

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้ากำลังทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าที่ส่งมาจากระบบผลิตไฟฟ้าผ่านระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อทำการจำหน่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทต่างๆต่อไป โดยทั่วไปแล้วระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า มีส่วนประกอบหลักต่างๆ ได้แก่ สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อย หม้อแปลงจำหน่าย สายป้อน สายจำหน่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำและอุปกรณ์ป้องกัน

หน้าที่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่สำคัญประการหนึ่งคือ การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา มีความมั่นคงในการส่งไฟฟ้าสูง หากเกิดเหตุขัดข้องก็สามารถแก้ไขให้ไฟฟ้าดับกลับคืนในเวลารวดเร็วหรือทำให้มีระยะเวลาการขัดข้องน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยอาศัยอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ซึ่งเหตุขัดข้องที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการลัดวงจรในสายป้อน หรือ หม้อแปลง การเกิดลัดวงจรนี้อาจเกิดได้ใน 2 ลักษณะ คือ แบบถาวรและแบบชั่วคราว ที่อาจส่งผลให้เกิดแรงดันตก หรือ ไฟกระพริบแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ อันเป็นสาเหตุในการเกิดไฟฟ้าดับแก่ผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งจะพบบ่อยในย่านผู้ใช้ไฟฟ้าอุตสาหกรรม หากการทำหน้าที่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่สมบูรณ์หรือไม่สามารถทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ เนื่องจากเกิดการขัดข้องของอุปกรณ์แล้วก็จะมีความเชื่อถือได้ต่อระบบโดยรวม ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดข้อขัดข้องหรือเกิดเหตุไฟฟ้าดับขึ้น

ในอดีตที่ผ่านมาระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้รับความสนใจในการศึกษาด้านความเชื่อถือได้ของระบบน้อยกว่าระบบผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากระบบผลิตกำลังไฟฟ้ามีการลงทุนสูง และการเกิดขัดข้องของระบบผลิตกำลังไฟฟ้า จะส่งผลให้เกิดผลกระทบเป็นบริเวณกว้าง ต่อทั้งสังคมและสิ่งแวดล้อม ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นส่วนที่มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำกว่า และผลกระทบจากการเกิดเหตุขัดข้องมีบริเวณที่แคบกว่า แต่จากประสบการณ์ของการไฟฟ้าต่างๆ พบว่า สถิติการเกิดไฟฟ้าดับที่มีผลต่อผู้ใช้ไฟฟ้ามีสาเหตุจากระบบจำหน่ายมากที่สุด

ตามที่แสดงในตารางที่ 2.1 สถิติดังกล่าวทำให้ผู้วางแผนระบบไฟฟ้าต้องคำนึงถึงการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างมาก ปัจจุบันในหลายประเทศได้มีการกำหนดเกณฑ์ของความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เพื่อรับประกันคุณภาพการให้บริการต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยกำหนดเป็นค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบ

ตารางที่ 2.1 สถิติระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับที่มีสาเหตุจากส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

ส่วนประกอบของระบบไฟฟ้า	ระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับเฉลี่ยต่อผู้ใช้ไฟฟ้าต่อปี	
	(นาทีก)	(ร้อยละ)
ระบบผลิต/ระบบส่ง	0.5	0.5
132 kV	2.3	2.4
69 kV และ 33 kV	8.0	8.3
11 kV และ 6.6 kV	58.8	60.7
แรงดันต่ำ	11.5	11.9
การดับไฟเพื่อทำงาน	15.7	16.2
รวม	96.8	100

2.1.1 อุปกรณ์หลักในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.1.2.1 สายไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ สายเปลือยและสายหุ้มฉนวน การเลือกใช้สายไฟฟ้าแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ หากต้องการระบบไฟฟ้าที่มีความเชื่อถือได้สูงควรใช้สายเคเบิลใต้ดิน แต่การลงทุนก็จะสูงตามไปด้วย

2.1.2.2 หม้อแปลงจำหน่าย เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้ต่ำลงเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ผู้ใช้ประเภทต่างๆ ด้วยระบบแรงดันต่ำต่อไป

2.1.1.3 เซอร์กิตเบรกเกอร์ โดยทั่วไปใช้ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ป้องกันใช้ในการกำจัดการเกิดการผิดพลาดในระบบหรือตัดส่วนของอุปกรณ์ที่เกิดการผิดพลาดออกจากระบบ

2.1.1.4 สวิตช์ตัดตอน โดยทั่วไปใช้ติดตั้งในสายเมน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบช่วงสุดท้ายที่รับไฟฟ้าจากระบบสายส่งเพื่อจำหน่ายให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้าอาจเป็นระบบไฟฟ้ากระแสตรงหรือระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีใช้ตอนเริ่มแรกเพื่อจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าตามเมืองใหญ่ๆ มาภายหลังระบบจำหน่ายไฟฟ้ากระแสสลับได้เข้ามาแทนที่ทั้งนี้เนื่องจากประหยัดกว่าแบบไฟฟ้ากระแสตรง ระบบจำหน่ายไฟฟ้าประกอบด้วยสองส่วนที่สำคัญ คือ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าปฐมภูมิซึ่งรับไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือสถานีไฟฟ้าย่อยและส่งต่อไปยังบริเวณผู้ใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก และแปลงไฟลงผ่านหม้อแปลงระบบจำหน่ายไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้าทุติยภูมิซึ่งรับไฟจากหม้อแปลงระบบจำหน่ายส่งต่อไปยังผู้ใช้ไฟเพื่อใช้งานเลย ระบบจำหน่ายสามารถจำแนกออกได้เป็นส่วนๆ ที่สำคัญดังนี้ สถานีไฟฟ้าย่อยกำลัง ระบบสายส่งย่อย สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย สายป้อนปฐมภูมิ หม้อแปลงจำหน่าย และระบบจำหน่ายทุติยภูมิ ส่วนต่างๆ ของระบบจำหน่ายที่กล่าวมานี้ใช้กับระบบจำหน่ายทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นระบบจำหน่ายที่แบ่งตามชนิดของโหลด เช่น อาคารพาณิชย์ ผู้อยู่อาศัย โรงงานอุตสาหกรรม หรือแบ่งตามชนิดโครงสร้าง เช่น สายจำหน่ายเหนือดิน หรือสายจำหน่ายใต้ดิน [12]

ตารางที่ 2.2 การแบ่งส่วนของระบบจำหน่าย

ส่วนของระบบจำหน่าย	หน้าที่และการทำงาน
สถานีไฟฟ้าย่อยกำลัง (Bulk Power Substation)	รับกำลังไฟฟ้าจากระบบสายส่งและแปลงไฟเพื่อให้ระบบสายส่งย่อย
ระบบสายส่งย่อย (Subtransmission System)	ระบบวงจรไฟฟ้าที่รับไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลัง เพื่อส่งต่อไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย
สถานีไฟฟ้าจำหน่าย (Distribution Substation)	สถานีไฟฟ้ารับกำลังไฟฟ้าจากวงจรสายส่งย่อยและแปลงให้สายป้อนปฐมภูมิ
สายป้อนปฐมภูมิ (Primary Feeder)	วงจรไฟฟ้าที่รับไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อส่งไปยังหม้อแปลงจำหน่าย
สายป้อนทุติยภูมิ (Secondary Feeder)	วงจรไฟฟ้าที่รับไฟจากหม้อแปลงจำหน่ายและส่งไปยังผู้ใช้ไฟ

2.1.2 สถานีไฟฟ้าย่อยกำลัง

สถานีไฟฟ้าย่อยกำลัง คือ สถานีเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่งให้ต่ำลงแล้วเข้าระบบสายส่งย่อย เนื่องจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังนี้มีโหลดเป็นจำนวนมากไหลผ่าน การออกแบบสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังจึงต้องพิถีพิถันในเรื่องการจ่ายไฟฟ้าให้โหลดอย่างต่อเนื่อง ถ้าหากสถานีไฟฟ้าย่อยขัดข้องไม่สามารถจ่ายไฟให้ระบบสายส่งย่อยได้ก็จะทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าใช้ ลักษณะการจัดบัส และเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังมีด้วยกันหลายแบบขึ้นอยู่กับความสำคัญของโหลดที่จ่ายไฟว่าต้องการให้มีความมั่นคง มีไฟฟ้าใช้อย่างต่อเนื่องเพียงใด การจัดบัส และเบรกเกอร์ในสถานีไฟฟ้าย่อยแบ่งออกได้เป็นดังนี้

2.1.2.1 บัสเดี่ยวหรือบัสประธาน (Single or Main Bus) เป็นรูปแบบการจัดบัสและเบรกเกอร์อย่างง่าย มีหม้อแปลงสองชุด แปลงแรงดันไฟฟ้าของสายส่งลงไปเป็นระดับสายส่งย่อย ถ้าเกิดลัดวงจรที่บัสนี้ก็ทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟได้เลยแหล่งจ่ายไฟใดที่เกิดขัดข้องแหล่งจ่ายไฟที่เหลือก็ยังสามารถจ่ายไฟได้โดยไม่ขาดความต่อเนื่องในการจ่ายไฟถ้าหม้อแปลงที่จ่ายมีขนาดใหญ่มากพอ รูปแบบการจัดบัสเดี่ยวหรือบัสประธานนี้มีจุดอ่อนที่การเกิดลัดวงจรที่บัสทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้โหลดและหม้อแปลงในระบบนี้ต้องมีขนาดใหญ่

2.1.2.2 บัสแรงสูงตัดตอน การจัดบัสของระบบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากบัสเดี่ยวโดยการต่อแหล่งจ่ายไฟสองแหล่งเข้าด้วยกันเพื่อว่าเมื่อมีเหตุขัดข้องกับแหล่งจ่ายไฟใด อีกแหล่งจ่ายไฟหนึ่งยังสามารถส่งกำลังไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงทั้งสองแทนที่จะเป็นหม้อแปลงเดียว สถานีไฟฟ้าย่อยแบบนี้ลงทุนน้อยก็จริงแต่ความต่อเนื่องในการจ่ายไฟไม่สูงเมื่อเทียบกับสถานีไฟฟ้าย่อยแบบอื่น

2.1.2.3 บัสเดี่ยวตัดตอน การจัดบัสและเบรกเกอร์ของระบบนี้เหมือนกับแบบบัสประธานหรือบัสเดี่ยวยกเว้นบัสถูกแยกออกมาเป็นสองบัสหรือมากกว่า โดยใช้เบรกเกอร์เป็นตัวตัดตอนแยกลักษณะแบบนี้มีผลคือบัสตอนใดถูกเอาออกจากระบบเพื่อการบำรุงรักษาได้โดยไม่มีผลต่อบัสตัดตอนอื่นๆ การเกิดลัดวงจรที่บัสตอนใดไม่ได้ทำให้ระบบหยุดชะงักการจ่ายไฟทั้งหมดเพียงแต่หยุดจ่ายบางส่วนเท่านั้น จะเห็นว่าการจัดบัส และเบรกเกอร์แบบนี้ก็เพื่อแก้ไขจุดอ่อนของการจัดแบบบัสประธานหรือเดี่ยว ในกรณีที่เกิดลัดวงจรที่บัสแล้วต้องหยุดชะงักการจ่ายไฟหมด เมื่อมีการจัดวงจรให้ดีขึ้นแล้วคือ ไม่ให้มีโหลดสูงเกินไป การบำรุงรักษาโดยการเอาบัสตัดตอนใดออกสามารถทำได้โดยไม่ต้องปลดโหลดออกเลยเพื่อให้มีความต่อเนื่องของการจ่ายโหลดในกรณีนี้สถานีไฟฟ้าย่อยที่รับไฟจากบัสตัดตอนใดๆ ต้องรับไฟจากบัสตัดตอนอื่นๆ หรือจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังอื่นๆ

2.1.2.4 บัสประธานคู่ เป็นการจัดบัสและเบรกเกอร์เพื่อลดความผิดพลาดในการทำงานเบรกเกอร์หรือบัสสามารถตัดออกจากระบบเวลาใดก็ได้โดยไม่รบกวนการจ่ายไฟเลย ถ้าหากบัสทั้งสองถูกใช้งานอยู่และเกิดลัดวงจรขึ้นที่บัสใดบัสหนึ่ง จุดลัดวงจรดังกล่าวสามารถถูกตัดออกจากระบบได้ด้วยวิธีเลย์แบบดิฟเฟอเรนเชียล โดยยังสามารถจ่ายไฟได้เหมือนปกติอยู่ ระบบบัสประธานนี้อาจดัดแปลงได้โดยตัดบัสออกเป็นตอนๆ โดยใช้เบรกเกอร์ตัดตอนและสวิตช์ตัดตอน เบรกเกอร์คู่อาจใช้สำหรับบางวงจรโดยที่วงจรอื่นอาจต่อเข้ากับบัสโดยผ่านสวิตช์ตัดตอนเท่านั้น การเลือกวิธีการจัดบัสและเบรกเกอร์อย่างใดก็ขึ้นอยู่กับความสำคัญของวงจรว่าจะต้องมีการป้องกันมากหรือไม่

2.1.2.5 บัสประธานและบัสโอน บัสโอน หมายถึง บัสที่วงจรหนึ่งอาจถูกโอนจากบัสประธานมาที่บัสนี้ที่ละวงจรโดยผ่านทางเบรกเกอร์เชื่อมโยง (Tie Breaker) ระบบนี้อาจถูกดัดแปลงให้สายจ่ายไฟที่เข้ามาต่อผ่านสวิตช์ตัดตอนเพื่อว่าจะต่อเข้ากับบัสประธานหรือบัสโอนก็ได้ กรณีนี้ก็สามารถแก้ไขปัญหาที่ว่าเหตุขัดข้องที่บัสประธานทำให้ขาดการจ่ายไฟได้

2.1.2.6 บัสประธานสำรองและโอน บัสสำรองมีไว้สำหรับต่อสายป้อนหรือสายจ่ายไฟ บัสสำรองนี้ทำหน้าที่เหมือนกับบัสประธานที่สอง สายป้อนที่จ่ายไปสถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ อาจแยกรับไฟจากสองบัสโดยมีสายจ่ายไฟป้อนเข้าแต่ละบัสจากหม้อแปลง การบำรุงรักษาเบรกเกอร์ของสายป้อนสามารถทำได้โดยต่อโหลดไว้ชั่วคราวเข้ากับบัสโอน

2.1.2.7 บัสประธานและบัสโอนสำรอง ซึ่งเป็นการดัดแปลงระบบการจัดบัสประธานสำรองและโอนโดยใช้บัสสำรองและบัสโอนรวมเข้าเป็นบัสเดียวกัน การจัดแบบนี้มีข้อดีคือสามารถบำรุงรักษาบัสใดหรือเบรกเกอร์ใดก็ได้ การเพิ่มบัสหรือเบรกเกอร์ใหม่เข้าไปก็สามารถทำได้โดยไม่ยุ่งยากการบำรุงรักษาเบรกเกอร์ของสายป้อนสามารถทำได้โดยจ่ายไฟผ่านเบรกเกอร์ของสายจ่ายไฟเข้าบัสประธานผ่านเบรกเกอร์เชื่อมโยงเข้าบัสโอนและไปยังโหลด ในการจัดบัสประธานและบัสโอนสำรองเพื่อจ่ายไฟต้องระมัดระวังในเรื่องการทำงานของสวิตช์ตัดตอนตามขั้นตอนด้วย

2.1.2.8 บัสเบรกเกอร์ครึ่ง เป็นระบบที่มีบัสประธานสองชุดที่ใช้อุปกรณ์น้อยลง ระบบใช้เบรกเกอร์ 3 ชุดต่อ 2 วงจร จึงเรียกว่าการจัดแบบนี้ว่าบัสเบรกเกอร์ครึ่ง การย้ายโหลดเพื่อรับไฟจากบัสประธานใดก็ทำได้โดยใช้เบรกเกอร์ ขั้นตอนการทำงานปิดเปิดของเบรกเกอร์ตามลำดับก็ไม่ยุ่งยาก

2.1.2.9 บัสวง มีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือ ใช้เบรกเกอร์หนึ่งชุดต่อหนึ่งวงที่เข้าหรือออกจากระบบเท่านั้น และข้อได้เปรียบอีกประการคือ แต่ละวงจรของโหลดหรือวงจรที่ออกจากระบบได้รับการจ่ายไฟสองทาง ถึงแม้ว่าค่าใช้จ่ายลดลงต่ำกว่าของระบบบัสประธานคู่หรือบัสเบรกเกอร์ครึ่งแต่บัสวงก็ยังมี ความมั่นคงและเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟ เบรกเกอร์ในระบบลัดวงจรใดๆ สามารถเอาออกจากระบบได้เพื่อการ บำรุงรักษาโดยไม่ทำให้ระบบต้องหยุดจ่ายไฟอย่างไรก็ตามถ้ามีการลัดวงจรเกิดที่วงจรที่เข้ามาหรือออกไปใน ขณะที่มีการเอาเบรกเกอร์ออกไปบำรุงรักษาก็อาจทำให้วงจรอื่นที่อยู่ข้างเคียงไม่สามารถรับไฟได้

2.1.3 ระบบสายส่งย่อย

สายส่งย่อยมีหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังเพื่อส่งไปให้สถานีไฟฟ้าย่อยที่อยู่ตามแหล่งชุมชนต่างๆ ที่สถานีไฟฟ้าย่อยนี้ระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งย่อยถูกแปลงให้ต่ำลงเพื่อส่งต่อไปยังสายป้อน

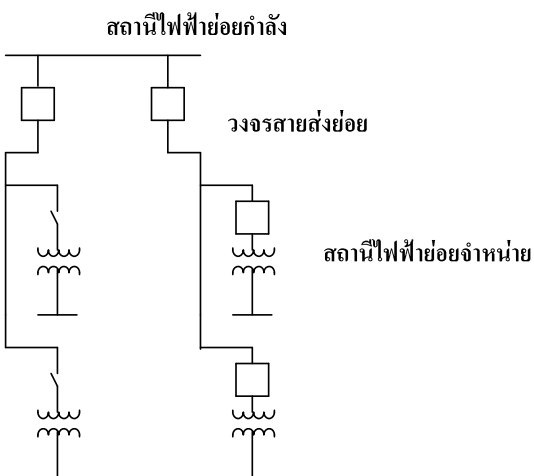
การจัดว่าระบบสายส่งใดเป็นสายส่งย่อยหรือไม่ ต้องพิจารณาจากการทำงานของระบบไม่ใช่พิจารณาจากระดับแรงดันไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับสายส่งย่อยขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าระบบสายส่งย่อย ถ้าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายส่ง สายส่งย่อยและสายป้อน มีค่าสูงมากเกินไปหรือต่ำมากเกินไปก็ไม่ประหยัด ระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งย่อยที่ใช้กันอยู่ระหว่าง 28 และ 138 kV ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างรับแรงดันไฟฟ้าของสายส่ง สายส่งย่อยและสายป้อน ระดับแรงดันไฟฟ้าโดยทั่วไปไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามตารางนี้

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่ง สายส่งย่อย และสายป้อน

กรณี	สายส่ง (kV)	สายส่งย่อย (kV)	สายป้อน (kV)
1	34.5	13	4
2	69	13	4
3	69	34.5	4
4	69	34.5	13
5	69	46	13
6	69	46	4
7	115	34.5	4
8	115	46	4
9	115	69	13
10	138	69	13
11	138	34.5	4
12	138	69	23
13	230	138	13
14	230	138	23

บางระบบใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่ง และสายส่งย่อยระดับเดียวกันการใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวแยกว่าสายส่งใดเป็นสายส่งแรงสูง สายส่งย่อย หรือสายป้อนทำได้ยาก บางระบบอาจใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าหนึ่งกับสายส่งย่อยในพื้นที่หนึ่งแต่กลับใช้กับสายป้อนในอีกพื้นที่หนึ่งก็ได้ วงจรของสายส่งย่อยอาจจัดอยู่ในรูปเรเดียลหรือแบบอื่นๆ ที่ยุ่งยากขึ้นไป ความแตกต่างสำคัญสองประการของการแบ่งชนิดของการจัดวงจรสายส่งย่อย คือ ระบบที่สถานีไฟฟ้าย่อยกำลังไม่ได้มีการเชื่อมโยงด้วยสายส่งย่อย และระบบที่สถานีไฟฟ้าย่อยกำลังที่มีการเชื่อมโยงด้วยสายส่งย่อย ระบบจำหน่ายที่ไม่มีการเชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังด้วยสายส่งย่อยจะส่งจ่ายแบบเรเดียล ลูป หรือกริดแบบแหล่งจ่ายเดียว สถานีไฟฟ้าย่อยกำลังสามารถเชื่อมโยงด้วยกันที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสายส่งย่อยโดยการแตะ-ทาย (Tapped Tie) หรือกริดแบบหลายแหล่งจ่าย

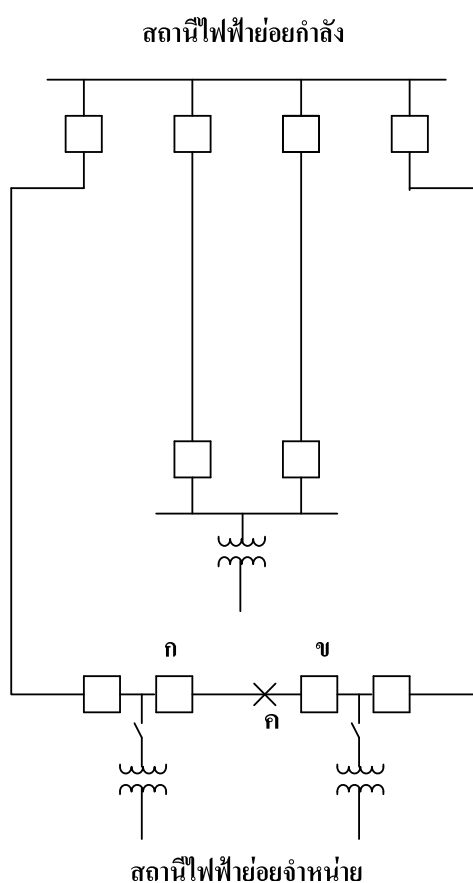
2.1.3.1 วงจรสายส่งย่อยแบบเรเดียล (Radial) วงจรนี้ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนักสำหรับระบบสายส่งเนื่องจากความมั่นคง หรือความเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟต่ำเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในสายส่งย่อยใดจะทำให้ไม่มีการจ่ายไฟให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยทุกแห่งที่รับไฟจากวงจรสายส่งย่อย



รูปที่ 2.1 สายส่งแบบเรเดียลแบบง่าย

การปรับปรุงระบบสายส่งย่อยและเรเดียลให้ดีขึ้นสามารถทำได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละวงจรจ่ายไฟให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยส่วนหนึ่ง และในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฉุกเฉินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยอื่นๆ การจัดแบบนี้ทำให้สามารถจ่ายไฟให้ผู้บริโภคได้รวดเร็วกรณีที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบและในกรณีที่ระบบมีปัญหา เช่น การลัดวงจรดังกล่าวนั้นการสวิตช์ไฟของสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อรับไฟจากสายส่งย่อยหนึ่งไปยังสายส่งย่อยอีกวงจรหนึ่งสามารถทำได้โดยสวิตช์ หรือเบรกเกอร์ดังรูปที่ 2.2 แต่ถ้าหากใช้เบรกเกอร์ต้องมีระบบล็อกกระหว่างกัน (Interlock) คือ เบรกเกอร์ที่กรณีปกติเปิดอยู่จะปิดลงก็ต่อเมื่อเบรกเกอร์ในวงจรที่เกิดลัดวงจรเปิดออกก่อน

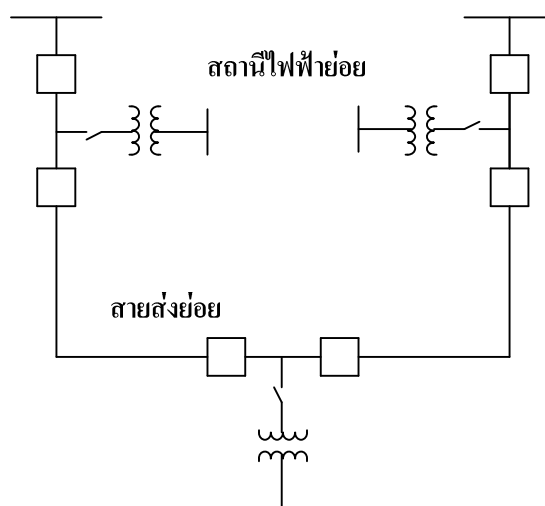
2.1.3.2 วงจรสายส่งย่อยแบบลูป (Loop) การแบ่งสายส่งย่อยในลูปเป็นตอนๆ เมื่อมีการเกิดลัดวงจรขึ้นในสายส่งย่อยไม่ว่าตอนใดก็ตามก็ไม่สามารถทำให้สถานีไฟฟ้าย่อยใดหยุดจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟ เพราะจุดลัดวงจรในสายส่งย่อยจะถูกแยกออกจากระบบด้วยการเปิดของเบรกเกอร์ทั้งสองของสายส่งย่อยตอนนั้น สมมติเกิดลัดวงจรในสายส่งย่อยตอนหนึ่งที่จุด ค. เบรกเกอร์ ก. และ ข. ก็เปิดออกทำให้จุดลัดวงจร ค. ถูกแยกออกจากระบบและสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งหมดก็สามารถรับไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังได้เช่นเดิม แต่การออกแบบระบบนี้ทุกๆ ตอนของสายส่งย่อยต้องไม่รับโหลดเกินตัว (Overload) ในกรณีที่สายส่งวงจรย่อยตอนใดถูกตัดออกจากระบบ



รูปที่ 2.2 วงจรสายส่งย่อยแบบลูป

บางครั้งการจัดวงจรแบบลูปทำให้สับสนคิดว่าเป็นวงจรแหวน (Ring) ดังนั้นจึงต้องทำความเข้าใจระหว่างวงจรแบบลูปและวงแหวน ลูป หมายถึง วงจรซึ่งเริ่มต้นจากแหล่งจ่ายไฟหนึ่งไปยังโหลดต่างๆ และวนกลับมายังแหล่งจ่ายไฟเดิมที่จุดเริ่มต้นหรือบัสเดียวกัน วงแหวน หมายถึง วงจรที่มีการเชื่อมโยงแหล่งจ่ายไฟหลายแหล่งเข้าด้วยกัน การจัดวงจรแบบวงแหวนนิยมใช้กันมากสำหรับสายส่งย่อยและเมื่อระยะขยายมากขึ้นก็จะอยู่ในรูปของกริด (Grid)

2.1.3.3 วงจรสายส่งย่อยแบบถ่ายโอน (Tapped-Tie) ระบบจำหน่ายนี้มีการเชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังด้วยสายส่งย่อย สถานีไฟฟ้าย่อยก็รับไฟจากสายส่งย่อยที่เชื่อมโยงนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การจัดระบบนี้ต้องแบ่งระบบเป็นตอนๆ โดยมีเบรกเกอร์หัวท้ายของแต่ละตอนเพื่อเวลาการเกิดลัดวงจรขึ้นในตอนใดตอนหนึ่งของสายส่งจุดลัดวงจรก็ถูกตัดออกจากระบบด้วยการเปิดของเบรกเกอร์ที่หัวท้ายของตอนนั้นๆ



รูปที่ 2.3 สายส่งย่อยแบบถ่ายโอน

2.1.3.4 วงจรสายส่งย่อยแบบกริดเป็นระบบที่คล่องตัวเนื่องจากสามารถขยายเพื่อต่อให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยเพิ่มขึ้นได้อย่างทันทีโดยใช้โครงสร้างวงจรน้อย ระบบกริดใช้เบรกเกอร์จำนวนมากและระบบรีเลย์ยุ่งยากกว่าระบบเรเดียลและลูบ ระบบกริดให้ความมั่นคงและความเชื่อถือได้ของระบบมากขึ้น แต่ปัญหาเรื่องรีเลย์ก็ยุ่งยากมากขึ้นอย่างไรก็ตามการเชื่อมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟหลายแหล่งมีข้อดี คือทำให้มีการกระจายโหลดสำหรับแหล่งจ่ายไฟพอกๆกัน

