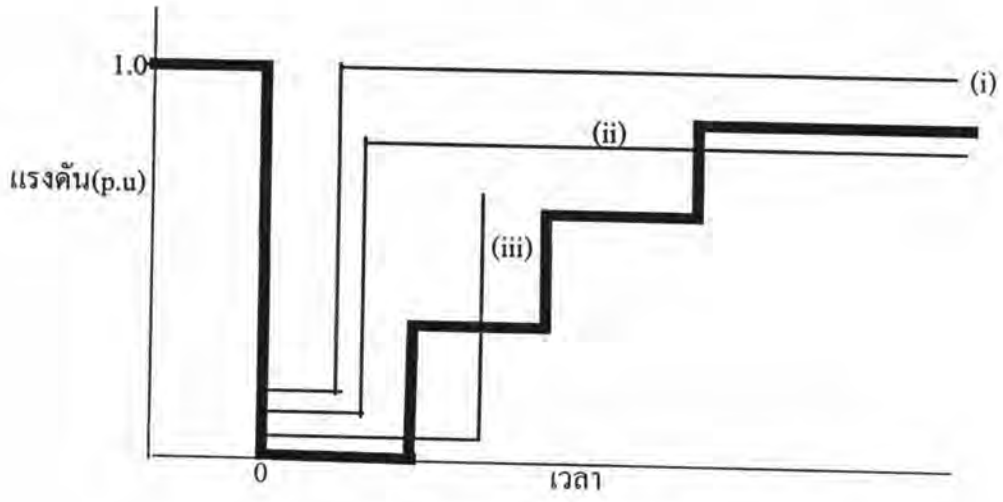
-เครื่องมือสำหรับการวัด วาล์ว หรือ ระบบควบคุมที่จะทำการปรับให้ระบบอยู่ในสถานะที่ปลอดภัย เช่น การตัดไฟที่จ่ายให้กับระบบการผลิตเมื่อเกิดแรงดันตก เป็นต้น

-รีเลย์ที่ใช้ในการตัดไฟที่จ่ายให้กับมอเตอร์ขนาดใหญ่ เมื่อแรงดันตกต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ในช่วงเวลาที่กำหนด

- Stability curve ของมอเตอร์ซิงโครนัสซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่ทนรับได้นานที่สุดกับระดับของแรงดันตกต่างๆ

- การลดลงของแรงดันจะนำมาสู่การเพิ่มของกระแสในมอเตอร์ ในกรณีนี้เราจะมีรีเลย์ป้องกันกระแสเกินแบบหน่วงเวลาเพื่อใช้ในการป้องกันมอเตอร์ ซึ่งสิ่งนี้ต้องนำไปกำหนดไว้ในกราฟแรงดันตกที่อนุญาตให้เกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดขัดข้องขึ้น

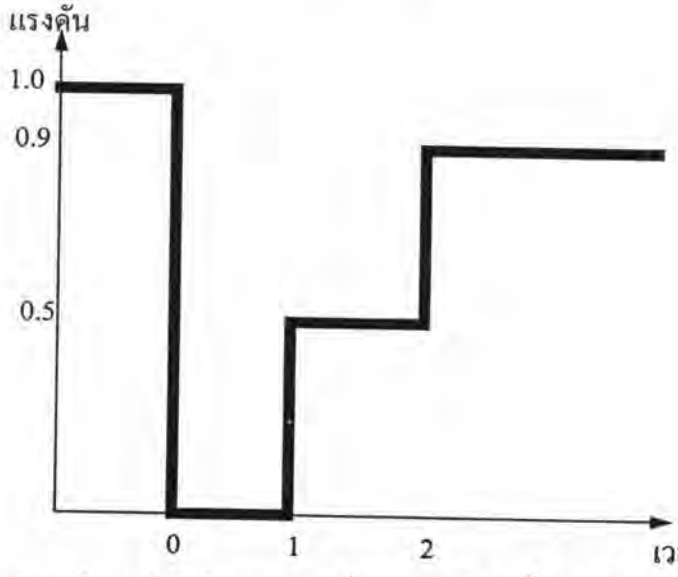
- ขึ้นกับระบบที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉิน หรือ UPS ทำให้ทนต่อแรงดันตกได้นานขึ้น



รูปที่ 2.10 เกณฑ์การเกิดข้อขัดข้อง(Interruption criterion)[11,12] (เป็นเส้นหนา)

ถ้าสมมติให้เส้นหนาในรูปที่ 2.10 เป็นเกณฑ์การเกิดข้อขัดข้องที่จุดโหลดหนึ่ง จะพบว่ารูปแบบของแรงดันตก(i)ในรูปที่ 2.10 จะไม่ทำให้เกิดการตัดวงจรที่จุดโหลดนั้น ในกรณีรูปแบบของแรงดันตก(ii)ในรูปที่ 2.10 จะไม่ทำให้เกิดการตัดวงจรที่จุดโหลดนั้นแต่จะมีขนาดแรงดันที่ต่ำเกินไป และในกรณีรูปแบบของแรงดันตก(iii)ในรูปที่ 2.10 จะเกิดการตัดวงจรที่จุดโหลดนั้น

การสร้างกราฟแรงดันตกสูงสุดที่อนุญาตให้เกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดขัดข้องขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณ เช่นสมมติว่าที่จุดโหลดทนต่อแรงดันตกได้ที่ระดับ 50% ในช่วงเวลา 1 วินาทีและแรงดันตกได้ที่ระดับ 90% ในช่วงเวลา 2 วินาที จะได้รูปกราฟที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงรูปกราฟแรงดันตกสูงสุดที่อนุญาตให้เกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดขัดข้องขึ้นที่สามารถทนต่อแรงดันตกได้ที่ระดับ 50% ในช่วงเวลา 1วินาทีและที่ระดับ 90% ในช่วงเวลา 2วินาที

ในการคำนวณ เราจะต้องทราบถึงกราฟแรงดันตกสูงสุดที่อนุญาตให้เกิดขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดขัดข้องขึ้นที่แต่ละจุดโหลดในระบบ ครบทุกจุดโหลดของระบบที่เราจะนำไปทดสอบ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณของโปรแกรม