

การตั้งค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ และแรงดัน
ตกชั่วขณะ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Optimum Power Quality Standard Setup Considering Interruption and Voltage Sag
Costs



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตั้งค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณา ค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ และแรงดันตกชั่วขณะ
โดย	นายธนัทไชย สมรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พิสิษฐ์พล จีรพงศานานุรักษ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชาญชัย อมรวิภาส)	

ธนัทไชย สมรักษ์ : การตั้งค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ และแรงดันตกชั่วขณะ. (Optimum Power Quality Standard Setup Considering Interruption and Voltage Sag Costs) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการตั้งค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยพิจารณาค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะโดยการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าผ่านโปรแกรม MATLAB ด้วยวิธี Monte Carlo ปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าคือประเภทของสายไฟฟ้าและตำแหน่งติดตั้งของสายไฟฟ้า โดยการทดสอบจะใช้มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะร่วมกับมูลค่าการติดตั้งสายไฟฟ้าในระบบเพื่อกำหนดมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม

ผลการทดสอบพบว่าการใช้สายไฟฟ้าประเภทสายเคเบิลใต้ดินจะช่วยลดอัตราการเกิดไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะได้มากกว่าสายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือย โดยเฉพาะการใช้สายไฟฟ้าเคเบิลใต้ดินในสายป้อนเดียวกันที่จ่ายไฟให้กับโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงตำแหน่งต้นทางของสายป้อนจะช่วยลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะได้มากกว่าตำแหน่งอื่นๆ อย่างไรก็ตามการติดตั้งเพิ่มสายเคเบิลใต้ดินเข้าในระบบจะส่งผลให้มูลค่าการติดตั้งสายไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า มูลค่าทั้งหมดประกอบด้วยมูลค่าการติดตั้งสายไฟฟ้าในระบบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะที่มีค่าน้อยที่สุดนั้นไม่เหมาะสำหรับการนำมาเป็นค่ามาตรฐานเนื่องจากมูลค่าการติดตั้งในระบบจะสูงมากเมื่อเทียบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ ท้ายสุดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอแนวคิดในการกำหนดค่ามาตรฐาน ดัชนีจำนวนครั้งไฟฟ้าดับเฉลี่ยต่อปีต่อผู้ใช้ไฟ ดัชนีระยะเวลาเฉลี่ยเมื่อเกิดไฟฟ้าดับต่อปีต่อผู้ใช้ไฟ และอัตราการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยหาจุดคุ้มทุนของมูลค่าการติดตั้งระบบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970187421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Power Quality, Voltage Sag, Power System Faults, Monte-Carlo
Methode, Financial Losses

Thanatchai Somrak : Optimum Power Quality Standard Setup Considering
Interruption and Voltage Sag Costs. Advisor: Assoc. Prof. THAVATCHAI
TAYJASANANT, Ph.D.

This thesis proposed a method to set the optimal power quality standards by considering interruption and voltage sag costs by simulating power distribution system with the MATLAB program by using Monte Carlo method. The main factor affecting the power quality is type and location of electrical wires. Optimal power quality standard was set by using resulted interruption and voltage sag costs together with an investment cost.

Results showed that underground cables can reduce the occurrence of interruptions and voltage sags more than overhead lines. In particular, applying underground cables on the same feeder of industrial customers will reduce the cost of interruptions and voltage sags more than other positions. However, an installation of underground cables will be more expensive than overhead lines. In the end, this thesis proposed the setup of the standard consists of System Average Interruption Frequency Index (SAIFI), System Average Interruption Duration Index (SAIDI), and voltage sag frequency on industrial customers by using the break-even point between an investment cost and a cost caused by interruptions and voltage sags.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กระผมขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้กระผมขอกราบขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์ และ อ.ดร.พิสิษฐ์พล จิรพวงานานุรักษ์ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงกราบขอบพระคุณ ดร.ชาญชัย อมรวิภาส กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้สละเวลาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุดท้ายนี้กระผมขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ตลอดจนเพื่อน พี่ น้อง ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ธนัทไชย สมรักษ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ญ	ญ
สารบัญรูปภาพ.....ฐ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 2	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์..... 2	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 3	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์..... 3	3
1.6 ทบทวนวรรณกรรม..... 3	3
1.6.1 การคำนวณค่าดัชนีแรงดันตกชั่วขณะ..... 3	3
1.6.2 การคำนวณมูลค่าไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ..... 5	5
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 7	7
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย..... 8	8
2.1 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า..... 8	8
2.1.1 การเปรียบเทียบไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ..... 8	8
2.1.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์ปัญหาไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ..... 10	10
2.2 แรงดันตกชั่วขณะ..... 11	11

2.2.1	นิยามของแรงดันตกชั่วขณะ	11
2.2.2	สาเหตุของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ	12
2.2.3	การคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันตกชั่วขณะ	12
	การลัดวงจรบนสาย.....	13
2.3	ประเภทของการลัดวงจร.....	16
	2.3.1 การลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตร.....	16
	2.3.2 การลัดวงจรประเภทไม่สมมาตร	17
2.4	อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า.....	19
	2.4.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์.....	19
	2.4.2 รีโคลสเซอร์.....	20
	2.4.3 ฟิวส์.....	21
	2.3.4 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าจำหน่าย.....	21
บทที่ 3	ทฤษฎีพื้นฐานในการประเมินไฟฟ้าดับของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	23
	3.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการประเมินไฟฟ้าดับในระบบไฟฟ้ากำลัง	23
	3.1.1 การจำลองการเกิดความบกพร่องในระบบไฟฟ้า.....	23
	3.1.2 การจำลองประเภทของการลัดวงจร.....	25
	3.2 ดัชนีที่ใช้ในการประเมินไฟฟ้าดับ	26
	3.2.1 นิยามตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	26
	3.2.2 ดัชนีที่เกี่ยวกับไฟฟ้าดับ.....	26
	3.3 ค่าดัชนีไฟฟ้าดับได้ของประเทศไทย.....	30
	3.3.1 ค่าดัชนี SAIFI.....	30
	3.3.2 ค่าดัชนี SAIDI.....	31
บทที่ 4	ทฤษฎีพื้นฐานในการประเมินแรงดันตกชั่วขณะ	32
	4.1 ดัชนีแรงดันชั่วขณะ	32

4.2	มาตรฐานความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า	33
4.2.1	มาตรฐาน ITIC.....	34
4.2.2	มาตรฐาน SEMI-F47	35
4.3	ค่าคาดหวังต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....	36
4.3.1	การจัดลำดับชนิดของอุปกรณ์	36
4.3.2	ค่าคาดหวังของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ	39
4.4	ค่าคาดหวังต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน ITIC	41
บทที่ 5	ปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินมูลค่าคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย	43
5.1	ประเภทของสายไฟหรือสายป้อนในระบบจำหน่าย	43
5.2	มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ	45
5.3	มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะ	46
5.4	อายุการใช้งานเฉลี่ย และเงินลงทุนสำหรับแต่ละอุปกรณ์	47
5.5	การคำนวณมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม	48
บทที่ 6	ผลการทดสอบ	51
6.1	ระบบทดสอบ	51
6.2	ขั้นตอนการทดสอบ.....	54
6.3	ผลการทดสอบ	56
6.3.1	การเปรียบเทียบตำแหน่งการลัดวงจรกับผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้า	56
6.3.2	ดัชนีไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ.....	60
6.3.3	พิจารณาต้นทุนในการติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าและมูลค่าความเสียหายที่เกิดจาก ไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ.....	62
1.)	ข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาต้นทุนติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้า และปัจจัยของ ประเภทสายจำหน่ายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	62
2.)	การพิจารณามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ...	66

3.) การพิจารณาต้นทุนติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าพร้อมกับมูลค่าความเสียหายที่เกิด
จากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ69

6.3.4 การจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรม..... 77

บทที่ 7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....86

ภาคผนวก ก. 90

บรรณานุกรม91

ประวัติผู้เขียน95



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมของยุโรป.....	6
ตารางที่ 1.2 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมของประเทศสหรัฐอเมริกา.....	6
ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์คุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60255	20
ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์แต่ละประเภท.....	33
ตารางที่ 4.2 ค่า ITIC	34
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า SARFI _{SEMI-F47}	35
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP95	39
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP75	40
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP50	40
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP25	41
ตารางที่ 4.8 ค่าคาดหวังต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน ITIC (อุปกรณ์ระดับ D).....	42
ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราความขัดข้องและระยะเวลาการซ่อมแซมของสายไฟฟ้าประเภทต่างๆ[25].....	44
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายไฟฟ้าเหนือดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายของ ประเทศไทย[25]	44
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายป้อนประเภทสายเคเบิลใต้ดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยต่างๆใน ทวีปยุโรป[26].....	45
ตารางที่ 5.4 ฟังก์ชันความเสียหาย CCDF แบ่งแยกตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟภ.	46

ตารางที่ 5.5	มูลค่าความเสียหายเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะประเทศมาเลเซีย[28]	47
ตารางที่ 5.6	แสดงอายุการใช้งานเฉลี่ย และมูลค่าการก่อสร้างระบบแบ่งตามประเภทสาย[24]	47
ตารางที่ 6.1	ข้อมูลความยาวของสายป้อนแต่ละเส้น	53
ตารางที่ 6.2	ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายแต่ละเส้น (โอห์ม/กิโลเมตร)[20]	53
ตารางที่ 6.3	อัตราการล้มเหลวแบบถาวร และระยะเวลาการซ่อมแซมของสายไฟฟ้าแต่ละประเภท	53
ตารางที่ 6.4	ประเภท จำนวน และขนาดของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละจุดโหลด	54
ตารางที่ 6.5	ตำแหน่งสายที่ลัดวงจรต่อแรงดันตกบนโหลด 8 และ โหลด 9	57
ตารางที่ 6.6	เงินลงทุนสำหรับการก่อสร้างระบบตามชนิดของสายไฟ[20]	63
ตารางที่ 6.7	ฟังก์ชันความเสียหาย CCDF แบ่งแยกตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟภ.	64
ตารางที่ 6.8	มูลค่าความเสียหายเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะประเทศมาเลเซีย	64
ตารางที่ 6.9	ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายของประเทศไทย[25]	65
ตารางที่ 6.10	ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายป้อนประเภทสายเคเบิลใต้ดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศต่างๆใน ทวีปยุโรป[26]	65
ตารางที่ 6.11	มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 1	66
ตารางที่ 6.12	มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 2	68
ตารางที่ 6.13	มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 3	68
ตารางที่ 6.14	มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 4	69
ตารางที่ 6.15	ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.1	70
ตารางที่ 6.16	ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.2	71
ตารางที่ 6.17	ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.3	71
ตารางที่ 6.18	ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.4	72
ตารางที่ 6.19	ค่ามาตรฐานไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ	77
ตารางที่ 6.20	ตำแหน่งสายที่ลัดวงจรต่อแรงดันตกบนชั่วขณะโหลด 8 และ โหลด11	78

ตารางที่ 6.21 ตำแหน่งสายที่ลัดวงจรต่อแรงดันตกชั่วขณะบนโหลด 8 และ โหลด15	82
ตารางที่ ก.1 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะในประเทศต่างๆ.....	90



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการลัดวงจรเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ.....	9
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการลัดวงจรเมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ	9
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการตรวจการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ	10
รูปที่ 2.4 แสดงการลัดวงจรบริเวณสาย.....	13
รูปที่ 2.5 การลัดวงจรที่เกิดบริเวณสายระหว่างบัส k และ j ที่ตำแหน่ง f.....	13
รูปที่ 2.6 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร	16
รูปที่ 2.7 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน.....	18
รูปที่ 2.8 คุณสมบัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC กรณี TDS มีค่าเท่ากับ 1.0.....	19
รูปที่ 2.9 ลำดับการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์, ฟิวส์ และรีโคลสเซอร์	22
รูปที่ 2.10 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป.....	22
รูปที่ 3.1 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์สองสถานะของมาร์คอฟ	23
รูปที่ 3.2 รูปแสดงแบบจำลองการทำงานของสายไฟฟ้าตามระยะเวลาต่างๆ.....	24
รูปที่ 4.1 มาตรฐาน ITIC.....	34
รูปที่ 4.2 มาตรฐาน SEMI-F47.....	35
รูปที่ 4.3 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ A.....	36
รูปที่ 4.4 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ B.....	37
รูปที่ 4.5 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ C1	37
รูปที่ 4.6 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ C2	38
รูปที่ 4.7 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ D.....	38
รูปที่ 5.1 สายไฟประเภทต่างๆ	43
รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบตัดแปลง RBTS บัส 2.....	52

รูปที่ 6.2 ขั้นตอนการทำงาน	55
รูปที่ 6.3 ขนาดของแรงดันที่เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงาน อุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 9)ในกรณีเกิดการลัดวงจรในตำแหน่งสายป้อนต่างๆ.....	58
รูปที่ 6.4 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 9)	59
รูปที่ 6.5 ค่า SAIFI ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด (กรณีที่ 1).....	60
รูปที่ 6.6 ค่า SAIDI ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด (กรณีที่ 1).....	61
รูปที่ 6.7 จำนวนแรงดันตกชั่วขณะต่อปีบนโหลดที่ 8 ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด.....	61
รูปที่ 6.8 จำนวนแรงดันตกชั่วขณะต่อปีบนโหลดที่ 9 ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด.....	62
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์มูลค่าการก่อสร้างระบบกับมูลค่าความเสียหายภายในระบบ	73
รูปที่ 6.10 มูลค่าทั้งหมดในกรณีต่างๆ	74
รูปที่ 6.11 SAIFI ในระบบไฟฟ้าจำหน่าย โดยเทียบความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	75
รูปที่ 6.12 SAIDI ในระบบไฟฟ้าจำหน่าย โดยเทียบความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	75
รูปที่ 6.13 จำนวนแรงดันตกบนโหลด 8 โดยเทียบความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	76
รูปที่ 6.14 จำนวนแรงดันตกบนโหลด 9 โดยเทียบความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	76
รูปที่ 6.15 ขนาดของแรงดันที่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจรบนตำแหน่งสายป้อนต่างๆกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท โรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 11)ในกรณีเกิดการลัดวงจรในตำแหน่งสายป้อนต่างๆ.....	79
รูปที่ 6.16 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8) กรณี โรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 11.....	80
รูปที่ 6.17 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 11) กรณีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 11	81
รูปที่ 6.18 ขนาดของแรงดันที่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจรบนตำแหน่งสายป้อนต่างๆกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท โรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 15)ในกรณีเกิดการลัดวงจรในตำแหน่งสายป้อนต่างๆ.....	83
รูปที่ 6.19 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8) กรณี โรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 15.....	84

รูปที่ 6.20 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 15)
กรณีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 15.....85



บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

แนวโน้มในปัจจุบันโรงงานมีการใช้อุปกรณ์ที่มีความทันสมัยมากขึ้นเพื่อให้ผลิตสินค้าที่มีคุณภาพ การบริการในปริมาณที่สูงขึ้น การใช้อุปกรณ์ที่ทันสมัยนั้นสามารถลดต้นทุนการผลิต เพิ่มปริมาณ และคุณภาพการผลิตได้ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ดังกล่าวนั้นอ่อนไหวต่อความบกพร่องที่เกิดในระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการผลิตสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นการลงทุนการผลิต และปรับปรุงระบบไฟฟ้า เพื่อเพิ่มคุณภาพในระบบให้ดีขึ้น เช่น การเปลี่ยนชนิดของสาย เพื่อบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า และยังคงตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้าเช่นกัน การลงทุนต่าง ๆ นั้นจะต้องมีการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่ครอบคลุมถึงค่าความเสียหายที่เกิดจากสิ่งรบกวนทางคุณภาพไฟฟ้า

ความหมายของคำว่าคุณภาพไฟฟ้านั้นครอบคลุมทั้ง 2 ส่วน คือ อย่างแรกความเชื่อถือได้ของระบบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ความเชื่อถือได้ของระบบนั้น จะเน้นในส่วนของการเกิดไฟดับ ที่สามารถแบ่งได้เป็น ไฟดับชั่วคราว(น้อยกว่า 2 วินาที) ไฟดับชั่วคราว(มากกว่า 2 วินาทีแต่น้อยกว่า 2 นาที) และไฟดับ(มากกว่า 2 นาที)[1] และคุณภาพไฟฟ้าในระบบ มีหลายรูปแบบ เช่น แรงดันเกินชั่วคราว ฮาร์มอนิก และไฟกระพริบ จากมุมมองของผู้ใช้โดยทั่วไปแม้การเกิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นไม่ทำให้เกิดการสูญเสียรายได้ต่อครั้งไม่มากขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการหยุดชะงักการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ แต่การเกิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นส่งผลต่อมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมากที่สุดเนื่องจากเป็นเหตุการณ์เกิดบ่อยครั้งและมีมูลค่าความเสียหายต่อเหตุการณ์มาก [2] ดังนั้นการคำนวณค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจนั้นต้องคำนวณทั้งไฟดับ และแรงดันตกชั่วขณะ

ในการลงทุนด้านการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าจำเป็นต้องต้องทำการประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจของคุณภาพไฟฟ้าต่อลูกค้าที่ให้บริการในเครือข่ายภายในระบบ ขึ้นกับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับผู้ไฟฟ้าในจุดที่มีคุณภาพไฟฟ้าต่ำ และ ค่าเสียหายของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าของระบบ[1] ในส่วนของปัญหาด้านความเชื่อถือได้นั้นเป็นปัญหาที่พบได้แพร่หลาย ที่มีทั้งการจำลอง การเกิด การแก้ปัญหา และ การประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรวมถึงการคำนวณความเสียหายที่

เกิดขึ้นที่มีกระบวนการในการออกแบบวางแผน ป้องกัน และ แก้ไข แต่เรื่องแรงดันตกชั่วขณะนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่าความเชื่อถือของระบบ ปัจจุบันอุปกรณ์หลายประเภทมีความอ่อนไหวต่อแรงดันตก แต่ยังไม่มีการประเมินค่าความเสียหายออกมอย่างชัดเจน

ในส่วนของการประเมินเศรษฐกิจเกี่ยวกับความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะนั้นต้องมีข้อมูลดังนี้ 1.) จำนวน ลักษณะ ระยะเวลา และตำแหน่งที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ 2.) ความอ่อนไหวของอุปกรณ์ 3.) ค่าความเสียหายเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่อการเกิดไฟตกชั่วขณะ 1 ครั้ง (แบ่งตามประเภทของลูกค้านั้นๆ)

ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอเกี่ยวกับวิธีการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นของผู้ใช้ไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะ และ ไฟดับ ซึ่งแบ่งตามประเภทของผู้ใช้ไฟและระยะเวลาของเหตุการณ์ รวมถึงการประเมินผลกระทบทางเศรษฐกิจที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะและไฟดับในระบบจำหน่าย และนำวิธีการประเมินทางเศรษฐกิจดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในระบบจำหน่ายเพื่อหาค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.) ประเมินค่าความสูญเสียทางการเงินทั้งหมดที่เกิดจากไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะ
- 2.) วิเคราะห์ค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม สำหรับกรณีการเกิดไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้การประเมินความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1.) รูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นำมาสร้างระบบจำลองจะพิจารณาเฉพาะระบบจำหน่ายแรงดันกลางที่มีโครงสร้างแบบเรเดียลเท่านั้น
- 2.) ระบบไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ คือ Roy Billinton Test System bus 2: RBTS bus 2
- 3.) พิจารณาชนิดของสายเพียง 2 ประเภท คือ เหนือดิน และ สายไฟฟ้าใต้ดินเท่านั้น
- 4.) พิจารณาเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ และไฟดับที่เกิดจากการลัดวงจรที่เกิดบริเวณสายไฟในระบบเท่านั้น โดยพิจารณาการลัดวงจร 2 ประเภท คือ ประเภทสามเฟสสมมาตร และประเภทหนึ่งเฟสลงดิน
- 5.) ไม่พิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดการลัดวงจรซ้ำซ้อนในเวลาเดียวกัน
- 6.) พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของการลัดวงจรมีค่าเท่ากับศูนย์
- 7.) ประเมินความเสียหายจากไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะของระบบไฟฟ้าผ่านการคำนวณดัชนีความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะ ได้แก่ ITIC โดยการจำลองการทำงานของสายไฟฟ้าแบบ Monte Carlo Simulation

- 8.) การคำนวณแรงดันตกชั่วขณะในระบบ พิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมเท่านั้น
- 9.) พิจารณาความคุ้มค่าของการติดตั้งสายในระบบผลิตไฟฟ้า เปรียบเทียบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะในระยะเวลา 30 ปี ตามอายุการใช้งานเฉลี่ยของสายไฟ
- 10.) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นำมาทดสอบไม่คำนวณถึงการเพิ่มจำนวนและขนาดของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1.) ศึกษาหลักการพื้นฐานในการคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นบริเวณสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 2.) ศึกษาหลักการพื้นฐานในการคำนวณดัชนีชี้วัดแรงดันตกชั่วขณะในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 3.) ศึกษาการคำนวณค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตก และ ไฟดับ
- 4.) ศึกษามาตรฐานการประเมินแรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 5.) พัฒนาโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสุมสถานะ การทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- 6.) พัฒนาโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่าดัชนีแรงดันตกชั่วขณะ และเหตุการณ์ไฟดับ
- 7.) ทดสอบโปรแกรมกับระบบไฟฟ้าทดสอบ Roy Billinton Test System bus 2 (RBTS bus 2)
- 8.) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ
- 9.) เรียบเรียงผลงานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) วิธีการคำนวณมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะ
- 2) การประเมินมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสมของไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะ

1.6 ทบทวนวรรณกรรม

1.6.1 การคำนวณค่าดัชนีแรงดันตกชั่วขณะ

งานวิจัยประเภทที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณดัชนีชี้วัดแรงดันตกชั่วขณะจะประกอบด้วยบทความดังต่อไปนี้

บทความเรื่อง “Power Quality: Measurements of Sags and Interruptions”[3] กล่าวถึงการศึกษามาตรฐานที่ใช้ในการวัดแรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ITIC curve และ SEMI-F47 curve และในส่วนของไฟฟ้าดับจะใช้การพิจารณาโดยใช้ดัชนี SAIFI SAIDI และ

CAIDI ซึ่งกลุ่มของดัชนีที่ใช้วัดการเกิดไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้า จะสามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น

บทความเรื่อง “Voltage Sag Studies in Distribution Networks-Part III: Voltage Sag Index Calculation” [4] กล่าวถึงการศึกษาค่าของเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบเพื่อดูผลของจำนวนและระยะเวลาเหตุการณ์เฉลี่ยของแรงดันตกชั่วขณะในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อใช้ในการศึกษาค่าดัชนีแรงดันตกชั่วขณะแต่ละประเภท รวมถึง วิธีการคำนวณค่าดัชนีแรงดันตกชั่วขณะแต่ละชนิด ร่วมกับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน โดยอุปกรณ์ป้องกันที่พิจารณานั้นมี 2 ประเภทได้แก่ เซอร์คิตเบรกเกอร์ และฟิวส์

บทความเรื่อง “An Analytical Approach for Stochastic Assessment of Balanced and Unbalanced Voltage Sags in Large Systems” [5] กล่าวถึงการศึกษาวิธีการคำนวณแรงดันตกชั่วขณะเมื่อเกิดการลัดวงจรในสายส่งและในบัส และวิธีการประเมินแรงดันตกชั่วขณะทั้งในกรณีที่เกิดการลัดวงจรแบบสมมาตรและไม่สมมาตร ซึ่งผลจากการจำลองจะถูกวิเคราะห์โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาตำแหน่งลัดวงจรที่เกิดขึ้นได้

บทความเรื่อง “IEEE Guide for Voltage Sag Indices” [6] กล่าวถึงวิธีการต่างๆ ในการกำหนดการเกิดแรงดันตกชั่วขณะประกอบด้วยดัชนีและองค์ประกอบต่างๆ รวมไปถึงวิธีการคำนวณ Voltage sag severity ซึ่งเป็นการคำนวณเพื่อประเมินความรุนแรงของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะซึ่งจะแบ่งตามขนาดแรงดันและระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งการคำนวณจะพิจารณาร่วมกับกราฟ ITIC หรือ SEMI-F47 เพื่อบ่งบอกถึงโอกาสการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของผู้ใช้ไฟฟ้ารวมถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

จากบทความที่ [3 - 6] สามารถนำหลักการและวิธีการในบทความมาใช้ในการสร้างโปรแกรม เพื่อใช้ในการจำลองเหตุการณ์ลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายที่ใช้ทดสอบเพื่อวิเคราะห์การเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ จากนั้นจะนำหลักการที่ได้มาใช้ในการสร้างโปรแกรมเพื่อใช้ในการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะที่จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจำหน่าย โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองเหตุการณ์ รวมถึงการสร้างโปรแกรมเพื่อพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าจำหน่าย และยังบอกถึงมาตรฐานที่นำมาพิจารณาซึ่งประกอบไปด้วยมาตรฐานการทนแรงดันตกชั่วขณะของ ITIC ที่เป็นมาตรฐานที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจำพวก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ SEMI-F47 ที่เป็นมาตรฐานที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจำพวกสารกึ่งตัวนำเป็น

หลัก และ Voltage sag severity ที่เป็นการนำ ITIC และ SEMI-F47 มาพิจารณาเพื่อวิเคราะห์โอกาสการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องของผู้ใช้ไฟฟ้ารวมถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

1.6.2 การคำนวณมูลค่าไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

งานวิจัยประเภทที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณมูลค่าไฟฟ้าดับแรงดันตกชั่วขณะจะประกอบด้วยบทความดังต่อไปนี้

บทความเรื่อง “Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags—Part I: The Methodology” [1] กล่าวถึงหลักการในการประเมินมูลค่าของไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะรายปี เพื่อใช้ในการประมาณค่าความเสียหายทางเศรษฐศาสตร์ที่จะเกิดขึ้นในระบบต่อปีที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีในการประเมินการเกิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นจะประเมินจากการนำข้อมูลความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายเพื่อมาหาโอกาสการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องและระยะเวลาของเหตุการณ์ขัดข้องเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะของแต่ละอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายในระบบไฟฟ้าจำหน่าย

บทความเรื่อง “Probabilistic Assessment of Financial Losses due to Interruptions and Voltage Sags— Part II : Practical Implementation” [7] กล่าวถึงการยกตัวอย่างการคำนวณโดยนำวิธีการคำนวณการหาไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะมาจำลองกับระบบทดสอบเพื่อหามูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

บทความเรื่อง “Power Quality Loss Survey Report” [8] เป็นบทความทำการสำรวจเพื่อหามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากคุณภาพไฟฟ้าต่างๆประกอบด้วย แรงดันตกชั่วขณะ ไฟฟ้าดับ ฮาร์โมนิก เป็นต้น โดยบทความฉบับนี้จะทำการสอบถามจะผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละพื้นที่และวิเคราะห์เพื่อหามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากคุณภาพไฟฟ้าโดยรวมที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่

บทความเรื่อง “Cost of Poor Power Quality-Power Quality Application Guide” [9] เป็นบทความเกี่ยวกับการประเมินความเสียหายที่เกิดจากคุณภาพไฟฟ้าในยุโรป ซึ่งจะแนะนำความเสี่ยงทางธุรกิจที่เกิดจากปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า โดยจะบอกถึงการเกิดความเสียหายของคุณภาพไฟฟ้าต่างๆ รวมถึงบอกถึงมูลค่าความเสียหายเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมของยุโรป

ประเภทโรงงานอุตสาหกรรม	มูลค่าความเสียหายจากแรงดันตกชั่วขณะ (ยูโรต่อเหตุการณ์)
โรงงานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	3,800,000
องค์กรการค้า (Financial trading)	6,000,000 ต่อชั่วโมง
ศูนย์คอมพิวเตอร์	750,000
องค์กรโทรคมนาคม	30,000 ต่อนาที
อุตสาหกรรมเหล็ก	350,000
อุตสาหกรรมแก้ว	250,000

บทความเรื่อง "Power Quality"[10] เป็นบทความเกี่ยวกับการอธิบายคุณภาพไฟฟ้าแต่ละประเภท ส่วนของเรื่องแรงดันตกชั่วขณะจะอธิบายเกี่ยวกับการเกิดแรงดันตกชั่วขณะโดยอ้างอิงตาม ITIC รวมถึงการประเมินมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะของประเทศสหรัฐอเมริกาดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมของประเทศสหรัฐอเมริกา

ประเภทโรงงานอุตสาหกรรม	มูลค่าความเสียหายจากแรงดันตกชั่วขณะ (ดอลลาร์สหรัฐต่อเหตุการณ์)
อุตสาหกรรมกระดาษ	30,000
อุตสาหกรรมเคมี (จำพวกพลาสติก แก้ว เป็นต้น)	50,000
อุตสาหกรรมยานยนต์	75,000
อุตสาหกรรมการผลิต	100,000
อุตสาหกรรมเกี่ยวกับบัตรเครดิต	250,000
อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ	2,500,000

จากบทความที่ [1] และ [7-9] จะสามารถอธิบายได้ถึงการประเมินมูลค่าความเสียหายเกี่ยวกับไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจำหน่ายเพื่อใช้ในการประเมินมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ รวมถึงมูลค่าความเสียหายจากแรงดันตกชั่วขณะของอุตสาหกรรมแต่ละประเภท

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 6 บท โดยแบ่งเป็นเนื้อหาดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย

บทที่ 3 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานการประเมินไฟฟ้าดับของระบบไฟฟ้า

บทที่ 4 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการประเมินแรงดันตกชั่วขณะ

บทที่ 5 จะกล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินมูลค่าคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

บทที่ 6 จะกล่าวถึงผลการทดสอบ

บทที่ 7 จะกล่าวถึงสรุปผลและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย

บทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งการเกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายมีหลายประเภท เช่น ไฟฟ้าดับ แรงดันตกชั่วขณะ แรงดันเกิน ฮาร์มอนิกส์ ทรานเซียน และไฟกระพริบ เป็นต้น แต่ปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้ามากที่สุดคือ ไฟฟ้าดับ และ แรงดันตกชั่วขณะ เนื่องจากเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง และส่งผลให้เกิดมูลค่าความเสียหายแก่ผู้ใช้ไฟฟ้ามาก จากปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย สามารถแบ่งได้ 4 หัวข้อดังนี้

- 1) ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
- 2) แรงดันตกชั่วขณะ
- 3) ประเภทของการลัดวงจร
- 4) อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า

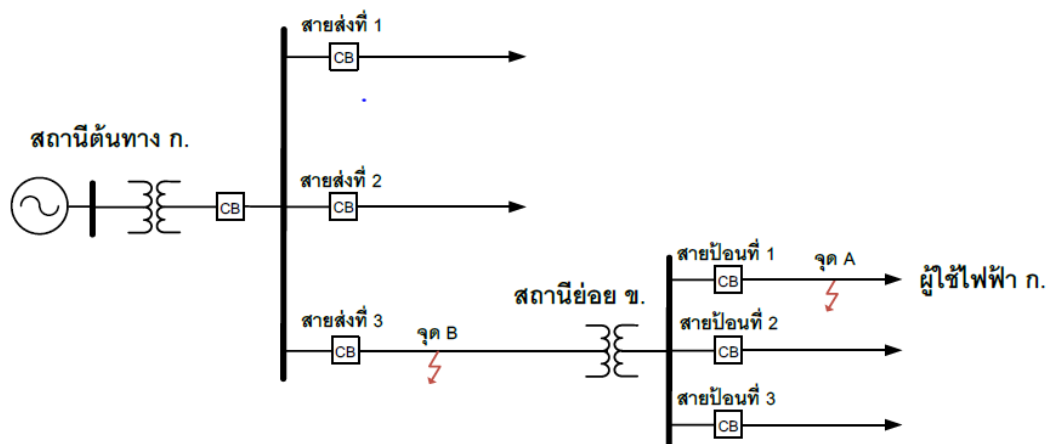
2.1 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า

ความผิดปกติในระบบไฟฟ้า (Fault)[11] คือ สภาวะที่การไหลของกระแสในระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ ซึ่งสามารถเกิดได้จากสาเหตุหลายประการ เช่น การเปิดวงจรในระบบไฟฟ้า (Open circuit power system) การลัดวงจรในระบบไฟฟ้า (Short circuit power system) โดยจะมีเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของความผิดปกติ ดังนี้

- 1.) การจำแนกประเภทความผิดปกติตามระยะเวลาการเกิดความผิดปกติ สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความผิดปกติประเภทชั่วคราว และ ความผิดปกติประเภทถาวร
- 2.) การจำแนกประเภทความผิดปกติตามตำแหน่งการเกิดความผิดปกติสามารถจำแนกได้หลายประการตามตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้น เช่น ความผิดปกติบนสาย ความผิดปกติที่บัส ความผิดปกติที่หม้อแปลง เป็นต้น

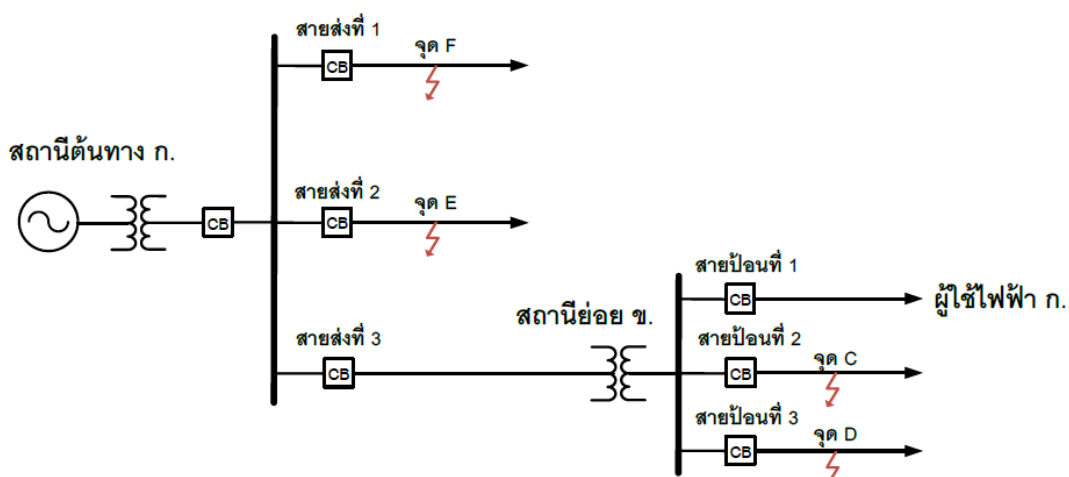
2.1.1 การเปรียบเทียบไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

ความแตกต่างระหว่างไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ ที่มีสาเหตุมาจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าเป็นสาเหตุหลัก แต่อย่างไรก็ตามเหตุการณ์ทั้งสองมีความแตกต่างกันในแง่ลักษณะการเกิดความรุนแรง และความบ่อยครั้งของเหตุการณ์ โดยเหตุการณ์ไฟฟ้าดับเกิดจากการลัดวงจรบนสายที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการลัดวงจรเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ

จากรูปที่ 2.1 ผู้ใช้ไฟฟ้า ก. จะเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับก็ต่อเมื่อเกิดการลัดวงจรบนสายป้อนที่ 1 (จุด A) ซึ่งจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ก. โดยตรงหรือเกิดการลัดวงจรบนสายส่งที่จ่ายไฟฟ้าให้กับสถานีไฟฟ้าย่อย ข.(จุด B) ซึ่งจ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ก. อีกทั้ง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นที่จุด A เซอร์กิตเบรกเกอร์ของสายป้อนที่ 1 จะทำการปลดวงจรส่งผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับขึ้น และหากเกิดการลัดวงจรขึ้นที่จุด B จะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ของสายส่ง 3 ทำการปลดวงจรส่งผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้าที่รับไฟจากสายส่ง 3 เกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งหมดซึ่งรวมถึงผู้ใช้ไฟฟ้า ก. ด้วย



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งการลัดวงจรเมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ

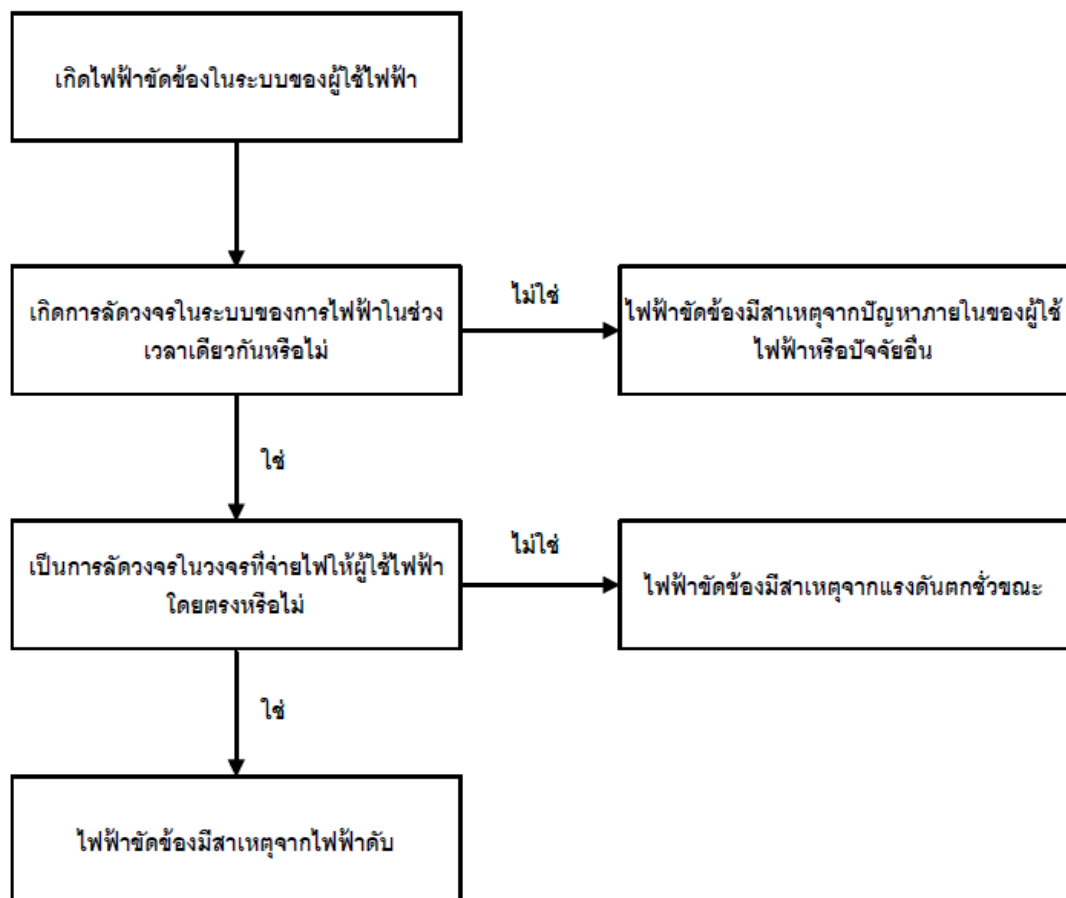
สำหรับเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะนั้นจะเกิดขึ้น เมื่อเกิดการลัดวงจรในวงจรข้างเคียงกับวงจรที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.2 จากตัวอย่างจะพบว่าหากเกิดการลัดวงจร

