



การศึกษาผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า
ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ทง ลานธารทอง
นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณผลประโยชน์ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



The Study of Impacts of Economic for Distribution System
with Distributed Generation

Thong Lantharthong
Nattachote Rugthaicharoencheep

This Research in Funded by Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Phra Nakorn
Year 2015

ชื่อเรื่อง : การศึกษาผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ผู้วิจัย : ผศ.ทง ลานธารทอง สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร
ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร

พ.ศ. : 2558

บทคัดย่อ

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว คือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่ติดตั้งในบริเวณแหล่งผู้ใช้ไฟฟ้าหนาแน่น ประโยชน์ของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอย่างหนึ่งที่สำคัญคือ การปรับปรุงความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้ดีขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการติดตั้งและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวรับการพิจารณาอย่างเหมาะสม การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีจุดประสงค์หลักคือการลดค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟาดับของผู้ใช้ไฟฟ้าให้มีค่าต่ำสุด

เทคนิคที่ใช้ในการแก้ปัญหาการลดค่าความเสียหายอันเนื่องมาจากไฟฟาดับของผู้ใช้ไฟฟ้าให้มีค่าต่ำสุดคือการค้นหาแบบตาบู่รวมกับการวิเคราะห์ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ใช้เป็นตัววัดค่าความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับไฟฟาดับ

โดยทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบของ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 จากผลการทดสอบการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถนำมาใช้เพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

Title : The Study of Impacts of Economic for Distribution System
with Distributed Generation

Researcher : Assistant Professor Thong Lantharthong, Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, RMUTP
Assistant Professor Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTP

Year : 2015

Abstract

A distributed generation is a small-scale Installed in the customer density sources. The benefits of distributed energy resources is one example. To improve the reliability of power distribution system for the better. The increased reliability of power distribution system that is connected to the source of power distribution efficiency depends on the size of the supply and installation of power distribution are considered appropriate. To Evaluation the reliability in distribution system with the main purpose is to the minimization for customer interruption cost.

The technique employed to minimization problem for customer interruption cost in solved by the developed tabu search algorithm together with reliability worth analysis that provide an indirect measure for cost implication associated with power failure.

The developed methodology is tested with a distribution system of Roy Billinton Test System (RBTS) bus 2. Numerical results from the tests demonstrate that distributed generation can be used to promote economy and reliability of the distribution systems.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการศึกษาผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบจำหน่ายที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวนี้ ได้รับทุนอุดหนุน การวิจัยจากงบประมาณเงินผลประโยชน์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาทุกท่าน คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาแต่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 การทบทวนงานวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	5
1.6 วิธีการวิจัย	5
1.7 ประโยชน์ของการวิจัย	6
บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า	7
2.2 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	18
2.3 การค้นหาแบบตาบู่	23
2.4 การประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	33
บทที่ 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	40
3.1 หลักการของการวิเคราะห์ปัญหา	40
3.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่	46
3.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2	47
3.4 กรณีศึกษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ (RBTS) บัส 2	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	52
4.1 ผลการทดสอบ	52
4.2 การวิเคราะห์ผลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS ปี 2	64
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการวิจัย	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	70
คณะผู้วิจัย	71



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	สถิติระยะเวลาการเกิดไฟฟ้าดับที่มีสาเหตุจากส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้า	8
2-2	การแบ่งส่วนของระบบจำหน่าย	9
2-3	ตัวอย่างระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่ง สายส่งย่อย และสายป้อน	11
2-4	อัตราส่วน kVA หม้อแปลงระบายความร้อนด้วยพัดลมกับระบายความร้อนเอง	15
2-5	มาตรฐานระดับแรงดันสูงและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	20
2-6	มูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ Standard Industrial Classification (SIC)	38
2-7	เกณฑ์การแบ่งประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าในพื้นที่บริการของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	38
2-8	มูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (บาท/kW) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	38
3-1	จำนวน DG ที่ติดตั้งและกำลังผลิตรวมเมื่อติดตั้ง DG เข้าในระบบ	48
3-2	โหลดสูงสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2	49
3-3	ข้อมูลเกี่ยวกับผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2	49
3-4	แสดงข้อมูลของสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2	50
3-5	ดัชนีความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2	50
3-6	อัตราความเสียหายและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อมของอุปกรณ์แบบต่างๆ	50
4-1	ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีศึกษาที่ 1	53
4-2	ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีศึกษาที่ 2	54
4-3	ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีศึกษาที่ 3	56
4-4	ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีศึกษาที่ 4	58
4-5	ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีศึกษาที่ 5	60
4-6	อัตราราคารับซื้อไฟฟ้า (Adder) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	62
4-7	ตำแหน่งที่เหมาะสมและขนาดของ DG จากการทดสอบ	62
4-8	ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีศึกษาที่ 1 - 5	63
4-9	ราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของ DG และค่าเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ	64

สารบัญรูป

ภาพที่		หน้า
2-1	สายส่งแบบแรงดันแบบง่าย	12
2-2	วงจรสายส่งย่อยแบบรูป	13
2-3	สายส่งย่อยแบบถ่ายโอน	14
2-4	ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวของระบบทฤษฎีภูมิเพื่อช่วยให้ผู้อาศัย และอาคารพาณิชย์ขนาดเล็ก	18
2-5	การขนานแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า	19
2-6	รูปแบบการเคลื่อนย้ายของการค้นหาแบบตาบอด	31
2-7	แผนผังวิธีการค้นหาแบบตาบอด	32
2-8	ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบแรงดันในกรณีที่มีสวิตช์ตัดตอนที่สายป้อนและพิวส์ที่จุดโหลด	34
2-9	ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบแรงดันกรณีจ่ายไฟฟ้าสำรองจากสายป้อนอื่น	34
2-10	ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบแรงดันกรณีติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว	35
3-1	การเกิดฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	43
3-2	จุดโหลด B, C และ D ที่แยกออกจากตำแหน่งที่เกิดฟอลต์	44
3-3	กรณีที่เป็นไปได้ที่แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า	44
3-4	ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2	47
4-1	ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 จากโปรแกรม	52
4-2	กรณีฐานไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย	53
4-3	ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2 จากโปรแกรม	54
4-4	การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกรณีที่ 2	55
4-5	ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 3 จากโปรแกรม	56
4-6	การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกรณีที่ 3	57
4-7	ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 4 จากโปรแกรม	58
4-8	การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกรณีที่ 4	59
4-9	ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 5 จากโปรแกรม	60
4-10	การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกรณีที่ 5	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ามีความสำคัญมากขึ้นเรื่อย ๆ จากปัจจัยอันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ และสังคมรวมทั้งการพัฒนาทางด้านต่างๆระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นระบบที่มีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟโดยตรง การเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้ไฟฟ้าดับมากกว่าร้อยละ 90 มีสาเหตุมาจากระบบจำหน่ายไฟฟ้านอกจากนี้ในปัจจุบันหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยได้มีการกำหนดเกณฑ์คุณภาพการให้บริการของการไฟฟ้าระบบจำหน่าย ด้วยค่าดัชนีความเชื่อถือได้ เพื่อเป็นปัจจัยในการประเมินประสิทธิภาพของการไฟฟ้า ความเชื่อถือได้ของระบบคือการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าให้มีคุณภาพ และอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม การเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญเพราะระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นระบบที่เชื่อมต่อระหว่างระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากับผู้ไฟฟ้าซึ่งถือเป็นระบบที่มีความสำคัญ และส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง การเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับส่วนใหญ่มิสาเหตุมาจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า ความน่าเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เป็นพื้นฐานของการออกแบบ และการประเมินค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและผู้ใช้ไฟอยู่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จึงต้องมีการเพิ่มกำลังผลิตและขยายระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เพื่อให้สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟได้ทั่วถึง แต่การดำเนินการดังกล่าวมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น เชื้อเพลิง เงินลงทุน และพื้นที่ในการก่อสร้างที่มีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเทคโนโลยีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed Generation: DG) หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เข้ามาช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ เนื่องจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีข้อดีที่สำคัญคือ ใช้เงินลงทุนและพื้นที่ในการก่อสร้างน้อยกว่าโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ และสามารถติดตั้งอยู่ใกล้กับผู้ไฟฟ้าได้ [1] กำลังผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จะอยู่ในช่วงระหว่าง 5 kV – 10 MV การบำรุงรักษา และเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวนั้นค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำ [2] แต่การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้าไปในระบบจำหน่ายจะส่งผลให้การทำงานและการควบคุมระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในตำแหน่งและขนาดที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า เช่น กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น ระดับแรงดันไฟฟ้าหรือขนาดกระแสลัดวงจรในระบบเปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนด [3] พลังงานที่นำมาใช้กับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีหลายประเภท ได้แก่ พลังงานทางเลือก เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายมีประโยชน์ในการลดความสูญเสียของกำลังไฟฟ้า และยังสามารถปรับปรุงค่าความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย การเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นในระบบจำหน่ายมาก ปกติเวลาเกิดฟอลต์ในระบบอุปกรณ์ป้องกันจะแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบไฟฟ้า

ทำให้แหล่งจ่ายหลักไม่สามารถที่จะจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าบางส่วนจึงส่งผลให้ระบบที่ถูกแยกออกไม่มีไฟฟ้าใช้ แต่ถ้าติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะสามารถเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่ถูกแยกออกจากระบบได้ และสามารถลดปริมาณผู้ใช้ไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบและความเสียหายทางเศรษฐกิจที่มาจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างกันไปตามลักษณะของผู้ใช้ไฟฟ้า แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถปรับปรุงค่าความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่าย การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีหลักการสำคัญในการออกแบบและการวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างประหยัดและการหยุดจำหน่ายไฟฟ้าให้น้อยที่สุด แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการสำรองพลังงานไฟฟ้า [4]

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการค้นหาแบบตามูซึ่งเป็นวิธีการคิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคำนวณค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (ECOST) โดยทำการทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการวิเคราะห์ด้วยและได้ทดลองเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบอัตราการลดของค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (ECOST) และต้นทุนในการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย

1.2 การทบทวนงานวิจัย

การทบทวนวรรณกรรม (literature review) เป็นเนื้อหาหลักส่วนหนึ่งในการเขียนรายงานการวิจัย โดยเน้นอธิบายเกี่ยวกับงานวิจัยหรือความรู้ในหัวข้อเดียวกันหรือใกล้เคียงในอดีต โดยการทบทวนวรรณกรรมนั้นมีจุดมุ่งหมายในการรวบรวมข้อมูลปัจจุบันของผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทบทวนวรรณกรรมมักจะพบได้ในงานเขียนด้านวิชาการ เช่นในวิทยานิพนธ์ ดุษฎีนิพนธ์ หรือผลงานในวารสารวิชาการการทบทวนวรรณกรรมมักจะถูกลำดับเป็นส่วนที่สองของงานเขียนต่อจากบทนำ และมักจะอยู่ก่อนหน้าเป้าหมายงานวิจัย และขั้นตอนการวิจัย[5]

การทบทวนงานวิจัย (Literature Review) ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการทำงานวิจัย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างงานวิจัย เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการวิเคราะห์ปัญหาและมีแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยอย่างถูกต้อง ในการวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้สรุปรายชื่อผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยบทความนี้ได้จำแนกประเภทรายชื่อบทความตามวิธีการวิเคราะห์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และเทคนิคที่ใช้ซึ่งทำให้เห็นภาพรวมสำหรับการวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งการทบทวนงานวิจัยสำหรับงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า และส่วนที่สองเป็นการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าและทางระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.2.1 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบเมื่อมีการเชื่อมต่อของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังนี้

บทความของ Surisunthon [6] กล่าวถึงการประเมินการลดลงของแรงดันไฟฟ้าและผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า การประเมินการลดลงของแรงดันไฟฟ้าจะถูกวิเคราะห์โดยวิธีการวางตำแหน่งที่ผิดเพื่อตรวจสอบพื้นที่ของดัชนีความถี่ของแรงดันไฟฟ้าตก โดยสรุปผลการทดลองในกรณีศึกษาาระบบทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 จะแสดงให้เห็นว่าแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวควรติดตั้งท้ายฟีดเดอร์และการป้องกันการไหลย้อนกลับ การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวควรเป็นที่ต้นทางของ SE จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าปลายทาง SE

บทความของ Zeng Ming [6] ในงานวิจัยนี้กล่าวถึงการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าซึ่งจะได้ประโยชน์สองประการโดยอันดับแรกสามารถปรับปรุงความเชื่อถือได้แต่ละจุดโหลดที่อยู่ใกล้แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยส่วนใหญ่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุดโหลดนี้ ประการที่สอง แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวติดตั้งในที่ที่เหมาะสมจะมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากขึ้น

บทความของ Ault-McDonald-Burt [8] กล่าวถึงโครงสร้างการวิเคราะห์เชิงกลยุทธ์สำหรับการประเมินผลแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โครงสร้างจะขึ้นอยู่กับแนวคิดของการประเมินปัญหาการกระจายของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการควบคุมการกระจายที่เป็นอิสระในระบบจำหน่ายไฟฟ้า รูปแบบค่าของการประเมินแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ส่งผลในการวางแผนระบบจำหน่ายไฟฟ้าและในการวัดค่าผลกระทบโดยรวมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในส่วนต่างๆของการจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้บริษัทจำหน่ายไฟฟ้ากำหนดการทดสอบระบบจำหน่ายแบบเรียลไทม์ที่จะตอบสนองต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายในอนาคต ผลที่ได้จากการศึกษา แสดงให้เห็นค่าศักยภาพของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว (ทั้งบวกและลบ) การศึกษานี้ยังแสดงให้เห็นการประยุกต์ใช้รูปแบบการวิเคราะห์นี้เพื่อความคุ้มค่าของการผลิต

1.2.2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าทางระบบจำหน่ายไฟฟ้า

บทความของ Berg-Krahl [9] กล่าวถึงการนำเสนอวิธีการประเมินผลและการลดค่าใช้จ่ายเครือข่ายที่เกี่ยวข้องในการสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้า การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยตระหนักถึงการทำงานระยะยาวที่มีประสิทธิภาพรวมทั้งต้นทุนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว นอกจากนี้มาตรการสำหรับการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวไปยังระบบ เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ค่าใช้จ่ายสำหรับระบบที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีการคำนวณและเปรียบเทียบสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกต้นทุนสำหรับการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะถูกกำหนดในแนวทางเซตสี่เหลี่ยม ขั้นตอนที่สองต้นทุนสำหรับการลงทุนสายส่งจะคำนวณบริเวณแหล่งจ่ายในชนบทและพิจารณาเพื่อเสนอวิธีการรวมค่าใช้จ่ายของสายส่งและแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

บทความของ Li [10] ได้เสนอการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ารวมถึงการพัฒนาวิธีคำนวณในสองรูปแบบสำหรับการกระจายของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการดำเนินการในการประเมินความเชื่อถือได้ ที่กำหนดรูปแบบการลัดวงจรกับการซ่อมแซมการลัดวงจรจะช่วยให้รวมความล้มเหลวได้อย่างง่าย โดยเทคนิคเครื่องมือในการประเมินผลความน่าเชื่อถือได้ ผลการทดสอบจะชี้ว่าการลัดวงจรมีผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบ

บทความของ Chiradeja [2] กล่าวว่า สาธารณูปโภคทางด้านไฟฟ้ากำลังหาเทคโนโลยีใหม่เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้ายอมรับคุณภาพไฟฟ้าและความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้า โดยเลือกแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวซึ่งมีขนาดเล็กและเป็นที่น่าสนใจมาก มีประโยชน์ต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในจำนวนที่เพิ่มขึ้น เพราะเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยและง่ายต่อการหาสถานที่ติดตั้ง แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวถือเป็นการเพิ่มกำลังไฟฟ้าในโหลด โดยผลิตกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงและมลพิษต่ำ ต้นทุนในการบำรุงรักษาและเชื้อเพลิงต่ำ