2.1.4 สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย (Distribution Substation)

สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย คือ สถานีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า แบ่งจ่ายและแปลงแรงดันไฟฟ้าโดยรับไฟจากสายส่งย่อยเพื่อส่งต่อไปให้ผู้ใช้ไฟสถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่ายแบ่งออกได้ดังนี้

2.1.4.1 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบธรรมดา (Simple) ประกอบด้วย สวิตช์ตัดตอนแรงสูง หม้อแปลง และสายป้อนพร้อมเบรกเกอร์ทางด้านแรงต่ำ โดยมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าในหม้อแปลงหรือสายป้อนเพื่อการบำรุงรักษา และการตรวจเช็คเบรกเกอร์หรือการตรวจเช็คโดยไม่ต้องดับไฟอาจใช้สวิตช์ทางผ่าน (By-Pass Switch)

2.1.4.2 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบหลายสายส่งย่อย (Multiple Subtransmission) รูปแบบเพื่อให้มีความมั่นคงและเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟมากขึ้นจะเพิ่มสายส่งย่อยเข้าไปในสถานีไฟฟ้าย่อย สวิตช์ตัดตอนสองชุดแบบลือกระหว่างกันเพื่อใช้ในการโอนการรับไฟจากสายส่งย่อยหนึ่งไปยังสายส่งย่อยหนึ่ง เมื่อมีการลัดวงจรในสายส่งย่อยเบรกเกอร์ของสายส่งนั้นเปิดวงจรออก เวลาที่ผู้ใช้ไฟไม่ได้รับไฟก็คือช่วงเวลาของการโอนสวิตช์รับไฟไปยังสายส่งย่อยใหม่

2.1.4.3 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบหม้อแปลงหลายชุด (Multiple Transformer) เพื่อป้องกันการเกิดไฟดับเนื่องจากหม้อแปลงชำรุด หรือเสียหายโดยใช้หม้อแปลงหลายชุด หม้อแปลงในสถานีไฟฟ้าย่อยแบ่งออกเป็นสองชุด เมื่อหม้อแปลงหนึ่งไม่สามารถจ่ายโหลดได้หม้อแปลงที่เหลือก็สามารถรับโหลดที่เหลือได้

ตารางที่ 2.4 อัตราส่วน kVA ของหม้อแปลงระบายความร้อนด้วยพัดลมกับระบายความร้อนเอง

ขนาดหม้อแปลงเมื่อระบายความร้อนเอง	kVA หม้อแปลงระบายความร้อนด้วยพัดลม
	kVA หม้อแปลงระบายความร้อนเอง
501 – 2,499 kVA	1.15
2,500 – 11,999 kVA	1.25
12,000 หรือมากกว่า	1.33

เพื่อป้องกันไม่ให้หม้อแปลงสองชุดทำงานขนานกันใช้สวิตช์ชนิดตัดโหลดที่อยู่ระหว่างบัสแรงต่ำเป็นแบบลือกระหว่างกัน คือ สวิตช์ชนิดตัดโหลดนี้จะปิดวงจรได้ก็ต่อเมื่อสวิตช์ตัดตอนใดของหม้อแปลงเปิดวงจรออก

2.1.4.4 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบจ่ายไฟและต่อไฟอัตโนมัติ (Automatic Service Restoration) ถูกออกแบบให้การจ่ายโหลดทั้งหมดหรือบางส่วนหยุดชะงักชั่วคราวหรือเป็นการถาวร เมื่อเกิดการลัดวงจรในหม้อแปลงหรือสายส่งย่อยช่วงเวลาหยุดไฟคือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการสับสวิตช์ต่างๆ หรือช่วงเวลาที่ใช้เปลี่ยนอุปกรณ์สำรอง การลดช่วงเวลาหยุดจ่ายไฟให้น้อยลงสามารถทำได้โดยใช้สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่ายแบบสับเปลี่ยนสวิตช์อัตโนมัติ การทำงานเมื่อเกิดลัดวงจรเมนสายส่งย่อยหนึ่งเบรกเกอร์ทางต้นของสายส่งย่อยจะเปิดวงจรออกทำให้แรงดันไฟฟ้าของสายส่งย่อยตกไป เบรกเกอร์แรงสูงของปลายสายส่งย่อยก็เปิดออกรีเลย์ทราบการเปิดวงจรของเบรกเกอร์แรงสูงนี้ก็ไปควบคุมเบรกเกอร์ตัดตอนด้านแรงสูงปิดวงจรทำให้หม้อแปลงทั้งสองชุดรวมจ่ายไฟตามปกติได้ เมื่อแก้ไขการลัดวงจรเรียบร้อยแล้วจ่ายไฟทำให้เบรกเกอร์ตัดตอนด้านแรงสูงเปิดวงจรออกและเบรกเกอร์ ปลายสายส่งย่อยปิดวงจรและจ่ายไฟตามปกติ

2.1.4.5 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบแหล่งจ่ายไฟขนาน (Parallel Supply) มีการจ่ายไฟให้กับโหลดแบบต่อเนื่องได้โดยไม่มีการหยุดจ่ายไฟ เมื่อเกิดลัดวงจรในสายส่งย่อยหรือเบรกเกอร์ด้านแรงสูงถูกควบคุมด้วยรีเลย์กระแสเกินตามทิศทางและเปิดวงจรออกเมื่อเกิดลัดวงจรในระบบกระแสลัดวงจรไหลจากบัสแรงสูงของสถานีไฟฟ้าย่อยไปทางแหล่งจ่ายไฟ เมื่อเกิดลัดวงจรในสายส่งย่อยเบรกเกอร์แรงสูงที่ต้นทางและปลายทางของสายส่งย่อยเปิดวงจรออก และแยกจากจุดลัดวงจรออกจากระบบสถานีไฟฟ้าย่อยและยังจ่ายโหลดต่อไปได้โดยอาศัยไฟจากอีกสายส่งย่อยที่ไม่เกิดการลัดวงจร

2.1.4.6 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบสปอต-เน็ตเวิร์ก (Spot-Network) มีความมั่นคงและความเชื่อถือได้สูงในการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องโดยใช้สวิตช์ซึ่งน้อยที่สุดหม้อแปลงแต่ละตัวทำงานร่วมกับสายส่งย่อยแต่ละวงจร และสวิตช์ตัดตอนเฉพาะทางด้านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้นเบรกเกอร์ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงถูกควบคุมโดยรีเลย์กระแสเกินตามทิศทาง รีเลย์นี้ทำงานเพื่อเปิดวงจรของเบรกเกอร์หม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายส่งย่อย เบรกเกอร์ทางต้นทางของสายส่งย่อยและเบรกเกอร์ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเปิดวงจรออกทำให้เหลือหม้อแปลงชุดเดียวกับโหลดทั้งหมด

2.1.4.7 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบการจัดบัสช์ซ้อน เป็นการจัดที่ให้ความคล่องตัวในการจ่ายไฟสูงมาก ใช้บัสประธานและสำรองทางด้านแรงต่ำสายป้อนแต่ละสายอาจรับไฟจากบัสใดก็ได้บัสหนึ่งสามารถใช้สำหรับรับและจ่ายไฟตามปกติส่วนอีกบัสหนึ่งเป็นบัสสำรองหรือฉุกเฉิน ในกรณีเกิดการลัดวงจรที่บัสประธานแรงต่ำเบรกเกอร์แรงต่ำทั้งสองของหม้อแปลงที่ต่อกับบัสประธานเปิดออกโดยอัตโนมัติ ดังนั้นเปิดวงจรเบรกเกอร์ของสายป้อนที่เดิมอยู่กับบัสประธานด้วยมือและปิดวงจรของเบรกเกอร์สองชุดของหม้อแปลงต่อเข้ากับบัสสำรอง และปิดวงจรของเบรกเกอร์สายป้อนสี่ชุดที่ต่อกับบัสสำรองทำให้โหลดรับไฟจากหม้อแปลงตามปกติ

2.1.4.8 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบเคลื่อนที่ได้ ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยตั้งอยู่บนรถลากเพื่อเคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ง่าย อุปกรณ์สวิตช์ หม้อแปลง และอุปกรณ์สวิตช์แรงต่ำถูกประกอบไว้อย่างสอดคล้องกันจากโรงงานผู้ผลิตทั้งหมด ในกรณีมีปัญหาซึ่งไม่สามารถจ่ายไฟได้เป็นระยะเวลานาน คือ ไม่สามารถซ่อมแซมแก้ไขอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อยที่ขัดข้องให้ทำงานได้ในเวลาสั้นก็จะต้องเอาสถานีไฟฟ้าย่อยแบบเคลื่อนที่ได้นี้เข้าไปทำหน้าที่แทนสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีปัญหา

2.1.5 ระบบสายป้อนปฐมภูมิ

ระบบสายป้อนปฐมภูมิ หมายถึง ส่วนของระบบกำลังไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่ายและหม้อแปลงจำหน่าย ระบบสายป้อนปฐมภูมิประกอบด้วยวงจรที่เรียกว่า สายป้อน (Feeder) เริ่มจากบัสแรงต่ำของสถานีไฟฟ้าย่อยไปยังบริเวณที่โหลดหนาแน่นและจ่ายไฟให้หม้อแปลงจำหน่าย ถ้าเป็นระบบจำหน่ายในประเทศไทยคือระดับแรงดัน 22, 33 kV สำหรับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ 12, 24 kV สำหรับระบบการไฟฟ้านครหลวง

สายป้อนปฐมภูมิประกอบด้วยสายประธานและสายกิ่ง หรือสายแทปด้านขวาออกจากสายประธาน สายป้อนประธานโดยมากเป็นสามเฟสสามสายหรือสี่สายในขณะที่กิ่งเป็นสามเฟสหรือเฟสเดียวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในสายกิ่ง ระบบสายป้อนปฐมภูมิสามารถแยกการจัดวงจรออกเป็นชนิดสำคัญดังนี้

2.1.5.1 การจัดวงจรแบบเรเดียลตรง เป็นการจัดแบบง่ายที่สุดและลงทุนน้อยที่สุดมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแหล่งเดียวกระแสที่ต้นทางของสายป้อนที่ออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยมีขนาดสูงที่สุด ส่วนขนาดกระแสตามสายป้อนประธานลดลงตามทางเมื่อมีการจ่ายไฟแยกให้สายกิ่งหรือสายป้อนย่อย ขนาดของสายป้อนประธานนี้สามารถลดขนาดลงได้เป็นช่วงๆ การจัดวงจรแบบนี้มีความเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟฟ้าต่ำ เพราะเมื่อเกิดลัดวงจรในสายป้อนประธานจะทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้ผู้บริโภคทั้งหมดนอกจากจุดลัดวงจรจะกำจัดออกจากระบบด้วยฟิวส์หรือสวิตช์ตัดตอนแยกจุดลัดวงจรออกเท่านั้นที่มีไฟใช้ เนื่องจากการจัดวงจรของระบบป้อนปฐมภูมิแบบเรเดียลธรรมดา มีข้อเสียหลายประการจึงได้มีการพัฒนาการจัดวงจรเรเดียลแบบอื่นๆ ดังนี้ วงจรแบบเรเดียลเชื่อมโยงวงจรแบบเรเดียลศูนย์กลางโหลด และวงจรแบบเรเดียลแยกเฟส

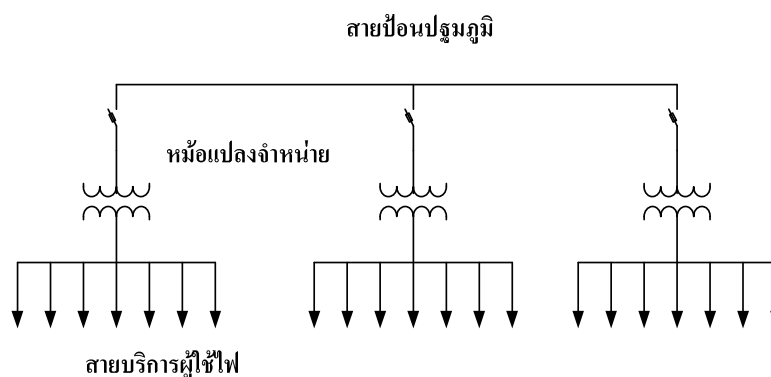
2.1.5.2 การจัดวงจรแบบลูปรเดียล สายป้อนจะเริ่มจากสถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่ายวนรอบผ่านบริเวณโหลดหนาแน่น และวนกลับไปหาสถานีไฟฟ้าย่อยโดยใช้สายกิ่งหรือสายป้อนย่อยแยกออกจากลูปรประธานเพื่อจ่ายให้โหลดในพื้นที่นั้นๆ เบรกเกอร์จะใช้สองชุดก็ได้ วงจรลูปรอาจจ่ายไฟโดยที่สวิตช์ตัดตอนหรือเบรกเกอร์ตัดตอนในเวลาปกติเปิดวงจรหรือปิดวงจรอยู่ก็ได้ ความแตกต่างระหว่างระบบที่มีสวิตช์ตัดตอนหรือเบรกเกอร์ตัดตอนปิดวงจรอยู่กับแบบที่เปิดวงจรก็คือความมั่นคงและความเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟต่างกัน ระบบที่มีสวิตช์ตัดตอนหรือเบรกเกอร์ตัดตอนปิดวงจรเวลาปกตินั้นจะให้แรงดันไฟฟ้าแรงกว่าและสูญเสียต่ำ

2.1.5.3 การจัดวงจรแบบเน็ตเวิร์ก คือใช้สายป้อนปฐมภูมิเป็นสายเชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่ายแม้จะมีการใช้งานแต่ไม่ค่อยนิยมกับระบบนี้เท่าไร เหตุผลประการแรกคือ ระบบเน็ตเวิร์กไม่ได้ให้ความเชื่อถือได้ในการจ่ายโหลดสูงกว่าแบบเรเดียลหรือลูปรที่เงินลงทุนเท่ากัน และประการที่สองคือ การออกแบบและการทำงานของระบบเน็ตเวิร์กยุ่งยากกว่าแบบเรเดียลหรือลูปรอย่างไรก็ตามวงจรเน็ตเวิร์กที่ใช้ตามชานเมืองประหยัดกว่าแบบเรเดียลเมื่อคิดจำนวนการติดตั้ง ระบบเน็ตเวิร์กนี้ใช้สายส่งย่อยสองวงจร หรือมากกว่าเพื่อจ่ายไฟให้ผู้บริโภคได้อย่างเชื่อถือได้เพราะว่าหากสายส่งย่อยใดไม่สามารถจ่ายไฟมาได้ ผู้บริโภคก็ยังสามารถรับไฟจากสายส่งย่อยอื่น จำนวนของวงจรสายส่งย่อยเพื่อจ่ายโหลดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งย่อย และจำนวนขนาดอัตราของหม้อแปลงที่ใช้ในเน็ตเวิร์ก