ขึ้นสายป้อนที่ 2 (จุด C). หรือสายป้อนที่ 3 (จุด D.) จะทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ผู้ใช้ไฟฟ้า ก. และหากเกิดการลัดวงจรขึ้นบริเวณสายส่งที่ 1 (จุด F) หรือสายส่งที่ 2 (จุด E) ผู้ใช้ไฟฟ้าที่รับไฟจากสถานีไฟฟ้าย่อย ข. จะเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะทุกราย

2.1.2. การตรวจสอบและวิเคราะห์ปัญหาไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

หากเกิดเหตุการณ์ขัดข้องขึ้นภายในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถตรวจสอบว่าเหตุการณ์ดังกล่าวมีสาเหตุมาจากการเกิดไฟฟ้าดับหรือแรงดันตกชั่วขณะในระบบของการไฟฟ้าหรือไม่ โดยตัวอย่างขั้นตอนการตรวจสอบการแยกปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง สามารถแสดงดังรูปที่ 2.3 [11]

ในการตรวจสอบหากพบว่าปัญหาไฟฟ้าขัดข้องภายในระบบของผู้ใช้ไฟฟ้ามีสาเหตุมาจากแรงดันตกชั่วขณะ การแก้ไขปัญหาต้องเริ่มจากการวิเคราะห์หาส่วนของระบบหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการตรวจการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

ขั้นตอนที่1: การแยกแยะอุปกรณ์หรือระบบย่อยที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะ ออกจากส่วนอื่นๆ คือ การตรวจสอบเพื่อแยกแยะว่าเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้น อุปกรณ์ หรือส่วนใด ของระบบที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะ เพื่อให้สามารถเข้าไปแก้ปัญหาได้ตรงจุด

ขั้นตอนที่2: การตรวจสอบความถูกต้องเหมาะสมในการทำงานของอุปกรณ์ปลดวงจร และ อุปกรณ์ป้องกัน เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์ และรีเลย์ตรวจสอบแรงดัน เป็นต้น โดยเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้าอุปกรณ์ดังกล่าวไม่ควรสั่งปลดวงจรไฟฟ้า เนื่องจากอุปกรณ์บางประเภทสามารถทำงานได้แม้เกิดแรงดันตกชั่วขณะแต่หากเซอร์กิตเบรกเกอร์ปลดวงจรเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะจะส่งผลให้อุปกรณ์ทุกตัวที่อยู่หลังเซอร์กิตเบรกเกอร์ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับซึ่ง ส่งผลกระทบรุนแรงมากกว่า

ขั้นตอนที่3: การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของส่วนต่างๆภายในอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือ กระบวนการผลิต เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภทอาจมีส่วนประกอบภายในที่มีความอ่อนไหว ต่อแรงดันตกชั่วขณะแตกต่างกัน โดยทั่วไปอาจแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ ภาคควบคุม ภาคกำลัง และ โหลดทางกล ซึ่งการแก้ปัญหาในแต่ละส่วนจะมีวิธีการและเงินลงทุนที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นที่จะต้อง ตรวจสอบให้ได้แน่ชัดว่าส่วนประกอบใดที่อ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ

2.2 แรงดันตกชั่วขณะ

2.2.1 นิยามของแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะคือเหตุการณ์ที่ค่าแรงดันมีขนาดลดลงในช่วงระยะเวลาสั้น ซึ่งมีมาตรฐาน การกำหนดการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่ได้รับการยอมรับคือนิยามแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน ยุโรป (EN50160)[12] และนิยามแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานอเมริกา (IEEE std.1159)[13]

1.) นิยามแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานยุโรป

แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Dip) คือ ค่าแรงดันที่ลดลงอย่างรวดเร็วโดยลดลงอยู่ในช่วง 90% ถึง 1% ของแรงดันที่ระบุ และมีช่วงระยะเวลาของเหตุการณ์อยู่ในช่วง 0.01 วินาที ถึง 1 นาที

2.) นิยามแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐานอเมริกา

แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) คือ ค่าแรงดันที่ลดลงอย่างรวดเร็วโดยลดลงอยู่ในช่วง 90% ถึง 10% ของแรงดันที่ระบุ และมีช่วงระยะเวลาของเหตุการณ์อยู่ในช่วง 0.5 ไซเคิล ถึง 1 นาที

2.2.2 สาเหตุของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะมีสาเหตุมาจากการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า ความรุนแรงของเหตุการณ์นั้นขึ้นอยู่กับ ขนาดของแรงดันที่ลดลง และ ระยะเวลาของเหตุการณ์ ระยะเวลาในการเกิดเหตุการณ์การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะขึ้นกับระยะเวลาในการกำจัดความบกพร่องในระบบไฟฟ้า มักเป็นช่วงเวลาสั้นๆ[11] นอกจากนี้ยังมีสาเหตุจากกรณีอื่น เช่น การเปิด-ปิดของเครื่องใช้ไฟฟ้า ประเภทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งกรณีที่เกิดจากมอเตอร์นั้นเป็นจะมีกระแสที่สูงประมาณ 6 – 8 เท่าของกระแสปกติ และจะสูงขึ้นตามขนาดของมอเตอร์ เหตุการณ์ดังกล่าวจะมีระยะเวลาประมาณ 2 – 3 วินาที

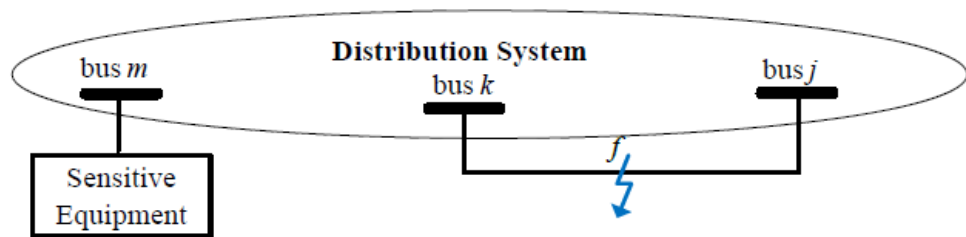
ผลของความบกพร่องที่ก่อให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะก่อให้เกิดความผิดปกติจนกระทั่งความบกพร่องได้รับการขจัดโดยอุปกรณ์ป้องกัน(Protection Device) อุปกรณ์ป้องกันที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่างเช่น ฟิวส์ หรือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ แต่ถ้าเป็นอุปกรณ์ป้องกันจำพวก รีโกลสเซอร์ สถานะความผิดปกติก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้หลายจำนวนรอบของการทำงาน และ ระยะเวลาของการเกิดความบกพร่อง ความบกพร่องที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution system) และ ในระบบส่ง (Transmission System) ประเภทของความบกพร่องหลักที่เกิดขึ้นในระบบบ่อยครั้งคือความบกพร่องแบบ 1 สายลงดิน (Single-Line to Ground Fault) ส่วนใหญ่มีสาเหตุการเกิดมาจากสภาพอากาศ เช่น การเกิดฟ้าผ่า การเสื่อมสภาพของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า ถึงแม้จะมีระบบป้องกันความผิดปกติเหล่านี้ แต่เราก็ไม่สามารถที่จะทำการป้องกันความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นในระบบได้ 100% ดังนั้นปัญหาเรื่องแรงดันตกชั่วขณะจึงเป็นหนึ่งในปัญหาหลักของความเสียหายในปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า

2.2.3 การคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันตกชั่วขณะ

การคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันตกชั่วขณะในทางปฏิบัติการลัดวงจรในระบบไฟฟ้านั้น อาจเกิดได้หลายตำแหน่ง อาทิเช่น การลัดวงจรบริเวณสาย การลัดวงจรที่บัส การลัดวงจรบนหม้อแปลง เป็นต้น ซึ่งการลัดวงจรบริเวณสายนั้นมีหลายประเภท เช่น หนึ่งเฟสลงดิน เฟสถึงเฟส เฟสถึงเฟสลงดิน และสามเฟสสมมาตร เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาการลัดวงจรที่เกิดบริเวณสายไฟฟ้าของระบบ โดยการลัดวงจรที่ทำการพิจารณานั้นจะมีเพียง 2 ประเภท คือ หนึ่งเฟสลงดินซึ่งเป็นการลัดวงจรที่เกิดขึ้นบ่อยที่สุดในระบบ และการลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตรซึ่งเป็นการลัดวงจรที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบมากที่สุด

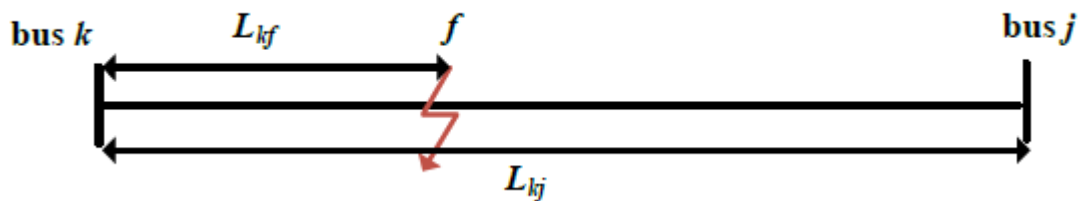
การลัดวงจรบนสาย

การคำนวณกระแสลัดวงจรและแรงดันตกชั่วขณะบนสายนั้นจะกำหนดให้ระบบมีทั้งหมด N บัสโดยสมมติให้เกิดการลัดวงจรขึ้นบนสายระหว่างบัส k และบัส j ที่ตำแหน่ง f และ พิจารณาแรงดันตกชั่วขณะที่บัส m . [5, 14] ซึ่งเป็นบัสที่มีอุปกรณ์ไวต่อการเปลี่ยนแปลงอยู่ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการลัดวงจรบริเวณสาย

ในการคำนวณกระแสลัดวงจร และ แรงดันตกชั่วขณะ จะนิยามค่า p คืออัตราส่วนระยะทางจากบัส k ไปยังตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร f และระยะทางจากบัส k ถึงบัส j ดังรูป 2.5 และสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.5 การลัดวงจรที่เกิดบริเวณสายระหว่างบัส k และ j ที่ตำแหน่ง f

$$p = \frac{L_{kf}}{L_{kj}} \quad (2.1)$$

โดยที่

- | | | |
|----------|-----|--|
| p | คือ | อัตราส่วนระยะทางจากบัส k ไปยังตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร |
| L_{kf} | คือ | ระยะทางจากบัส k ถึง ตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจร f (km.) |
| L_{kj} | คือ | ระยะทางจากบัส k ถึงบัส j (km.) |

ค่าอิมพีแดนซ์ Z_{mf} และ Z_{ff} ลำดับศูนย์ ลำดับบวก และลำดับลบ ได้ดังสมการที่ (2.2) ถึง (2.7)

$$Z_{mf}^z = Z_{mk}^z + (Z_{mj}^z - Z_{mk}^z) p \quad (2.2)$$

$$Z_{mf}^p = Z_{mk}^p + (Z_{mj}^p - Z_{mk}^p) p \quad (2.3)$$

$$Z_{mf}^n = Z_{mk}^n + (Z_{mj}^n - Z_{mk}^n) p \quad (2.4)$$

$$Z_{ff}^z = (1-p)^2 Z_{kk}^z + p^2 Z_{jj}^z + 2p(1-p) Z_{kj}^z + p(1-p) Z_{kj}^z \quad (2.5)$$

$$Z_{ff}^p = (1-p)^2 Z_{kk}^p + p^2 Z_{jj}^p + 2p(1-p) Z_{kj}^p + p(1-p) Z_{kj}^p \quad (2.6)$$

$$Z_{ff}^n = (1-p)^2 Z_{kk}^n + p^2 Z_{jj}^n + 2p(1-p) Z_{kj}^n + p(1-p) Z_{kj}^n \quad (2.7)$$

โดยที่

$Z_{mf}^z, Z_{mf}^p, Z_{mf}^n$ คือ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ลำดับศูนย์ บวก และ ลบ แถว m หลัก f

$Z_{mk}^z, Z_{mk}^p, Z_{mk}^n$ คือ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ลำดับศูนย์ บวก และ ลบ แถว m หลัก k

$Z_{mj}^z, Z_{mj}^p, Z_{mj}^n$ คือ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ลำดับศูนย์ บวก และ ลบ แถว m หลัก j

$Z_{kj}^z, Z_{kj}^p, Z_{kj}^n$ คือ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ลำดับศูนย์ บวก และ ลบ แถว k หลัก j

$Z_{kk}^z, Z_{kk}^p, Z_{kk}^n$ คือ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ลำดับศูนย์ บวก และ ลบ แถว k หลัก k

$Z_{jj}^z, Z_{jj}^p, Z_{jj}^n$ คือ บัสอิมพีแดนซ์เมตริกซ์ลำดับศูนย์ บวก และ ลบ แถว j หลัก j

ค่าแรงดันก่อนเกิดการลัดวงจร ณ ตำแหน่ง f สามารถคำนวณได้ดังสมการ(2.8)

$$V_{pre,f} = V_{pre,k} + (V_{pre,j} - V_{pre,k}) p \quad (2.8)$$

ค่าแรงดันตกชั่วขณะลำดับต่างๆที่บัส m และอยู่บริเวณตำแหน่ง f ของสาย สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.9) –(2.11)

$$V_{mf}^z = V_{pre,m}^z - Z_{mf}^z I_f^z \quad (2.9)$$

$$V_{mf}^p = V_{pre,m}^p - Z_{mf}^p I_f^p \quad (2.10)$$

$$V_{mf}^n = V_{pre,m}^n - Z_{mf}^n I_f^n \quad (2.11)$$

โดยที่

$V_{pre,f}$ คือ แรงดันก่อนเกิดการลัดวงจรที่ตำแหน่ง f

$V_{pre,k}$ คือ แรงดันก่อนเกิดการลัดวงจรที่บัส k

$V_{pre,j}$ คือ แรงดันก่อนเกิดการลัดที่บัส j

และจากค่าแรงดันค่าแรงดันตกชั่วขณะลำดับต่างๆสามารถนำมาคำนวณค่าของแรงดัน กระแสและอิมพีแดนซ์ในรูปวงจรถ้าลำดับต่างๆสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของเฟสได้ดังสมการ (2.12) – (2.14)

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^z \\ V^p \\ V^n \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^z \\ I^p \\ I^n \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z^z \\ Z^p \\ Z^n \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$a = e^{j120}$$

โดยที่

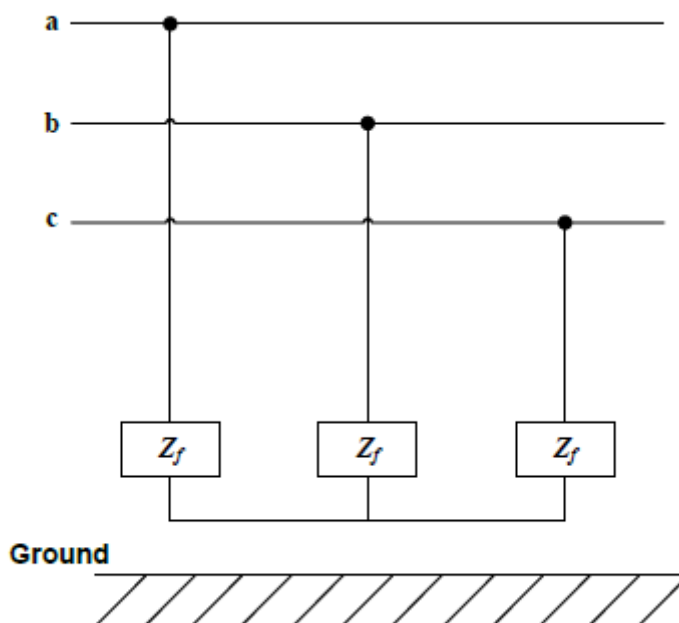
V^a, V^b, V^c	คือ	แรงดันเฟส a b cตามลำดับ
I^a, I^b, I^c	คือ	กระแสเฟส a b cตามลำดับ
Z^a, Z^b, Z^c	คือ	อิมพีแดนซ์เฟส a b cตามลำดับ
V^z, V^p, V^n	คือ	แรงดันลำดับศูนย์ บวก ลบตามลำดับ
I^z, I^p, I^n	คือ	กระแสลำดับศูนย์ บวก ลบตามลำดับ
Z^z, Z^p, Z^n	คือ	อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์ บวก ลบตามลำดับ

2.3 ประเภทของการลัดวงจร

การลัดวงจรในระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่ การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร (Three-phase balanced fault) และการลัดวงจรประเภทไม่สมมาตร (Unbalanced Fault) [14]

2.3.1 การลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตร

การลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตรคือการลัดวงจรที่เกิดจากการที่สายไฟทั้งสามเฟสในระบบไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรพร้อมกันดังรูปที่ 2.5 โดยเป็นการลัดวงจรที่มีโอกาสเกิดน้อยแต่ส่งผลให้เกิดกระแสลัดวงจรที่บัสที่เกิดการลัดวงจรสูงที่สุด [14]



รูปที่ 2.6 การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร

การลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตรนี้สามารถคำนวณค่ากระแสลัดวงจรได้ดังสมการ (2.15) โดยค่ากระแสลำดับศูนย์ และ ลำดับลบจะมีค่าเท่ากับศูนย์ จึงเหลือเพียงค่ากระแสลำดับบวกเท่านั้น ดังสมการ

$$I = I^P = \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^P + z_f} \quad \text{และ} \quad I^n = I^z = 0 \quad (2.15)$$

ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่บัส m เนื่องจากการลัดวงจรที่ตำแหน่ง f สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.16)

$$\Delta V_{mf} = -Z_{mf}^p \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^p + z_f} \quad (2.16)$$

ค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บัส m เนื่องจากการลัดวงจรที่บัส f สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.17)

$$V_{mf} = V_{pre,m} - Z_{mf}^p \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^p + z_f} \quad (2.17)$$