บทความของ Chen [11] กล่าวถึงความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้มีคุณภาพและคุ้มค่าในการบริการของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ไม่เพียงแต่มีการจัดตารางเวลาการบำรุงรักษาแต่ยังระบุส่วนประกอบที่สำคัญต่อความเชื่อถือได้ วิธีต่างๆในการคำนวณความเชื่อถือได้รับการพัฒนาและพิสูจน์เช่นให้มีประสิทธิภาพ สำหรับการประเมินผลความเชื่อถือได้มีองค์ประกอบที่ซับซ้อน การวิเคราะห์การลัดวงจรที่เกิดจากต้นไม้ โดยรวมแต่ละองค์ประกอบความเชื่อถือได้ผ่านทางเชิงปริมาณจะระบุชุดจ่ายไฟฟ้าที่ถูกตัดไปจากวงจร การวิเคราะห์การไหลของระบบไฟฟ้ารวมถึงผลกระทบของระบบไฟฟ้าในการบำรุงรักษาระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวางแผนและดำเนินงานอย่างเหมาะสมสำหรับการเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ กำหนดวัตถุประสงค์หลักของการวิจัย ดังนี้

- 1.3.1 เพื่อประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าในรูปดัชนีความเชื่อถือได้ และปรับความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.3.2 เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.3.3 เพื่อทราบค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ
- 1.3.4 เพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.3.5 เพื่อลดการเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยการพัฒนาวิธีการค้นหาแบบตาบู่
- 1.4.2 วิเคราะห์ระบบจำหน่ายทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 จำนวน 15 บัส 36 สายป้อน 22 จุดโหลด
- 1.4.3 พิจารณาความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะไม่คำนึงถึงผลกระทบของลำดับทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานไม่ได้ตามเงื่อนไขเดิม เมื่อติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว
- 1.4.4 ขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ทำการติดตั้ง 100 kW- 2000 kW
- 1.4.5 วิเคราะห์ความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยพิจารณาค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ
- 1.4.6 ประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Matrix Laboratory (MATLAB)

1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

- 1.5.1 คอมพิวเตอร์แบบพกพา Intel Centrino 1.66 GHz, Ram 1.99 GB
- 1.5.2 โปรแกรมสำเร็จรูป Matrix Laboratory (MATLAB)

1.6 วิธีการวิจัย

การวางแผนและดำเนินงานอย่างเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีวิธีการวิจัยดังนี้

- 1.6.1 ศึกษาบทความวิชาการที่เกี่ยวกับงานวิจัย ดังนี้
 - 1.6.1.1 ผลกระทบทางด้านเทคนิคของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเมื่อเชื่อมต่อในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
 - 1.6.1.2 ศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับการจัดกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว
 - 1.6.1.3 ศึกษาบทความที่เกี่ยวกับการเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าและการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้มีความเชื่อถือได้มากขึ้น
 - 1.6.1.4 การคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
 - 1.6.1.5 ประโยชน์สำหรับความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
 - 1.6.1.6 การวิเคราะห์และรูปแบบความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
 - 1.6.1.7 การวิเคราะห์และการประเมินแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว
 - 1.6.1.8 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

- 1.6.2 ระบุปัญหาที่จะทำการศึกษาในรูปแบบเหตุการณ์การเกิดลัดวงจรในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.6.3 ศึกษาการประเมินค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางแผนและดำเนินงาน
- 1.6.4 ศึกษาการไหลและการวิเคราะห์ของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า
- 1.6.5 ศึกษาการทำงานและผลกระทบในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว
- 1.6.6 พัฒนาโปรแกรมที่นำมาใช้ในการประมวลผลความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.6.7 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยการประมวลผลการทดสอบและวิเคราะห์เปรียบเทียบกับบทความวิชาการอื่นที่ทำการทดสอบในลักษณะงานที่ใกล้เคียงกัน
- 1.6.8 สรุปผลและเขียนงานวิจัย

1.7 ประโยชน์ของการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวางแผนและดำเนินงานอย่างเหมาะสมสำหรับความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สรุปได้ดังนี้

- 1.7.1 สามารถเข้าใจการหาค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.7.2 สามารถนำผลงานวิจัยไปใช้เป็นแนวทางการออกแบบระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 1.7.3 สามารถเข้าใจวิธีการค้นหาแบบตาบอดและนำมาใช้ในการแก้ปัญหา
- 1.7.4 สามารถลดค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ และปรับปรุงความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า



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 เนื่องจากเกิดการขัดข้องของอุปกรณ์แล้วก็จะส่งผลต่อความเชื่อถือได้ต่อระบบโดยรวม 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	
	(นาที)	(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 และแปลงโวลต์ผ่านหม้อแปลงระบบจำหน่ายไฟฟ้า 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
สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย (Distribution Substation)	สถานีไฟฟ้ารับกำลังไฟฟ้าจากวงจรสายส่งย่อยและแปลงให้สายป้อนปฐมภูมิ
สายป้อนปฐมภูมิ (Primary Feeder)	วงจรไฟฟ้าที่รับไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อย เพื่อส่งไปยังหม้อแปลงจำหน่าย
สายป้อนทุติยภูมิ (Secondary Feeder)	วงจรไฟฟ้าที่รับไฟจากหม้อแปลงจำหน่ายและส่งไปยังผู้ใช้ไฟ

2.1.2 สถานีไฟฟ้าย่อยกำลัง

สถานีไฟฟ้าย่อยกำลัง คือ สถานีเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบสายส่งให้ต่ำลงแล้วเข้าระบบสายส่งย่อย เนื่องจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังนี้มีโหลดเป็นจำนวนมากโหลดผ่าน 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 เมื่อมีการจัดวงจรให้ดีแล้วคือ ไม่ให้มีโหลดสูงเกินไป การบำรุงรักษาโดยการเอาบัสตัดตอนใดออกสามารถทำได้โดยไม่ต้องปลดโหลดออกเลยเพื่อให้มีความต่อเนื่องของการจ่ายโหลดในกรณีนี้สถานีไฟฟ้าย่อยที่รับไฟจากบัสตัดตอนใดๆ ต้องรับไฟจากบัสตัดตอนอื่นๆ หรือจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังอื่นๆ

2.1.2.4 บัสประธานคู่ เป็นการจัดบัสและเบรกเกอร์เพื่อลดความผิดพลาดในการทำงานเบรกเกอร์หรือบัสสามารถตัดออกจากระบบเวลาใดก็ได้โดยไม่รบกวนการจ่ายไฟเลย ถ้าหากบัสทั้งสองถูกใช้งานอยู่และเกิดลัดวงจรขึ้นที่บัสใดบัสหนึ่ง จุดลัดวงจรดังกล่าวสามารถถูกตัดออกจากระบบได้ด้วยรีเลย์แบบดิฟเฟอเรนเชียล 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 การเพิ่มบัสหรือเบรกเกอร์ใหม่เข้าไปก็สามารถทำได้โดยไม่ต้องยากการบำรุงรักษาเบรกเกอร์ของสายป้อนสามารถทำได้โดยจ่ายไฟผ่านเบรกเกอร์ของสายจ่ายไฟเข้าบัสประธานผ่านเบรกเกอร์เชื่อมโยงเข้าบัสโอนและไปยังโหลด 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

สายส่งย่อยมีหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยกำลังเพื่อส่งไปให้สถานีไฟฟ้าย่อยที่อยู่ ตามแหล่งชุมชนต่างๆ ที่สถานีไฟฟ้าย่อยนี้ระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งย่อยถูกแปลงให้ต่ำลงเพื่อส่งต่อไป ยังสายป้อน

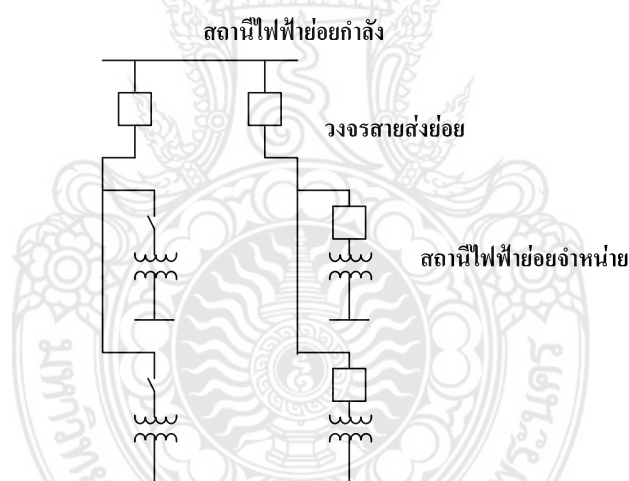
การจัดว่าระบบสายส่งใดเป็นสายส่งย่อยหรือไม่ ต้องพิจารณาจากการทำงานของระบบไม่ใช่พิจารณา จากระดับแรงดันไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับสายส่งย่อยขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของ ระบบที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าระบบสายส่งย่อย ถ้าอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายส่ง สายส่งย่อยและสายป้อน มีค่าสูงมากเกินไปหรือต่ำมากเกินไปก็ไม่ประหยัด 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

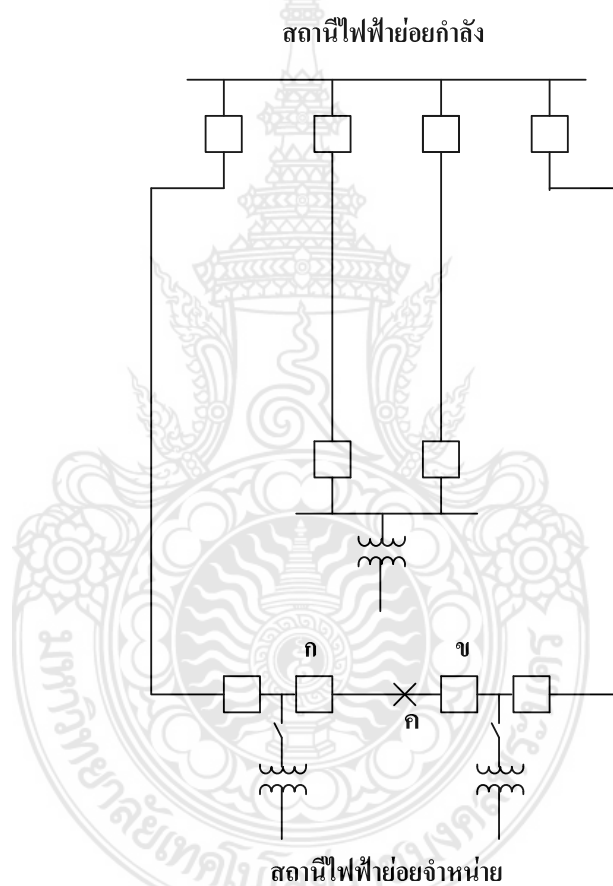
2.1.3.1 วงจรสายส่งย่อยแบบเรเดียล (Radial) วงจรนี้ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนักสำหรับระบบสายส่งเนื่องจากความมั่นคง หรือความเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟต่ำเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ เมื่อเกิดลัดวงจรขึ้นในสายส่งย่อยใดจะทำให้ไม่มีการจ่ายไฟให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยทุกแห่งที่รับไฟจากวงจรสายส่งย่อย



รูปที่ 2.1 สายส่งแบบเรเดียลแบบง่าย

การปรับปรุงระบบสายส่งย่อยและเรเดียลให้ดีขึ้นสามารถทำได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละวงจรจ่ายไฟให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยส่วนหนึ่ง และในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฉุกเฉินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยอื่นๆ การจัดแบบนี้ทำให้สามารถจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟได้รวดเร็วกรณีที่มีการลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบและในกรณีที่ระบบมีปัญหา เช่น การลัดวงจรดังกล่าวนั้นการสวิตช์ไฟของสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อรับไฟจากสายส่งย่อยหนึ่งไปยังสายส่งย่อยอีกวงจรหนึ่งสามารถทำได้โดยสวิตช์ หรือเบรกเกอร์ดังรูปที่ 2.2 แต่ถ้าหากใช้เบรกเกอร์ต้องมีระบบล๊อคระหว่างกัน (Interlock) คือ เบรกเกอร์ที่กรณีปกติเปิดอยู่จะปิดลงก็ต่อเมื่อเบรกเกอร์ในวงจรที่เกิดลัดวงจรเปิดออกก่อน

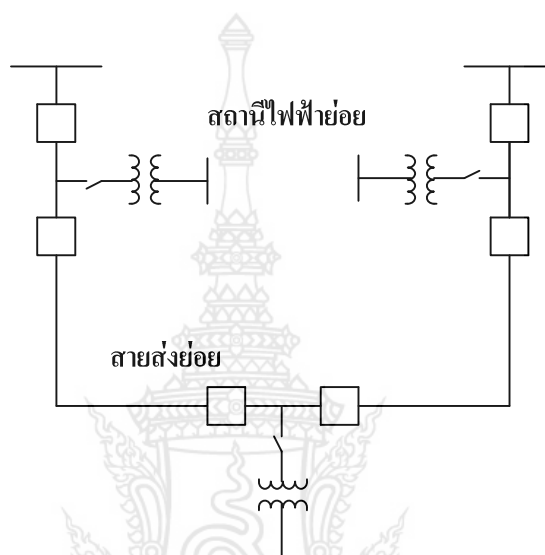
2.1.3.2 วงจรสายส่งย่อยแบบลูป (Loop) การแบ่งสายส่งย่อยในลูปเป็นตอนๆ เมื่อมีการเกิดลัดวงจรขึ้นในสายส่งย่อยไม่ว่าตอนใดก็ตามก็ไม่สามารถทำให้สถานีไฟฟ้าย่อยใดหยุดจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟ เพราะจุดลัดวงจรในสายส่งย่อยจะถูกแยกออกจากระบบด้วยการเปิดของเบรกเกอร์ทั้งสองของสายส่งย่อยตอนนั้น สมมุติเกิดลัดวงจรในสายส่งย่อยตอนหนึ่งที่จุด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



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 วงจรสายส่งย่อยแบบกริดเป็นระบบที่คล่องตัวเนื่องจากสามารถขยายเพื่อต่อให้กับสถานีไฟฟ้าย่อยเพิ่มขึ้นได้อย่างทันทีโดยใช้โครงสร้างวงจรมีน้อย ระบบกริดใช้เบรกเกอร์จำนวนมากและระบบรีเลย์ยุ่งยากกว่าระบบเรเดียลและลูบ ระบบกริดให้ความมั่นคงและความเชื่อถือได้ของระบบมากขึ้น แต่ปัญหาเรื่องรีเลย์ก็ยุ่งยากมากขึ้นอย่างไรก็ตามการเชื่อมเข้ากับแหล่งจ่ายไฟหลายแหล่งมีข้อดี คือทำให้มีการกระจายโหลดสำหรับแหล่งจ่ายไฟพอกๆกัน

2.1.4 สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย (Distribution Substation)

สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่าย คือ สถานีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมรักษา ระดับแรงดันไฟฟ้า แบ่งจ่ายและแปลงแรงดันไฟฟ้าโดยรับไฟจากสายส่งย่อยเพื่อส่งต่อไปให้ผู้ใช้งานไฟฟ้าย่อยจำหน่ายแบ่งออกได้ดังนี้

2.1.4.1 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบธรรมดา (Simple) ประกอบด้วย สวิตช์ตัดตอนแรงสูง หม้อแปลง และสายป้อนพร้อมเบรกเกอร์ทางด้านแรงต่ำ โดยมากมีอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้าในหม้อแปลงหรือสายป้อนเพื่อการบำรุงรักษา 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 หรือช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์สำรอง การลดช่วงเวลาหยุดจ่ายไฟให้น้อยลงสามารถทำได้โดยใช้สถานีไฟฟ้าย่อยจำหน่ายแบบสับเปลี่ยนสวิตช์อัตโนมัติ การทำงานเมื่อเกิดลัดวงจรเมนสายส่งย่อยหนึ่งเบรกเกอร์ทางต้นของสายส่งย่อยจะเปิดวงจรออกทำให้แรงดันไฟฟ้าของสายส่งย่อยตกไป เบรกเกอร์แรงสูงของปลายสายส่งย่อยก็เปิดออกรีเลย์ทราบการเปิดวงจรของเบรกเกอร์แรงสูงนี้ก็ไปควบคุมเบรกเกอร์ตัดตอนด้านแรงสูงปิดวงจรทำให้หม้อแปลงทั้งสองชุดร่วมจ่ายไฟตามปกติได้ เมื่อแก้ไขการลัดวงจรเรียบร้อยแล้วและจ่ายไฟทำให้เบรกเกอร์ตัดตอนด้านแรงสูงเปิดวงจรออกและเบรกเกอร์ ปลายสายส่งย่อยปิดวงจรและจ่ายไฟตามปกติ