2.1.6 ระบบสายป้อนทุติยภูมิ

ระบบสายป้อนทุติยภูมิ หมายถึง ส่วนของระบบไฟฟ้ากำลังระหว่างหม้อแปลงจำหน่ายและผู้บริโภค ระบบทุติยภูมินี้ประกอบด้วย หม้อแปลงจำหน่าย วงจรทุติยภูมิ สายบริการผู้ใช้ไฟ มิเตอร์เพื่อวัดพลังงานที่ผู้ใช้ไฟใช้ ระบบสายป้อนทุติยภูมิ ได้แก่ระดับแรงดัน 380/220 V หรือที่เรียกว่าระบบแรงดันต่ำ ถ้าหากระบบทุติยภูมิจ่ายไฟให้กับพื้นที่อุตสาหกรรม หรือบริเวณที่ผู้ใช้ไฟหนาแน่นวงจรทุติยภูมิก็ไม่ต้องมี

ระบบสายป้อนทุติยภูมิสำหรับผู้อยู่อาศัยและบริเวณอาคารพาณิชย์ขนาดเล็กแสดงในรูปที่ 2.4 หม้อแปลงจำหน่ายจะแปลงแรงดันไฟฟ้าของสายป้อนปฐมภูมิให้ต่ำลงและวงจรทุติยภูมิออกจากหม้อแปลงจำหน่ายและจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟในกรณีต่างๆ ระบบนี้ส่วนมากเป็นเฟสเดียวยกเว้นบริเวณอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์ ระบบทุติยภูมิสามเฟสใช้กับบริเวณอยู่อาศัยและบริเวณที่ผู้ใช้ไฟหนาแน่นก็ต่อเมื่อมีโหลดประเภทอุตสาหกรรมหรืออาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่รวมอยู่อาศัยในพื้นที่นั้น



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมเส้นเดียวของระบบทุดิยภูมิเพื่อจ่ายให้ผู้อาศัย และอาคารพาณิชย์ขนาดเล็ก

การจัดวางจรของระบบทุดิยภูมิแบ่งออกได้เป็น เรเดียลตรง ทุดิยภูมิรวม และระบบเน็ตเวิร์กทุดิยภูมิ ระบบเรเดียลตรงส่วนมากใช้กับผู้อยู่อาศัยอาคารพาณิชย์ขนาดเล็ก บริเวณที่ผู้อยู่อาศัยหนาแน่นและบริเวณอุตสาหกรรมเพราะการทำงานของระบบจ่ายไฟเป็นแบบง่ายๆ และค่าใช้จ่ายต่ำ ระบบทุดิยภูมิรวมใช้กับผู้อยู่อาศัยและอาคารพาณิชย์ขนาดเล็กซึ่งผู้ใช้ไฟอยู่ติดๆ กัน

2.2 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation : DG) คือ การผลิตไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังผลิต ตั้งแต่หน่วย kW – MW ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับประเทศไทยได้นิยามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 10 MW ที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายของการไฟฟ้า คือ ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Production: VSPP) หมายถึง ผู้ผลิตไฟฟ้าทั้งภาคเอกชน รัฐบาล รัฐวิสาหกิจ และประชาชนทั่วไปที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของตนเองมีลักษณะกระบวนการผลิตไฟฟ้าตามข้อ ข ที่จำหน่ายไฟฟ้าให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย โดยมีปริมาณพลังไฟฟ้าขายเข้าระบบไม่เกิน 10 MW โดยที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย หมายถึง การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) [13] ปัจจัยการผลักดันแนวโน้มให้เกิดแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การลดค่าใช้จ่ายโดยรวมให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ความจำเป็นที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิต ความจำเป็นในการปรับปรุงความเชื่อถือได้ ความจำเป็นในการรักษาความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น การตอบสนองต่อความต้องการสูงสุด กฎระเบียบอุตสาหกรรมและการปรับโครงสร้าง และ กฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวกับโรงไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว กำหนดจากการใช้พลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวมี 3 ประเภทดังนี้

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) เช่น พลังลม พลังแสงอาทิตย์ พลังน้ำขนาดเล็ก (Mini Hydroelectricity) พลังน้ำขนาดเล็กมาก (Micro Hydroelectricity) พลังคลื่นทะเล หรือมหาสมุทร พลังความร้อนใต้พิภพ และก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

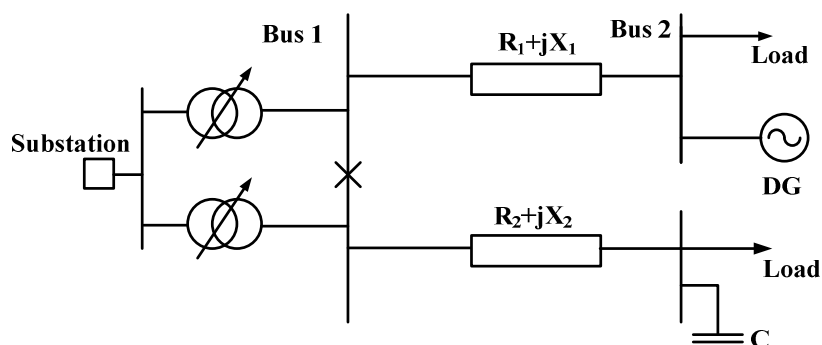
การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิง เช่น ถ่านหินหรือเศษวัสดุเหลือใช้ในการเกษตร หรือกากจากการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ขยะมูลฝอยและไม้จากการปลูกป่าเป็นเชื้อเพลิง

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานที่ได้มาจากระบวนการผลิต การใช้หรือการขนส่งเชื้อเพลิง ได้แก่ พลังงานที่เหลือทิ้ง เช่น ไอน้ำที่เหลือจากกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมหรือการเกษตร พลังงานสูญเสีย เช่น ความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์ พลังงานที่เป็นผลพลอยได้ เช่น พลังงานกลได้จากการปรับลดความดันของก๊าซธรรมชาติ

ประโยชน์ที่ได้รับจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ลดความสูญเสียในสายไฟฟ้า เนื่องจากไม่ต้องส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไประยะทางไกลๆ เพราะแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีขนาดเล็กสามารถติดตั้งใกล้แหล่งที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าหนาแน่นได้ แรงดันไฟฟ้าดีขึ้นเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกในสายไฟฟ้าลดลงแล้วระบบการผลิตอยู่ใกล้กับภาระทางไฟฟ้า (Load) ลดมลภาวะ เนื่องจากการผลิตส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ปล่อยมลภาวะน้อย หรือไม่มีส่วนทำลายสิ่งแวดล้อม และปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

2.2.1 การขนานแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การขนานแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ต้องมีการพิจารณาระดับแรงดันไฟฟ้า ความถี่ อุปกรณ์ป้องกัน ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และฮาร์มอนิก (Harmonics) ให้อยู่ในมาตรฐานและระเบียบที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นกำหนด โดยประเทศไทยมีระเบียบว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย สำหรับปริมาณพลังไฟฟ้าไม่เกิน 10 MW[14] ระเบียบการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ในกรณีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เนื่องจากมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจำนวนมาก



รูปที่ 2.5 การขนานแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ข้อกำหนดในการขนานแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ปริมาณพลังไฟฟ้าในกรณีการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดปริมาณไฟฟ้า ดังนี้ ระบบ 22 kV ไม่เกิน 8.0 MW และระบบ 33 kV ไม่เกิน 10.0 MW และระดับแรงดันไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับปริมาณพลังไฟฟ้าปริมาณไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบ 66 kVA ขึ้นไปจะเชื่อมโยงกับระบบ ณ ระดับแรงดัน 22.33 kV และปริมาณพลังไฟฟ้าจ่ายเข้าระบบไม่เกิน 66 kVA จะเชื่อมโยงระบบ ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พิจารณาโดยสามารถขยายปริมาณ พลังงานไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากทำการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าได้ตามความเหมาะสมของระบบในแต่ละพื้นที่ ทั้งนี้ปริมาณไฟฟ้าจริงที่จะรับเข้าระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายจะพิจารณาถึงความปลอดภัย มาตรฐานทางด้านบริการ และผลประโยชน์ต่อส่วนรวมเป็นหลัก

2.2.2 หลักเกณฑ์ในการขนานแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2.2.2.1 ระดับแรงดันไฟฟ้า การขนานแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับระบบไฟฟ้าต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในมาตรฐานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด ดังแสดงในตารางที่ 2.4

2.2.2.2 ความถี่ ผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องรักษาความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที หากไม่สามารถรักษาระดับความถี่นี้ได้จะต้องมีอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติทำหน้าที่ตัดการจ่ายไฟฟ้าของผู้ให้สัญญาออกจากระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายภายใน 0.1 วินาที

2.2.2.3 ฮาร์โมนิก ผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้าในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายผิดเพี้ยนมากเกินไป ปริมาณความผิดเพี้ยนดังกล่าววัดที่จุดต่อร่วม จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้า (PRC-PQG-01/1998) ประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมของ 3 การไฟฟ้า

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานระดับแรงดันสูงและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	Normal Circumstances		Exceptional Circumstances	
	Min.	Max.	Min.	Max.
115 kV	109.2	120.7	103.5	126.5
69 kV	65.5	72.4	62.1	75.9
33 kV	31.3	34.7	29.7	36.3
22 kV	20.9	23.1	19.8	24.2
220 V	200	240	200	240
330 V	342	418	342	418

2.2.3 ผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นแบบเรเดียล (Radial) กรณีที่ไม่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว การไหลของกระแสไฟฟ้าจะไหลจากสถานีต้นทางไปยังโหลดในทิศทางเดียว เมื่อเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้ามีสองทิศทาง ซึ่งจะทำให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงในหลายด้าน เช่น การไหลของค่ากำลังไฟฟ้า และการจัดลำดับเวลาการทำงานของรีเลย์ป้องกันต่างๆ ดังนั้นแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอาจจะจ่ายกระแสย้อนกลับไปยังสถานีต้นทางได้และก่อให้เกิดผลกระทบต่างๆ กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าดังนี้ [15]

2.2.3.1 ผลกระทบต่อความสูญเสียทางไฟฟ้า แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงทำให้ลดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากสถานีไฟฟ้าย่อย และลดขนาดกระแสในสายป้อนกำลังสูญเสียในสายส่งจึงลดลง เมื่อเชื่อมต่อกับระบบในตำแหน่งใกล้กับโหลด ทำให้ความสูญเสียรวมในระบบลดลง แต่ถ้าแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอยู่ไกลสถานีไฟฟ้าย่อย ความสูญเสียในระบบจำหน่ายสูงขึ้น แต่ความสูญเสียในระบบส่งจ่ายลดลง [16] และเมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าระบบเกินความต้องการ และปริมาณพลังงานที่เหลือจ่ายย้อนกลับเข้าไปในระบบ แล้วไปยังโหลดในระยะทางไกลกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งเพิ่มขึ้น แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถลดความสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายเมื่อขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสม

2.2.3.2 ผลกระทบต่อระดับแรงดัน แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นแหล่งกำเนิดกำลังไฟฟ้าจริง ที่มีตัวประกอบกำลัง (power factor) คงที่ เมื่อจ่ายเข้าสู่ระบบ จะทำให้แรงดันสูงขึ้น ถ้าเป็น induction generator จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบแต่ดึงกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟออกจากระบบ ส่วนแบบ synchronous generator สามารถใช้เป็น voltage regulator ได้ เมื่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวหลุดออกจากระบบจะเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่และส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแรงดันไฟฟ้า ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล (ที่ไม่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว) จะมีระดับแรงดันที่ลดลงเรื่อยๆ จากสถานีไฟฟ้าย่อยต้นทาง การควบคุมระดับแรงดัน ใช้คาปาซิเตอร์ หรือการเปลี่ยนค่า tap ของหม้อแปลง

2.2.3.3 ผลกระทบต่อการตั้งค่าอุปกรณ์ป้องกัน ผลกระทบต่อพิกัดและความสัมพันธ์ในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันของระบบจำหน่ายไฟฟ้า กระแสฟอลต์จะมีค่าสูงกว่าปกติ เมื่อมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวต่อเข้ามาในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะทำให้กระแสฟอลต์มีค่าสูงขึ้น อาจทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกัน ทำให้การตั้งค่าของรีเลย์ยากขึ้น ปกติเมื่อมีการเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะปลดตัวเองออกจากระบบ แต่บ่อยครั้งที่ตรวจจับฟอลต์ในสายป้อนข้างเคียงแล้วปลดตัวเองออกโดยไม่จำเป็นและเกิดปัญหาจากการทำงานของ recloser การเชื่อมต่อนี้ที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกำลังจ่ายไฟอยู่ อาจทำให้เกิดปัญหา out-of-phase กับระบบไฟฟ้าหลัก ทำให้เกิดแรงดันเกินได้ถึง 3 เท่า รวมทั้งกระแส inrush สูงมากไหลเข้าหม้อแปลงหรือมอเตอร์และแรงบิดเปลี่ยนแปลงฉับพลันที่มอเตอร์ของผู้ใช้ไฟฟ้า

2.2.3.4 ผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน การมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในระบบทั้งขนาดกำลังไฟฟ้าในสายป้อน และทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน ในกรณีที่จ่ายแต่กำลังไฟฟ้าจริงอยู่ด้านท้ายของคาปาซิเตอร์ แรงดันปลายทางมีค่าสูงขึ้น การสับคาปาซิเตอร์เข้าในระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ อาจทำให้มีแรงดันที่ปลายทางสูงเกิน และเมื่อเชื่อมต่อในระบบจำหน่ายต้องปรับตั้งค่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันให้เหมาะสมกับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอาจทำให้เกิดระดับแรงดันสูงเกินไปโดยเฉพาะถ้าติดตั้งอยู่ด้านหุติยภูมิของหม้อแปลง