2.3.2 การลัดวงจรประเภทไม่สมมาตร

การลัดวงจรประเภทไม่สมมาตรคือ การลัดวงจรที่เกิดจากการที่สายไฟหนึ่ง หรือสองสาย ในระบบไฟฟ้าเกิดการลัดวงจรพร้อมกัน โดยโอกาสที่จะเกิดการลัดวงจรของแต่ละประเภทยี่นั้นจะแตกต่างกัน การลัดวงจรแบบไม่สมมาตรนั้น สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single line – to – ground fault) การลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟส (Line – to – line fault) และ การลัดวงจรแบบเฟสต่อเฟสลงดิน (Double line – to – ground fault) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเพียงการลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินเท่านั้น[14]

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดินนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อสายเฟสใดเฟสหนึ่งในระบบไฟฟ้าถูกลัดวงจรลงดิน ดังรูปที่ 2.7 โดยการลัดวงจรประเภทยี่ จะส่งผลให้เกิดกระแสลัดวงจรที่มีความรุนแรงน้อยที่สุด แต่โอกาสที่จะเกิดมากที่สุดเมื่อเทียบกับการลัดวงจรประเภทอื่นๆ และจากรูปสามารถพิจารณาวิธีการคำนวณค่าขนาดของแรงดันตกชั่วขณะได้ดังต่อไปนี้

เมื่อสมมติให้เกิดการลัดวงจรประเภทหนึ่งเฟสลงดินขึ้นที่เฟส a จะได้สมการ (2.18) – (2.19)

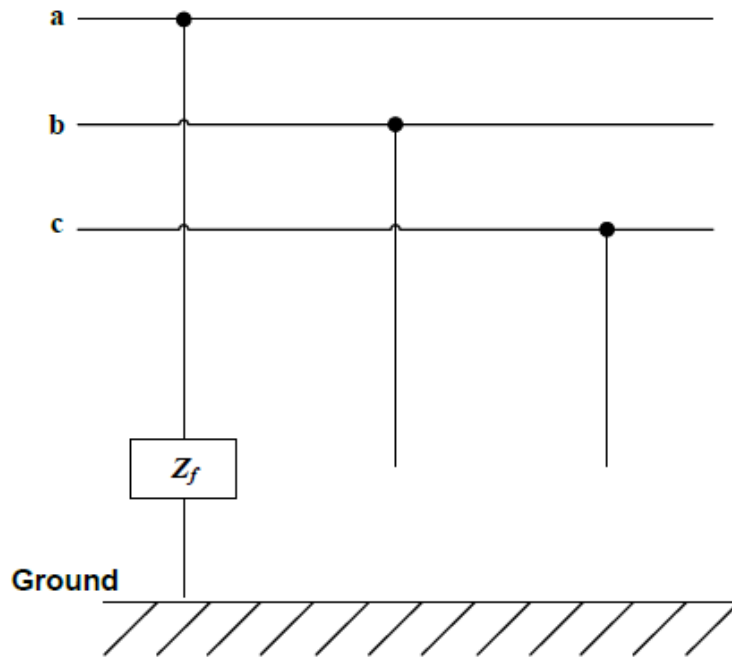
$$I^b = 0 \text{ และ } I^c = 0 \quad (2.18)$$

$$V^a = 0 \quad (2.19)$$

ค่ากระแสลัดวงจรสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.20) – (2.21)

$$I^z = I^p = I^n = \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.20)$$

$$I^a = \frac{3V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.7 การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน

ค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บัส m เนื่องจากการลัดวงจรที่ตำแหน่ง f ในรูปวงจรลำดับสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.22) – (2.24)

$$V_{mf}^z = -Z_{mf}^z \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.22)$$

$$V_{mf}^p = V_{pre,m} - Z_{mf}^p \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.23)$$

$$V_{mf}^n = -Z_{mf}^n \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.24)$$

ค่าแรงดันตกชั่วขณะที่บัส m เนื่องจากการลัดวงจรที่ตำแหน่ง f ในรูปเฟสสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.25) – (2.27)

$$V_{mf}^a = V_{pre,m} - (Z_{mf}^z + Z_{mf}^p + Z_{mf}^n) \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.25)$$

$$V_{mf}^b = a^2 V_{pre,m} - (Z_{mf}^z + a^2 Z_{mf}^p + a Z_{mf}^n) \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.26)$$

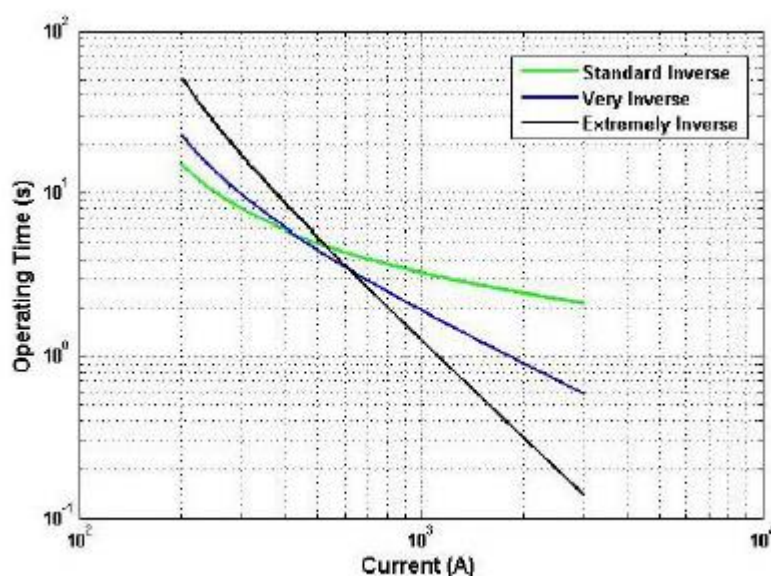
$$V_{mf}^c = a V_{pre,m} - (Z_{mf}^z + a Z_{mf}^p + a^2 Z_{mf}^n) \frac{V_{pre,f}}{Z_{ff}^z + Z_{ff}^p + Z_{ff}^n + 3z_f} \quad (2.27)$$

2.4 อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์ป้องกันมีหน้าที่ในการกำจัดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสายส่งหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆภายในระบบ[15, 16] สำหรับระบบจำหน่ายแล้วโดยพื้นฐานนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกัน 3 ประเภท ได้แก่ เซอร์คิตเบรกเกอร์ รีโคลสเซอร์ และฟิวส์ เป็นต้น

2.4.1 เซอร์คิตเบรกเกอร์

เซอร์คิตเบรกเกอร์[15]เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่ทำหน้าที่เปิดวงจรขณะที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะผิดปกติ โดยทั่วไปในระบบไฟฟ้าจำหน่ายเซอร์คิตเบรกเกอร์จะทำการติดตั้งอยู่ที่ต้นทางสายป้อนของระบบ หรือหลังสถานีไฟฟ้าย่อยโดย โดยทำหน้าที่ป้องกันสายป้อน และเป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรอง (Backup protection) กรณีที่รีโคลสเซอร์ หรือฟิวส์ไม่สามารถทำงานได้ โดยทั่วไปการทำงานของเซอร์คิตเบรกเกอร์จะขึ้นอยู่กับประเภทของอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับสัญญาณ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะอุปกรณ์ตรวจจับความผิดปกติของกระแสที่ไหลผ่าน หรือ รีเลย์กระแสเกิน ดังนั้น เซอร์คิตเบรกเกอร์จะทำงานเมื่อกระแสที่ไหลผ่านเกินค่าที่กำหนดไว้ (Overcurrent protection) โดยคุณลักษณะการทำงานของเซอร์คิตเบรกเกอร์ จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่รีเลย์ทำงานและกระแส สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60255 Electrical Relay ซึ่งแบ่งคุณลักษณะการทำงานออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ Standard Inverse (SI), Very Inverse (VI) และ Extremely Inverse (EI) ดังรูปที่ 2.8 และแสดงได้ดังสมการที่ 2.28



รูปที่ 2.8 คุณลักษณะของเซอร์คิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC กรณี TDS มีค่าเท่ากับ 1.0

$$t(I) = TDS \left[\frac{A}{\left(\frac{I}{I_{pick_up}} \right)^B - 1} \right] \quad (2.28)$$

โดยที่

TDS	คือ	ค่าเวลาปรับตั้งของอุปกรณ์ป้องกัน
t	คือ	ระยะเวลาการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ (วินาที)
I	คือ	กระแสลัดวงจรที่ไหลผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ (kA)
I_{pick_up}	คือ	ค่ากระแสปรับตั้งที่เซอร์กิตเบรกเกอร์จะเริ่มทำงาน (kA)

สำหรับค่าพารามิเตอร์ A และ B เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทคุณลักษณะการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์คุณลักษณะของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60255

Characteristic	A	B
Standard Inverse (SI)	0.14	0.02
Very Inverse (VI)	13.5	1
Extremely Inverse (EI)	80	2

2.4.2 รีโคลสเซอร์

รีโคลสเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับและแยกการลัดวงจรชั่วคราวออกจากการลัดวงจรถาวร ซึ่งทั่วไปแล้วจะทำการติดตั้งบริเวณกลางสายป้อนของระบบจำหน่าย[16] โดยการทำงานของรีโคลสเซอร์จะมีด้วยกัน 2 จังหวะ ประกอบด้วย จังหวะแรกเป็นการทำงานแบบเร็ว (Fast mode) และจังหวะที่สองเป็นการทำงานแบบช้า (Slow mode) เมื่อมีการลัดวงจรเกิดขึ้นในระบบ รีโคลสเซอร์จะทำงานเพื่อทำการเปิดวงจรโดยใช้ช่วงการทำงานแบบเร็วเพื่อตรวจสอบว่าการลัดวงจรที่เกิดขึ้นว่าเป็นแบบชั่วคราวหรือถาวร ถ้าการลัดวงจรที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั่วคราวระบบจะกลับคืนสู่ภาวะปกติ (Reclosure) โดยไม่มีการตัดวงจร อย่างไรก็ตามถ้าการลัดวงจรนั้นยังคงอยู่ซึ่งแสดงให้เห็นเป็นการลัดวงจรแบบถาวร รีโคลสเซอร์จะทำการตัดวงจรโดยใช้ช่วงการทำงานแบบช้า โดยการการทำงานของรีโคลสเซอร์นั้นจะคล้ายกับการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ จึงสามารถใช้ความสัมพันธ์

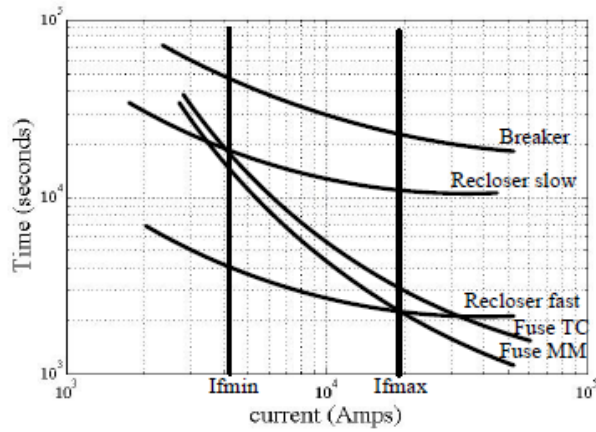
ระหว่างระยะเวลาที่รีเลย์ทำงานและกระแสที่ตรวจพบได้เช่นกัน โดยจะใช้คุณลักษณะแบบ Extremely Inverse

2.4.3 ฟิวส์

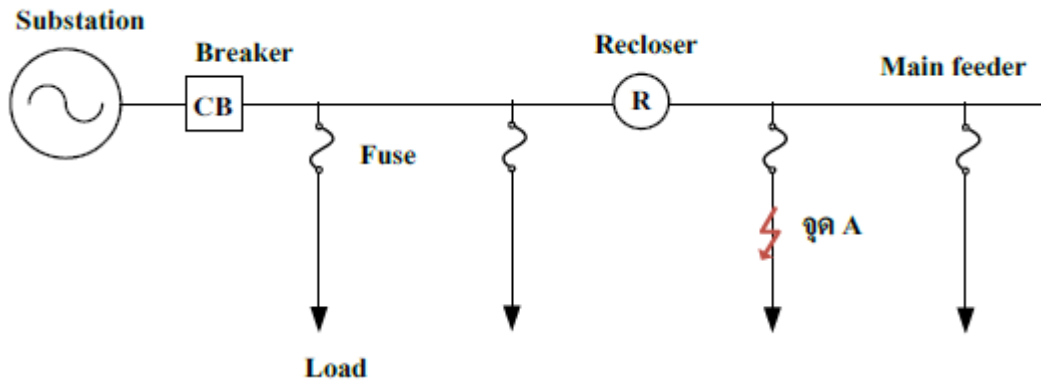
ฟิวส์[15, 16]เป็นอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินชนิดหนึ่ง โดยใช้ความร้อนจากกระแสที่ไหลผ่านตัวฟิวส์ที่เกินค่าที่กำหนดไว้เป็นตัวทำการเปิดวงจร ซึ่งปกติแล้วจะทำการติดตั้งบริเวณต้นทางของสายป้อนย่อย เพื่อป้องกันกระแสเกินที่จะเกิดขึ้นกับโหลดบนสายป้อนย่อย โดยมีค่าคุณลักษณะด้วยกัน 2 ค่า คือ ค่าหลอมละลายขั้นต่ำ (Minimum Melting: MM) และค่าที่ใช้ในการหลอมละลายทั้งหมด (Total Clearing: TC) ชนิดของฟิวส์ที่นิยมใช้ในระบบจำหน่ายจะมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ K (Fast types) และ T (Slow types) การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเร็ว โดยที่อัตราส่วนความเร็ว คือ อัตราส่วนของค่าน้อยที่สุดของกระแสหลอมละลาย (Minimum melt current) ที่เกิดจากการทำงานที่ 0.1 วินาที ถึง ค่ากระแสน้อยสุดในการหลอมละลายที่ 300 วินาที สำหรับชนิด K อัตราส่วนความเร็ว 6-8 และชนิด T 10-13 โดยขนาดของฟิวส์ที่นิยมเลือกใช้ คือ 6 A, 10 A, 15 A, 25 A, 40 A, 65 A, 100 A, 140 A และ 200 A และที่ไม่นิยมใช้ คือ 8 A, 12 A, 20 A, 30 A, 50 A และ 80 A

2.3.4 ลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้าจำหน่าย

โดยทั่วไปเซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการติดตั้งไว้ที่ต้นทางของสายป้อน รีโกลสเซอร์จะถูกติดตั้งไว้บริเวณกลางสายป้อน และฟิวส์จะถูกติดตั้งบริเวณต้นทางของสายป้อนย่อยดังรูปที่ 2.12 ในส่วนของลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันที่แปรผันตามระยะเวลาของเหตุการณ์ลัดวงจรที่เหมาะสมจากการตั้งค่าขนาดกระแสที่เกิดการลัดวงจรบนอุปกรณ์ป้องกันของผู้ติดตั้งระบบ โดยจะมีการกำหนดช่วงของกระแสตั้งแต่กระแสลัดวงจรต่ำสุด ($I_{f,min}$) ถึงกระแสลัดวงจรสูงสุด ($I_{f,max}$) ของระบบดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะเห็นถึงค่าความสัมพันธ์ของค่ากระแสที่เกิดขึ้นขณะเกิดการลัดวงจรกับระยะเวลาเหตุการณ์ หากเกิดกระแสลัดวงจรค่าหนึ่งลำดับการลัดวงจรจะเรียงตามระยะเวลาของการเกิดการลัดวงจรคือ รีโกลสเซอร์ ฟิวส์ และ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ตามลำดับ โดยสามารถแสดงตัวอย่างลำดับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันได้คือหากเกิดการลัดวงจรบริเวณหลังรีโกลสเซอร์ (จุด A) อุปกรณ์แรกที่ต้องทำงานคือ รีโกลสเซอร์ช่วงทำงานเร็ว เพื่อกำจัดการลัดวงจรแบบชั่วคราว อย่างไรก็ตามเมื่อรีโกลสเซอร์ต่อกลับวงจรกลับเข้ามา หากการลัดวงจรดังกล่าวยังอยู่ในระบบ จะแสดงว่าเป็นการลัดวงจรแบบถาวร ฟิวส์จะเป็นอุปกรณ์ถัดมาที่ต้องทำงาน หากฟิวส์ไม่ทำงานอุปกรณ์ถัดมาที่ต้องทำงานคือรีโกลสเซอร์ช่วงการทำงานช้า โดยจะมีเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ป้องกันสำรองหากกับฟิวส์และ รีโกลสเซอร์ไม่ทำงาน แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ลำดับการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์, ฟิวส์ และรีโคลสเซอร์



รูปที่ 2.10 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป

บทที่ 3

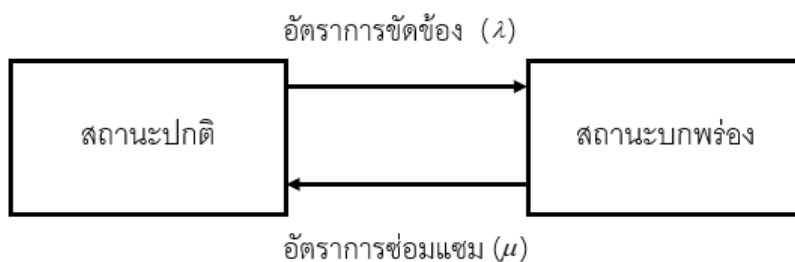
ทฤษฎีพื้นฐานในการประเมินไฟฟ้าดับของระบบไฟฟ้ากำลัง

3.1 แนวคิดพื้นฐานเกี่ยวกับการประเมินไฟฟ้าดับในระบบไฟฟ้ากำลัง

3.1.1 การจำลองการเกิดความบกพร่องในระบบไฟฟ้า

ในการจำลองเหตุการณ์ไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะนั้นสามารถวิเคราะห์ได้จากเหตุการณ์ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งเหตุการณ์ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบนั้นโดยทั่วไปจะมีวิธีการประเมินเหตุการณ์ความบกพร่องในระบบไฟฟ้าได้สองขั้นตอน คือ วิธีการวิเคราะห์ (Analytical Method) ซึ่งเป็นวิธีการสุ่มพฤติกรรมของอุปกรณ์ในระบบ โดยใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณค่าดัชนีต่างๆ และวิธีการจำลองเหตุการณ์ (Simulation Method) การจำลองเหตุการณ์นั้นจะมีวิธีการจำลองเหตุการณ์โดยใช้เทคนิคของมอนติคาร์โล [17] (Monte Carlo Simulation Method: MCS) ซึ่งเทคนิคของมอนติคาร์โลนั้นจะใช้ในการจำลองพฤติกรรมของอุปกรณ์ในระบบที่เกิดขึ้นและตอบสนองต่อเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม และทำการจำลองเหตุการณ์ซ้ำๆ หลายครั้ง เพื่อประเมินผลที่ได้จากการจำลอง จากวิธีการประเมินเหตุการณ์ความบกพร่องในระบบไฟฟ้าข้างต้นนั้น เป็นวิธีที่เหมาะสมกับระบบที่ไม่มีความซับซ้อนมาก จำนวนอุปกรณ์น้อย และให้ผลที่แม่นยำ แต่วิธีการดังกล่าวนี้มีจุดด้อยคือ การคำนวณมีความซับซ้อนซึ่งจะทำให้คำนวณยาก และใช้เวลามากในการจำลองเหตุการณ์ แต่วิธีดังกล่าวเป็นวิธีในการประเมินเหตุการณ์ความบกพร่องในระบบไฟฟ้าได้ดีที่สุด