2.1.4.5 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบแหล่งจ่ายไฟขนาน (Parallel Supply) มีการจ่ายไฟให้กับโหลดแบบต่อเนื่องได้โดยไม่มีการหยุดจ่ายไฟ เมื่อเกิดลัดวงจรในสายส่งย่อยหรือเบรกเกอร์ด้านแรงสูงถูกควบคุมด้วยรีเลย์กระแสเกินตามทิศทางและเปิดวงจรออกเมื่อเกิดลัดวงจรในระบบกระแสลัดวงจรไหลจากบัสแรงสูงของสถานีไฟฟ้าย่อยไปทางแหล่งจ่ายไฟ เมื่อเกิดลัดวงจรในสายส่งย่อยเบรกเกอร์แรงสูงที่ต้นทางและปลายทางของสายส่งย่อยเปิดวงจรออก และแยกจากจุดลัดวงจรออกจากระบบสถานีไฟฟ้าย่อยและยังจ่ายโหลดต่อไปได้โดยอาศัยไฟจากอีกสายส่งย่อยที่ไม่เกิดการลัดวงจร

2.1.4.6 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบสปอต-เน็ตเวิร์ก (Spot-Network) มีความมั่นคงและความเชื่อถือได้สูงในการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องโดยใช้สวิตช์ที่น้อยที่สุดหม้อแปลงแต่ละตัวทำงานร่วมกับสายส่งย่อยแต่ละวงจรและสวิตช์ตัดตอนเฉพาะทางด้านแรงดันไฟฟ้าแรงสูงเท่านั้นเบรกเกอร์ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงถูกควบคุมโดยรีเลย์กระแสเกินตามทิศทาง รีเลย์นี้ทำงานเพื่อเปิดวงจรของเบรกเกอร์หม้อแปลงเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในสายส่งย่อย เบรกเกอร์ทางต้นทางของสายส่งย่อยและเบรกเกอร์ทางด้านแรงต่ำของหม้อแปลงเปิดวงจรออกทำให้เหลือหม้อแปลงชุดเดียวกับโหลดทั้งหมด

2.1.4.7 สถานีไฟฟ้าย่อยแบบการจัดบัสซบซ้อน 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 หรือสายแทปด้านขวาออกจากสายประธานสายป้อนประธานโดยมากเป็นสามเฟสสามสายหรือสี่สายในขณะที่กิ่งเป็นสามเฟสหรือเฟสเดียวทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในสายกิ่ง ระบบสายป้อนปฐมภูมิสามารถแยกการจลัดวงจรออกเป็นชนิดสำคัญดังนี้

2.1.5.1 การจัดวงจรแบบเรเดียลตรง เป็นการจัดแบบง่ายที่สุดและลงทุนน้อยที่สุดมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแหล่งเดียวกระแสที่ต้นทางของสายป้อนที่ออกจากสถานีไฟฟ้าย่อยมีขนาดสูงที่สุด ส่วนขนาดกระแสตามสายป้อนประธานลดลงตามทางเมื่อมีการจ่ายไฟแยกให้สายกิ่งหรือสายป้อนย่อย ขนาดของสายป้อนประธานนี้สามารถลดขนาดลงได้เป็นช่วงๆ การจัดวงจรแบบนี้มีความเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟฟ้าต่ำ เพราะเมื่อเกิดลัดวงจรในสายป้อนประธานจะทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟทั้งหมดนอกจากจุดลัดวงจรจะกำจัดออกจากระบบด้วยฟิวส์หรือสวิตช์ตัดตอนแยกจุดลัดวงจรออกเท่านั้นที่มีไฟใช้ เนื่องจากการจัดวงจรของระบบป้อนปฐมภูมิแบบเรเดียลธรรมดาที่มีข้อเสียหลายประการจึงได้มีการพัฒนาการจัดวงจรเรเดียลแบบอื่นๆ ดังนี้ วงจรแบบเรเดียลเชื่อมโยงวงจรแบบเรเดียลศูนย์กลางโหลด และวงจรแบบเรเดียลแยกเฟส

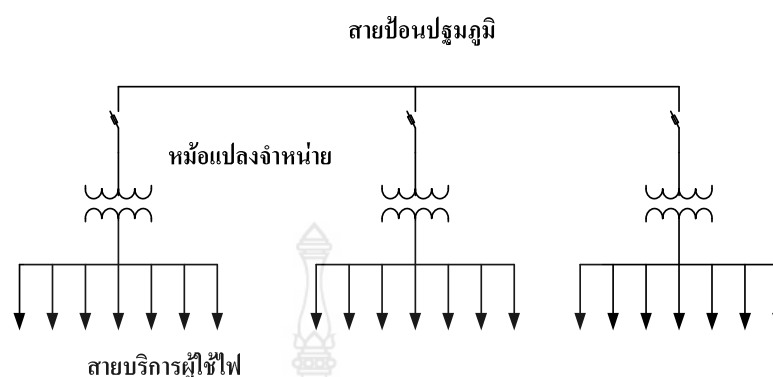
2.1.5.2 การจัดวงจรแบบลูปรเดียล สายป้อนจะเริ่มจากสถานีไฟฟ้าจ่ายจำหน่ายวนรอบผ่านบริเวณโหลดหนาแน่น และวนกลับไปหาสถานีไฟฟ้าจ่ายโดยใช้สายกิ่งหรือสายป้อนย่อยแยกออกจากลูปรประธานเพื่อจ่ายให้โหลดในพื้นที่นั้นๆ เบรกเกอร์จะใช้สองชุดก็ได้ วงจรลูปรอาจจ่ายไฟโดยที่สวิตช์ตัดตอนหรือเบรกเกอร์ตัดตอนในเวลาปกติเปิดวงจรหรือปิดวงจรอยู่ก็ได้ ความแตกต่างระหว่างระบบที่มีสวิตช์ตัดตอนหรือเบรกเกอร์ตัดตอนปิดวงจรอยู่กับแบบที่เปิดวงจรก็คือความมั่นคงและความเชื่อถือได้ในการจ่ายไฟต่างกัน ระบบที่มีสวิตช์ตัดตอนหรือเบรกเกอร์ตัดตอนปิดวงจรเวลาปกตินั้นจะให้แรงดันไฟฟ้าแรงกวลขึ้นและความสูญเสียต่ำ

2.1.5.3 การจัดวงจรแบบเน็ตเวิร์ก คือใช้สายป้อนปฐมภูมิเป็นสายเชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้าจ่ายจำหน่ายแม้จะมีการใช้งานแต่ไม่ค่อยนิยมกับระบบนี้เท่าไร เหตุผลประการแรกคือ ระบบเน็ตเวิร์กไม่ได้ให้ความเชื่อถือได้ในการจ่ายโหลดสูงกว่าแบบเรเดียลหรือลูปรที่เงินลงทุนเท่ากัน และประการที่สองคือ การออกแบบและการทำงานของระบบเน็ตเวิร์กยุ่งยากกว่าแบบเรเดียลหรือลูปรอย่างไรก็ตามวงจรเน็ตเวิร์กที่ใช้ตามชานเมืองประหยัดกว่าระบบเรเดียลเมื่อคิดจำนวนการติดตั้ง ระบบเน็ตเวิร์กนี้ใช้สายส่งย่อยสองวงจร หรือมากกว่าเพื่อจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟได้อย่างเชื่อถือได้เพราะว่าหากสายส่งย่อยใดไม่สามารถจ่ายไฟมาได้ ผู้ใช้ไฟก็ยังสามารถได้รับไฟจากสายส่งย่อยอื่น จำนวนของวงจรสายส่งย่อยเพื่อจ่ายโหลดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งย่อย และจำนวนขนาดอัตราของหม้อแปลงที่ใช้ในเน็ตเวิร์ก

2.1.6 ระบบสายป้อนทุติยภูมิ

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

ระบบสายป้อนทุติยภูมิสำหรับผู้อยู่อาศัยและบริเวณอาคารพาณิชย์ขนาดเล็กแสดงในรูปที่ 2.4 หม้อแปลงจำหน่ายจะแปลงแรงดันไฟฟ้าของสายป้อนปฐมภูมิให้ต่ำลงและวงจรทุติยภูมิออกจากหม้อแปลงจำหน่ายและจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟในกรณีต่างๆ ระบบนี้ส่วนมากเป็นเฟสเดียวยกเว้นบริเวณอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์ ระบบทุติยภูมิสามเฟสใช้กับบริเวณผู้อยู่อาศัยและบริเวณที่ผู้ใช้ไฟหนาแน่นก็ต่อเมื่อมีโหลดประเภทอุตสาหกรรมหรืออาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่รวมอยู่อาศัยในพื้นที่นั้น



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

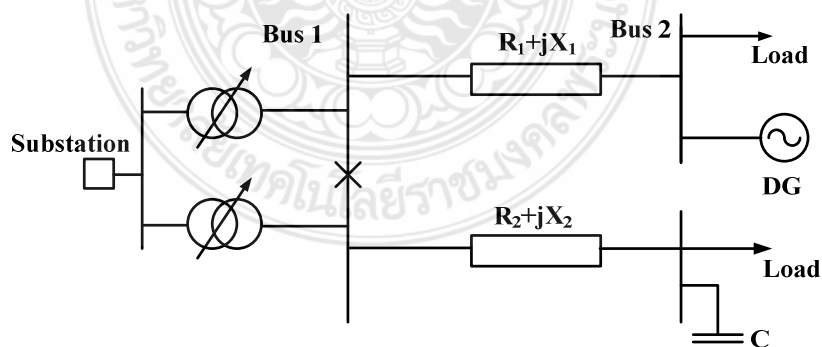
การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิง เช่น กากหรือเศษวัสดุเหลือใช้ในการเกษตร หรือกากจากการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ขยะมูลฝอยและไม้จากการปลูกป่าเป็นเชื้อเพลิง

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

ประโยชน์ที่ได้รับจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ลดความสูญเสียในสายไฟฟ้า เนื่องจากไม่ต้องส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไประยะทางไกลๆ เพราะแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีขนาดเล็กสามารถติดตั้งใกล้แหล่งที่มีผู้ใช้ไฟฟ้าหนาแน่นได้ แรงดันไฟฟ้าดีขึ้นเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกในสายไฟฟ้าน้อยลงแล้วระบบการผลิตอยู่ใกล้กับภาระทางไฟฟ้า (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 ฮาร์มอนิก ผู้ผลิตไฟฟ้าจะต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้าในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายผิดเพี้ยนมากเกินไป ปริมาณความผิดเพี้ยนดังกล่าววัดที่จุดต่อร่วม จะต้องไม่เกินค่าที่กำหนดตามข้อกำหนดเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้า (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 จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบแต่ดึงกำลังไฟฟ้านี้ออกจากระบบ ส่วนแบบ synchronous generator สามารถใช้เป็น voltage regulator ได้ เมื่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวหลุดออกจากระบบจะเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าไม่คงที่และส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแรงดันไฟฟ้า ระบบจำหน่ายแบบเรเดียล (ที่ไม่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว) จะมีระดับแรงดันที่ลดลงเรื่อยๆ จากสถานีไฟฟ้าย่อยต้นทางการควบคุมระดับแรงดัน ใช้คาปาซิเตอร์ หรือการเปลี่ยนค่า tap ของหม้อแปลง

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

2.2.3.4 ผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน การมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในระบบทั้งขนาดกำลังไฟฟ้าในสายป้อน และทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน ในกรณีที่ย้ายแต่กำลังไฟฟ้าจริงอยู่ด้านท้ายของคาปาซิเตอร์ แรงดันปลายทางมีค่าสูงขึ้น การสับคาปาซิเตอร์เข้าในระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้านั้นอาจทำให้มีแรงดันที่ปลายทางสูงเกิน และเมื่อเชื่อมต่อในระบบจำหน่ายต้องปรับตั้งค่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันให้เหมาะสมกับการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอาจทำให้เกิดระดับแรงดันสูงเกินไปโดยเฉพาะถ้าติดตั้งอยู่ด้านท้ายของหม้อแปลง

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 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ของการไฟฟ้าจะรับหน้าที่ในการรักษาเสถียรภาพของระบบทั้งในสภาวะคงตัวและสภาวะทรานเซียนท์ ถ้าระดับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว penetration มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโหลดในระบบ จะถูกคิดเป็นโหลดที่มีค่าเป็นลบ (negative load) แต่เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าปริมาณมากขึ้น (high penetration) จะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ของระบบไฟฟ้าโดยรวมได้

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 ระบบได้อย่างไม่ยุ่งยากมากอันเนื่องมาจากหลักการและกลไกการทำงานของ TS ที่ไม่ซับซ้อนนั่นเองซึ่งทำให้ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งานของ TS ค่อนข้างที่จะสะดวกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ยกตัวอย่าง เช่น วิธีการอบอ่อนจำลอง (simulated annealing) จีโนมติกอัลกอริทึม (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 (จุดประสงค์หลักในที่นี้ก็คือการหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่นนั่นเอง) พิจารณางค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบทั่วไป กำหนดให้พื้นผิวในรูปเป็นผลที่ได้จากค่าการประเมิน (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 องค์ประกอบพื้นฐานของการค้นหาคำตอบแบบตาบอด

TS เพิ่มเติมขั้นตอนและเงื่อนไขในการเดินที่นอกเหนือไปจากการค้นหาคำตอบพื้นที่รอบข้าง โดยมีจุดประสงค์หลักคือ

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

2.3.1.2 หลีกเลี่ยงเส้นทางการค้นหาคำตอบที่ทำให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ (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) การใช้เงื่อนไขของความคงอยู่นี้เป็นการติดตามการค้นหาคำตอบในช่วงเวลาที่ผ่านไป เมื่อคำตอบหนึ่งถูกค้นพบแล้ว การเดินที่นำไปสู่คำตอบนั้นจะถูกตั้งเป็นสถานะต้องห้าม คำตอบที่ถูกค้นพบด้วยการเดินนี้จะถือเป็นคำตอบล่าสุดและจะไม่ถูกค้นอีกภายในระยะเวลาหนึ่ง (เนื่องจากการเดินที่นำไปสู่คำตอบนี้ถูกห้ามใช้อีกในขณะที่ยังมีสถานะต้องห้ามอยู่) หลังจากระยะเวลาที่กำหนดผ่านไป สถานะการเดินนั้นก็จะถูกตั้งค่ากลับสู่สภาวะปกติ ดังนั้นแล้วภายหลังจากการเดินไปยังคำตอบหนึ่งๆ 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 เนื่องจากเงื่อนไขเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่งไม่เพียงพอ 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 ยังมีองค์ประกอบอื่นที่เป็นส่วนสำคัญในการออกแบบการค้นหาแบบตราบูนนั้นก็คือ เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (aspiration criteria) ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สามารถทำให้เกิดการเดินไปในทิศทางที่ต้องการ ถึงแม้ว่าการเดินนั้นจะมีสถานะต้องห้าม โดยที่การเดินดังกล่าวจะถูกอนุญาตก็ต่อเมื่อคำตอบที่ได้ดีกว่าทุกคำตอบที่เคยค้นพบมา (TS จะต้องทำการเก็บบันทึกผลการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเอาไว้เพื่อใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข

วิธีการค้นหาแบบตราบูนประกอบด้วยรูปแบบการค้นหาคำตอบ 2 รูปแบบที่สำคัญ คือการค้นหาคำตอบโดยวิธีการใช้หน่วยความจำระยะสั้น หมายถึง การค้นหาที่จดจำอดีตหรือประสบการณ์การค้นหาที่ผ่านมาเพียงระยะสั้นและการค้นหาคำตอบโดยวิธีการใช้หน่วยความจำระยะยาว หมายถึง การค้นหาที่จดจำอดีตหรือประสบการณ์การค้นหาที่ผ่านมาเพื่อช่วยให้การค้นหาคำตอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.3.2 รายละเอียดโครงสร้างของ TS

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

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 ซึ่งทำให้ขบวนการค้นหาคำตอบหยุดชะงักไป

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 เมื่อเกิดการเดินขึ้นในทิศทางใดทิศทางหนึ่งแล้วไม่ควรจะต้องเดินย้อนกลับไปทิศทางเดิมอีก เพราะดูเหมือนว่าคำตอบของทางเดินที่ผ่านมาจะไม่ใช่คำตอบที่ต้องการ ดังนั้นทุกครั้งที่มีการเดินใดๆเกิดขึ้น การเดินย้อนกลับนั้นจะถูกตั้งค่าสถานะเป็นต้องห้ามในการเดินครั้งถัดไป