2.2.3.5 ผลกระทบที่มีต่อเสถียรภาพของระบบจากการเกิดสภาวะทำงานเองโดยอิสระ (Islanding) การเกิดสภาวะทำงานเองโดยอิสระ (Islanding) คือ อุปกรณ์ป้องกันของระบบจำหน่ายทำการตัดวงจรบางส่วนออกจากระบบไฟฟ้าหลัก แต่วงจรส่วนนั้นมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวต่ออยู่ ทำให้วงจรส่วนนั้นยังคงได้รับไฟอยู่ ซึ่งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวควรตรวจจับเหตุการณ์นี้ได้และปลดตัวเองออกจากวงจรระบบไฟฟ้า เพื่อคุณภาพและความสามารถในการผลิตและลดความเสียหายทางเศรษฐกิจจากกรณีไฟฟ้าดับและเพิ่มความเชื่อถือได้ เมื่อเกิดสภาวะทำงานเองโดยอิสระ (Islanding) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความผิดพลาดและสถานะการดำเนินงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้า หากเกิดสภาวะทำงานเองโดยอิสระ (Islanding) โดยไม่วางแผนอาจทำให้เกิดแรงดันเกินและเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ หากมีการวางแผนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ (Reliability) ของระบบไฟฟ้า

ผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบจากการเกิดสภาวะทำงานเองโดยอิสระ (Islanding) แรงดันและความถี่ของระบบที่เชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะเกิดเปลี่ยนแปลง การไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมได้ส่งผลเสียต่อผู้ใช้ไฟและไม่สามารถปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายอยู่ได้จึงไม่สามารถรองรับโหลดที่เหลืออยู่โดยไม่มีสถานีไฟฟ้าย่อยช่วยจ่ายโหลด การทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่เหลือของวงจรอาจไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ อาจเกิดอันตรายกับผู้ทำงานด้านบำรุงรักษา เนื่องจากระบบยังคงมีการจ่ายไฟจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวหลังจากตัดวงจรออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยแล้ว และเกิดปัญหาเมื่อมีการ reclose ของการเกิดสภาวะทำงานเองโดยอิสระ (Islanding) เข้ากับระบบหลัก

2.2.4 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวต่อเสถียรภาพของระบบ

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยปกติไม่ได้ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกได้อย่างรวดเร็วตามที่ระบบต้องการ และศูนย์ควบคุมไม่สามารถควบคุมความถี่และแรงดันของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จึงถือว่าไม่สามารถเสริมเสถียรภาพของระบบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ของการไฟฟ้าจะรับหน้าที่ในการรักษาเสถียรภาพของระบบทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะทรานเซียนต์ ถ้าระดับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว penetration มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโหลดในระบบ จะถูกคิดเป็นโหลดที่มีค่าเป็นลบ (negative load) แต่เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมากขึ้น (high penetration) จะส่งผลกระทบกับเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้าโดยรวมได้

2.2.4.1 ความเร็วโรเตอร์เบี่ยงเบนสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ในสายส่งที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวแบบ Induction generator ความเร็วโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณการจ่ายไฟและระยะห่างระหว่างแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบ และแบบ Synchronous generator จะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบมีความเร็วลดลง ส่วนแบบ Power electronic converter จะส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบมีความเร็วลดลง เนื่องจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวแบบนี้จะปลดตัวเองออกจากวงจรเมื่อเกิดฟอลต์มีผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในวงจรรับภาระโหลดเพิ่มขึ้น

2.2.4.2 ระยะเวลาการแกว่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อเกิดฟอลต์ในสายส่งของระบบที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบ ระยะเวลาในการแกว่งจะมากขึ้นกว่าไม่มี เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นในระบบแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวแบบ Power electronic converter ไม่สามารถควบคุมแรงดันและความถี่และมีระยะเวลาในการแกว่งสูงมากจากการปลดตัวเองออกขณะที่กำลังช่วยจ่ายโหลดปริมาณมาก แต่แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวแบบ Power electronic converter สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ได้ทำให้ระยะเวลาในการแกว่งน้อยกว่าระบบที่ไม่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2.2.4.3 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับความมั่นคงของระบบ ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (Power system security) คือ การที่ระบบไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้ เมื่อเกิดเหตุไม่คาดหมาย (Contingency) [14] ในระบบจะพิจารณาจากกำลังไฟฟ้าสำรอง (Spinning reserve) ในระบบรวมถึงค่า ramping up และ ramping down ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบ ขณะที่แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจำนวนมาก (High penetration) ในระบบเมื่อเกิดฟอลต์และการหลุดของสายส่งเพื่อจำกัดฟอลต์ ทำให้ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (รวมทั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว) เกิดการแกว่ง ถ้าแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีการแกว่งของความถี่ออกนอกค่าที่กำหนดไว้ จะตัดตัวเองออกจากระบบ ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของระบบรับภาระโหลดมากยิ่งขึ้นไปอีก ซึ่งอาจเสี่ยงต่อการที่กำลังสำรองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ไม่สามารถรองรับโหลดและการเปลี่ยนแปลงของความถี่ได้แก้ไขโดยการปลดโหลด (Load shedding) เพื่อรักษาเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในระบบ

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธีการค้นหาแบบตาบู่

วิธีการค้นหาแบบตาบู่ หรือ tabu search (TS) เป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ได้นำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นวิธีการคิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาแบบที่เรียกว่าปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงผสมผสาน (combinatorial optimization) วิธีการค้นหาแบบตาบู่เสนอครั้งแรกโดย Fred Glover [17] เป็นผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดของ TS ไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ.2520 และหลังจากนั้นได้กลายมาเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เป็นกรรมวิธีที่มีการทำซ้ำแบบฮิวริสติก วิธีการค้นหาแบบตาบู่สามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และยังสามารถทำการค้นหาคำตอบต่อไป

จนกระทั่งให้ คำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (near global optimum) ตัว TS เองยังสามารถประยุกต์ใช้งานกับหลายๆ ระบบได้อย่างไม่ยุ่งยากมากนักเนื่องจากหลักการและกลไกการทำงานของ TS ที่ไม่ซับซ้อนนั่นเองซึ่งทำให้ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งานของ TS ค่อนข้างที่จะสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ยกตัวอย่าง เช่น วิธีการอบอ่อนจำลอง (simulated annealing) จีโนมิติกอัลกอริทึม (genetic algorithm) เครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) ฯลฯ ดังนั้นแล้วการเขียนโปรแกรมใช้งาน TS จึงอาจใช้เพียง 2.3 บรรทัดเท่านั้น ข้อดีหลายๆ อย่างของ TS ทำให้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย และกลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในงานหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ทางธุรกิจหรือทางวิศวกรรม

คำว่า Tabu หรือ Taboo มีความหมายตามพจนานุกรมทั่วไปว่า ‘ต้องห้าม’ ดังนั้นวิธีการค้นหาแบบตาบู จึงหมายถึง วิธีการค้นหาที่มีข้อห้าม หรือการห้ามการค้นหาคำตอบในบางขอบเขต ในวิธีการห้ามดังกล่าวนั้นจะเป็นการห้ามเพื่อที่จะช่วยไม่ต้องไปค้นหาคำตอบเดิม หรือเกิดการวนรอบ การค้นหาคำตอบซึ่งอยู่ในขอบเขตของการค้นหาเดิม ทำให้ไม่สามารถหาคำตอบที่ดีขึ้นได้ [18] TS ใช้หลักแนวคิดที่ทำให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ เส้นทางต่างๆ ที่อยู่รอบๆ คำตอบในขณะนั้นสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการตัดสินใจว่าจะเลือกคำตอบใหม่ในเส้นทางใด ซึ่งแตกต่างไปจากการเลือกค้นหาคำตอบด้วยวิธีสุ่ม (random search) ดังนั้นการเลือกเส้นทางค้นหาคำตอบ ซึ่งในบางครั้งไม่ได้ให้คำตอบที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันอาจจะเป็นกลยุทธ์ที่สามารถนำไปสู่การค้นหาคำตอบที่ดีกว่าต่อไปได้ (จุดประสงค์หลักในที่นี่ก็คือการหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นนั่นเอง) พิจารณางค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบทั่วไป กำหนดให้พื้นผิวในรูปเป็นผลที่ได้จากการประเมิน (objective value) ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) จุดหมายในที่นี้คือการหาค่าสูงสุดจากพื้นผิวของฟังก์ชันดังกล่าว (maximization) การคำนวณหาคำตอบใหม่จากจุดของคำตอบปัจจุบันใดๆ จะใช้ปฏิบัติการที่เรียกว่าการ ‘move’ (move operator) หรือ ‘การเดิน’ ซึ่งจะทำให้คำตอบหรือสถานะปัจจุบันของคำตอบเปลี่ยนแปลงไปตามการเดิน สำหรับการค้นหาคำตอบต่างๆ ไปที่เรียกว่าการค้นหาคำตอบเฉพาะที่ (local search หรือ LS) หรือการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง (neighborhood search หรือ NS) นั้น จะทำการเลือกคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันจากคำตอบที่มีอยู่รอบๆ โดยอาศัยการเดินเพื่อทำการประเมินค่าของคำตอบรอบๆ ข้างเหล่านั้น แล้วเลือกคำตอบที่ดีที่สุดขึ้นมาเป็นคำตอบใหม่ต่อไป

ข้อด้อยของวิธีการค้นหาคำตอบแบบนี้ก็คือ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ เมื่อคำตอบที่ได้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดในคำตอบรอบข้างแล้ว จะไม่มีการเดินใดๆ ที่ทำให้ได้คำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันนี้อีกแล้ว อย่างไรก็ตามโครงสร้างการค้นหาคำตอบแบบนี้ก็ยังถูกใช้ในวิธีการค้นหาคำตอบแบบอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ยกตัวอย่างเช่นการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมลงชันสุด (steepest descent) ที่ออกแบบให้ทิศทางการค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุดในทอมนของเกรเดียน (gradient) ถึงแม้วิธีดังกล่าวจะไม่สามารถแก้ปัญหาของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ก็ตาม สำหรับ TS แล้ว คุณสมบัติในการหลีกเลี่ยงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นเป็นจุดเด่นที่ทำให้ TS กลายเป็นเครื่องมือในการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพสูง

2.3.1 องค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบแบบตาบ

TS เพิ่มเต็มขั้นตอนและเงื่อนไขในการเดินที่นอกเหนือไปจากการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง โดยมีจุดประสงค์หลักคือ

2.3.1.1 หลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum avoidance) คำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่มคำตอบพื้นที่รอบข้างจะมีค่าการประเมินที่สูงที่สุด ถ้าคำตอบใหม่มีค่าการประเมินที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบจะทำการเดินไปยังทิศทางนั้น และเมื่อใดที่ค่าการประเมินของคำตอบพื้นที่รอบข้างไม่ได้ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน การค้นหาคำตอบที่ดีกว่าจะสิ้นสุดลง ซึ่งในกรณีนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นในการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง คำตอบที่ได้ในขณะนี้จะเป็คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นในทางตรงข้าม TS ยอมให้มีการเดินไปยังคำตอบใหม่ มีค่าการประเมินที่ไม่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน จุดประสงค์สำคัญก็เพื่อให้สามารถหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้นั่นเอง

2.3.1.2 หลีกเลียงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ (cycle-avoidance) เส้นทางบางเส้นทางสามารถนำไปสู่การวนรอบอยู่กับที่ ทำให้ไม่สามารถหลุดออกไปจากสถานะปัจจุบันได้ (ดังนั้นไม่สามารถเปลี่ยนเส้นทางที่นำไปสู่คำตอบที่ดีกว่าได้) ตัวอย่างของเส้นทางดังกล่าวได้แก่การเดินย้อนกลับ (inverse move) ซึ่งในบางโอกาสอาจจะทำให้การค้นหาคำตอบเกิดการเดินไปกลับโดยไม่มีที่สิ้นสุดได้ดังนั้นใน TS จึงมีการตั้งค่าสถานะของการเดินที่เพิ่งถูกใช้ให้เป็นสถานะต้องห้าม (tabu) เพื่อไม่ให้ใช้ การเดินนี้อีกภายในระยะเวลาที่กำหนด (นั่นหมายความว่าถ้าเวลาผ่านไปภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้แล้ว สถานะของการเดินนั้นจะถูกยกเลิกการเป็นสถานะต้องห้าม)

ด้วยความสามารถใหม่ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า TS ได้มีการใช้ข้อมูลของการค้นหาคำตอบในอดีตมาช่วยตัดสินใจการเดินว่าควรจะไปในทิศทางใด องค์ประกอบใหม่ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในโครงสร้างของ TS ที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นนี้ได้แก่

2.3.1.3 เงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด (recency condition) การใช้เงื่อนไขของความคงอยู่นี้เป็นการติดตามการค้นหาคำตอบในช่วงเวลาที่ผ่านมา เมื่อคำตอบหนึ่งถูกค้นพบแล้ว การเดินที่นำไปสู่คำตอบนั้นจะถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม คำตอบที่ถูกค้นพบด้วยการเดินนี้จะถือเป็นคำตอบล่าสุดและจะไม่ถูกค้นอีกภายในระยะเวลาหนึ่ง (เนื่องจากการเดินที่นำไปสู่คำตอบนี้ถูกห้ามใช้อีกในขณะที่ยังมีสถานะต้องห้ามอยู่) หลังจากระยะเวลาที่กำหนดผ่านไป สถานะการเดินนั้นก็จะถูกตั้งค่ากลับสู่สภาวะปกติ ดังนั้นแล้วภายหลังกการเดินไปยังคำตอบหนึ่งๆ TS จะบังคับให้การค้นหาคำตอบทำการเดินไปยังคำตอบใหม่ โดยที่คำตอบเดิมจะไม่ถูกค้นอีก กลไกนี้ทำให้ TS สามารถหลุดออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น และทำการค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นไปเรื่อยๆ ได้(ถึงแม้ว่าในบางครั้ง คำตอบใหม่จะไม่ดีกว่าคำตอบที่มีอยู่ก็ตาม)