จากวิธีในการประเมินเหตุการณ์ความบกพร่องในระบบไฟฟ้า จะใช้ข้อมูลการขัดข้องของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเป็นข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการประเมิน จากนั้นจะนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองพฤติกรรมการทำงานของอุปกรณ์แต่ละอุปกรณ์ในระบบ และนำข้อมูลดังกล่าวมาจำลองโดยใช้แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์สองสถานะของมาร์คอฟ (Two-State Markov Model) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์สองสถานะของมาร์คอฟ

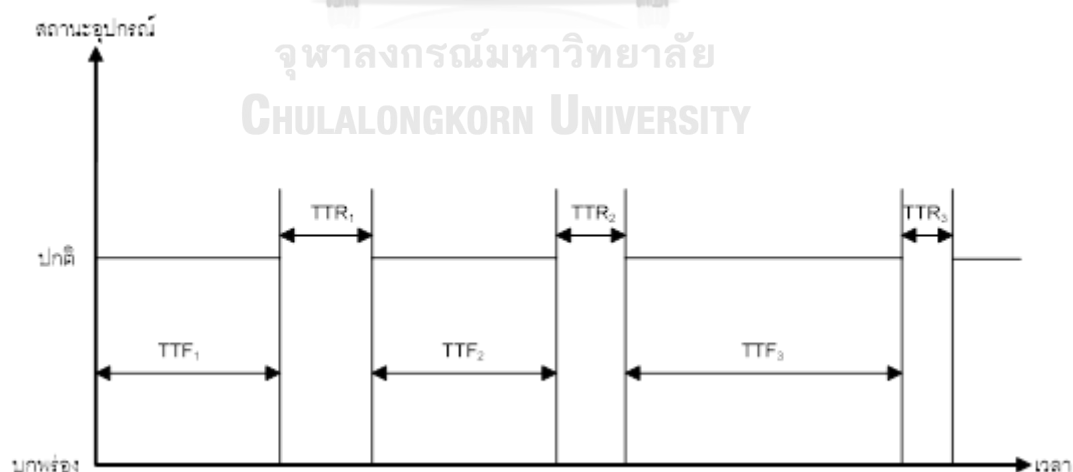
จากรูปจะเห็นว่าแบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์สองสถานะของมาร์คอฟนั้นมีพารามิเตอร์ 2 พารามิเตอร์ คือ อัตราการขัดข้อง และ อัตราการซ่อมแซม[17] ดังสมการที่ (3.1) - (3.2)

$$\text{อัตราการขัดข้อง}(\lambda) = \frac{\text{จำนวนเหตุการณ์การขัดข้องของอุปกรณ์ในช่วงเวลาที่กำหนด}}{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่อุปกรณ์ทำงาน}} \quad (3.1)$$

$$\text{เวลาการซ่อมแซม}(r) = \frac{\text{ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการซ่อมแซมอุปกรณ์}}{\text{จำนวนเหตุการณ์การซ่อมแซมอุปกรณ์ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด}} \quad (3.2)$$

แบบจำลองการทำงานของอุปกรณ์สองสถานะของมาร์คอฟนั้น จะจำลองสถานะของระบบ โดยการจำลองการทำงานบนสาย ซึ่งมี 2 สถานะ คือ สถานะปกติ และ สถานะบกพร่อง โดยเริ่มจากสถานะปกติทำงานไปเรื่อยๆจนระยะเวลาหนึ่งเกิดเหตุขัดข้องบริเวณสายก่อให้เกิดสถานะบกพร่อง ซึ่งคือการเกิดความบกพร่องบริเวณสาย ก่อให้เกิดการลัดวงจร จากนั้นจะมีการซ่อมแซมและบำรุงรักษาจนอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถกลับมาใช้งานได้อีกครั้งคือการกลับสู่สถานะปกติ ดังรูปที่ 3.2

โดยค่า TTF_i คือ ระยะเวลาที่สายไฟฟ้าอยู่ในสถานะปกติครั้งที่ i และ TTR_i คือ ระยะเวลาที่สายไฟฟ้าอยู่ในสถานะบกพร่องครั้งที่ i ซึ่งทั้งสองจะใช้การสุ่มโดยใช้วิธี Monte Carlo ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.3) และ (3.4)[17]



รูปที่ 3.2 รูปแสดงแบบจำลองการทำงานของสายไฟฟ้าตามระยะเวลาต่างๆ

$$TTF = -\frac{1}{\lambda} \times \ln(U) \quad (3.3)$$

$$TTR = \frac{1}{\mu} + \left(0.1 \times Z \times \frac{1}{\mu} \right) \quad (3.4)$$

โดยที่

U	คือ	ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform distribution)
Z	คือ	ตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution)
λ	คือ	อัตราการชำรุดของสายไฟฟ้า (ครั้ง/ปี)
μ	คือ	อัตราการซ่อมแซมของสายไฟฟ้า (ครั้ง/ปี)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้กระบวนการประเมินเหตุการณ์ความบกพร่องในระบบไฟฟ้า มาประยุกต์ใช้กับระบบทดสอบ โดยพิจารณาที่สายไฟฟ้า เพื่อหาจำนวนครั้งของเหตุการณ์ ตำแหน่ง และระยะเวลาเหตุการณ์ที่เกิดไฟฟ้าดับ ซึ่งจะนำข้อมูลดังกล่าวมาพิจารณาต่อไป

3.1.2 การจำลองประเภทของการลัดวงจร

ประเภทของการลัดวงจรที่ทำการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมีทั้งหมด 2 ประเภท คือ การลัดวงจรประเภทหนึ่งเฟสลงดิน และการลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตร[18] ซึ่งกำหนดให้มีความน่าจะเป็นในการเกิดการลัดวงจรแต่ละประเภทดังต่อไปนี้[19]

- การลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตรมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นเท่ากับ 15%
- การลัดวงจรประเภทหนึ่งเฟสลงดินมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นเท่ากับ 85 %

โดยแบบจำลองประเภทของการเกิดการลัดวงจรสามารถสร้างได้ตามสมการ (3.5)

$$T = \begin{cases} TP, & \text{if } 0 < U_T \leq 0.15 \\ PTG, & \text{if } 0.15 < U_T \leq 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

โดยที่

T	คือ	ประเภทของการลัดวงจรที่เกิดขึ้น
TP	คือ	การลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตร
PTG	คือ	การลัดวงจรประเภทหนึ่งเฟสลงดิน
U_T	คือ	เลขที่ได้จากการสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอระหว่าง 0 ถึง 1

3.2 ดัชนีที่ใช้ในการประเมินไฟฟ้าดับ

3.2.1 นิยามตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

นิยามตัวแปรพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการประเมินไฟฟ้าดับตามมาตรฐาน IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices (IEEE Std 1366TM-2012)[20] มีดังต่อไปนี้

CI	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ (ราย)
CMI	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับคูณด้วยเวลาไฟฟ้าดับ (ราย-นาทิต)
N_i	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ได้รับผลจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรแต่ละครั้งในช่วงเวลาที่กำหนด (ราย)
$CN_{(k \geq n)}$	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวร n ครั้งหรือมากกว่าในช่วงเวลาที่กำหนด (ราย)
$CN_{(k \geq S)}$	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับระยะเวลาไฟฟ้าดับ S ชั่วโมงหรือมากกว่า (ราย)
$CN_{(k \geq T)}$	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับระยะเวลาไฟฟ้าดับ T ชั่วโมงหรือมากกว่า (ราย)
$CNT_{(k \geq n)}$	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรและชั่วคราว n ครั้งหรือมากกว่าในช่วงเวลาที่กำหนด (ราย)
N_T	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดที่ได้รับการจ่ายไฟในระบบ (ราย)
N_i	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ได้รับผลจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรแต่ละครั้งในช่วงเวลาที่กำหนด (ราย)
r_i	คือ	ระยะเวลาการกู้คืนการจ่ายไฟของเหตุการณ์ไฟฟ้าดับแต่ละครั้ง (นาทิต)

3.2.2 ดัชนีที่เกี่ยวกับไฟฟ้าดับ

ดัชนีความเชื่อถือได้ที่พิจารณาเฉพาะเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวร[20]มีดังต่อไปนี้

1) System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)

ดัชนี SAIFI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.6) และ (3.7)

$$SAIFI = \frac{\sum \text{Total Number of Customers Interrupted}}{\text{Total Number of Customers Served}} \quad (3.6)$$

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_T} = \frac{CI}{N_T} \quad (3.7)$$

2) System Average Interruption Duration Index (SAIDI)

ดัชนี SAIDI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาไฟฟ้าดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยทั่วไปจะคิดเป็นนาทีหรือชั่วโมง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.8) และ (3.9)

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Customer Minutes of Interruption}}{\text{Total Number of Customers Served}} \quad (3.8)$$

$$SAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{N_T} = \frac{CMI}{N_T} \quad (3.9)$$

3) Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI)

ดัชนี CAIDI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงเวลาเฉลี่ยในการกู้คืนการจ่ายไฟเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.10) และ (3.11)

$$CAIDI = \frac{\sum \text{Customer Minutes of Interruption}}{\text{Total Number of Customers Interrupted}} = \frac{CMI}{CI} \quad (3.10)$$

$$CAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{\sum N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (3.11)$$

4) Customer Total Average Interruption Duration Index (CTAIDI)

ดัชนี CTAIDI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาไฟฟ้าดับที่ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยตรงต้องพบเจอภายในช่วงเวลาที่กำหนด ดัชนีนี้จะมีการคำนวณที่ใกล้เคียงกับ

ดัชนี CAIDI ยกเว้นแต่ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับหลายครั้งจะนับเพียงแค่ครั้งเดียวเท่านั้น โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.12) และ (3.13)

$$CTAIDI = \frac{\sum \text{Customer Interruption Durations}}{\text{Total Number of Distinct Customers Interrupted}} \quad (3.12)$$

$$CTAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{CN} = \frac{CMI}{CN} \quad (3.13)$$

หมายเหตุ : จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยตรงจะถูกนับเพียงครั้งเดียวโดยไม่นับอยู่กับจำนวนครั้งของเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในช่วงเวลาที่กำหนด

5) Customer Average Interruption Frequency Index (CAIFI)

ดัชนี CAIFI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรโดยตรงต้องพบเจอกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยที่ใช้ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับหลายครั้งจะนับเพียงแค่ครั้งเดียวเท่านั้น โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.14) และ (3.15)

$$CAIFI = \frac{\sum \text{Total Number of Customer Interruptions}}{\text{Total Number of Distinct Customers Interrupted}} \quad (3.14)$$

$$CAIFI = \frac{\sum N_i}{CN} = \frac{CI}{CN} \quad (3.15)$$

หมายเหตุ : จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับโดยตรงจะถูกนับเพียงครั้งเดียวโดยไม่นับอยู่กับจำนวนครั้งของเหตุการณ์ไฟฟ้าดับในช่วงเวลาที่กำหนด

6) Average Service Availability Index (ASAI)

ดัชนี ASAI คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของเวลา (โดยมากแสดงเป็นร้อยละ) ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับการจ่ายไฟในช่วงเวลาที่กำหนด โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.16) และ (3.17)

$$ASAI = \frac{\text{Customer Hours Service Availability}}{\text{Customer Hours Service Demand}} \quad (3.16)$$

$$ASAI = \frac{N_T \times (\text{Number of hours / yr}) - \sum r_i N_i}{N_T \times (\text{Number of hours / yr})} \quad (3.17)$$

หมายเหตุ : ปีปกติสุรทินมี 8,760 ชั่วโมง และปีอธิกสุรทิน มี 8,784 ชั่วโมง

7) Customers Experiencing Multiple Interruptions ($CEMI_n$)

ดัชนี $CEMI_n$ คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับถาวรเป็นจำนวน n ครั้งหรือมากกว่าต่อจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.18) และ (3.19)

$$CEMI_n = \frac{\text{Total Number of Customers that Experienced } n \text{ or More Sustained Interruptions}}{\text{Total Number of Customers Served}} \quad (3.18)$$

$$CEMI_n = \frac{CN_{(k \geq n)}}{N_T} \quad (3.19)$$

8) Customers Experiencing Long Interruption Durations ($CELID$)

ดัชนี $CELID$ คือ ดัชนีที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ประสบกับเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่มีระยะเวลาไฟฟ้าดับมากกว่าหรือเท่ากับเวลาที่กำหนด ไม่ว่าจะเป็ระยะเวลาไฟฟ้าดับของเหตุการณ์เดียวหรือระยะเวลาไฟฟ้าดับรวมที่ผู้ใช้ไฟฟ้าประสบในช่วงเวลาที่กำหนด โดยกรณีระยะเวลาไฟฟ้าดับของเหตุการณ์เดียวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.20) และ (3.21) ส่วนกรณีระยะเวลาไฟฟ้าดับรวมสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.22) และ (3.23)

ระยะเวลาไฟฟ้าดับของเหตุการณ์เดียว :

$$CELID - S = \frac{\text{Total Number of Customers that Experienced } S \text{ or More Hours Duration}}{\text{Total Number of Customers Served}} \quad (3.20)$$

$$CELID - S = \frac{CN_{(k \geq S)}}{N_T} \quad (3.21)$$

ระยะเวลาไฟฟ้าดับรวม :

$$CELID - T = \frac{\text{Total Number of Customers that Experienced } T \text{ or More Hours Duration}}{\text{Total Number of Customers Served}} \quad (3.22)$$

$$CELID - T = \frac{CN_{(k \geq T)}}{N_T} \quad (3.23)$$

3.3 ค่าดัชนีไฟฟ้าดับได้ของประเทศไทย

จากมาตรฐาน IEEE Std 1366TM-2012[20] ดัชนีที่นิยมใช้สำหรับประเมินความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทย ประกอบด้วย ดัชนี SAIFI ดัชนี SAIDI ซึ่งแต่ละดัชนีมีความหมายและการคำนวณดังต่อไปนี้[21]

3.3.1 ค่าดัชนี SAIFI

ค่าดัชนี SAIFI (System Average Interruption Frequency Index, ครั้ง/ปี) คือ ค่าดัชนีที่บ่งบอกถึงค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งของการเกิดเหตุการณ์ขัดข้องในระบบโครงข่ายไฟฟ้าต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบ ตามระยะเวลาที่พิจารณา โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.24)

$$SAIFI = \frac{\text{ผลรวมของจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (3.24)$$

โดย

λ_i คือ อัตราการเกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบที่ i (ครั้ง/ปี)
 N_i คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบที่ i

3.3.2 ค่าดัชนี SAIDI

ค่าดัชนี SAIDI (System Average Interruption Duration Index, ชั่วโมง/ปี) คือ ค่าดัชนีที่แสดงค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของระบบที่กระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งระบบ ในระยะเวลาที่พิจารณา โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.25)

$$SAIDI = \frac{\text{ผลรวมของระยะเวลาที่ผู้ใช้ไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลว}}{\text{จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด}} = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (3.25)$$

โดย

U_i คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่เกิดเหตุการณ์ล้มเหลวของผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบที่ i (ชั่วโมง/ปี)

N_i คือ จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าของระบบที่ i

บทที่ 4

ทฤษฎีพื้นฐานในการประเมินแรงดันตกชั่วขณะ

4.1 ดัชนีแรงดันชั่วขณะ

ในการประเมินแรงดันตกชั่วขณะ [3-5] นั้นมีหลายวิธีการที่สามารถนำมาใช้ได้ หนึ่งในวิธีที่นิยมนำมาใช้คือ การพิจารณาค่าดัชนีแรงดันตกชั่วขณะ โดยมีดัชนีหลายชนิดที่ใช้แสดงถึงความรุนแรงของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบ ได้แก่ ค่าดัชนีเฉลี่ยจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันของระบบ หรือ SARFI_x (System Average RMS Variation Frequency Index)

SARFI_x คือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนเหตุการณ์ที่ตรวจวัดและมีการแปรเปลี่ยนระดับแรงดันในช่วงเวลาการประเมินต่อจำนวนลูกค้าที่พิจารณาทั้งหมด โดยค่าขนาดแรงดันตกชั่วขณะที่มีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่าค่า X จะนำมาพิจารณา ซึ่งสามารถคำนวณค่า SARFI_x ของระบบได้ดังสมการ (4.1)

$$SARFI_x = \frac{\sum_{j=1}^n N_j}{N_T} \quad (4.1)$$

โดยที่

X	คือ	ค่าระดับแรงดัน RMS ที่พิจารณา
n	คือ	จำนวนจุดโหนดทั้งหมด
N _j	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าที่ได้รับผลกระทบเมื่อระดับแรงดันอยู่ต่ำกว่าระดับที่พิจารณา ณ จุดโหนด j
N _T	คือ	จำนวนลูกค้าทั้งหมดในระบบ

ทั้งนี้ดัชนี SARFI_x สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของระดับแรงดัน x ที่พิจารณา ได้แก่ ค่าดัชนี SARFI_{Threshold} เมื่อระดับแรงดันพิจารณาเป็นแรงดันขีดจำกัด เช่น 70% 80% เป็นต้น และค่าดัชนี SARFI_{Curve} เมื่อระดับแรงดันพิจารณาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและขนาดของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น โดยสำหรับในกรณีที่พิจารณาค่าดัชนี SARFI_{Curve} จะสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท ตามมาตรฐานความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ SARFI_{ITIC} และ SARFI_{SEMI-F47} ซึ่งจะนำเสนอโดยละเอียดต่อไปในหัวข้อถัดไป

4.2 มาตรฐานความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า

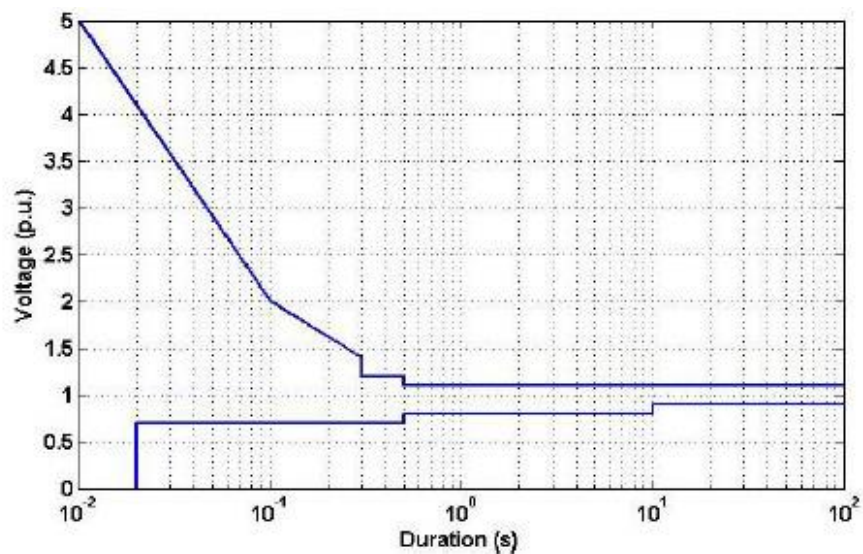
อุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละประเภทจะมีความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะที่แตกต่างกัน [3, 22] สามารถแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งในปัจจุบันนั้นได้มีการกำหนดมาตรฐานเพื่อให้การออกแบบของอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถทนต่อแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นได้ โดยมาตรฐานที่ถูกใช้งาน และ นำไปใช้ในการวิจัยอย่างแพร่หลายมีทั้งสิ้น 3 มาตรฐาน ได้แก่ มาตรฐาน CBEMA, มาตรฐาน ITIC และ มาตรฐาน SEMI-F47