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

2.3.2.6 จำนวนครั้งสำหรับเงื่อนไขของความซ้ำซาก (frequency) เงื่อนไขนี้จะกำหนดจำนวนครั้งสูงสุดของการเดินรูปแบบหนึ่งๆ ไม่ให้ถูกเรียกใช้บ่อยเกินไปอันจะก่อให้เกิดการวนรอบอยู่กับที่ได้เมื่อการเดินนั้นๆ ถูกเรียกใช้จนเกิดจำนวนครั้งที่กำหนดไว้การเดินนั้นก็จะมีสถานะต้องห้ามอยู่จนกระทั่งระยะเวลาความคงอยู่ของสถานะต้องห้ามนั้นหมดไป 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 อยู่ในขอบเขตการค้นหาหลายๆหรือคำตอบเดิมที่มีอยู่ การกำหนดรูปแบบการเป็นตาบอดนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละปัญหา ไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน เช่นอาจถูกกำหนดไว้ว่าห้ามกลับมายังตำแหน่งเดิมเป็นต้น

2.3.3.3 รายการตาบอด หมายถึง ตัวกำหนดจำนวนครั้งที่ทำซ้ำที่ต้องการห้ามไม่ให้มีการกลับมาที่เดิม เพราะการจะกำหนดรูปแบบการเป็นตาบอดว่าห้ามไม่ให้มีการกลับมาตำแหน่งเดิมนั้น อาจที่จะพลาดโอกาสการหาคำตอบที่ดีก็ได้ การกำหนดรายการตาบอดจึงเป็นการกำหนดว่าจะห้ามเงื่อนไขของรูปแบบการเป็นตาบอดอยู่นานเท่าไร การกำหนดจำนวนการเป็นตาบอดไม่มีเกณฑ์ตายตัวว่าจะจะเป็นเท่าไร ซึ่งการกำหนดสูงเกินไปก็จะทำให้พลาดโอกาสที่จะได้คำตอบที่ดีได้ ในขณะที่เดียวกันถ้ากำหนดน้อยเกินไป อาจจะทำให้ได้คำตอบที่ย้อนกลับหรือการวนรอบในขอบเขตของคำตอบหลายๆ ได้

2.3.3.4 เกณฑ์ความปรารถนา เป็นรูปแบบการควบคุมที่ช่วยในการหาคำตอบที่ดีเป็นไปด้วยดี และรวดเร็วมากขึ้น โดยกำหนดเป็นเงื่อนไขสำหรับการค้นหาที่ถูกเป็นตราบานั้นสามารถให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเท่าที่เคยได้ตั้งแต่การเริ่มค้นหาจนถึงปัจจุบัน 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] โดยใช้รหัสเกรย์ซึ่งเป็นรหัสคอมพิวเตอร้อีกชนิดหนึ่ง

2.3.4.4 วิธีการคำนวณฟังก์ชันเป้าหมาย คือการนำตัวเลขบิตที่ได้จากการถอดรหัส ที่เป็นรหัสเกรย์แปลงเป็นเลขฐานสองและแปลงมาเป็นฐานสิบ ซึ่งเป็นค่าแต่ละค่าของ x , 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

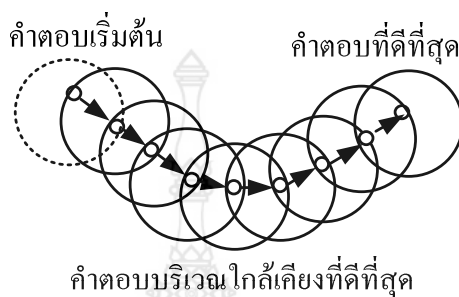
ถ้าไม่เป็นตาบอดให้ $s_{current} = s_{neighbor_best}$ แต่ถ้าเป็นตาบอดต้องผ่านเกณฑ์ความปรารถนาคือจะต้องมีค่าฟังก์ชันเป้าหมายดีกว่าของ f_{best} เดิม แล้วทำการย้ายตำแหน่งโดยกำหนดให้

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

ขั้นตอนที่ 8

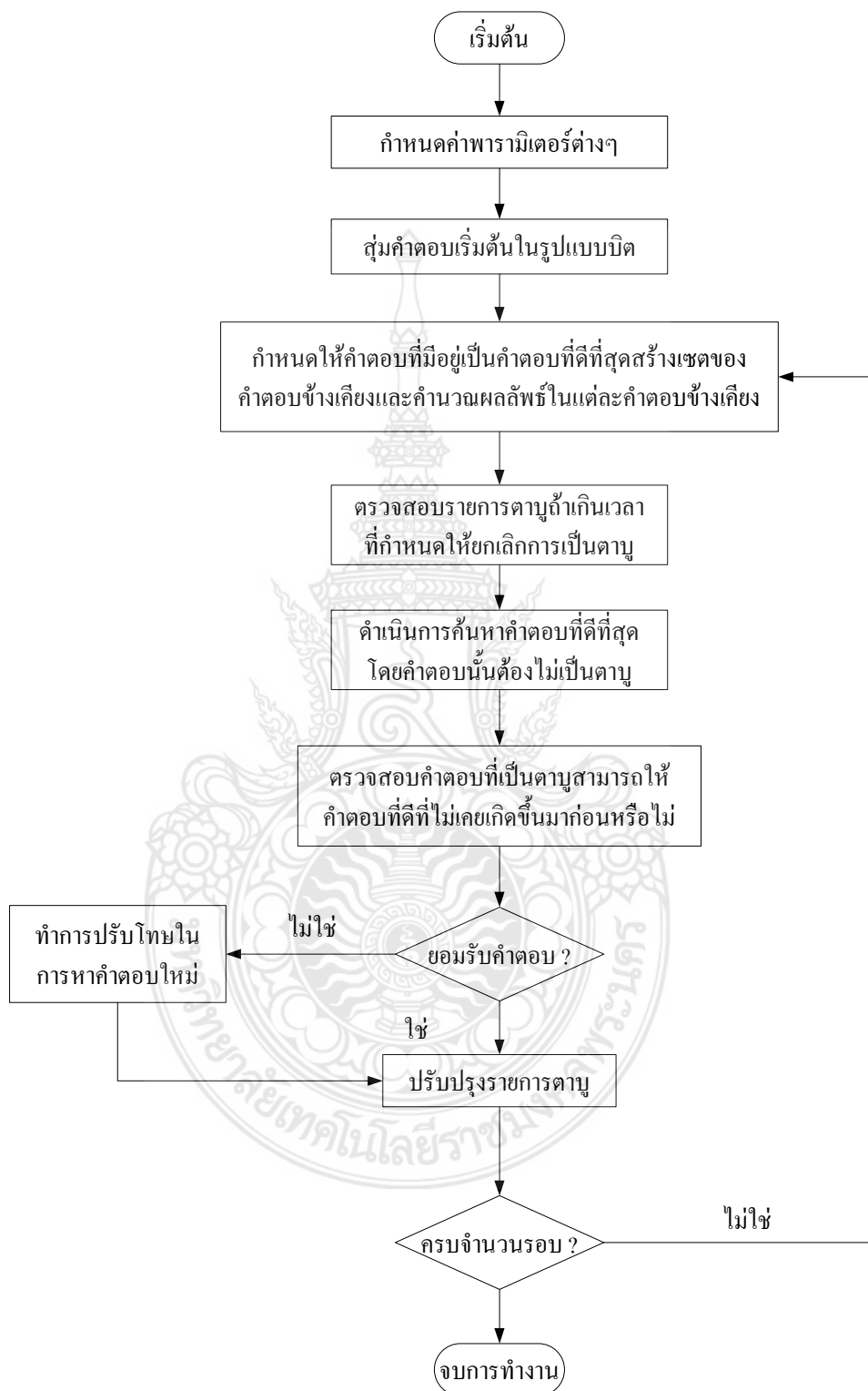
ดำเนินการจบครบรอบจำนวนครั้งสูงสุดที่กำหนดไว้

การเคลื่อนย้ายคำตอบซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับวิธีการค้นหาแบบตาบอด คือ สามารถค้นหาคำตอบหลุดจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ได้ และหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.6 รูปแบบการเคลื่อนย้ายของการค้นหาแบบตาบอด





รูปที่ 2.7 แผนผังวิธีการค้นหาแบบตาม

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

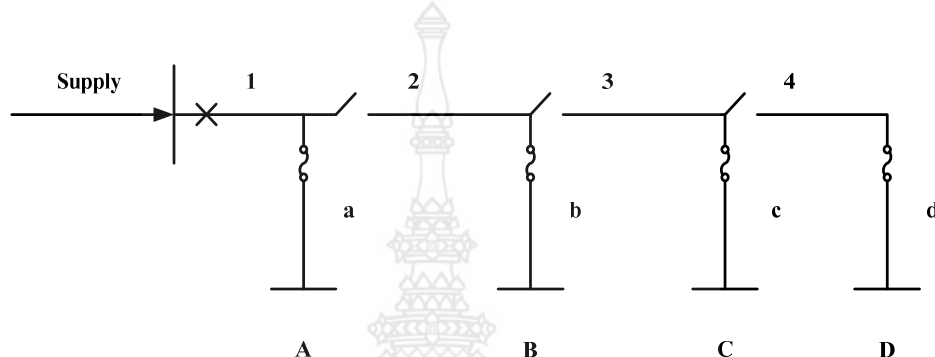
$$U_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad 2.2$$

ระยะเวลาเฉลี่ยที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ คำนวณจาก

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

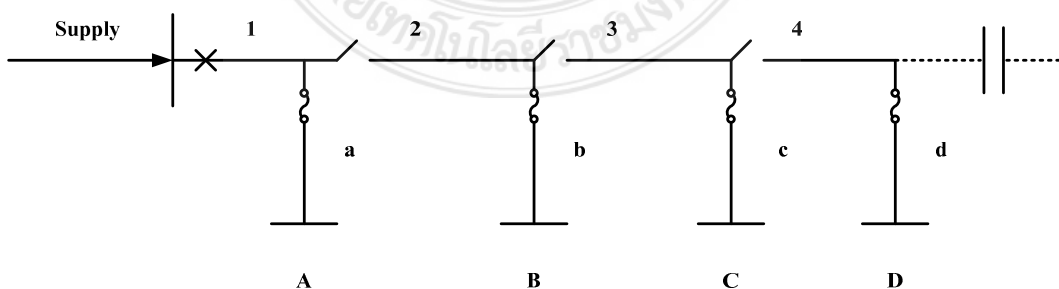
โดยที่ n คือ เหตุการณ์ที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้

รูปที่ 2.8 เป็นกรณีติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันที่จุดโหลดและสวิตช์ตัดตอน เมื่อเกิดฟอลต์ที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของวงจร อุปกรณ์ป้องกันจะทำงานเปิดวงจรของระบบก่อน แล้วสับสวิตช์ตัดตอนแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกแล้วจึงจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบตามเดิม จุดโหลดที่อยู่ก่อนจุดที่เกิดฟอลต์ก็จะได้รับการจ่ายไฟฟ้าตามเดิม ส่วนจุดโหลดที่อยู่หลังจุดเกิดฟอลต์จะเกิดไฟฟ้าดับจนกว่าจะแก้ไขส่วนที่เกิดฟอลต์เสร็จ โดยที่ความเชื่อถือได้ของเบรกเกอร์และฟิวส์เป็น 100%



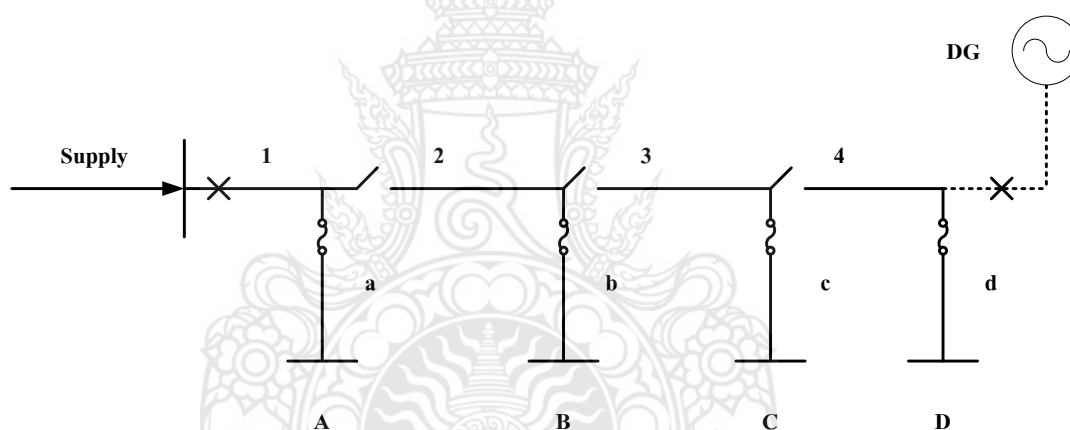
รูปที่ 2.8 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลในกรณีมีสวิตช์ตัดตอนที่สายป้อนและฟิวส์ที่จุดโหลด

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 จุดโหลดที่อยู่ก่อนจุดที่เกิดฟอลต์ก็จะได้รับการจ่ายไฟฟ้าตามเดิม แต่จุดโหลดที่อยู่หลังจุดเกิดฟอลต์จะเกิดไฟฟ้าดับจะเป็นการสับสวิตช์ตัดตอนและเวลาในการจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมาทดแทนเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ แต่ต้องพิจารณาความสำคัญของจุดโหลดที่จ่ายไฟฟ้า โดยจะต้องคำนึงถึงกำลังผลิตพิกัดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่นำมาติดตั้งส่วนจุดโหลดที่ไม่ได้รับการจ่ายไฟฟ้าจะเกิดไฟฟ้าดับจนกว่าจะแก้ไขส่วนที่เกิดฟอลต์เสร็จและระยะเวลาไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์ ตำแหน่งและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังนั้นตำแหน่งและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจึงมีผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบ โดยที่ความเชื่อถือได้ของเบรกเกอร์และฟิวส์เป็น 100%



รูปที่ 2.10 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลในกรณีติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

2.4.2 ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้า

เนื่องจากความพึงพอใจของผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเป็นลูกค้าของการไฟฟ้าแต่ละรายที่ได้รับการบริการที่ดี มีจำนวนครั้งของการเกิดไฟฟ้าดับน้อยที่สุดเป็นเรื่องสำคัญ ดังนั้นในการคำนวณดัชนีความเชื่อถือได้จึงนิยามอ้างอิงผู้ใช้ โดยการให้ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่เกิดไฟฟ้าดับและจำนวนที่ไฟฟ้าดับต่อปีต่อผู้ใช้หนึ่งราย 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 ดัชนีความพร้อมในการจ่ายไฟฟ้า 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 (นาทีก) และ มูลค่าความเสียหาย (\$/kW)				
	1 นาทีก	20 นาทีก	60 นาทีก	240 นาทีก	480 นาทีก
ผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่					
อุตสาหกรรม	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
พาณิชย์	1.625	3.868	9.085	25.16	55.81
กสิกรรม	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	น้อยกว่า 30
กิจการขนาดกลาง	ตั้งแต่ 30 ขึ้นไป แต่ไม่เกิน 1000
กิจการขนาดใหญ่	ตั้งแต่ 1000 ขึ้นไป

จากรายงานผลของการศึกษาอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของสำนักงานคณะกรรมการนโยบาย พลังงานแห่งชาติ (สนพ.) 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

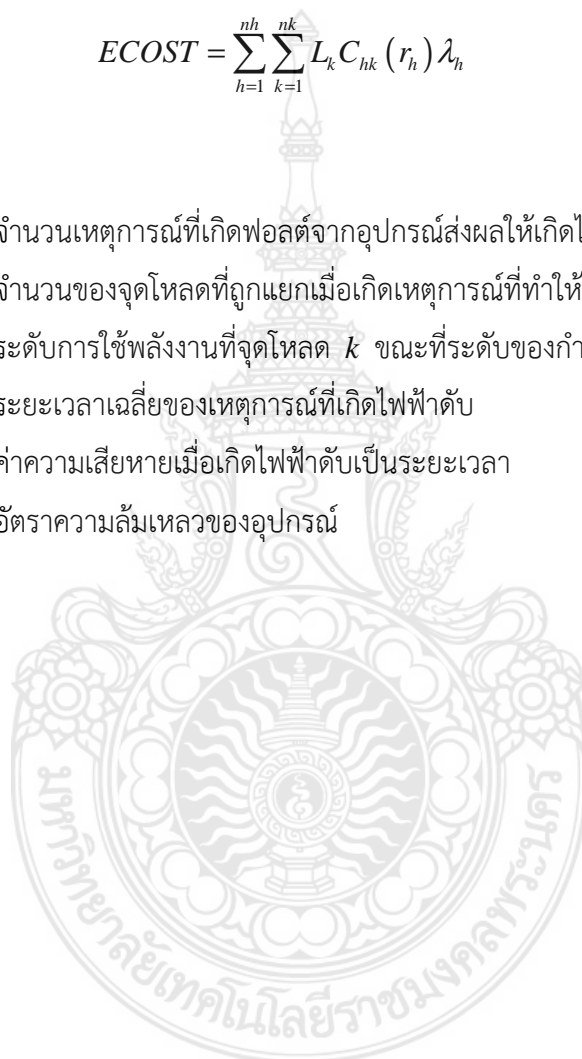
2.4.4 ค่าคาดหวังความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (System Expected Outage Cost to Customers Due to Supply Outage : ECOST)