2.3.1.4 เงื่อนไขของความซ้ำซาก (frequency condition) ในลักษณะเดียวกันเราสามารถบันทึกจำนวนครั้งที่การเดินหนึ่งๆ ถูกเรียกใช้ได้ TS ถือว่าถ้ารูปแบบการเดินใดถูกเรียกใช้เป็นจำนวนมากครั้งเกินไป (เกินจำนวนที่ตั้งเอาไว้) การเดินนั้นควรจะถูกต้องห้ามหรือถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ ทำให้สามารถหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้

เงื่อนไขทั้งสองจะถูกใช้ร่วมกันเสมอ เนื่องจากเงื่อนไขเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งไม่เพียงพอ เราสามารถกล่าวได้ว่าเงื่อนไขทั้งสองเป็นส่วนเติมเต็ม หรือ complimentary ซึ่งกันและกัน กล่าวคือการเดินใดถูกตั้งค่าให้มีสถานะ ต้องห้ามด้วยเงื่อนไขของความซ้ำซาก และได้คงสถานะต้องห้ามนานเกินระยะเวลาที่กำหนดไว้ การเดินนั้นจะสามารถถูกตั้งค่ากลับสู่สถานะปกติได้ด้วยเงื่อนไขของความคงอยู่ล่าสุด TS ยังมีอีก 2 องค์ประกอบอื่นๆ อันเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้การค้นหาคำตอบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้แก่ กลไกการเน้น (intensification) และกลไกการแปรเปลี่ยน (diversification) กลยุทธ์ทั้งสองอย่างมีผลต่อการเลือกเส้นทางในการค้นหาคำตอบ

กลไกการเน้น คือการค้นหาคำตอบที่เน้นไปยังกลุ่มคำตอบที่ได้ค้นพบแล้วว่าเป็นคำตอบที่ดี โดยใช้ข้อมูลที่ได้บันทึกจากการค้นหาคำตอบที่ผ่านมาในอดีต กลยุทธ์นี้ทำ TS กลับไปค้นหาคำตอบในย่านที่เคยเจอคำตอบที่ดีและทำการค้นหาในย่านนั้นอย่างละเอียดขึ้น ส่วนประกอบของคำตอบที่น่าจะเป็นประโยชน์ หรือ เส้นทางที่นำไปสู่คำตอบนั้น จะถูกใช้เป็นข้อมูลโดยกลไกการเน้นในการค้นหาคำตอบใหม่ได้

กลไกการแปรเปลี่ยน ในทางตรงกันข้ามเป็นกลยุทธ์ที่ส่งเสริมให้ TS ไปทำการสำรวจย่านที่ยังไม่เคยถูกสำรวจมาก่อน ซึ่งอาจจะทำให้ได้คำตอบที่มีความแตกต่างไปจากกลุ่มคำตอบที่ได้ถูกสำรวจมาก่อนที่จะทำกลยุทธ์นี้ ในบางครั้งการเลือกเส้นทางอื่นที่ยังไม่เคยสำรวจและแตกต่างไปจากแนวทางของเส้นทางเดิมอาจจะทำให้มีโอกาสเจอคำตอบที่ดีกว่าได้เช่นกัน

เกณฑ์ความทะเยอทะยาน นอกไปจากองค์ประกอบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น TS ยังมีองค์ประกอบอื่นที่เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบการค้นหาแบบตาคู้นั้นก็คือ เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (aspiration criteria) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สามารถทำให้เกิดการเดินไปในทิศทางที่ต้องการ ถึงแม้ว่าการเดินนั้นจะมีสถานะต้องห้าม โดยที่การเดินดังกล่าวจะถูกอนุญาตก็ต่อเมื่อคำตอบที่ได้ดีกว่าทุกคำตอบที่เคยค้นพบมา (TS จะต้องทำการเก็บบันทึกผลการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเอาไว้เพื่อใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข

วิธีการค้นหาแบบตาคู้นประกอบด้วยรูปแบบการค้นหาคำตอบ 2 รูปแบบที่สำคัญ คือการค้นหาคำตอบโดยวิธีการใช้หน่วยความจำระยะสั้น หมายถึง การค้นหาที่จดจำอดีตหรือประสบการณ์การค้นหาที่ผ่านมาเพียงระยะสั้นและการค้นหาคำตอบโดยวิธีการใช้หน่วยความจำระยะยาว หมายถึง การค้นหาที่จดจำอดีตหรือประสบการณ์การค้นหาที่ผ่านมาเพื่อช่วยให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.3.2 รายละเอียดโครงสร้างของ TS

สิ่งสำคัญที่ทำให้ TS แตกต่างไปจากการค้นหาคำตอบวิธีอื่นๆ คือรายการต้องห้าม (tabu list) ซึ่งใช้เป็นตัวข้อมูล สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ในการค้นหาคำตอบไม่ว่าจะเป็นสถานะต้องห้ามของแต่ละ การเดินหรือคุณสมบัติ อื่นๆของ TS เช่น เงื่อนไขความซ้ำซากหรือเงื่อนไขความคงอยู่ล่าสุด ดังนั้นการ ออกแบบรายการต้องห้ามจึงมีความ สำคัญอย่างยิ่ง เพราะคุณสมบัติของรายการต้องห้ามเช่น ขนาด หรือ ช่วงเวลาในการคงความเป็นสถานะต้องห้าม ฯลฯ จะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของ TS กำหนดให้เซตของการเดิน M ประกอบไปด้วย เซตของการเดินที่ต้องห้าม T (เป็นตาบู) และเซตของการ เดินที่อนุญาต A (ไม่เป็นตาบู)

2.3.2.1 การกำหนดสถานะของการเดินย้อนกลับ (Inverse Move) การกำหนดสถานะของ การเดินย้อนกลับให้เป็นสถานะต้องห้ามมีความจำเป็นที่สามารถทำให้ TS สามารถหลุดพ้น จากคำตอบ เหมาะที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ในบางโอกาสการกำหนดสถานะของการเดินนี้ทำให้ TS มีความสามารถในการแก้ปัญหาของการวนรอบอยู่กับที่ของคำตอบได้อีกด้วย การเดินและการเดินย้อนกลับ นี้ทำให้การค้นหาคำตอบ เกิดการวนรอบติดอยู่ที่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ-เฉพาะถิ่น การวนรอบนี้ สามารถถูกแก้ไขได้ถ้าการเดินย้อนกลับถูกกำหนดให้มีสถานะต้องห้ามภายในระยะเวลาหนึ่ง (ซึ่งควรจะ เพียงพอที่จะทำให้การค้นหาคำตอบนั้นอยู่ห่างไปจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ไม่เช่นนั้น แล้วโอกาสที่การเดินจะนำไปสู่คำตอบเดิมก็ยังคงมีอยู่) เมื่อเวลาผ่านไปตามที่กำหนดก็จะทำการยกเลิก สถานะต้องห้ามของการเดินนั้น ช่วงเวลาสถานะต้องห้ามนั้นต้องไม่นานเกินไปจนทำให้การเดินทั้งหมดที่มี อยู่กลายเป็นสถานะต้องห้าม ซึ่งทำให้ขอบเขตการค้นหาคำตอบหยุดชะงักไป

2.3.2.2 การกำหนดสถานะของการเดินที่มีความซ้ำซาก ในบางกรณีที่การค้นหาคำตอบเกิด การวนรอบอยู่กับที่ซึ่งโดยลำพังของการกำหนดสถานะต้องห้ามของการเดินย้อนกลับนั้น ไม่เพียงพอที่จะ ทำให้หลุดพ้นออกจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นได้การนำเงื่อนไขของความซ้ำซากเข้ามาใช้ ในการกำหนดสถานะต้องห้ามของการเดิน จึงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบได้ในการ ใช้เงื่อนไขของความซ้ำซากเข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบ จะพิจารณาว่าชุดการเดินใดที่ถูกใช้บ่อย จนเกินไปสถานะนั้นๆ จะถูกกำหนดสถานะให้เป็นต้องห้ามภายในระยะเวลาหนึ่ง จำนวนครั้งในการ เรียกใช้ชุดการเดินก่อนที่จะถูกห้ามจะขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหา

2.3.2.3 รายการต้องห้าม (tabu list) มีหน้าที่บันทึกข้อมูลการเดินในแต่ละรอบของการ ค้นหาคำตอบขนาดของรายการต้องห้ามนั้นโดยปกติแล้วจะขึ้นอยู่กับหลายๆองค์ประกอบ สำหรับตัวอย่าง นี้มีการเดินที่แตกต่างกัน อยู่ 8 แบบ (ไม่รวมการเดินอยู่กับที่) ดังนั้นขนาดของรายการต้องห้ามควรจะมี ขนาดไม่เกิน 6 (หรือ $L - 2$ เมื่อจำนวนรูปแบบในการเดินทั้งหมดคือ L) สาเหตุที่จำเป็นจะต้องออกแบบ ให้รายการต้องห้ามมีขนาดเล็ก กว่าจำนวนรูปแบบในการเดินทั้งหมดที่ใช้ได้เนื่องจากจะทำให้การค้นหา คำตอบไม่หยุดชะงักเมื่อเกิดกรณีที่ทุกการเดินมีสถานะต้องห้าม (อย่างน้อยยังมีเหลืออีกการเดินอีก 2 ทิศทางที่ยังไม่ถูกห้ามเดิน)

2.3.2.4 การเดินย้อนกลับ (inverse move) เราสามารถนิยามการเดินย้อนกลับคือ เราสามารถกล่าวเป็นคำพูดทั่วไปสำหรับการเดินย้อนกลับและการกำหนดค่าให้เป็นสถานะต้องห้ามได้คือ เมื่อเกิดการเดินขึ้นในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแล้วไม่ควรจะต้องเดินย้อนกลับไปในทิศทางเดิมอีก เพราะดูเหมือนว่าคำตอบของทางเดินที่ผ่านมาจะไม่ใช่ว่าคำตอบที่ต้องการ ดังนั้นทุกครั้งที่มีการเดินใดๆเกิดขึ้น การเดินย้อนกลับนั้นจะถูกตั้งค่าสถานะเป็นต้องห้ามในการเดินครั้งถัดไป

2.3.2.5 ระยะเวลาความคงอยู่ของสถานะต้องห้าม (recency) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อทิศทางการหาคำตอบของระบบ เมื่อการเดินใดๆ ถูกกำหนดใหม่สถานะต้องห้ามแล้วภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ค่าหนึ่ง สถานะต้องห้ามของการเดินนั้นจะถูกยกเลิกไป ระยะเวลาความคงอยู่ของสถานะต้องห้ามนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของรายการต้องห้าม ดังนั้นระยะเวลาความคงอยู่ของสถานะต้องห้ามนี้ควรจะนานเพียงพอที่จะทำให้การค้นหาคำตอบหลุดพ้นจากการวนรอบอยู่กับที่ได้ สำหรับตัวอย่างนี้การใช้เงื่อนไขความคงอยู่ของสถานะต้องห้ามจะถูกใช้คู่กับเงื่อนไขความซ้ำซาก ซึ่งโดยปกติแล้วเงื่อนไขทั้งสองจะถูกใช้ร่วมกันเสมอเพราะเงื่อนไขอย่างใดอย่างหนึ่งอาจจะไม่เพียงพอให้ TS สามารถแก้ไขปัญหาก็ได้

2.3.2.6 จำนวนครั้งสำหรับเงื่อนไขของความซ้ำซาก (frequency) เงื่อนไขนี้จะกำหนดจำนวนครั้งสูงสุดของการเดินรูปแบบหนึ่งๆ ไม่ให้ถูกเรียกใช้บ่อยเกินไปอันจะก่อให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ได้เมื่อการเดินนั้นๆ ถูกเรียกใช้จนเกิดจำนวนครั้งที่กำหนดไว้การเดินนั้นก็จะมิสถานะต้องห้ามอยู่จนกระทั่งระยะเวลาความคงอยู่ของสถานะต้องห้ามนั้นหมดไป ในการออกแบบ TS นั้นจะต้องมีเงื่อนไขอย่างน้อย 2 อย่างที่คอยทำหน้าที่ตรงข้ามกันและสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ยกตัวอย่างเช่นเมื่อมีการออกแบบเงื่อนไขที่ทำให้การเดินมีสถานะต้องห้ามแล้ว (การเดินย้อนกลับและเงื่อนไขของความซ้ำซาก) ก็จำเป็นต้องออกแบบเงื่อนไขที่สามารถยกเลิกสถานะต้องห้ามของการเดินนั้นได้

2.3.3 องค์ประกอบหลักของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

2.3.3.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย เพื่อใช้สำหรับประกอบการตัดสินใจในการค้นหาคำตอบว่าจะค้นหาคำตอบไปในทิศทางใด ฟังก์ชันเป้าหมายจะใช้เพื่อประเมินการค้นหาคำตอบว่าคำตอบที่ค้นหาอยู่ในแต่ละขั้นตอนนั้นมีประสิทธิภาพเพียงใด

2.3.3.2 รูปแบบการจำกัดแบบตาบอด หมายถึง รูปแบบการควบคุมการย้อนกลับ หรือการวนรอบ อยู่ในขอบเขตการค้นหาเดิมๆหรือคำตอบเดิมที่มีอยู่ การกำหนดรูปแบบการเป็นตาบอดนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหา ไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน เช่นอาจถูกกำหนดไว้ว่าห้ามกลับมายังตำแหน่งเดิมเป็นต้น

2.3.3.3 รายการตาบอด หมายถึง ตัวกำหนดจำนวนครั้งที่ทำซ้ำที่ต้องการห้ามไม่ให้มีการกลับมาที่เดิม เพราะการจะกำหนดรูปแบบการเป็นตาบอดว่าห้ามไม่ให้มีการกลับมาตำแหน่งเดิมนั้น อาจที่จะพลาดโอกาสการหาคำตอบที่ดีก็ได้ การกำหนดรายการตาบอดจึงเป็นการกำหนดว่าจะห้ามเงื่อนไขของรูปแบบการเป็นตาบอดอยู่นานเท่าไร การกำหนดจำนวนการเป็นตาบอดไม่มีเกณฑ์ตายตัวว่าจะจะเป็นเท่าไร ซึ่งการกำหนดสูงเกินไปก็จะทำให้พลาดโอกาสที่จะได้คำตอบที่ดีได้ ในขณะเดียวกันถ้ากำหนดน้อยเกินไปอาจจะทำให้ได้คำตอบที่ย้อนกลับหรือการวนรอบในขอบเขตของคำตอบเดิมๆ ได้