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์แต่ละประเภท

ชนิดของอุปกรณ์	ขนาดแรงดันที่เหลืออยู่ [%]	ระยะเวลาสูงสุด[ms]
Motor starter	50	40
Variable speed motor with electronics	85	10
PLC I/O Device	50 – 90	8 – 20
Frequency inverter	82	1.5
Variable Speed Drive rectifier	50 – 80	2 – 3
Process controller	70	< 8
Computerized numerical controlled lathe	70	< 8
Direct Current drive controller	88	< 8
Personal Computer	50 – 70	60 – 160
Contactors	50 – 60	20 – 30
Electromagnetic disconnecting switch	50	10
Electromagnetic relays	50 – 60	15 – 40
Medical equipment	60	130
Servo drives	80	50
Laser marker	90	100

4.2.1 มาตรฐาน ITIC

มาตรฐานจากองค์กรทางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Information Technology Industry Council)[4] เพื่อกำหนดขีดจำกัดความทนได้ของอุปกรณ์ที่ปรับปรุงจาก CBEMA Curve แต่จะมีความสอดคล้องกับเทคโนโลยีสมัยใหม่มากขึ้น [3] แสดงดังรูปที่ 4.1 และรายละเอียดดังตารางที่ 4.2



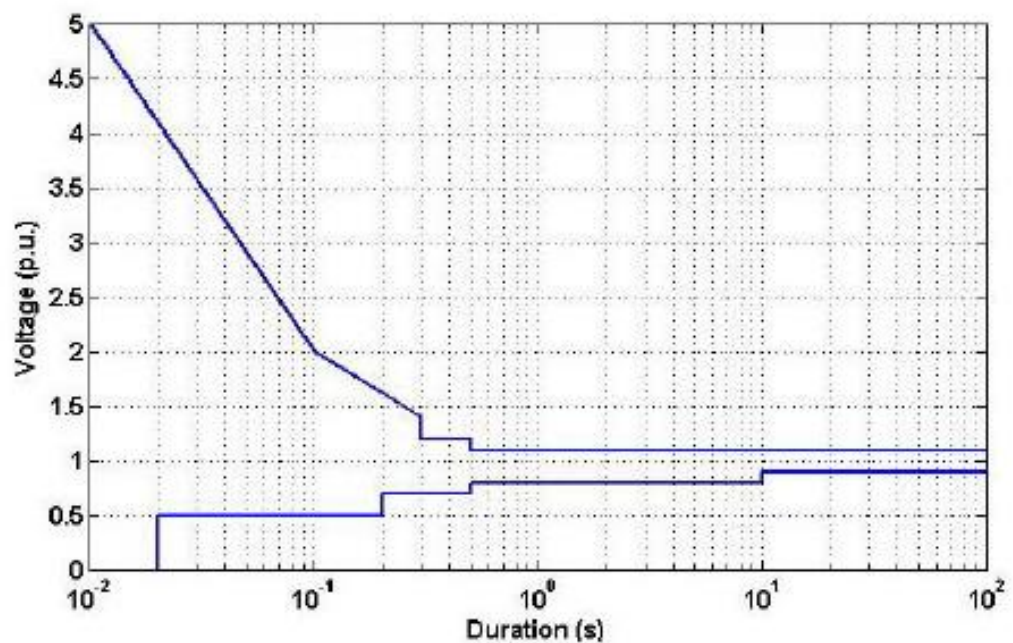
รูปที่ 4.1 มาตรฐาน ITIC

ตารางที่ 4.2 ค่า ITIC

Voltage (p.u.)	Duration (d)
0	$d \leq 20ms$
<0.7	$20ms < d \leq 500ms$
<0.8	$500ms < d \leq 10sec$
<0.9	$10sec < d$

4.2.2 มาตรฐาน SEMI-F47

มาตรฐาน SEMI-F47 (The Semiconductor Equipment and Materials International) [3] เป็นมาตรฐานที่กำหนดเพื่อรองรับความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะที่ถูกใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะพบว่าหากทำการเปรียบเทียบมาตรฐาน ITIC กับมาตรฐาน SEMI-F47 จะพบว่าในช่วงระยะเวลาตั้งแต่ 0.05 วินาที ถึง 1 วินาที มาตรฐาน SEMI-F47 จะมีการกำหนดเป็นลักษณะขั้นบันได ขณะที่มาตรฐาน ITIC จะกำหนดเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถพิจารณาออกมาเป็นค่าได้ดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 มาตรฐาน SEMI-F47

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า $SARFI_{SEMI-F47}$

Voltage (p.u.)	Duration (d)
0	$d \leq 20ms$
< 0.5	$20ms < d \leq 200ms$
< 0.7	$200ms < d \leq 500ms$
< 0.8	$500ms < d \leq 10sec$
< 0.9	$10sec < d$

4.3 ค่าคาดหวังต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

ในการพิจารณาค่าคาดหวังจำนวนการเกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบ[23] จะมีการแบ่งประเภทของอุปกรณ์ เนื่องจากอุปกรณ์แต่ละประเภทมีความสามารถในการทนต่อขนาดและระยะเวลาของแรงดันตกชั่วขณะที่แตกต่างกัน

4.3.1 การจัดลำดับชนิดของอุปกรณ์

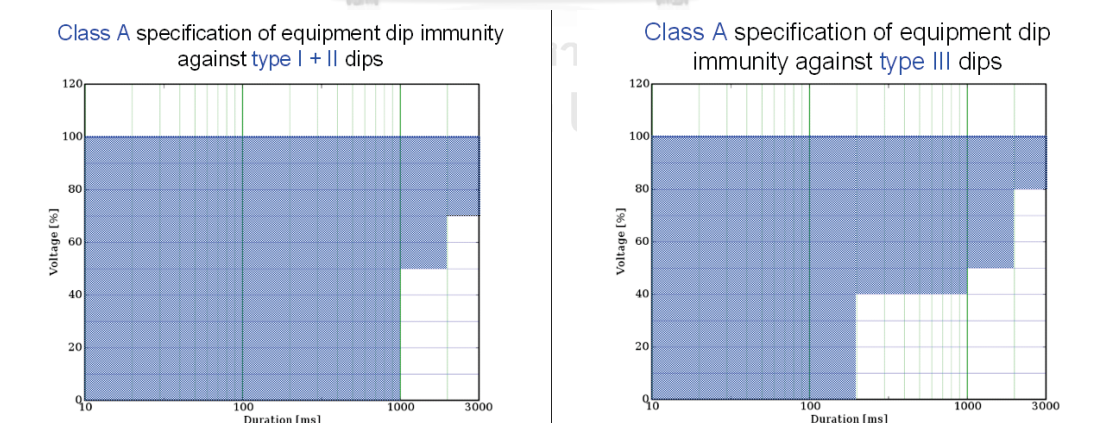
การแบ่งชนิดของอุปกรณ์[23]จะมีการแบ่ง 2 ขั้นตอน คือ แบ่งตามชนิดของการเกิดความบกพร่อง และแบ่งตามความสามารถในการทนต่ออุปกรณ์

1.) แบ่งตามชนิดของความบกพร่องในระบบที่ส่งผลให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะสำหรับอุปกรณ์สามเฟสได้ 3 ประเภท คือ

- Type I : การลัดวงจรแบบหนึ่งเฟสลงดิน (Single line – to – ground fault)
- Type II : การลัดวงจรแบบสองเฟสลงดิน (Double line – to – ground fault)
- Type III : การลัดวงจรแบบสามเฟสสมมาตร (Three-phase balanced fault)

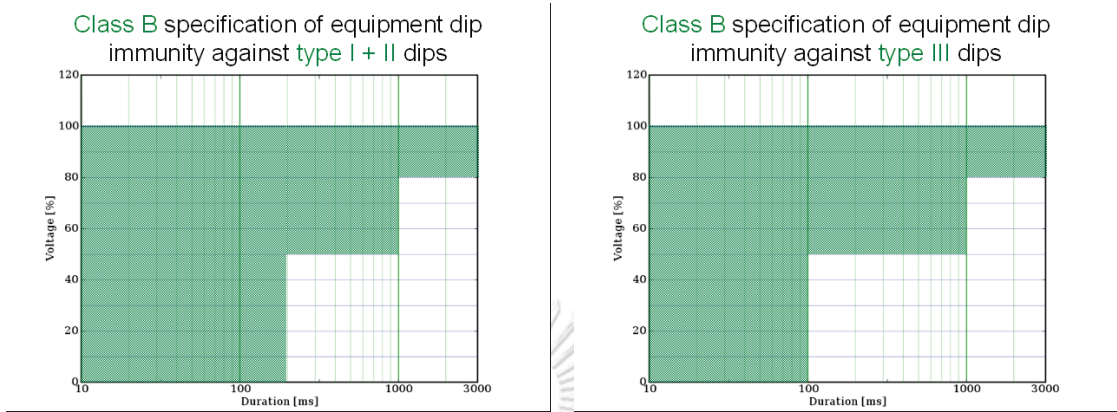
2.) แบ่งชนิดตามการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ได้เป็น 6 ระดับดังต่อไปนี้

- การทนต่อแรงดันตกของอุปกรณ์ระดับ A : ในระดับนี้จะเป็นอุปกรณ์ที่มีความอ่อนไหวต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูป 4.3



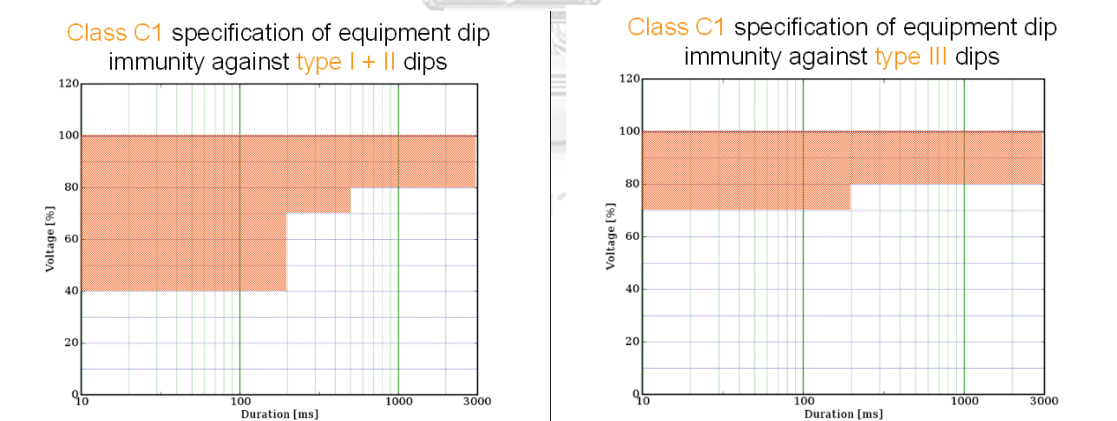
รูปที่ 4.3 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ A

- การทนต่อแรงดันตกของอุปกรณ์ระดับ B : ในระดับนี้จะเป็อุปกรณ์ที่มีความอ่อนไหวต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะน้อยกว่าระดับ A แต่ยังคงมีความอ่อนไหวต่อแรงดันตกชั่วขณะ ดังแสดงในรูป 4.4



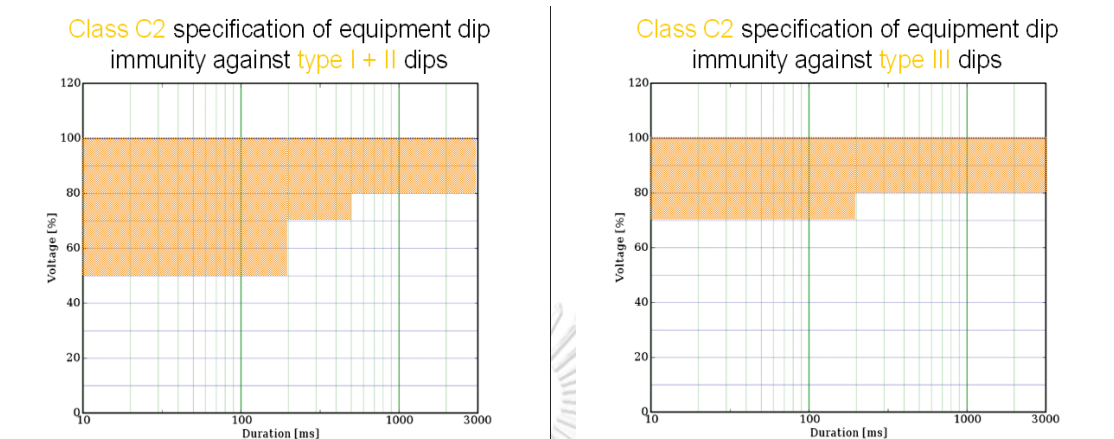
รูปที่ 4.4 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ B

- การทนต่อแรงดันตกของอุปกรณ์ระดับ C1 : ในระดับนี้จะเป็อุปกรณ์อ้างอิงจาก IEC 61000-4-11/34 ดังรูปที่ 4.5



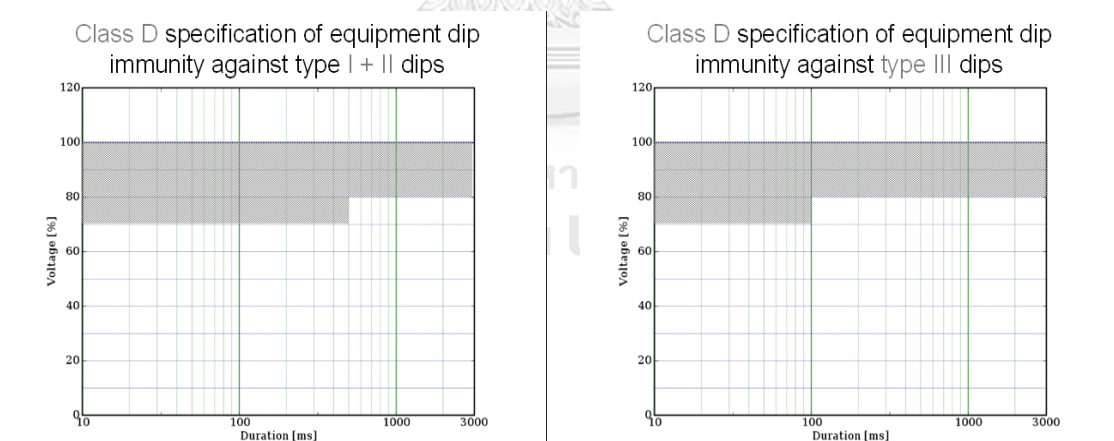
รูปที่ 4.5 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ C1

- การทนต่อแรงดันตกของอุปกรณ์ระดับ C2 : ในระดับนี้จะเป็นอุปกรณ์จำพวกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอ้างอิงจาก SEMI F47-0706 ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ C2

- การทนต่อแรงดันตกของอุปกรณ์ระดับ D : ในระดับนี้จะเป็นการแสดงของความทนทานของอุปกรณ์โดยทั่วไป ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับ ITIC ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความสามารถในการทนต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์ระดับ D

- การทนต่อแรงดันตกของอุปกรณ์ระดับ E : ในระดับนี้จะเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีผลต่อแรงดันตกชั่วขณะไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม

4.3.2 ค่าคาดหวังของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงจำนวนของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางที่เกิดขึ้นมากที่สุดที่สามารถยอมรับได้จากค่าความทนทานต่อแรงดันตกชั่วขณะของอุปกรณ์แต่ละชนิดนั้น ซึ่งสามารถแบ่งค่าจำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่สามารถยอมรับได้ตามระดับความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative Probability , CP) ซึ่งความน่าจะเป็นสะสม คือ เปอร์เซ็นของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่ส่งผลกระทบต่อจำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยจะแบ่งระดับของความน่าจะเป็นสะสมเป็น 4 กรณีดังนี้[23]

1.) ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 95% (CP95) คือเหตุการณ์แรงดันตกที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์มากกว่า 95 เปอร์เซ็นของเหตุการณ์แรงดันตกทั้งหมด และมีเพียงไม่ถึง 5 เปอร์เซ็นที่ไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์เนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะต่ออุปกรณ์เมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบ โดยจะกำหนดให้กรณีนี้เป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงมาก ดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP95

ชนิดของความบกพร่อง	ระดับของอุปกรณ์				
	A	B	C1	C2	D
Type I	1	4	13.5	17.5	36.5
Type II	1	7	21.5	24.5	38
Type III	4.5	13.5	30	30	35
Total	6.5	24.5	65	72	99.5

2.) ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 75% (CP75) คือเหตุการณ์แรงดันตกที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์มากกว่า 75 เปอร์เซ็นของเหตุการณ์แรงดันตกทั้งหมด และมีเพียงไม่ถึง 25 เปอร์เซ็นที่ไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์เนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะต่ออุปกรณ์เมื่อเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบ โดยจะกำหนดให้กรณีนี้เป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูง ดังตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP75

ชนิดของความบกพร่อง	ระดับของอุปกรณ์				
	A	B	C1	C2	D
Type I	1	1	4.5	5.5	9
Type II	1	1	6.5	7.5	14
Type III	1	4	10.5	10.5	11
Total	3	6	21.5	23.5	34

3.) ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 50% (CP50) คือเหตุการณ์แรงดันตกที่เกิดขึ้นต้องไม่ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของเหตุการณ์แรงดันตกทั้งหมด และเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์จะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนด โดยจะกำหนดให้กรณีนี้เป็นพื้นที่ปกติ ดังตาราง 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP50

ชนิดของความบกพร่อง	ระดับของอุปกรณ์				
	A	B	C1	C2	D
Type I	0	0	1	1	4.5
Type II	0	0	1	1	6.5
Type III	0	1	5	5	6
Total	0	1	7	7	17

4.) ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 25% (CP25) คือเหตุการณ์แรงดันตกที่เกิดขึ้นต้องส่งผลให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ของเหตุการณ์แรงดันตกทั้งหมด และเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์จะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่กำหนด โดยจะกำหนดให้กรณีนี้เป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่ำ ดังตาราง 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าคาดหวังของจำนวนแรงดันตกชั่วขณะสูงสุดของอุปกรณ์ในระดับต่างๆในกรณี CP25

ชนิดของความบกพร่อง	ระดับของอุปกรณ์				
	A	B	C1	C2	D
Type I	0	0	0	0	2
Type II	0	0	0	0	2.5
Type III	0	0	2	2	2.5
Total	0	0	2	2	7