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 จำนวนของจุดโหลดที่ถูกแยกเมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้ไม่สามารถจ่ายไฟได้
- L_k คือ ระดับการใช้พลังงานที่จุดโหลด k ขณะที่ระดับของกำลังไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟใช้
- r_h คือ ระยะเวลาเฉลี่ยของเหตุการณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับ
- C_{hk} คือ ค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลา
- λ_h คือ อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์



บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 หลักการของการวิเคราะห์ปัญหา

การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะปรับปรุงและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยเมื่อเกิดฟอลต์ในระบบจำหน่ายขึ้นอุปกรณ์ป้องกันในระบบจะทำงานและตัดแหล่งจ่ายไฟฟ้าแยกออกจากระบบเพื่อป้องกันผลกระทบจากการเกิดฟอลต์ และส่งผลกระทบทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าไม่มีไฟฟ้าใช้ ผู้ใช้ไฟฟ้าบางส่วนจะได้รับผลกระทบเป็นเวลานานเนื่องจากต้องรอการซ่อมแซมแก้ไขของพนักงานการไฟฟ้า แต่จะมีผู้ใช้ไฟฟ้าบางส่วนไม่ได้รับผลกระทบจากการเกิดฟอลต์ เนื่องจากมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวติดตั้งอยู่และสามารถเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าได้ โดยขึ้นอยู่กับขนาดและกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและตำแหน่งการติดตั้งกับตำแหน่งของจุดโหลด

3.1.1 ขอบเขตการวิเคราะห์ปัญหา

3.1.1.1 ขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว กำหนดค่าเป็นจำนวนเต็ม และแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทำงานที่กำลังผลิตปกติ

3.1.1.2 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว 1 ตัว สามารถติดตั้งได้ 1 ตำแหน่ง

3.1.1.3 กำหนดจำนวนสูงสุดของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

3.1.1.4 กำหนดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวรวมสูงสุด

3.1.1.5 โดยพิจารณาเฉพาะการจ่ายโหลดจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

3.1.1.6 การวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยเมื่อเกิดเหตุการณ์ฟอลต์ขึ้นในระบบไฟฟ้าจะพิจารณาการปลดจุดโหลด โดยพนักงานการไฟฟ้าในการสับเซอร์กิตเบรกเกอร์และสวิตช์ตัดตอนเท่านั้น

3.1.1.7 การพิจารณาความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะไม่คำนึงถึงผลกระทบของลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานไม่ได้ตามเงื่อนไขเดิม เมื่อมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

3.1.1.8 พิจารณาระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบว่าสามารถเลือกตำแหน่ง จำนวนและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

ปัญหาการหาตำแหน่ง จำนวนและขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสม เพื่อประเมินดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยอยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดจำนวนสูงสุดของการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและค่ากำลังการผลิตรวมสูงสุด

3.1.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

3.1.2.1 ค่าคาดหวังความเสียหายทางเศรษฐกิจเนื่องจากการเกิดไฟฟ้าดับมีค่าต่ำที่สุด

$$\text{Minimize} \quad ECOST = \sum_{h=1}^{nh} \sum_{k=1}^{nh} L_k C_{hk} (r_h) \lambda_h \quad 3.1$$

โดยที่

n_i	คือ	จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดฟอลต์ส่งผลให้เกิดไฟดับ
n_h	คือ	จำนวนจุดโหลดที่ถูกแยกเมื่อไม่สามารถจ่ายไฟได้
$L_{a(i)}$	คือ	ค่าเฉลี่ยระดับการใช้พลังงานที่จุดโหลด k
r_h	คือ	ระยะเวลาเฉลี่ยของเหตุการณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับ
C_{hi}	คือ	ค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟดับ (\$/kW) ของลูกค้า
λ_h	คือ	อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์

3.1.3 เงื่อนไขบังคับ

3.1.3.1 สมการการไหลของกำลังไฟฟ้า

$$P_k = \sum_{i=1}^{N_B} |Y_{ik} V_i V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad 3.2$$

$$Q_k = -\sum_{i=1}^{N_B} |Y_{ik} V_i V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad 3.3$$

3.1.3.2 ค่าของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสจะต้องอยู่ในขีดจำกัดที่กำหนดหลังจากเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้าในระบบ

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad 3.4$$

3.1.3.3 ค่าขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแต่ละสายป้อนต้องอยู่ในขีดจำกัดที่กำหนดหลังจากเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้าในระบบ

$$I_l \leq I_l^{\max}; l \in \{1, 2, \dots, N_l\} \quad 3.5$$

3.1.3.4 จำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่จะนำมาติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

$$\sum_{i=1}^{nbus} \sum_{j=1}^N e_{ji} \leq nDG \quad 3.6$$

กำหนด 3.1.3.4 กำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะต้องไม่เกินกำลังการผลิตรวมที่

$$\sum_{i=1}^{nbus} \sum_{j=1}^N C_j \cdot e_{ji} \leq G \quad 3.7$$

3.1.3.5 ตัวแปรการตัดสินใจในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยต้องมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

$$e_{ji} \in \{0,1\} \quad 3.8$$

3.1.3.6 แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถติดตั้งได้ตำแหน่งละหนึ่งตัว

$$\sum_{j=1}^{N_C} e_{jk} \leq 1 \quad k \in \{1,2,\dots,N_B\} \quad 3.9$$

กำหนดให้

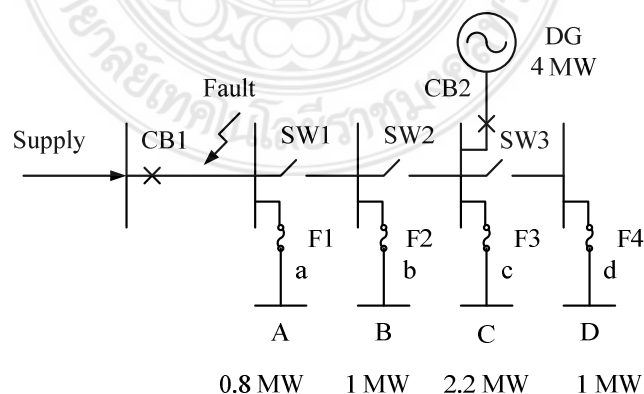
n_k	คือ	จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดฟอลต์จากอุปกรณ์ส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับ
n_h	คือ	จำนวนจุดโหลดที่ถูกแยกเมื่อเกิดเหตุการณ์ไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้
L_k	คือ	ระดับการใช้พลังงานที่จุดโหลด k ที่ระดับของกำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟใช้
r_h	คือ	ระยะเวลาเฉลี่ยของเหตุการณ์ที่เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ
C_{hk}	คือ	ค่าความเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลา
λ_h	คือ	อัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์
e_{ji}	คือ	ตัวแปรตัดสินใจสถานะตำแหน่งการติดตั้งบัส i และกำลังการผลิตที่ j
V_i	คือ	ขนาดแรงดันที่บัส i
V_i^{\max}	คือ	ขนาดแรงดันสูงสุดที่บัส i

V_i^{\min}	คือ	ขนาดแรงดันต่ำสุดที่บัส i
I_l	คือ	ขนาดกระแสที่ไหลผ่านสายป้อน
I_l^{\max}	คือ	ขนาดกระแสสูงสุดที่ไหลผ่านสายป้อน
C_j	คือ	ขนาดกำลังการผลิตที่ j ของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว
G	คือ	ขนาดกำลังการผลิตรวมสูงสุดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวทั้งระบบ
$nbus$	คือ	จำนวนบัสของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
nDG	คือ	จำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวของระบบจำหน่าย
N	คือ	จำนวนขนาดกำลังผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

หลักการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยพิจารณาการปลดโหลดเมื่อมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ดังต่อไปนี้

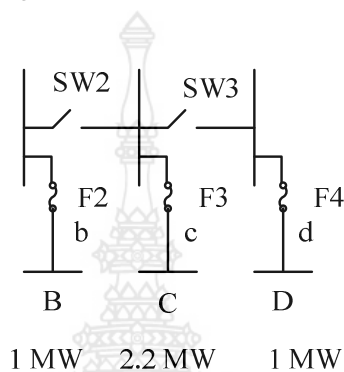
จากรูปที่ 3.1 แสดงระบบจำหน่ายไฟฟ้า 5 บัส 4 สายป้อนหลัก ได้แก่ 1, 2, 3, 4 และ 4 สายป้อนย่อย ได้แก่ a, b, c, d

การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่บัส 4 ขนาดกำลังการผลิต 4 MW มีจุดโหลดทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ จุดโหลด A เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทบ้านพักอาศัยมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.8 MW จุดโหลด B เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทหน่วยงานราชการมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 MW จุดโหลด C เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทสำนักงานเอกชน มีความต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 2.2 MW จุดโหลด D เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทพาณิชย์ ความต้องการกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 MW มีอุปกรณ์ป้องกัน ได้แก่ เบรกเกอร์โดยติดตั้งที่ต้นทางสายป้อนและติดตั้งที่หน้าแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว มีสวิตช์ตัดตอนที่ 1, 2 และ 3 ติดตั้งบริเวณสายป้อนหลักที่ 2, 3, 4 ตามลำดับ และมีฟิวส์ที่ 1, 2, 3 และ 4 ติดตั้งบริเวณสายป้อนย่อยที่ a, b, c และ d ตามลำดับ

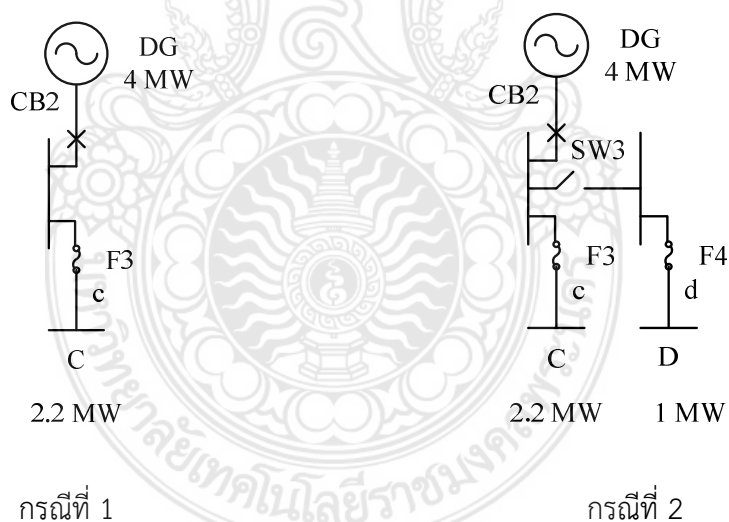


รูปที่ 3.1 การเกิดฟอลต์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

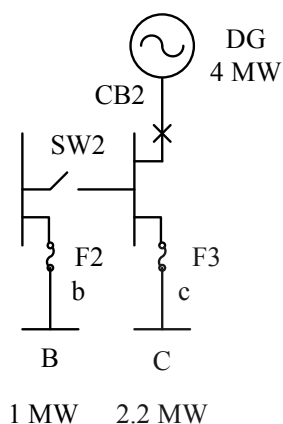
เมื่อเกิดฟอลต์ขึ้นที่สายป้อนหลักที่ 1 เบรกเกอร์ที่ติดตั้งต้นทางสายป้อนและเบรกเกอร์ที่ติดตั้งหน้าแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจะตัดออกจากระบบทำให้แหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้ส่งผลให้ทุกจุดโหลดเกิดอัตราการล้มเหลว จากนั้นสับสวิชต์ตัดตอนที่ 1 โดยแยกส่วนที่เกิดฟอลต์ออกจากระบบเพื่อทำการซ่อมแซมสายป้อนหลักที่ 1 ส่วนจุดโหลดที่ไม่ได้รับผลกระทบโดยตรงได้แก่ จุดโหลด B, C และ D สามารถนำมาวิเคราะห์ต่อ ในรูปที่ 3.2



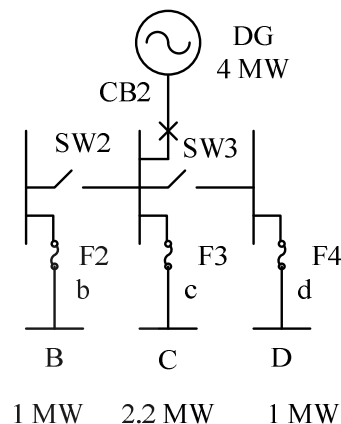
รูปที่ 3.2 จุดโหลด B, C และ D ที่แยกออกจากตำแหน่งที่เกิดฟอลต์



รูปที่ 3.3 กรณีที่เป็นไปได้ที่แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า



กรณี 3



กรณี 4

รูปที่ 3.3 (ต่อ) กรณีที่เป็นไปได้ที่แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.3 เมื่อวิเคราะห์ที่ตำแหน่งจุดโหลด B, C และ D โดยที่แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่จะเชื่อมต่อกลับเข้าสู่ระบบจะสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับจุดโหลดใดได้บ้าง จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าอาจเป็นไปได้ 4 กรณี

โดยทำการพิจารณาทั้ง 4 กรณีจากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจากขนาดกำลังผลิตพิกัดแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่กำหนดว่าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอกับความต้องการของแต่ละจุดโหลดหรือไม่ พบว่ากรณีที่ 1, 2 และ 3 สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอ ส่วนกรณีที่ 4 มีความต้องการกำลังไฟฟ้าทั้ง 3 จุดโหลดเท่ากับ 4.2 MW สูงกว่าขนาดกำลังผลิตพิกัดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จึงไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างเพียงพอ จากนั้นทำการคำนวณหาค่าที่ดีที่สุดของทั้ง 3 กรณี ว่ากรณีไหนให้ค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับต่ำที่สุด พบว่ากรณีที่ 2 ให้ค่าที่เหมาะสมและดีที่สุด เนื่องจากการเปรียบเทียบค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของจุดโหลด D เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทพาณิชย์สูงกว่าค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับของจุดโหลด B เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทหน่วยงานราชการ เมื่อกรณีที่ 2 เป็นค่าที่เหมาะสมและดีที่สุดจึงทำการสับสวิทช์ตัดตอนที่ 2 เพื่อแยกจุดโหลด B ออกไป ส่วนจุดโหลด C และ D จะได้รับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

จากการคำนวณดังกล่าวจะได้ว่าจุดโหลด A และ B จะได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับนานเป็นระยะเวลาของการซ่อมแซมสายป้อนที่ 1 ส่วนจุดโหลด C และ D จะได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเป็นระยะเวลาของการสับสวิทช์ตัดตอนที่ 2 เท่านั้น จากการวิเคราะห์ค่าความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยการติดตั้งมีตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตที่เหมาะสม จะสามารถปรับปรุงและเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

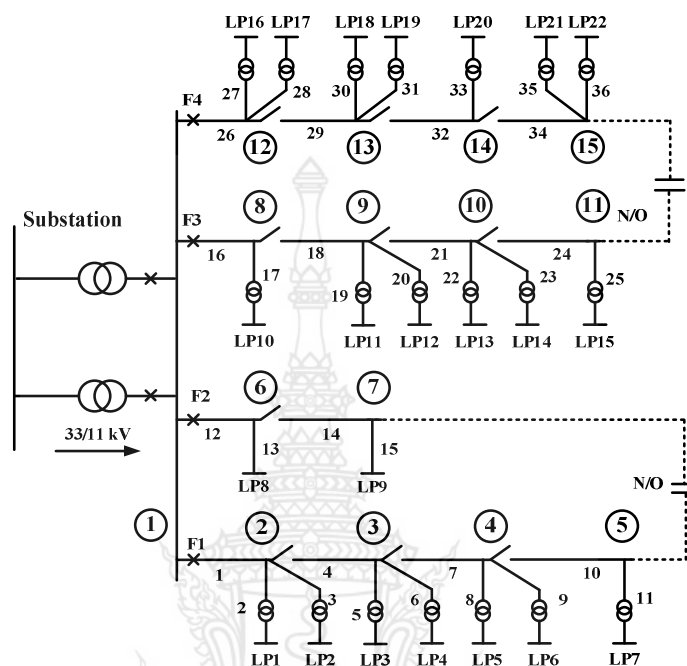
3.2 ขั้นตอนการแก้ปัญหาโดยวิธีการค้นหาแบบตาม