2.3.3.4 เกณฑ์ความปรารถนา เป็นรูปแบบการควบคุมที่ช่วยในการหาคำตอบที่ดีเป็นไปด้วยดี และรวดเร็วมากขึ้น โดยกำหนดเป็นเงื่อนไขสำหรับการค้นหาที่ถูกเป็นตานั้นสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่าที่เคยได้ตั้งแต่การเริ่มค้นหาจนถึงปัจจุบัน จะสามารถยกเลิกห้ามสำหรับการค้นหานั้นได้ เกณฑ์ความปรารถนาก็ไม่มีกฎเกณฑ์ที่ตายตัวขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาเป็นหลัก

2.3.4 วิธีการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตาบ

2.3.4.1 วิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ คือ การเลือกใช้เกณฑ์ความปรารถนาและขนาดรายการตาบ

2.3.4.2 วิธีการสร้างคำตอบเริ่มต้น โดยการใช้การสุ่มเป็นรูปแบบตัวเลขบิต

2.3.4.3 วิธีการถอดรหัส เป็นการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบบิตมาเป็นค่าจำนวนจริง การถอดรหัสแบบเลขฐานสอง และแบบรหัสเกรย์จะให้คำตอบที่ดีกว่า [17] โดยใช้รหัสเกรย์ซึ่งเป็นรหัสคอมพิวเตอรือีกชนิดหนึ่ง

2.3.4.4 วิธีการคำนวณฟังก์ชันเป้าหมาย คือการนำตัวเลขบิตที่ได้จากการถอดรหัส ที่เป็นรหัสเกรย์แปลงเป็นเลขฐานสองและแปลงมาเป็นฐานสิบ ซึ่งเป็นค่าแต่ละค่าของ x_i จากนั้นนำมาใช้ในการคำนวณฟังก์ชันเป้าหมาย

2.3.4.5 วิธีการสร้างคำตอบใกล้เคียง โดยการเปลี่ยนตัวเลข 0 เป็น 1 หรือการเปลี่ยนตัวเลข 1 เป็น 0 ที่ละตำแหน่งจากคำตอบเริ่มต้น

2.3.4.6 วิธีตรวจสอบรายการตาบ เป็นรายการที่ใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลกระบวนการค้นหาในอดีต ถ้าคำตอบข้างเคียงนั้นถูกเป็นตาบเกินระยะเวลาที่กำหนดให้ยกเลิกการเป็นตาบของคำตอบข้างเคียงนั้น

2.3.4.7 วิธีการใช้เกณฑ์ความปรารถนา เป็นการตรวจสอบคำตอบข้างเคียงจากคำตอบปัจจุบัน ถ้าคำตอบข้างเคียงนั้นถูกเป็นตาบแต่สามารถให้คำตอบที่ดีไม่เคยพบมาก่อน ก็สามารถเลือกเป็นคำตอบได้

2.3.4.8 วิธีการปรับโทษ เป็นวิธีการปรับตั้งค่าคำตอบเมื่ออยู่ในรายการตาบและไม่ผ่านเงื่อนไขของปัญหา

การแก้ปัญหาโดยการค้นหาแบบตาบเป็นการค้นหาเฉพาะที่ซึ่งใช้หน่วยความจำเพื่อหลีกเลี่ยงคำตอบข้างเคียงเฉพาะที่และช่วยให้เคลื่อนที่ออกจากจุดเหมาะสมเฉพาะที่วิธีการค้นหาแบบตาบเป็นวิธีการค้นหาที่มีข้อห้าม หรือการห้ามการค้นหาคำตอบในบางขอบเขต ในวิธีการห้ามดังกล่าวนั้นจะเป็นการห้ามเพื่อที่จะช่วยไม่ต้องไปค้นหาคำตอบเดิม โดยใช้รายการตาบและเกณฑ์ความปรารถนา

2.3.5 ขั้นตอนของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

ขั้นตอนที่ 1

เริ่มดำเนินการโดยทำการสุ่มคำตอบเริ่มต้น จากสมาชิกของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด

แทนด้วย $S_0 \in \Omega$

ขั้นตอนที่ 2

กำหนดให้คำตอบเริ่มต้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุดและกำหนดให้คำตอบเริ่มต้นเป็นคำตอบ

ปัจจุบัน $S_{best} = S_0, S_{current} = S_0$

ขั้นตอนที่ 3

คำนวณหาค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาและกำหนดค่าฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นค่าที่ดีที่สุด

$$f_{best} = f(s_{best})$$

ขั้นตอนที่ 4

นับจำนวนครั้งในการค้นหาและดำเนินการค้นหาคำตอบบริเวณใกล้เคียงของคำตอบปัจจุบัน

แทนด้วย $s_{neighbor}$ ภายในขอบเขต

ขั้นตอนที่ 5

คำนวณหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของสมาชิกแต่ละตัวของ $s_{neighbor}$ แล้วเลือกสมาชิกที่ทำให้

ค่าฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าดีที่สุด โดยกำหนดให้ $f_{good} = f(s_{neighbor_best})$

ขั้นตอนที่ 6

ตรวจสอบรายการตาบอดว่ามีสถานะเป็นตาบอดหรือไม่ ซึ่งหลักการออกแบบรายการตาบอดจะขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิด

ขั้นตอนที่ 7

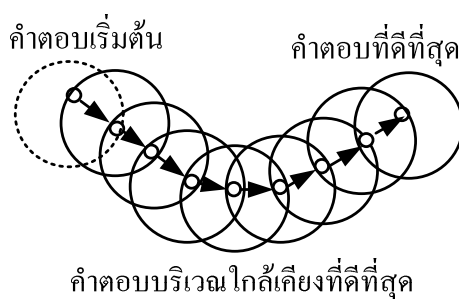
ถ้าไม่เป็นตาบอดให้ $s_{current} = s_{neighbor_best}$ แต่ถ้าเป็นตาบอดต้องผ่านเกณฑ์ความปรารถนาคือจะต้องมีค่าฟังก์ชันเป้าหมายดีกว่าของ f_{best} เดิม แล้วทำการย้ายตำแหน่งโดยกำหนดให้

$s_{current} = s_{neighbor_best}$ และปรับปรุงรายการตาบอดให้เป็นปัจจุบัน และเพิ่มจำนวนครั้งในการค้นหา

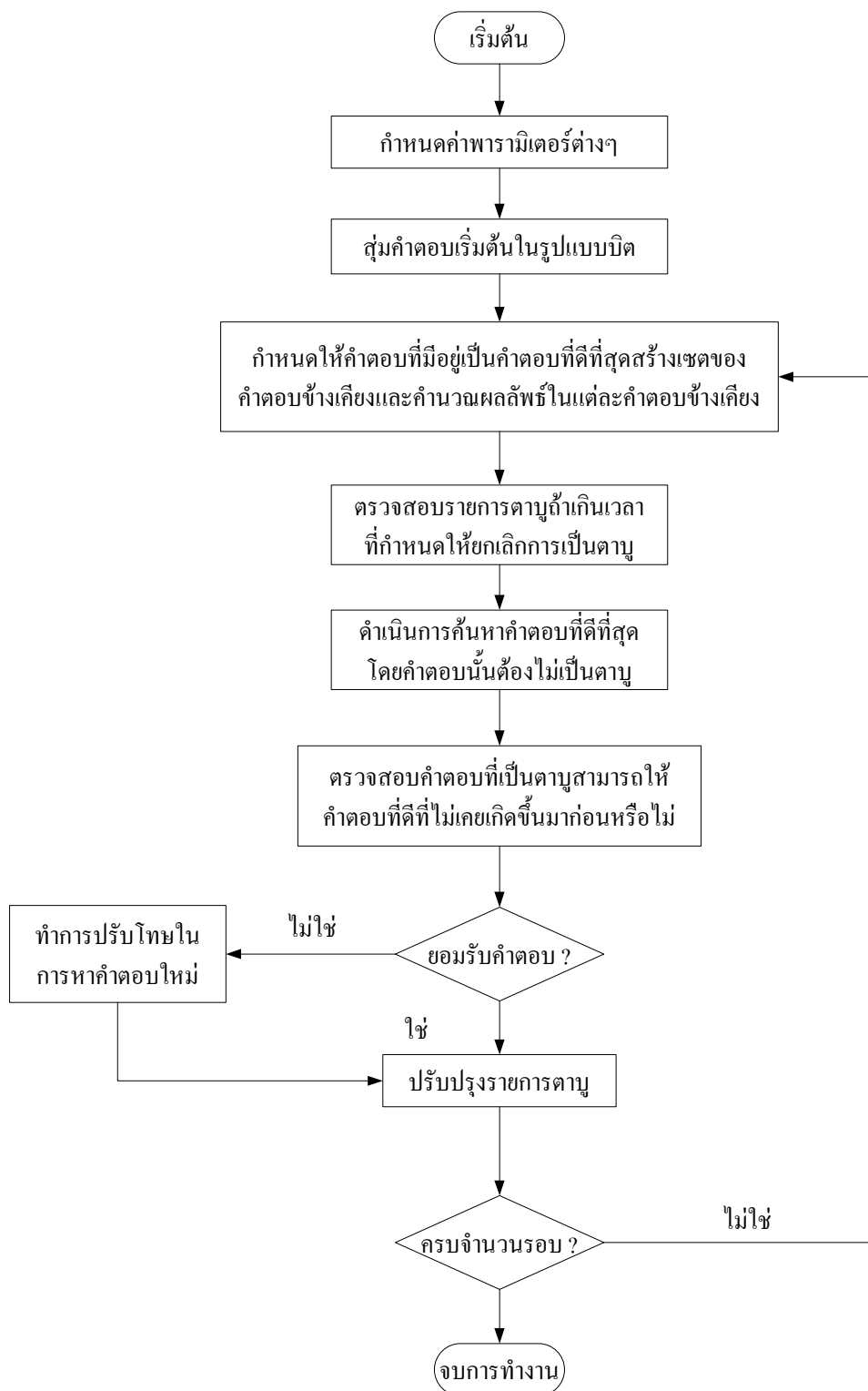
ขั้นตอนที่ 8

ดำเนินการจบครบรอบจำนวนครั้งสูงสุดที่กำหนดไว้

การเคลื่อนย้ายคำตอบซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวิธีการค้นหาแบบตาบ คือ สามารถค้นหาคำตอบหลุดจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ได้ และหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.6 รูปแบบการเคลื่อนย้ายของการค้นหาแบบตาบ



รูปที่ 2.7 แผนผังวิธีการค้นหาแบบตามู

2.4 การประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า หมายถึง ความคาดหวังว่าระบบไฟฟ้าจะสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับลูกค้าได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง โดยมีไฟฟ้าขัดข้องน้อยที่สุด ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า หมายถึง ตัวชี้บอกถึงคุณภาพของระบบไฟฟ้าว่ามีความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องในระบบมากหรือน้อยเพียงใด ค่าดัชนีความเชื่อถือได้สะท้อนให้เห็นถึงความพอเพียงและความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในส่วนต่างๆ การหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้านั้นจะต้องคำนึงถึงสถิติการทำงานหรือการคาดการณ์การทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นในระบบว่าจะเกิดเหตุขัดข้องขึ้นบ่อยครั้งหรือเมื่อเกิดแล้วต้องใช้เวลาซ่อมแซมนานเท่าใด ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถทำการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ได้ตามปกติอีกครั้ง [19]

2.4.1 ดัชนีความเชื่อถือได้ที่จุดโหลด

ความเชื่อถือได้ ณ จุดโหลดใดๆ ขึ้นอยู่กับความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ระหว่างจุดจ่ายไฟฟ้ากับจุดโหลดนั้นๆ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ทำให้อุปกรณ์ที่เกิดขัดข้องกลับคืนสภาวะการทำงานได้ตามปกติและต่อเข้าระบบได้อีกด้วย

ดัชนีพื้นฐานของระบบจำหน่ายคือดัชนีของจุดโหลด 3 ดัชนีคืออัตราการล้มเหลวเฉลี่ย (λ_s) ระยะเวลาเฉลี่ยที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ (r_s) และระยะเวลาที่ไฟฟ้าดับในหนึ่งปี (U_s)

อัตราการล้มเหลวเฉลี่ย (λ_s) คำนวณจาก

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad 2.1$$

ระยะเวลาที่ไฟฟ้าดับในหนึ่งปี คำนวณจาก

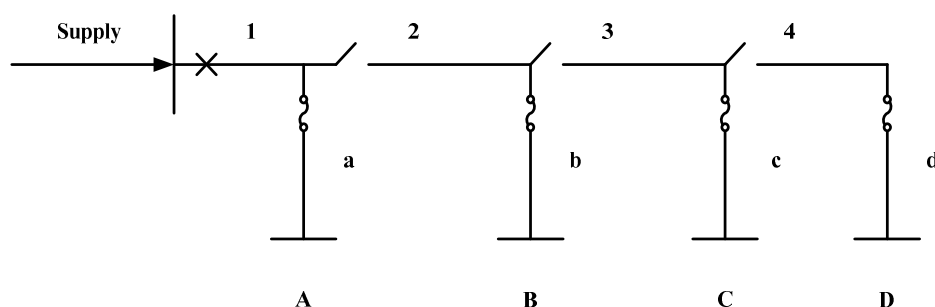
$$U_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad 2.2$$