จากค่าคาดหวังของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะดังกล่าว จะเห็นว่า CP50 แสดงถึงพื้นที่โดยทั่วไป และข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการวางแผนหรือเพื่อการตั้งสมมติฐานทางเศรษฐกิจและการตัดสินใจที่สมเหตุสมผล หากพื้นที่ดังกล่าวมีความเสี่ยงที่สูงคือ CP75 และ CP95 เป็นพื้นที่ที่ต้องการปรับปรุงเพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบ เนื่องจากค่า CP75 และ CP95 นั้นอาจส่งผลให้มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะที่สูงมาก แต่ในทางกลับกันหากพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่ต้องการความมั่นคงทางคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นน้อยมากควรใช้ค่า CP 25 ซึ่งจะส่งผลให้ค่าแรงดันตกชั่วขณะเกิดขึ้นน้อยมากแต่มูลค่าในการติดตั้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพจะสูงขึ้นตาม ซึ่งการเลือกค่าคาดหวังที่จะนำไปใช้ขึ้นกับความเหมาะสมของพื้นที่ของแต่ละผู้ใช้ไฟฟ้า

4.4 ค่าคาดหวังต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน ITIC

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน ITIC ซึ่งจะนำมาใช้กับพื้นที่โรงงานอุตสาหกรรม เพื่อหาค่าการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่เหมาะสมสามารถแบ่งระดับของค่าคาดหวังต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะได้เป็น 4 ระดับประกอบด้วย ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 95% (CP95) ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 75% (CP75) ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 50% (CP50) และ ค่าความน่าจะเป็นสะสมที่ 25% (CP25) การเลือกระดับของค่าคาดหวังการเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นกับประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า สามารถสรุปค่าคาดหวังการเกิดแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน ITIC (อุปกรณ์ระดับ D) ได้ดังตาราง 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคาดหวังต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน ITIC (อุปกรณ์ระดับ D)

ชนิดของความ บกพร่อง	ค่าความน่าจะเป็นสะสม(%)			
	95	75	50	25
Type I	36.5	9	4.5	2
Type II	38	14	6.5	2.5
Type III	35	11	6	2.5
รวม	99.5	34	17	7



บทที่ 5

ปัจจัยที่มีผลต่อการประเมินมูลค่าคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

5.1 ประเภทของสายไฟหรือสายป้อนในระบบจำหน่าย

การเปลี่ยนประเภทของสายไฟหรือสายป้อนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าจำหน่ายเป็นหนึ่งในวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบได้ โดยสายไฟที่ใช้ในระบบไฟฟ้าจำหน่ายของประเทศไทยในปัจจุบันประกอบด้วยสายไฟฟ้า 3 ประเภท คือ สายไฟฟ้าเหนื่อดินชนิดเปลือย สายไฟฟ้าเหนื่อดินชนิดหุ้มฉนวน และสายเคเบิลใต้ดิน ลักษณะของสายไฟประเภทต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 5.1 สายไฟประเภทต่างๆ

โดยสิ่งที่ต้องพิจารณาในการเปลี่ยนประเภทของสายป้อน คือ ค่าอัตราความขัดข้อง (Failure Rate) และระยะเวลาการซ่อมแซม (Repair Time) ว่าเมื่อเปลี่ยนประเภทสายไฟฟ้าไปแล้วจะมีค่าที่ดีขึ้นเท่าไร โดยค่าอัตราความขัดข้องและระยะเวลาการซ่อมของสายประเภทต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ 5.1 [24] และ สัดส่วนชนิดของสายไฟฟ้าเหนื่อดินทั้ง 2 ประเภทในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายของประเทศไทยรวมถึงสัดส่วนชนิดของสายป้อนประเภทสายเคเบิลใต้ดินในระบบ

จำหน่ายไฟฟ้าในประเทศต่างๆในทวีปยุโรป สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราความขัดข้องและระยะเวลาการซ่อมแซมของสายไฟฟ้าประเภทต่างๆ[25]

ชนิดของสาย	ภาคกลาง		ภาคเหนือ		ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		ภาคใต้	
	λ	r	λ	r	λ	r	λ	r
สายเปลือย	45.65	63.55	40.43	71.69	25.29	72.72	105.95	78.30
สายหุ้มฉนวน	10.71	63.55	8.45	71.69	7.67	92.72	5.95	78.30
สายเคเบิลใต้ดิน	2.44	75.55	2.06	47.00	3.9	137.67	1.8	49.87

หน่วย: λ = อัตราความขัดข้อง(ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี), r = ระยะเวลาซ่อมเฉลี่ย(นาท)

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายไฟฟ้าเหนือดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายของ ประเทศไทย[25]

เขตพื้นที่การทำงาน	ชนิดของสายไฟ(วงจร-กม.)		ชนิดของสายไฟ(%)	
	สายหุ้มฉนวน	สายเปลือย	สายหุ้มฉนวน	สายเปลือย
ภาคเหนือ	14,760.89	50,619.67	22.58	77.42
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	17,250.10	63,705.03	21.31	78.69
ภาคกลาง	20,972.52	36,100.21	36.75	63.25
ภาคใต้	22,835.49	34,343.57	36.75	63.25
รวม	75,819.00	184,768.48	29.10	70.90

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายป้อนประเภทสายเคเบิลใต้ดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของ ประเทศต่างๆใน ทวีปยุโรป[26]

ประเทศ	สัดส่วนของสายเคเบิลใต้ดินใน ระบบจำหน่ายแรงดันกลาง	สัดส่วนของสายเคเบิลใต้ดิน ใน ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ
Austria	57.80%	77.80%
Belgium	92.00%	59.00%
Czech Republic	22.90%	56.30%
France	44.90%	41.90%
Germany	78.10%	89.00%
Greece	10.60%	61.70%
Hungary	19.80%	26.90%
Italy	44.40%	37.20%
Netherlands	100.00%	100.00%
Norway	40.70%	53.30%
Switzerland	73.60%	91.80%
United Kingdom	48.30%	83.70%

5.2 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ

การคำนวณอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ค่า ดัชนีความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบ่งตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า จะใช้ค่าฟังก์ชันความเสียหายแบบรวมประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า (Composite Customer Damage Function: CCDF)[27] ซึ่ง การประเมินความเสียหายโดยตรงโดยใช้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์ทำให้สามารถประเมินผลกระทบ เนื่องจากเหตุการณ์ไฟฟ้าดับประกอบด้วย ความเสียหายโดยตรง ความเสียหายโดยอ้อมและ เหตุการณ์สมมติที่อาศัยหลักการของความเต็มใจที่จะจ่ายและความเต็มใจที่จะยอมรับ ซึ่งแสดงผลดัง ตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ฟังก์ชันความเสียหาย CCDF แบ่งแยกตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟภ.

ประเภทผู้ใช้ ไฟฟ้า	ค่าความเสียหายที่ระยะเวลาไฟฟ้าดับต่างๆ (หน่วย: บาท/กิโลวัตต์)						
	3นาทิต	30นาทิต	60นาทิต	90นาทิต	180นาทิต	240นาทิต	480นาทิต
บ้านอยู่อาศัย	0	2.26	11.47	20.67	58.85	71.58	97.04
กิจการขนาดเล็ก	2.83	32.99	66.85	101.15	204.04	272.63	547.89
กิจการขนาด กลาง	12.89	48.49	89.69	121.16	225.20	311.64	586.88
กิจการขนาด ใหญ่	24.69	41.69	60.42	70.46	101.36	121.46	202.07

5.3 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะ

การประเมินทางเศรษฐกิจเกี่ยวกับความสูญเสียทางการเงินอันเนื่องมาจากแรงดันตกชั่วขณะต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดแรงดันตก การตอบสนองต่อแรงดันของผู้ใช้ไฟ ประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งแยกตามประเภทของผู้ใช้ เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายจะมีมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะไม่เท่ากัน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ข้อมูลค่าเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะสำหรับภาคอุตสาหกรรมในประเทศมาเลเซีย[28] และกำหนดให้โหลดที่ 8 เป็นโรงงานไม้ เนื่องจากมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะของโรงงานประเภทนี้มีค่ากึ่งกลางของข้อมูลมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะทั้งหมด และโหลดที่ 9 เป็นโรงงานกระดาษ เนื่องจากมีมูลค่าความเสียหายจากแรงดันตกชั่วขณะต่ำที่สุดซึ่งจะส่งผลให้ได้ค่าของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นใช้ได้กับทุกโรงงาน โดยใช้ค่าอัตรามูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะต่อครั้ง (Sag Cost Per Event, SCPE) ซึ่งมูลค่าความเสียหายดังกล่าวนั้นจะใช้ข้อมูลจากการเก็บบันทึกข้อมูลการตอบสนองต่อคุณภาพไฟฟ้าในส่วนของแรงดันตกชั่วขณะประกอบไปด้วย มูลค่าของสินค้า มูลค่าของแรงงาน และมูลค่าความเสียหายจากอุปกรณ์ ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 มูลค่าความเสียหายเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะประเทศมาเลเซีย[28]

ประเภทอุตสาหกรรม	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันตกชั่วขณะต่อครั้ง(บาทต่อครั้ง)
โรงงานประเภทแก้ว,หิน,ปูน	3,228,796
โรงงานโลหะ	5,650,393
โรงงานพลาสติก/ยาง	1,235,014
พาณิชยกรรม (โรงพยาบาล,ธนาคาร)	807,199
โรงงานประเภทสารกึ่งตัวนำ	24,215,970
โรงงานเคมี	1,614,398
โรงงานไม้	1,614,398
โรงงานอาหาร	1,614,398
โรงงานยานยนต์	1,852,820
โรงงานกระดาษ	734,551

5.4 อายุการใช้งานเฉลี่ย และเงินลงทุนสำหรับแต่ละอุปกรณ์

อายุการใช้งานเฉลี่ยของสายไฟและเงินลงทุนของสายไฟในแต่ละประเภทเป็นข้อมูลที่ได้จากโครงการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าดังตารางที่ 5.6 [25] ซึ่งจะถูกใช้ประกอบในการประเมินความคุ้มค่าในทศวรรษต่อไป

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 5.6 แสดงอายุการใช้งานเฉลี่ย และมูลค่าการก่อสร้างระบบแบ่งตามประเภทสาย[24]

รายละเอียดอุปกรณ์	อายุการใช้งานเฉลี่ย (ปี)	หน่วย	เงินลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ (บาท)
สายไฟในระบบจำหน่าย 22/33 kV			
- 22 kV, 1 st Circuit,185 A	30	วงจร-กม.	913,740
- 33 kV, 1 st Circuit,185 A	30	วงจร-กม.	976,582
- 22 kV,1 st Circuit, 185 SAC	30	วงจร-กม.	1,425,546
- 33 kV,1 st Circuit,185 SAC	30	วงจร-กม.	1,600,328

รายละเอียดอุปกรณ์	อายุการใช้งานเฉลี่ย (ปี)	หน่วย	เงินลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ (บาท)
สายใต้ดิน (Underground Cable)			
- 22 kV Underground Cable 240 sqmm	30	วงจรถ-กม.	15,034,857
- 33 kV Underground Cable 240 sqmm	30	วงจรถ-กม.	15,159,199

5.5 การคำนวณมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการพิจารณาหาจุดเหมาะสมในการวิเคราะห์ค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้านั้นจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของผู้ติดตั้งระบบจะพิจารณามูลค่าของสายไฟฟ้าภายในระบบในแต่ละกรณีซึ่งสายไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยสายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือยและสายไฟฟ้าเคเบิลใต้ดินซึ่งในแต่ละกรณีจะมีการใช้สายไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังสมการที่ (5.2)[25] อีกส่วนคือส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้านั้นจะพิจารณาถึงมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าประกอบด้วยมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะดังสมการที่ (5.3) จะเห็นได้ว่ามูลค่าความเสียหายนั้นจะประกอบด้วยมูลค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับสามารถคำนวณได้จากสมการ (5.4) [28] โดยการพิจารณามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟฟ้าทุกประเภทนั้นจะใช้ค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับจากความเสียหายแบบรวมประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า (CCDF) และเหตุการณ์ไฟฟ้าดับนั้นจะแบ่งเหตุการณ์ออกเป็น 2 กรณีคือ เกิดการลัดวงจรหน้าอุปกรณ์ป้องกันรีโคสเซอร์ซึ่งจะส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับทั้งสายป้อน และเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับหลังอุปกรณ์ป้องกันรีโคสเซอร์ซึ่งจะส่งผลให้ไฟดับเฉพาะสายป้อนที่อยู่หลังรีโคสเซอร์เท่านั้น แต่การพิจารณามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะนั้นจะพิจารณาเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้นเนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม(โหลดที่ 8 และ 9) จะมีมูลค่าความเสียหายที่สูงมากเมื่อเทียบกับผู้ใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ไม่มีผลกระทบจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ ดังสมการที่ (5.5) จากการคำนวณข้างต้นจะได้มูลค่าการติดตั้งระบบรวมไปถึงมูลค่าความเสียหายทั้งในส่วนของไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะทำให้สามารถพิจารณามูลค่าทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (5.1) จากนั้นจะทำการพิจารณาในกรณีอื่นๆโดยการเปลี่ยนแปลงการใช้สายไฟฟ้า

ประกอบด้วยสายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือยและสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีการเลือกใช้สายไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และท้ายที่สุดจะนำทุกกรณีมาวิเคราะห์เพื่อหาจุดเหมาะสมที่จะใช้ในการพิจารณาค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับ

$$Cost_{total} = Cost_{inv} + Cost_{loss} \quad (5.1)$$

$$Cost_{inv} = \left(\sum_{a=1}^{n-e} Cost_{line1,a} \right) + \left(\sum_{b=1}^e Cost_{line2,b} \right) \quad (5.2)$$

$$Cost_{loss} = Cost_{int} + Cost_{sag} \quad (5.3)$$

$$Cost_{int} = \sum_{d=1}^q \sum_{c=1}^p R_{c,d} \times Load_{c,d} \times CCDF(R_{c,d}) \quad (5.4)$$

$$Cost_{sag} = (SARFI_{MC,8} \times SCPE_x) + (SARFI_{MC,y} \times SCPE_y) \quad (5.5)$$

โดยที่

$Cost_{total}$	คือ	มูลค่าทั้งหมดที่เกิดจากมูลค่าต้นทุนการติดตั้งและมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบ (บาท)
$Cost_{inv}$	คือ	ต้นทุนการติดตั้งสายป้อนระบบไฟฟ้าทั้งหมด (บาท)
$Cost_{loss}$	คือ	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฟดับและแรงดันตกชั่วขณะ (บาท)
$Cost_{line1, a}$	คือ	มูลค่าการก่อสร้างชนิดสายเหนือดินชนิดเปลือยในตำแหน่งที่ a (บาท)
$Cost_{line2, b}$	คือ	มูลค่าการก่อสร้างชนิดสายเคเบิลใต้ดินในตำแหน่งที่ b (บาท)
$Cost_{int}$	คือ	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฟดับ (บาท)
$Cost_{sag}$	คือ	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะ (บาท)
$R_{c,d}$	คือ	ระยะเวลาในการซ่อมบำรุงในเหตุการณ์ไฟฟ้าดับตำแหน่ง c ครั้งที่ d (นาทีก)
$Load_{c,d}$	คือ	โหลด ณ ตำแหน่ง c ครั้งที่ d (กิโลวัตต์)

$CCDF(R_{c,d})$	คือ	<i>Composite Customer Damage Function</i> หมายถึง ค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับโดยขึ้นกับระยะเวลาของไฟฟ้าดับ R ตำแหน่งที่ c ครั้งที่ d (บาทต่อกิโลวัตต์)
$SCPE_g$	คือ	Sag Cost Per Event หมายถึง มูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะต่อ 1 เหตุการณ์ บนโหลด g (บาทต่อครั้ง)
$SARFI_{ITIC,g}$	คือ	จำนวนเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะทั้งหมดที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน <i>ITIC</i> ณ โหลดที่ g ในระยะเวลา 30 ปี (ครั้ง)
n	คือ	จำนวนสายไฟฟ้าทั้งหมดในระบบ (เส้น)
e	คือ	จำนวนสายไฟฟ้าเคเบิลใต้ดินภายในระบบ (เส้น)
p	คือ	จำนวนผู้ใช้ไฟที่เกิดเหตุการณ์ไฟดับทั้งหมด (ราย)
q	คือ	จำนวนเหตุการณ์ไฟฟ้าดับทั้งหมดในระยะเวลา 30 ปี (ครั้ง)

บทที่ 6

ผลการทดสอบ

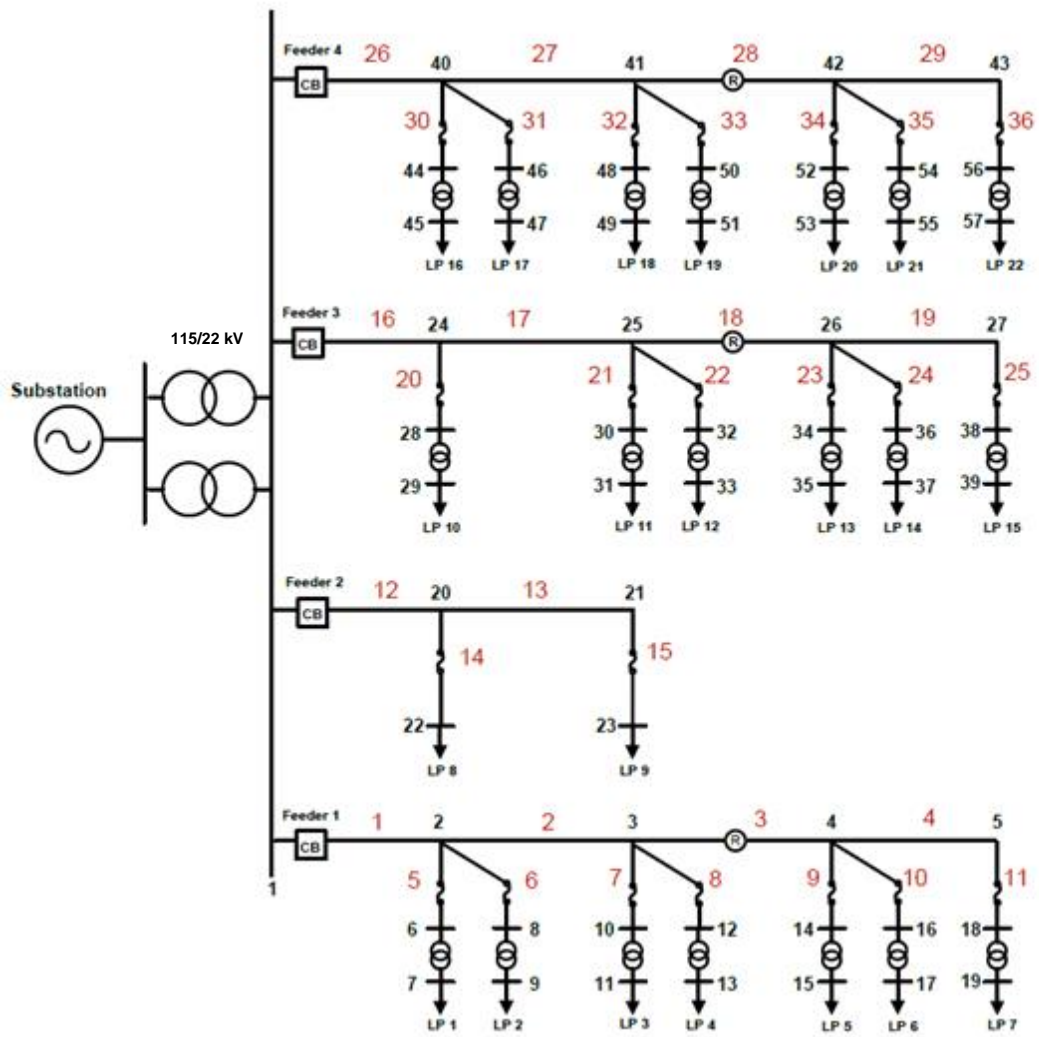
ในบทนี้จะเสนอถึงผลการทดสอบผลกระทบจากแรงดันตกชั่วขณะ ต่อตำแหน่งที่สนใจ และ คำนวณค่าดัชนีแรงดันตกชั่วขณะของระบบไฟฟ้า ทั้งนี้ จะทำการทดสอบโดยอาศัยระบบทดสอบ ดัดแปลงจากระบบทดสอบ Roy Billinton Test System bus 2: RBTS bus 2 [14]