การแก้ปัญหาในการหาค่าที่ดีที่สุดในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อการประเมินค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะใช้ e_{ji} เป็นตัวแปรในการตัดสินใจสำหรับตำแหน่งการติดตั้งบัส i และกำลังการผลิตที่ j ของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และการหาตำแหน่ง จำนวน และขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสม เพื่อการลดค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 : กำหนดค่าพารามิเตอร์ของวิธีการค้นหาแบบตามและป้อนข้อมูลของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับข้อมูลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่จะทำการทดสอบ
- ขั้นตอนที่ 2 : ดำเนินการทดสอบโดยการสุ่มตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตเริ่มต้น จากตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตทั้งหมด
- ขั้นตอนที่ 3 : กำหนดตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตเริ่มต้นเป็นคำตอบที่ดีที่สุด
- ขั้นตอนที่ 4 : หาค่า ECOST สมการที่ (8) พิจารณาการปลดโหลด เมื่อติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ภายใต้เงื่อนไขบังคับของสมการที่ (9) – (16) จากข้อมูลของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในขั้นตอนที่ 1 และกำหนดให้ค่า ECOST เป็นค่าที่ดีที่สุด
- ขั้นตอนที่ 5 : นับจำนวนครั้งในการค้นหาและดำเนินการค้นหาตำแหน่งและขนาดกำลังการผลิตบริเวณใกล้เคียงจากคำตอบปัจจุบัน
- ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณหาค่า ECOST โดยพิจารณาการปลดโหลด เมื่อมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวของสมาชิกแต่ละตัวของคำตอบบริเวณใกล้เคียง แล้วเลือกสมาชิกที่ทำให้ค่า ECOST มีค่าต่ำที่สุด
- ขั้นตอนที่ 7 : ตรวจสอบรายการตามว่ามีสถานะเป็นตามหรือไม่
- ขั้นตอนที่ 8 : ถ้าไม่เป็นตามให้คำตอบบริเวณใกล้เคียงดังกล่าวเป็นคำตอบปัจจุบัน แต่ถ้าเป็นตามต้องผ่านเกณฑ์ความปรารถนาคือต้องมีค่า ECOST ต่ำกว่าค่า ECOST เดิม แล้วทำการย้ายตำแหน่งโดยกำหนดให้ คำตอบบริเวณใกล้เคียงเป็นคำตอบปัจจุบัน และปรับปรุงรายการตามให้เป็นปัจจุบันและเพิ่มจำนวนครั้งในการค้นหา
- ขั้นตอนที่ 9 : ดำเนินการค้นหาจนครบรอบจำนวนครั้งสูงสุดที่กำหนดไว้

การพิจารณาการหาค่าที่เหมาะสมและดีที่สุดของในกรณีที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายคือผลของ ECOST รวมทั้งค่าของดัชนี SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS และ AENS โดยจะบ่งบอกความเชื่อถือได้ของระบบ จากการวิเคราะห์ซึ่งจะบอกความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อทราบว่าจุดใดในระบบที่จะต้องปรับปรุงแก้ไข ดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้าที่สำคัญและสามารถแทนพฤติกรรมของระบบได้ จากตารางข้อมูลค่าความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับพบว่าขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับและชนิดของผู้ใช้ไฟฟ้า และขึ้นอยู่กับโอกาสในการเกิดฟอลต์ของอุปกรณ์ ปริมาณของโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟฟ้าดับ โดยนำมาเป็นเงื่อนไขและกำหนดจำนวนและกำลังการผลิตรวมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ต้องการได้

3.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2



รูปที่ 3.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบของ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 ประกอบด้วย 36 สายป้อน 22 จุดโหลด การพัฒนาขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบตาข่ายโดยการทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบของ Roy Billinton Test System (RTBS) บัส 2 ซึ่งประกอบด้วย 15 บัส 36 สายป้อน 22 จุดโหลด ในระบบที่มีอุปกรณ์หลักต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบทั่วไปของระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการกำหนดค่าของระบบแสดงรูปที่ 3.4 โดยทำการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเพื่อศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าสูญเสียและความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า การค้นหาซ้ำสูงสุดของวิธีการค้นหาแบบตาข่าย คือ 100 รอบ กำหนดให้ใช้โหลดเฉลี่ยและค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดแต่ละบัส 0.95 p.u. และ 1.05 p.u. ตามลำดับ และขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าคือ 500 kW-2,000 kW โดยการพิจารณาจะไม่คำนึงถึงผลกระทบของลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานไม่ได้ เมื่อมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

3.4 กรณีศึกษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2

เพื่อศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าสูญเสียและความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า การค้นหาค่าสูงสุดของวิธีการค้นหาแบบตาบอด คือ 100 รอบ กำหนดให้ใช้โหลดเฉลี่ยและค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดแต่ละบัส $0.95 \text{ p.u.} \leq V \leq 1.05 \text{ p.u.}$ ตามลำดับ กำหนดค่ากำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่จะทำการติดตั้ง 5 ค่า คือ 500 kW, 1000 kW, 1500 kW, 2000 kW, 2500 kW เลือกตำแหน่งติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวตั้งแต่บัสที่ 1 ถึงบัสที่ 15 การพิจารณาจะไม่คำนึงถึงผลกระทบของลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานไม่ได้ เมื่อมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ความเชื่อถือได้ตำแหน่งที่เหมาะสมและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว จากการทดสอบในตารางที่ 4-6 และผลจากกรณีศึกษาของดัชนีความเชื่อถือในตารางที่ 4-7 ตามลำดับ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดและดีที่สุดในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายเพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายโดยวิธีการค้นหาแบบตาบอด

การทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 แบ่งเป็น 5 กรณีโดยการกำหนดจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ติดตั้งในระบบ และกำหนดกำลังรวมการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวดังต่อไปนี้

- กรณีที่ 1 กรณีฐานไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย
- กรณีที่ 2 กำหนดจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ติดตั้งในระบบเท่ากับ 1 เครื่อง
- กรณีที่ 3 กำหนดจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ติดตั้งในระบบเท่ากับ 2 เครื่อง
- กรณีที่ 4 กำหนดจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ติดตั้งในระบบเท่ากับ 3 เครื่อง
- กรณีที่ 5 กำหนดจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ติดตั้งในระบบเท่ากับ 4 เครื่อง

ตารางที่ 3.1 จำนวน DG ที่ติดตั้งและกำลังผลิตรวมเมื่อติดตั้ง DG เข้าในระบบ

กรณี	จำนวน DG ที่ติดตั้งในระบบ n_{DG} (unit)	กำลังผลิตรวมเมื่อติดตั้ง DG G (kW)
1	-	-
2	1	≤ 1000
3	2	≤ 2000
4	3	≤ 3000
5	4	≤ 4000

จากตารางที่ 3.1 แสดงการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบโดยกำหนดกรณีที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ จำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่า 0, 1, 2, 3 และ 4 โดยที่กรณีที่ 1.1 ไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว และกำลังผลิตรวมเมื่อติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเท่ากับ 0, ≤ 1000 , ≤ 2000 , ≤ 3000 และ ≤ 4000 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 โหลดสูงสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2

ชนิดของผู้ใช้ไฟฟ้า	โหลดสูงสุด (MW)
บ้านพักอาศัย	7.25
ผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก	3.50
หน่วยงานราชการ	5.55
พาณิชย์	3.70
รวม	20.00

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 เป็นระบบที่ถูกจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งเดียวกัน โดยมีสายป้อนที่ระดับ 11 kV ทั้งหมดจะถูกพิจารณาเป็นสายอากาศและข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละชนิดและปริมาณการใช้ตามแต่ละชนิดของผู้ใช้ไฟฟ้า แสดงไว้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลเกี่ยวกับผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2

จำนวนจุดโหลด	จุดโหลด	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้า	ชนิดของผู้ใช้ไฟฟ้า	ความต้องการกำลังไฟฟ้า	
				โหลดเฉลี่ย (MW)	โหลดสูงสุด (MW)
5	1, 2, 3, 10, 11	210	บ้านพักอาศัย	0.535	0.8668
4	12, 17, 18, 19	200	บ้านพักอาศัย	0.45	0.7291
1	8	1	ผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก	1.00	1.6279
1	9	1	ผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก	1.15	1.8721
6	4, 5, 13, 14, 20, 21	1	หน่วยงานราชการ	0.566	0.9167
5	6, 7, 15, 16, 22	10	พาณิชย์	0.454	0.7500
รวม		1908		12.291	20.00

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลของสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2

หมายเลขสาย	ความยาว (กม.)	ชนิดของสาย
2, 6, 10, 14, 17, 21, 25, 28, 30, 34	0.60	AAC 70
1, 4, 7, 9, 12, 16, 19, 22, 24, 27, 29, 32, 35	0.75	AAC 70
3, 5, 11, 13, 15, 18, 20, 23, 26, 31, 33, 36	0.80	AAC 70

ตารางที่ 3.5 ดัชนีความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2

อุปกรณ์	λ	r	r_p	s
หม้อแปลงไฟฟ้า 11/0.415	0.015	200	10	-
สายป้อน	0.0650	5	-	1

โดยที่

- λ คือ อัตราความล้มเหลว (ครั้ง/ปี) (สำหรับสายส่ง (ครั้ง/ปี/ก.ม.))
- r คือ เวลาซ่อม (ชั่วโมง)
- r_p คือ เวลาในการเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้า (ชั่วโมง)
- s คือ เวลาในการทำสวิตชิง (ชั่วโมง)

ตารางที่ 3.6 อัตราความเสียหายและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อมของอุปกรณ์แบบต่างๆ

อุปกรณ์	λ (ครั้ง/ปี)	r (ชั่วโมง)
เซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB)	0	2
รีโคลสเซอร์ (R)	0.1	1.5
สวิตช์ใบมีด (DS)	0.2	1
สวิตช์ถ่ายโอน (ATS)	0.023	1.5
ฟิวส์ (F)	0.1	1

หมายเหตุ: กำหนดให้อุปกรณ์ทุกชนิดมีความน่าจะเป็นที่ อุปกรณ์จะทำงานสำเร็จเท่ากับ 100%

การกำหนดค่าในระบบจำหน่ายทดสอบ RBTS บัส 2 จะแสดงข้อมูลต่างๆ ในตารางที่ 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ จากตารางที่ 3.6 จะแสดงอัตราความเสียหายและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อมของอุปกรณ์ป้องกันในระบบ จากกรณีนี้ในการทดสอบจะกำหนดให้อุปกรณ์กันมีประสิทธิภาพในการทำงาน 100% โดยในการทดสอบจะไม่นำอัตราความเสียหายและเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการซ่อมของอุปกรณ์ป้องกันในระบบมาวิเคราะห์ซึ่งในการวิเคราะห์จะจำลองการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้าในระบบจากกรณีศึกษาที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ การวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์การลดลงของค่าคาดหวังความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดไฟฟ้าดับให้มีค่าต่ำที่สุด

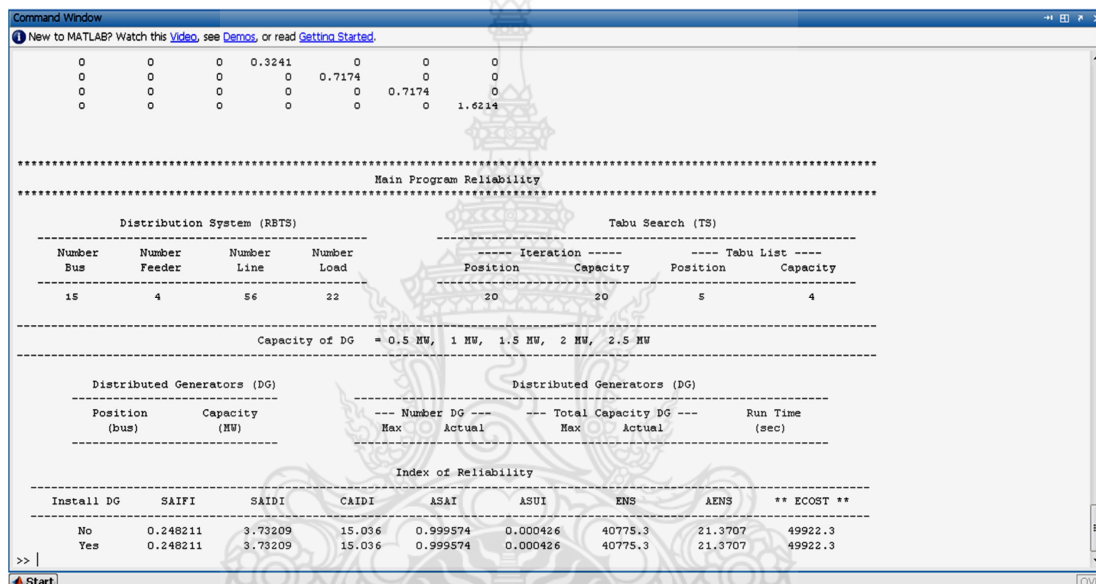


บทที่ 4

ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบ

4.1.1 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 กรณีฐานไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย

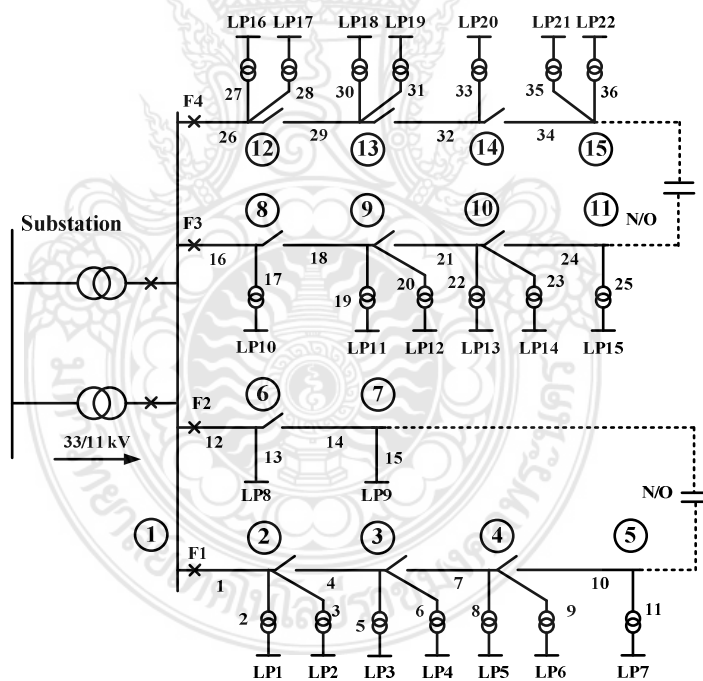


รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 จากโปรแกรม

แสดงค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในกรณีศึกษาที่ 1 เป็นค่าของดัชนีความเชื่อถือได้ที่ไม่ได้มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในตารางที่ 4.1 จากกรณีนี้กำหนดให้เป็นค่าฐานของการวิเคราะห์ค่าดัชนีความเชื่อถือได้และการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่า ECOST และรูปที่ 4.2 แสดงรูปของระบบทดสอบ RBTS บัส 2 ของกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.1 ผลจากการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 1

ดัชนีความเชื่อถือได้	กรณีศึกษาที่ 1
SAIFI (ครั้ง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	0.24821
SAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	3.73209
CAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ)	15.0360
ASAI	0.999574
ASUI	0.000426
ENS (kWh/ปี)	40,775.30
AENS (kWh/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	21.3707
ECOST (ดอลลาร์/ปี)	49,922.30
ECOST ลดลง (%)	-



รูปที่ 4.2 กรณีฐานไม่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย

4.1.2 ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีที่ 2

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

0 0 0 0 0.7174 0 0
0 0 0 0 0 0.7174 0
0 0 0 0 0 0 1.6214

-----
Main Program Reliability
-----
Distribution System (RBTS)
-----
Number   Number   Number   Number
Bus      Feeder   Line     Load
-----
15       4        56       22

Tabu Search (TS)
-----
Iteration ----- Tabu List -----
Position Capacity Position Capacity
-----
100      100      5        4

Capacity of DG = 0.5 MW, 1 MW, 1.5 MW, 2 MW, 2.5 MW

-----
Distributed Generators (DG)
-----
Position Capacity
(bus)    (MW)
-----
5        0.5

--- Number DG --- --- Total Capacity DG --- Run Time
Max Actual Max Actual (sec)
-----
1 1 1 0.5 121.115