ระยะเวลาเฉลี่ยที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ คำนวณจาก

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad 2.3$$

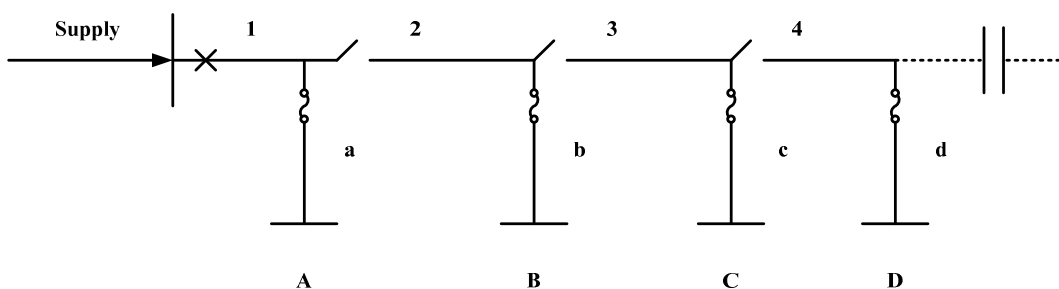
โดยที่ n คือ เหตุการณ์ที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้

รูปที่ 2.8 เป็นกรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่จุดโหลดและสวิตช์ตัดตอน เมื่อเกิดฟอลต์ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร อุปกรณ์ป้องกันจะทำงานเปิดวงจรของระบบก่อน แล้วสับสวิตช์ตัดตอนแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกแล้วจึงจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบตามเดิม จุดโหลดที่อยู่ก่อนจุดที่เกิดฟอลต์ก็จะได้รับการจ่ายไฟฟ้าตามเดิม ส่วนจุดโหลดที่อยู่หลังจุดเกิดฟอลต์จะเกิดไฟฟ้าดับจนกว่าจะแก้ไขส่วนที่เกิดฟอลต์เสร็จ โดยที่ความเชื่อถือได้ของเบรกเกอร์และฟิวส์เป็น 100%



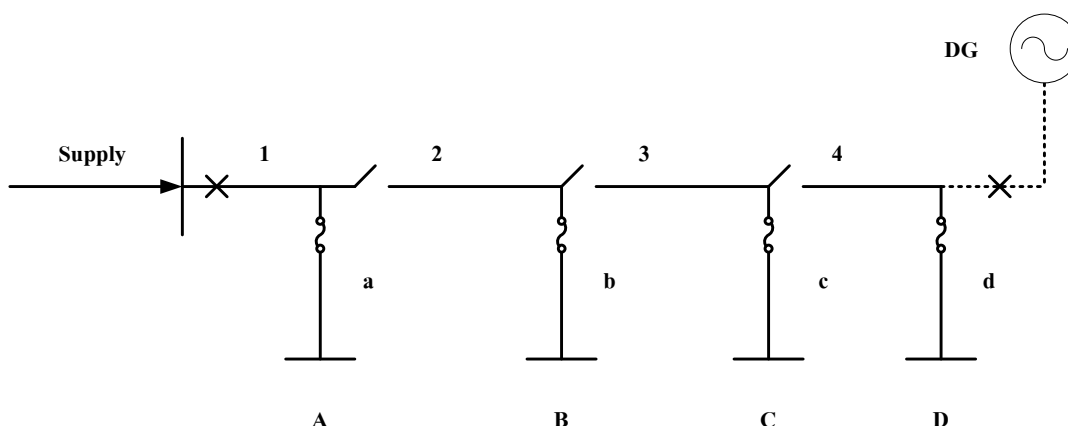
รูปที่ 2.8 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลในกรณีมีสวิตช์ตัดตอนที่สายป้อนและฟิวส์ที่จุดโหลด

รูปที่ 2.9 เป็นกรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่จุดโหลดและสวิตช์ตัดตอนเมื่อมีการจ่ายไฟฟ้าจากสายป้อนอื่น เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร อุปกรณ์ป้องกันจะทำงานเปิดวงจรของระบบก่อน แล้วสับสวิตช์ตัดตอนแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกแล้วจึงจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบตามเดิม จุดโหลดที่อยู่ก่อนจุดที่เกิดฟอลต์ก็จะได้รับการจ่ายไฟฟ้าตามเดิม แต่จุดโหลดที่อยู่หลังจุดเกิดฟอลต์จะเกิดไฟฟ้าดับจะเป็นการตัดสวิตช์ตัดตอนและเวลาในการจ่ายไฟฟ้าจากสายป้อนอื่นมาทดแทนเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ ระยะเวลาไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ตำแหน่งของสวิตช์ตัดตอนและเวลาการจ่ายไฟฟ้าสายป้อนอื่น ดังนั้นตำแหน่งของสวิตช์ตัดตอนจึงมีผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบ โดยที่ความเชื่อถือได้ของเบรกเกอร์และฟิวส์เป็น 100%



รูปที่ 2.9 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลในกรณีจ่ายไฟฟ้าสำรองจากสายป้อนอื่น

รูปที่ 2.10 เป็นกรณีศึกษาการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เมื่อเกิดฟอลต์ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร อุปกรณ์ป้องกันจะทำงานเปิดวงจรแยกแหล่งจ่ายไฟฟ้าทุกส่วนออกไปจากระบบ แล้วสับสวิตช์ตัดตอนแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกแล้วจึงจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบตามเดิม จุดโหลต์ที่อยู่ก่อนจุดที่เกิดฟอลต์ก็จะได้รับการจ่ายไฟฟ้าตามเดิม แต่จุดโหลต์ที่อยู่หลังจุดเกิดฟอลต์จะเกิดไฟฟ้าดับจะเป็นการสับสวิตช์ตัดตอนและเวลาในการจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมาทดแทนเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ แต่ต้องพิจารณาความสำคัญของจุดโหลต์ที่จ่ายไฟฟ้า โดยจะต้องคำนึงถึงกำลังผลิตพิกัดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่นำมาติดตั้งส่วนจุดโหลต์ที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้าจะเกิดไฟฟ้าดับจนกว่าจะแก้ไขส่วนที่เกิดฟอลต์เสร็จและระยะเวลาไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ตำแหน่งและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นตำแหน่งและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจึงมีผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบ โดยที่ความเชื่อถือได้ของเบรกเกอร์และฟิวส์เป็น 100%



รูปที่ 2.10 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลในกรณีติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2.4.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า

เนื่องจากความพึงพอใจของผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเป็นลูกค้าของการไฟฟ้าแต่ละรายที่ได้รับการบริการที่ดี มีจำนวนครั้งของการเกิดไฟฟ้าดับน้อยที่สุดเป็นเรื่องสำคัญ ดังนั้นในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้จึงนิยามอ้างอิงผู้ใช้ โดยการใช้ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่เกิดไฟฟ้าดับและจำนวนที่ไฟฟ้าดับต่อปีต่อผู้ใช้หนึ่งราย ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบกันระหว่างระบบต่างๆ ได้และยังสามารถตั้งเป้าหมายได้ ดัชนีดังกล่าวได้แก่

2.4.2.1 ดัชนีความถี่ของการล้มเหลวของระบบโดยเฉลี่ย แสดงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งการเกิดไฟฟ้าดับต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด

$$SAIFI = \sum \frac{\lambda_i N_i}{N_i} \quad \text{ครั้ง/ผู้ใช้ไฟฟ้า/ปี} \quad 2.4$$

2.4.2.2 ดัชนีระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับโดยเฉลี่ยของระบบ แสดงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด

$$SAIDI = \sum \frac{U_i N_i}{N_i} \quad \text{ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟฟ้า/ปี} \quad 2.5$$

โดยที่ N_i คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าของจุดโหลด i

2.4.2.3 ดัชนีระยะเวลาไฟฟ้าดับโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ไฟฟ้า แสดงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับโดยเฉลี่ยของผู้ใช้ไฟฟ้า

$$CAIDI = \sum \frac{U_i N_i}{\lambda_i N_i} \quad \text{ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟฟ้า/ปี} \quad 2.6$$

2.4.2.4 ดัชนีความพร้อมในการจ่ายไฟฟ้าแสดงค่าเฉลี่ยของการมีไฟฟ้าใช้ของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบ

$$ASAI = \frac{\sum N_i \times 8760 - \sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \quad 2.7$$

2.4.2.5 ดัชนีความไม่พร้อมในการจ่ายไฟฟ้า แสดงค่าเฉลี่ยของการไม่มีไฟฟ้าใช้ของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบ

$$ASUI = 1 - ASAI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8760} \quad 2.8$$

โดยที่ 8760 คือ จำนวนชั่วโมงในหนึ่งปี

2.4.2.6 ดัชนีพลังงานที่ไม่สามารถจ่ายได้ แสดงค่าพลังงานที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้า

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i \quad \text{kWh/ปี} \quad 2.9$$

โดยที่ $L_{a(i)}$ คือ โหลดเฉลี่ยที่จุดโหลด

2.4.2.7 ดัชนีพลังงานที่ไม่สามารถจะจ่ายได้โดยเฉลี่ย แสดงค่าพลังงานที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้าต่อผู้ใช้ไฟฟ้า

$$AENS = \frac{\sum L_{a(i)} U_i}{\sum N_i} \quad \text{kWh/ผู้ใช้ไฟฟ้า/ปี} \quad 2.10$$

ประโยชน์ของดัชนีเกี่ยวกับผู้ใช้ไฟฟ้าและโหลด ดัชนีเกี่ยวกับผู้ใช้ไฟฟ้าและโหลดมีความสำคัญต่อการประเมินค่าความล้มเหลวในการจ่ายไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าในอนาคต ดัชนีเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงความน่าเชื่อถือได้ของการทำงานของระบบจึงมีความสำคัญต่อระบบ คือ ช่วยประเมินการเปลี่ยนแปลงของระบบ และช่วยบอกจุดที่เป็นความเสี่ยงที่จะต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไข

2.4.3 มูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ

ตารางที่ 2.5 แสดง Standard Industrial Classification (SIC) จะแบ่งประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ อุตสาหกรรม พาณิชยกรรม กสิกรรม บ้านพักอาศัย หน่วยงานราชการ สำนักงานเอกชน ข้อมูลที่ได้เป็นผลสำรวจของ University of Saskatchewan เป็นข้อมูลประมาณมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้า 7 ประเภท ซึ่งมีอยู่ 5 ช่วงเวลา [20] ซึ่งเป็นพื้นฐานจากการหามูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของระบบไฟฟ้า

จากตารางที่ 2.5 พบว่ามูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับและชนิดของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทสำนักงานเอกชนมีมูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับสูงสุด และผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีมูลค่าความเสียหายต่ำที่สุดคือผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทบ้านพักอาศัย แต่ถ้าพิจารณาระยะเวลาในการเกิดไฟฟ้าดับเป็นเวลานานแล้ว ผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีมูลค่าความเสียหายต่ำที่สุดจะเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทกสิกรรม ในกรณีที่ระยะเวลาไฟฟ้าดับมีเวลาอยู่ในช่วงของเวลาในตาราง ให้ทำการคำนวณหามูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าโดยวิธีการประมาณแบบภายใน (Interpolation) ในลักษณะเชิงเส้น แต่ถ้ามากกว่า 8 ชั่วโมง ให้ใช้การประมาณแบบภายนอก (Extrapolation) ในลักษณะเชิงเส้น

ข้อมูลความเสียหายจากการเกิดไฟฟ้าดับของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการประเมินค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าจากการเกิดไฟฟ้าดับจำเป็นต้องทราบประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า เนื่องจากต้องนำไปทำการคำนวณความเสียหายจาก Sectoral Customer Damage Function (SCDF) ที่แยกตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดประเภท คือ บ้านที่อยู่อาศัย กิจการขนาดเล็ก กิจการขนาดกลาง กิจการขนาดใหญ่ กิจการเฉพาะอย่าง และส่วนราชการ

ตารางที่ 2.6 มูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับของ Standard Industrial Classification (SIC)

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับ (นาท) และ มูลค่าความเสียหาย (\$/kW)				
	1 นาท	20 นาท	60 นาท	240 นาท	480 นาท
ผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่					
อุตสาหกรรม	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
พาณิชย์	1.625	3.868	9.085	25.16	55.81
กลีกรรม	0.381	2.969	8.552	31.32	83.01
บ้านพักอาศัย	0.060	0.343	0.649	2.064	4.120
หน่วยงานราชการ	0.001	0.093	0.482	4.914	15.69
สำนักงานเอกชน	0.044	0.369	1.492	6.558	26.04
	4.778	9.878	21.06	68.83	119.2

ตารางที่ 2.7 เกณฑ์การแบ่งประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	ความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)
กิจการขนาดเล็ก	น้อยกว่า30
กิจการขนาดกลาง	ตั้งแต่ 30 ขึ้นไป แต่ไม่เกิน 1000
กิจการขนาดใหญ่	ตั้งแต่ 1000 ขึ้นไป

จากรายงานผลของการศึกษาอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของสำนักงานคณะกรรมการนโยบาย พลังงานแห่งชาติ (สณพ.) ที่จัดทำโดยสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำนักบริการวิชาการ [21] ได้สรุปแบบจำลองความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าจากการเกิดไฟฟ้าดับในรูปของ Sectoral Customer Damage Function (SCDF) ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ตารางที่ 2.8 มูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (บาท/kW) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	ระยะเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับ (ชั่วโมง) และ มูลค่าความเสียหาย (บาท/kW)			
	1 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง
บ้านพักอาศัย	8.694	19.050	39.762	80.716
ธุรกิจขนาดเล็ก	166.172	288.467	591.748	1054.216
ธุรกิจขนาดกลาง	55.006	92.647	193.661	363.221
ธุรกิจขนาดใหญ่	50.877	79.913	145.614	251.938

2.4.4 ค่าคาดหวังความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (System Expected Outage Cost to Customers Due to Supply Outage : ECOST)

มูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโหลด เวลาที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ และอัตราการล้มเหลวเฉลี่ยของอุปกรณ์ [22] ตามสมการ

$$ECOST = \sum_{h=1}^{nh} \sum_{k=1}^{nk} L_k C_{hk} (r_h) \lambda_h \quad 2.11$$

โดยที่

n_k	คือ	จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดฟอลต์จากอุปกรณ์ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับ
n_h	คือ	จำนวนของจุดโหลดที่ถูกแยกเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้
L_k	คือ	ระดับการใช้พลังงานที่จุดโหลด k ขณะที่ระดับของกำลังไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟใช้
r_h	คือ	ระยะเวลาเฉลี่ยของเหตุการณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับ
C_{hk}	คือ	ค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลา
λ_h	คือ	อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์