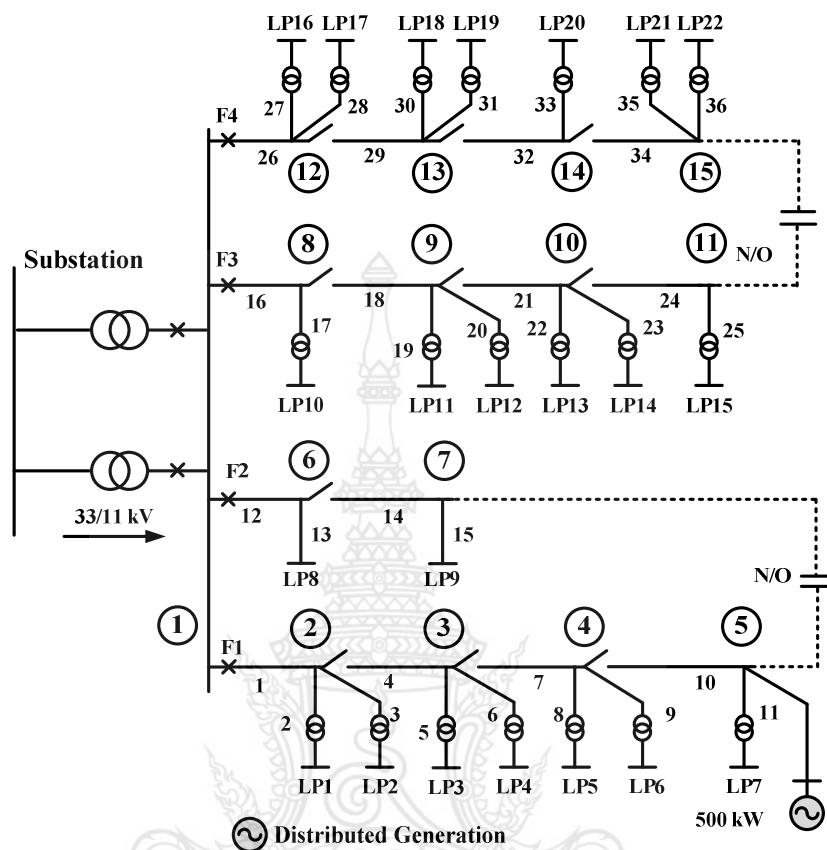
Index of Reliability
-----
Install DG SAIFI SAIDI CAIDI ASAI ASUI ENS AENS ** ECOST **
-----
No 0.248211 3.73209 15.036 0.999574 0.000426 40775.3 21.3707 49922.3
Yes 0.248211 3.72902 15.0236 0.999574 0.000426 40509.7 21.2315 47552.8
>>
Start OVR

```

รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2 จากโปรแกรม

ตารางที่ 4.2 ผลจากการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 2

ดัชนีความเชื่อถือได้	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 2
SAIFI (ครั้ง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	0.24821	0.24821
SAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	3.73209	3.72902
CAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ)	15.0360	15.0236
ASAI	0.999574	0.999574
ASUI	0.000426	0.000426
ENS (kWh/ปี)	40,775.30	40,509.70
AENS (kWh/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	21.3707	21.2315
ECOST (ดอลลาร์/ปี)	49,922.30	47,552.80
ECOST ลดลง (%)	-	4.74



รูปที่ 4.4 การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกรณีที่ 2

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 จากการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่า ECOST จากการกรณีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 49,922.30 และกรณีที่ 2 มีค่าเท่ากับ 47,552.80 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า ECOST เท่ากับ 4.74% และรูปที่ 4.4 แสดงระบบทดสอบ RBTS บัส 2 ของกรณีที่ 2 ที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบ

4.1.3 ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีที่ 3

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

0 0 0 0 0 0.7174 0
0 0 0 0 0 0 1.6214

*****
Main Program Reliability
*****

Distribution System (R BTS)
-----
Number   Number   Number   Number
Bus      Feeder   Line      Load
-----
15       4        56        22

Tabu Search (TS)
-----
Iteration Capacity Position Capacity
-----
40         40        5         4

Capacity of DG = 0.5 MW, 1 MW, 1.5 MW, 2 MW, 2.5 MW

Distributed Generators (DG)
-----
Position Capacity
(bus)      (MW)
-----
5          0.5
11         0.5

--- Number DG --- --- Total Capacity DG --- Run Time
Max Actual Max Actual (sec)
-----
2 2 1.0 1 263.16

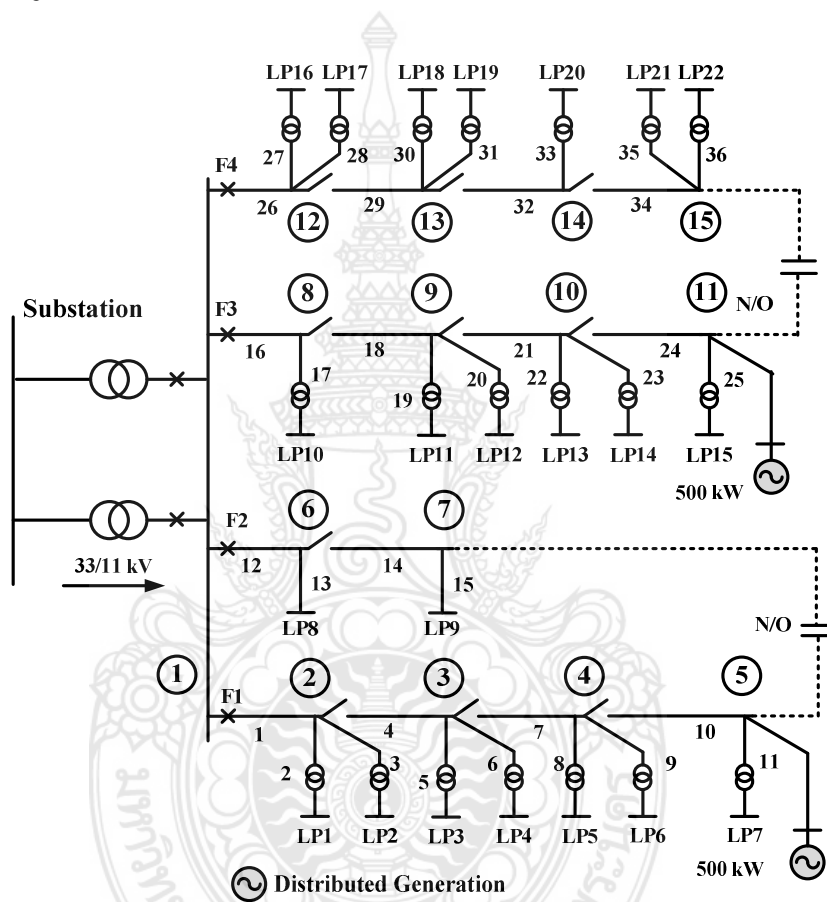
Index of Reliability
-----
Install DG SAIFI SAIDI CAIDI ASAI ASUI ENS AENS ** ECOST **
-----
No 0.248211 3.73209 15.036 0.999574 0.000426 40775.3 21.3707 49922.3
Yes 0.248211 3.72609 15.0118 0.999575 0.000425 40256 21.0985 45288.7
  
```

รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 3 จากโปรแกรม

ตารางที่ 4.3 ผลจากการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 3

ดัชนีความเชื่อถือได้	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 3
SAIFI (ครั้ง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	0.24821	0.24821
SAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	3.73209	3.72609
CAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ)	15.0360	15.0118
ASAI	0.999574	0.999575
ASUI	0.000426	0.000425
ENS (kWh/ปี)	40,775.30	40,256.00
AENS (kWh/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	21.3707	21.0985
ECOST (ดอลลาร์/ปี)	49,922.30	45,288.70
ECOST ลดลง (%)	-	9.28

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 3 จากการเปรียบเทียบอัตรา การลดลงของค่า ECOST จากกรณีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 49,922.30 และกรณีที่ 3 มีค่าเท่ากับ 45,288.70 จะ เห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า ECOST เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 เท่ากับ 9.28% และแสดง ระบบทดสอบ RBTS บัส 2 ของกรณีที่ 3 ที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำนวน 2 เครื่องในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกรณีที่ 3

4.1.4 ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีที่ 4

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

0 0 0 0 0 0 1.6214

-----
Main Program Reliability
-----
Distribution System (RBTS)
-----
Number Bus Number Feeder Number Line Number Load
-----
15 4 56 22

Tabu Search (TS)
-----
Iteration Position Capacity Position Capacity
-----
50 50 5 4

Capacity of DG = 0.5 MW, 1 MW, 1.5 MW, 2 MW, 2.5 MW

-----
Distributed Generators (DG)
-----
Position (bus) Capacity (MW)
-----
5 0.5
11 0.5
15 1.5

-----
Distributed Generators (DG)
-----
Number DG Total Capacity DG Run Time
Max Actual Max Actual (sec)
-----
3 3 2.8 2.5 1064.21

-----
Index of Reliability
-----
Install DG SAIFI SAIDI CAIDI ASAI ASUI ENS AENS ** ECOST **
-----
No 0.248211 3.73209 15.036 0.999574 0.000426 40775.3 21.3707 49922.3
Yes 0.248211 3.72264 14.9979 0.999575 0.000425 39646 20.7788 42026.1

>> |
Start OVR
  
```

รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 4 จากโปรแกรม

ตารางที่ 4.4 ผลจากการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 4

ดัชนีความเชื่อถือได้	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 4
SAIFI (ครั้ง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	0.24821	0.24821
SAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	3.73209	3.72264
CAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ)	15.0360	14.9979
ASAI	0.999574	0.999575
ASUI	0.000426	0.000425
ENS (kWh/ปี)	40,775.30	39,646.00
AENS (kWh/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	21.3707	20.7788
ECOST (ดอลลาร์/ปี)	49,922.30	42,026.10
ECOST ลดลง (%)	-	15.81

4.1.5 ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 กรณีที่ 5

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

Main Program Reliability
-----
Distribution System (RBTS)
-----
Number Bus      Number Feeder  Number Line  Number Load
-----
15              4              56           22

Tabu Search (TS)
-----
Iteration
-----
Position        Capacity      Position        Capacity
-----
10              10            5               4

Capacity of DG = 0.5 MW, 1 MW, 1.5 MW, 2 MW, 2.5 MW

Distributed Generators (DG)
-----
Position (bus)  Capacity (MW)
-----
4              1
5              0.5
11             0.5
15             1.5

Distributed Generators (DG)
-----
Number DG      Total Capacity DG      Run Time
Max Actual    Max Actual            (sec)
-----
4              4                    3.8    3.5                63.728

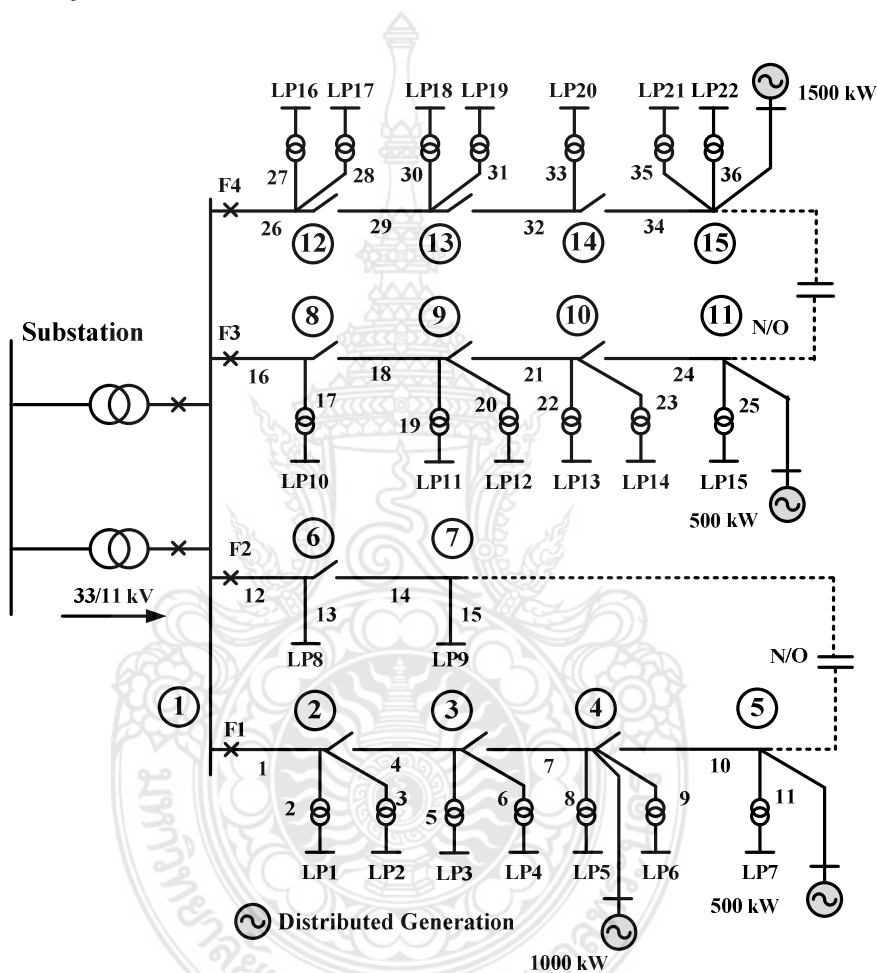
Index of Reliability
-----
Install DG  SAIFI  SAIDI  CAIDI  ASAI  ASUI  ENS  AENS  ** ECOST **
-----
No          0.248211  3.73209  15.036  0.999574  0.000426  40775.3  21.3707  49922.3
Yes         0.248211  3.7204  14.9888  0.999575  0.000425  39248.2  20.5703  39898.4
  
```

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 5 จากโปรแกรม

ตารางที่ 4.5 ผลจากการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 5

ดัชนีความเชื่อถือได้	กรณีศึกษาที่ 1	กรณีศึกษาที่ 5
SAIFI (ครั้ง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	0.24821	0.24821
SAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	3.73209	3.72040
CAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ)	15.0360	14.9888
ASAI	0.999574	0.999575
ASUI	0.000426	0.000425
ENS (kWh/ปี)	40,775.30	39248.20
AENS (kWh/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	21.3707	20.5703
ECOST (ดอลลาร์/ปี)	49,922.30	39,898.40
ECOST ลดลง (%)	-	20%

จากตารางที่ 4.5 แสดงค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในกรณี 1 และกรณี 5 จากการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของค่า ECOST จากกรณี 1 มีค่าเท่ากับ 49,922.30 และกรณี 5 มีค่าเท่ากับ 39,898.40 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า ECOST เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี 1 เท่ากับ 20% และแสดงระบบทดสอบ RBTS บัส 2 ของกรณี 3 ที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำนวน 4 เครื่องในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกรณี 5

ตารางที่ 4.6 อัตราการรับซื้อไฟฟ้า (Adder) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เชื้อเพลิง	ส่วนเพิ่มฯ(บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
ชีวมวล	0.30 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
ก๊าซชีวภาพ	0.30 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
พลังน้ำขนาดเล็ก (50-200 kW)	0.40 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
พลังน้ำขนาดเล็ก (< 50 kW)	0.80 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
ขยะ	2.50 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
พลังงานลม	3.50 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง
พลังงานแสงอาทิตย์	8.00 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง

หมายเหตุ: คิดอัตราการรับซื้อไฟฟ้า (Adder) โดยคิดจากพลังน้ำขนาดเล็ก (50-200 kW)

จากตารางที่ 4.6 อัตราการรับซื้อไฟฟ้า (Adder) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแสดงส่วนเพิ่มฯ (บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง) โดยแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าและแบ่งราคาตามต้นทุนเชื้อเพลิงของการผลิต ในปริญญานิพนธ์นี้กำหนดใช้ราคาต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยใช้เชื้อเพลิงพลังน้ำขนาดเล็ก (50-200 kW)

ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งที่เหมาะสมและขนาดของ DG จากการทดสอบ

กรณี	สถานที่ติดตั้ง DG (bus)	กำลังการผลิตของ DG ที่ติดตั้งในระบบ (kW)	กำลังการผลิตทั้งหมดของ DG (kW)	ต้นทุนการผลิต (บาท/ กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
1	-	-	-	0
2	5	500	500	200
3	5, 11	500, 500	1000	400
4	5, 11, 15	500, 500, 1500	2500	1000
5	4, 5, 11, 15	1000, 500, 500, 1500	3500	1400

จากตารางที่ 4.7 แสดงตำแหน่งที่เหมาะสมและขนาดของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากการระบบจำหน่ายทดสอบ RBTS บัส 2 โดยวิธีการค้นหาแบบตาบู่ ตำแหน่งการติดตั้งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวจากการทดสอบจะพบว่าตำแหน่งการติดตั้งจะติดตั้งบริเวณปลายสายป้อนเพราะตำแหน่งปลายสายป้อนมีอัตราล้มเหลวสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ จากการวิเคราะห์ตำแหน่งการติดตั้งเนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะเป็นแบบเรเดียลโดยปกติเมื่อเกิดฟอลต์อุปกรณ์ป้องกันจะตัดวงจรออกเพื่อป้องกันความเสียหาย เช่นเมื่อเกิดฟอลต์ในบัสที่ 9 ของระบบจำหน่ายทดสอบ RBTS บัส 2 และ F1 ตรวจสอบการลัดวงจรได้และทำการตัดวงจรออกทันที เมื่อ F1 ตัดวงจรออกจะทำให้บัส 10 และบัส 11 เกิดไฟฟ้าดับ แต่เมื่อระบบมีการเชื่อมต่อต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ตำแหน่งปลายสายป้อนก็จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองให้กับระบบได้ และทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าบัสที่ 10 และบัสที่ 11 มีไฟฟ้าใช้ ซึ่งเป็นการลดค่าของ ECOST ได้ และเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบให้มีประสิทธิภาพอีกด้วย

จากต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายโดยคิดจากเชื้อเพลิงพลังน้ำขนาดเล็ก (50-200 kW) ที่ 500 kW, 1,000 kW, 2,500 kW และ 3,500 kW ต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 200, 400, 1,000 และ 1,400 (บาท/ กิโลวัตต์-ชั่วโมง) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 1 –5

ดัชนีความเชื่อถือได้	กรณีศึกษา				
	กรณี 1	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5
SAIFI (ครั้ง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	0.24821	0.24821	0.24821	0.24821	0.24821
SAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	3.73209	3.72902	3.72609	3.72264	3.72040
CAIDI (ชั่วโมง/ผู้ใช้ไฟ)	15.0360	15.0236	15.0118	14.9979	14.9888
ASAI	0.999574	0.999574	0.999575	0.999575	0.999575
ASUI	0.000426	0.000426	0.000425	0.000425	0.000425
ENS (kWh/ปี)	40,775.30	40,509.70	40,256.00	39,646.00	39,248.20
AENS (kWh/ผู้ใช้ไฟ/ปี)	21.3707	21.2315	21.0985	20.7788	20.5703
ECOST (บาท/ปี)	49,922.30	47,552.80	45,288.70	42,026.10	39,898.40
ECOST ลดลง (%)	-	4.74	9.28	15.81	20

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 1 – 5 สามารถวิเคราะห์และเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ 1 (กรณีฐาน) กับกรณีที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ โดยในการเพิ่มจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในแต่ละกรณีนั้นทำให้ค่าของ ECOST ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากเปอร์เซ็นต์การลดลงของ ECOST แต่ในการเพิ่มจำนวนของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวนั้นต้องมีการวิเคราะห์ทางด้านผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอย่างมีประสิทธิภาพต้องมีการวางแผนและวิเคราะห์

ตารางที่ 4.9 ราคาต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของ DG และค่าเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ

ค่า	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
ECOST ลดลง	0	2,369.8	4,633.6	7,896.1	10,023.9
ต้นทุนการผลิต (บาท/ชั่วโมง)	0	200	400	1,000	1,400
การลด ECOST	0	2,169.8	4,233.6	6,896.1	8623.9

จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่ได้จากการลด ECOST โดยนำค่าการลดลงของกรณีในการทดสอบ มาลบกับค่าต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ จากอัตราค่าของการลดลงจึงสรุปได้ว่าแหล่งผลิตไฟฟ้าสามารถปรับปรุงความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายและมีความคุ้มค่าในการลดค่า ECOST ด้วยวิธีการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวอย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การวิเคราะห์ผลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2

การพิจารณาค่าเหมาะสมที่สุดจากการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ในการประเมินความเชื่อถือได้คือผลของ ECOST รวมทั้งค่าของดัชนี SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS และ AENS ซึ่งจะบอกความเชื่อถือได้ของระบบและทราบว่าตำแหน่งใดของระบบมีความเสี่ยงที่จะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขเพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบ การลดค่าคาดหวังความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (ECOST) ของระบบในกรณีที่ 2, 3, 4, และ 5 โดยจำกัดจำนวนแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ จากการศึกษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ Roy Billinton Test System (RBTS) บัส 2 จากกรณีศึกษาที่กำหนดเพื่อประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยวิธีการค้นหาแบบตาข่าย จากตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 จากกรณีศึกษาที่ 1 – 5 จะเห็นว่าค่าดัชนี SAIFI ในกรณีที่ 1 (กรณีฐาน) และกรณีที่ 2, 3, 4, และ 5 ตามลำดับ จะมีค่าดัชนี SAIFI เท่ากันทุกกรณีการทดสอบเนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว สังเกตจากการที่ค่าในกรณีที่ 1 (กรณีฐาน) ซึ่งไม่มีการติดตั้ง

แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีค่าเท่ากับ 0.24821 (ครั้ง/ผู้ใช้ไฟ/ปี) มีค่าเท่ากับกรณีศึกษาที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบ และกรณีที่ 1 ซึ่งกำหนดให้เป็นกรณีฐาน มีค่า ECOST (ค่าคาดหมายความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ) เท่ากับ 49,922.30 ดอลลาร์ต่อปี และในกรณีที่ 2, 3, 4, และ 5 มีค่า ECOST เท่ากับ 47,552.80, 45,288.70, 42,026.10, และ 39,898.40 ดอลลาร์ต่อปี ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า ECOST ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 (กรณีฐาน) เท่ากับ 4.74%, 9.28%, 15.81% และ 20% ตามลำดับ จากเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าคาดหมายความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ (ECOST) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฐาน จากการทดสอบจะลดลงเมื่อเพิ่มแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด แสดงในตารางที่ 4.7 กรณีที่ 2, 3, 4 และ 5 ผลการทดสอบมีแนวโน้มว่าตำแหน่งการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสม มักเป็นตำแหน่งที่อยู่ปลายสายป้อนเพราะตำแหน่งปลายสายป้อนมีอัตราล้มเหลวสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ และขนาดกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่ทำการทดสอบอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จะเห็นได้ว่า กรณีที่ 5 มีค่า ECOST ต่ำที่สุดเนื่องจากมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมากที่สุดจำนวน 4 เครื่อง และผลของตำแหน่งติดตั้งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวติดตั้งที่ 4, 5, 11 และ 15 ขนาดกำลังการผลิต 1000 kW, 500 kW, 500 kW และ 1500 kW ดังภาพที่ 4.5 มีการแสดงผลการหาตำแหน่งในการติดตั้งและกำลังการผลิต จะเห็นได้ว่ากำลังการผลิตรวมสูงสุดที่กำหนดไว้เท่ากับ 4000 kW แต่ผลการทดสอบกรณีที่ 1.5 มีกำลังการผลิตรวมน้อยกว่าค่ากำลังการผลิตรวมสูงสุดที่กำหนดไว้เท่ากับ 3500 kW และกรณีที่ 2, 3 และ 4 การผลิตรวมสูงสุดน้อยกว่าค่ากำลังการผลิตรวมสูงสุดที่กำหนดไว้เท่ากับ 500 kW, 1000 kW และ 2500 kW ตามลำดับ โดยที่กำลังการผลิตรวมที่กำหนดเท่ากับ 1000 kW, 2000 kW และ 3000 kW ตามลำดับ

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย วิเคราะห์ตารางที่ 4.9 แสดงต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยใช้เชื้อเพลิงการผลิตแบบพลังน้ำขนาดเล็ก (50-200 kW) เปรียบต้นทุนในการผลิตกับค่า ECOST ซึ่งจะทำให้เราทราบถึงค่าที่ลดลงอย่างแท้จริง จะแสดงความคุ้มค่าในการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวและส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ จากการวิเคราะห์จึงทราบถึงประสิทธิภาพของการเชื่อมต่อ และการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้ารวมถึงการเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

จากการวิเคราะห์ตามลำดับผลค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทดสอบ RBTS บัส 2 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 1 (กรณีฐาน) จะเห็นได้ว่าค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของกรณีทดสอบเมื่อมีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเปรียบเทียบกับกรณีฐานมีระดับค่าดัชนีความเชื่อถือได้ดีขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้้นำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเทคนิคที่อ้างอิงกับวิธีการค้นหาแบบตามู โดยวิธีการค้นหาแบบตามูเป็นการค้นหาที่มีข้อห้าม หรือการห้ามการค้นหาคำตอบเดิมโดยไม่เกิดการวนรอบของคำตอบเดิม จากการทดสอบโปรแกรมพบว่าวิธีการค้นหาแบบตามูสามารถตอบสนองการค้นหาที่เหมาะสมที่สุดในการประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว โปรแกรมจะแก้ไขปัญหาโดยหาค่าของตำแหน่งและกำลังการผลิตของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเมื่อเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

การวิจัยนี้ได้ทดสอบกับระบบทดสอบของ Roy Billinton Teat Syatem (RBTS) บัศ 2 ผลการศึกษาทำให้ทราบถึงความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ จากการทดสอบทำให้สามารถนำค่าดัชนีต่างๆ ที่ได้ไปใช้ในประกอบการตัดสินใจในการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของทางการไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการหาจุดที่เหมาะสมและการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว ในการวิเคราะห์ความเสียหายผู้ใช้ไฟฟ้าของความเชื่อถือได้ในระบบหลังจากมีการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าในระบบจำหน่ายโดยพิจารณาผลของ ECOST รวมทั้งค่าของดัชนีความเชื่อถือได้ และการเปรียบเทียบกับต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวกับค่า ECOST ที่ลดลงว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เชื่อถือได้ และสามารถลดค่าเสียหายจากเหตุการณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการทดสอบการหาค่าที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุดเมื่อเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการวิเคราะห์คุณค่าในเทอมของความเสียหายผู้ใช้ไฟฟ้าของความเชื่อถือได้ในระบบเมื่อมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยจะพิจารณาผลของ ECOST รวมทั้งวิเคราะห์ค่าของดัชนี SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS และ AENS จากการวิเคราะห์ค่าของดัชนีจะบ่งบอกความเชื่อถือได้ของระบบ เพื่อที่จะได้ทราบว่าจุดใดในระบบมีความเสี่ยงในการเกิดความล้มเหลวและจะต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไข ซึ่งค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของผู้ใช้ไฟฟ้าที่สำคัญจะสามารถบ่งบอกการทำงานและรูปแบบการทำงานระบบ และจากการวิเคราะห์ตารางมูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับจะพบว่ามูลค่าความเสียหายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่เกิดไฟฟ้าดับและแต่ละประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า การเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับจะขึ้นอยู่กับโอกาสในการเกิดฟอลต์ของอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ปริมาณของโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดไฟฟ้าดับ โดยมีขนาดของฟักัดกระแสที่สายป้อนและแรงดันที่จุดโหลดเป็นเงื่อนไขและสามารถกำหนดจำนวนและกำลังการผลิตรวมของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวให้เหมาะสมและดีที่สุดที่ต้องการได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฐานพบว่าค่าคาดหวังความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับลดลง จากการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าคาดหวังความเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟฟ้าดับมีแนวโน้มว่าการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว

สามารถเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายได้ การเพิ่มความเชื่อถือได้อย่างมีประสิทธิภาพตำแหน่งการติดตั้งของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวควรติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสม และต้นทุนในการเชื่อมต่อมีราคาไม่สูงเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้นั้นมีต้นทุนค่อนข้างต่ำเพราะเชื้อเพลิงที่นำมาใช้นั้นเป็นพลังงานหมุนเวียนเหมาะสำหรับการเพิ่มความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และลดค่าความสูญเสียการเกิดไฟฟ้าดับของผู้ใช้ไฟฟ้าได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดหลายอย่างอาจมีการพัฒนาและแก้ไขในอนาคตได้แก่

5.2.1 การนำเสนอวิธีการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีอื่นๆ มาใช้ในการแก้ปัญหา

5.2.2 การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยคำนึงถึงผลกระทบของลำดับการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ป้องกันที่ทำงานไม่ได้ตามเงื่อนไขเดิม เมื่อมีการติดตั้งแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย



เอกสารอ้างอิง

- ชำนาญ ห่อเกียรติ, “การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง”, โครงการพัฒนาความชำนาญด้านไฟฟ้ากำลัง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2550.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน)”, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2549.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, “ระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายสำหรับปริมาณพลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 10 เมกะวัตต์”, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2549.
- ปานจิต ดำรงกุลกำจร, “ผลกระทบจากพลังงานหมุนเวียนต่อระบบไฟฟ้า”, โครงการสนับสนุนงานด้านเทคนิค เพื่อการจัดหาไฟฟ้าและพลังงานทดแทนสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, กระทรวงพลังงาน.
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. ปัญญาเชิงคำนวณ. นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552.
- F. Glover, “Tabu search – Part I”, ORSA Journal on Computing, Vol. 1, No.3 pp.190-206, 1989.
- R. Billinton, and P. Wang, “Distribution System Reliability Cost/Worth Analysis Using Analytical Sequential Simulation Techniques”, IEEE Trans. on Power Systems. pp. 1245-1250, 13 November 1998.
- R. Billinton and R. N. Allan, “Reliability Evaluation of Power System”, Northern Ireland : PITMAN, 1894.
- R. Billinton and P. Wang, “Distribution System Reliability Cost/Worth Analysis Using Analytical Sequential Simulation Techniques”, IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 13, pp.1245-1250, 1998.
- สำนักงานคณะกรรมการนโยบายแห่งชาติ, “การศึกษาอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ”, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- L. Goel and R. Billinton, “Procedure for Evaluation Interrupted Energy Assessment Rates in an Overall Electric Power System”, IEEE Transaction on Power System, Vol. 6, pp. 1398-1403, 1991.
- A. M. Borbely and J.F. Kreider, “Distributed Generation”, The Power Paradigm for the New Millennium, 1st ed., CRC Press, 2001. Nara, K, et al. “Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators.” Proceeding of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2001 : 918-923.
- P. Chiradeja, “Reliability Assessment of Distribution System With Distributed Generation”, Faculty of Engineering Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference&Exhibition : Asia and Pacific Dalian, China

- A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi-kian, "Promotion strategy of clean technologies in distributed generator expansion planning," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2765-2773, Dec. 2009.
- P. Jahangiri and M. Fotuhi-Firuzabad, "Reliability Assessment of Distribution System with Distributed Generation" 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PEcon08), Johor Baharu, Malaysia, December 1-3, 2008.
- Cooper, "The structure of knowledge synthesis-knowledge in Society", Vol. 1, pp. 104-126. H.M. (1988).
- S. Surisunthon and T. Tayjasananant, "Impacts of Distributed Generation on Voltages Sag Assessment in Distribution System", (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011.
- Zeng Ming, Tian Kuo, Li Chen, "Method of Capacity Compensation for Independent Distributed Generation Network with in the Context of Smart Grid". Research Center of Energy and Electricity Economics North China Electric Power University Beijing, 102206, Project Supported by Beijing Education Commission.
- G.W.Ault, J.R.McDonald and G.M.Burt : "Strategic Analysis Frame Work For Evaluating Distributed Generation And Utility Strategies".IEEE Proc-Gener Transn , Vol.150, No.4, July 2003.
- A. Berg, S. Krahl, T. Paulun, "Cost-Efficient Integration of Distributed Generation Into Medium Voltage Networks By Optimized Network Planning". CIRED Seminar 2008 : SmartGrids for Distribution Frankfurt, 23-24 June 2008.
- W. Li, " Incorporating Aging Failures in Power System Reliability Evaluation".IEEE Transactions on Power System, Vol.17, NO.3, August 2002.
- S.K. Chen, T.K. Ho and B.H. Mao, "Reliability Evaluation of Railway Power Supplies By Fault-Tree Analysis IET Electr", *Power Appl*, 2007,1,(2),pp.161-272.

ภาคผนวก



คณะผู้วิจัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทง ลานธารทอง
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
e-mail: thong.l@rmutp.ac.th

การศึกษา

วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คอ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
คอ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตเทเวศร์

งานวิจัยที่สนใจ

การวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง และผลกระทบของการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)

คณะผู้วิจัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

การศึกษา

ปร.ด. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
คอ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

งานวิจัยที่สนใจ

การวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลกระทบของการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง
ใบอนุญาตผู้ตรวจสอบอาคาร

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)
- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) สามัญสมาชิก ตลอดชีพ
- Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand (ECTI Thailand)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)
- The Institution of Engineering and Technology (IET)
- International Association of Computer Science and Information Technology (IACSIT)