6.1 ระบบทดสอบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการทดสอบกับระบบทดสอบดัดแปลงจากระบบทดสอบ RBTS บัส 2 [14] แสดงดังรูปที่ 6.1 โดยมีข้อมูลเบื้องต้นดังต่อไปนี้

- ระบบทดสอบที่ระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์
- สถานีไฟฟ้าย่อยขนาด 20 เมกะโวลต์แอมป์
- จำนวนบัสทั้งหมด 57 บัส
- จำนวนจุดโหลดทั้งสิ้น 22 จุด ปริมาณความต้องการไฟฟ้า 20 เมกะวัตต์ และ 16 เมกะวาร์
- จำนวนสายป้อนและสายป้อนย่อยทั้งหมด 36 เส้น

สำหรับรายละเอียดความยาวของสายป้อน อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ค่าอัตราการ ล้มเหลวและระยะเวลาการฟื้นฟูของสายป้อน ประเภท จำนวนและขนาดของผู้ใช้ไฟในแต่ละจุดโหลด แสดงดังตารางที่ 6.1 – 6.4



รูปที่ 6.1 ระบบทดสอบตัดแปลง RTBS บัส 2

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลความยาวของสายป้อนแต่ละเส้น

ความยาวสายป้อน (กิโลเมตร)	หมายเลขสายป้อน
3.0	4, 5, 8, 13, 18, 20, 25, 29, 31, 32
3.75	1, 2, 3, 10, 12, 16, 19, 21, 23, 27, 28, 30, 34, 35
4.0	6, 7, 9, 11, 14, 15, 17, 22, 24, 26, 33, 36

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายแต่ละเส้น (โอห์ม/กิโลเมตร)[20]

ชนิดของอุปกรณ์	อิมพีแดนซ์ลำดับบวกและลบ	อิมพีแดนซ์ลำดับศูนย์
สายเหนือดินชนิดเปลือย	$0.176+1.302j$	$0.357+4.969j$
สายเคเบิลใต้ดิน	$0.001+0.064j$	$0.002+0.105j$
หม้อแปลงจำหน่าย	$22.1j$	$21.0j$

ตารางที่ 6.3 อัตราการล้มเหลวแบบถาวร และระยะเวลาการซ่อมแซมของสายไฟฟ้าแต่ละประเภท

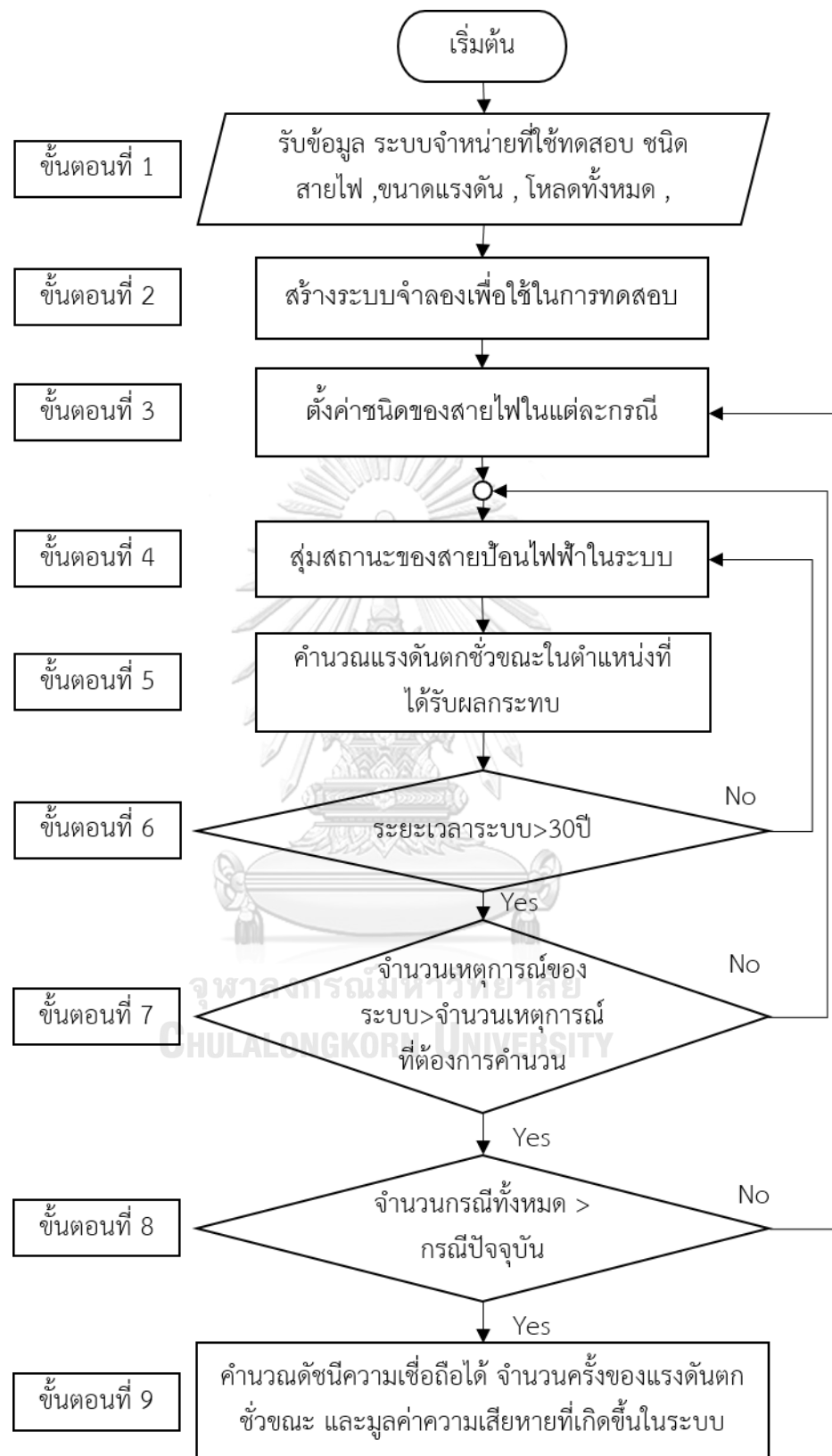
การล้มเหลวของประเภทสาย		อัตราการล้มเหลว (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	ระยะเวลาซ่อมแซม (นาทีก)
$\lambda_{overhead}$	อัตราการล้มเหลวของ สายไฟฟ้าเหนือดิน	45.65	63.55
$\lambda_{underground}$	อัตราการล้มเหลวของ สายไฟฟ้าใต้ดิน	2.44	75.55

ตารางที่ 6.4 ประเภท จำนวน และขนาดของผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละจุดโหลด

ตำแหน่งของ โหลด	ประเภทของผู้ใช้ไฟ	ปริมาณความต้องการไฟฟ้า		จำนวนผู้ใช้ไฟ
		กำลังไฟฟ้าจริง (เมกะวัตต์)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (เมกะวาร์)	
1-3,10,11	บ้านที่อยู่อาศัย	0.8668	0.6934	210
12,17-19	บ้านที่อยู่อาศัย	0.7291	0.5833	200
8	อุตสาหกรรมขนาด กลาง	1.6279	1.3023	1
9	อุตสาหกรรมขนาด กลาง	1.8721	1.4977	1
4, 5, 13, 14	หน่วยงานราชการ	0.9167	0.7334	1
20, 21	หน่วยงานราชการ	0.9167	0.7334	1
6, 7, 15	ธุรกิจบริหาร	0.7500	0.6000	10
16, 22	ธุรกิจบริหาร	0.7500	0.6000	10

6.2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการทดสอบจำลองเหตุการณ์โดยการใช้มอนติ-คาร์โล เพื่อประเมินค่าดัชนีความเชื่อถือได้ตามมาตรฐานไฟดับ และประเมินค่าดัชนีการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ จากนั้นจะทำการหาจุดที่เกิดการลัดวงจรบ่อยที่สุดเพื่อใช้ในการปรับปรุงระบบไฟฟ้า โดยมีกรทดสอบดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนที่ 1 : สร้างระบบจำลองเพื่อใช้ในการทดสอบ โดยทำการดัดแปลงจากระบบ ทดสอบ RBTS บัส 2

ขั้นตอนที่ 2 : พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณพื้นฐาน โดยโปรแกรมจำลองการเกิดการลัดวงจรในระบบ เพื่อใช้ในการคำนวณไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ โดยจะพิจารณาเฉพาะ การลัดวงจรประเภทสามเฟสสมมาตร และหนึ่งเฟสลงดินเท่านั้น

ขั้นตอนที่ 3 : ตั้งข้อมูลสายแต่ละเส้นให้ตรงในแต่ละกรณีเพื่อใช้ในการทดสอบระบบ โดยจะใช้สายไฟ 2 ประเภท คือสายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือย และสายฟ้าเคเบิลใต้ดิน

ขั้นตอนที่ 4 : จำลองเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบ โดยใช้มอนติ-คาร์โล จะได้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของการลัดวงจร ประเภทของการลัดวงจร ระยะเวลาที่เกิดการลัดวงจร

ขั้นตอนที่ 5 : จากข้อมูลในขั้นตอนที่ 4 มาพิจารณาระดับแรงดันตามมาตรฐานแรงดันตกชั่วขณะของ ITIC

ขั้นตอนที่ 6 : ตรวจสอบระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ 30 ปีตามอายุการใช้งานของสายไฟ

ขั้นตอนที่ 7 : ตรวจสอบจำนวนเหตุการณ์ที่ต้องการจำลองทั้งหมด โดยใช้จำนวนรอบสูงสุดของการจำลอง

ขั้นตอนที่ 8 : ทำการเปลี่ยนสายไฟฟ้าในกรณีในกรณีอื่นๆ

ขั้นตอนที่ 9 : ทำการคำนวณค่าดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจำหน่าย SAIFI SAIDI ต้นทุนของระบบ และมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากเหตุการณ์ขัดข้องในระบบ จากนั้นวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบ

6.3 ผลการทดสอบ

สำหรับการทดสอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นจะกำหนดให้ การเกิดแรงดันตกชั่วขณะและไฟดับในระบบเกิดจากการความผิดปกติในระบบเท่านั้น โดยพิจารณาเพียงการลัดวงจรประเภทหนึ่งเฟสลงดิน และสามเฟสสมมาตรบริเวณสายเท่านั้น

6.3.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งการลัดวงจรกับผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้า

จากการจำลองเหตุการณ์ลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบจะพบว่าเกิดการเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรในระบบนั้นจะส่งผลให้ค่าขนาดแรงดันที่ลดลงต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมที่ต่างกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเสนอตำแหน่งสายที่ลัดวงจรว่าจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งในระบบจำลองนี้มีผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม 2 โหลด คือโหลด 8 (โรงงานไม้) และโหลด 9 (โรงงานกระดาษ) ซึ่งอัตราการเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรของสายไฟในแต่ละตำแหน่งนั้นขึ้นกับอัตราความขัดข้องของสายไฟฟ้าแต่ละประเภทและความยาวของสายไฟในแต่ละตำแหน่ง โดยจะ

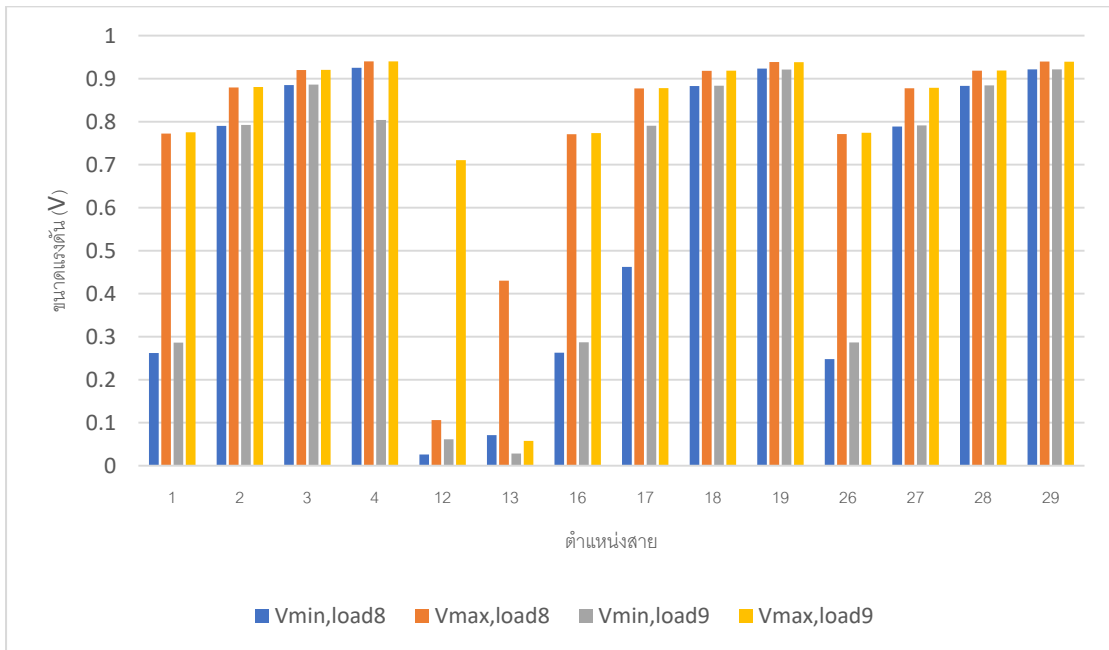
แสดงตำแหน่งของสายที่เกิดการลัดวงจรเทียบกับขนาดของแรงดัน และรูปแสดงตำแหน่งสายที่เกิดการลัดวงจรแล้วจะส่งผลให้ตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรม ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ตำแหน่งสายที่ลัดวงจรต่อแรงดันตกบนโหนด 8 และ โหนด 9

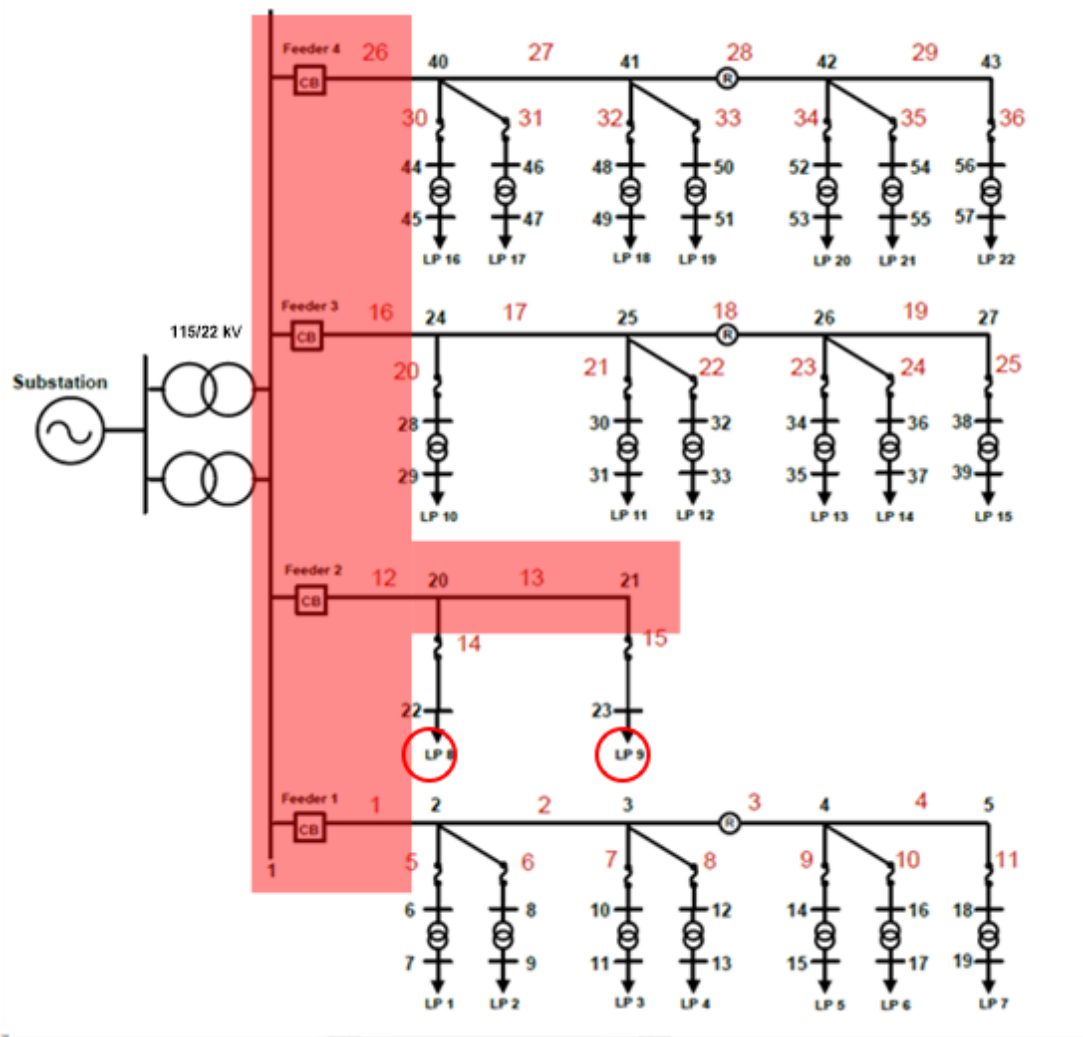
ตำแหน่งสายที่ลัดวงจร	แรงดันบนโหนดที่ 8 (p.u.)		ตำแหน่งสายที่ลัดวงจร	แรงดันบนโหนดที่ 9 (p.u.)	
	V_{min}	V_{max}		V_{min}	V_{max}
1	0.262	0.772	1	0.286	0.775
2	0.790	0.879	2	0.793	0.881
3	0.885	0.920	3	0.886	0.921
4	0.925	0.940	4	0.804	0.940
12	0.026	0.106	12	0.061	0.711
13	0.071	0.430	13	0.028	0.058
16	0.263	0.771	16	0.287	0.773
17	0.762	0.877	17	0.790	0.878
18	0.883	0.918	18	0.884	0.919
19	0.923	0.939	19	0.921	0.939
26	0.248	0.771	26	0.287	0.774
27	0.789	0.878	27	0.791	0.879
28	0.883	0.919	28	0.884	0.919
29	0.921	0.940	29	0.922	0.940

และจากผลการจำลองสามารถเปรียบเทียบขนาดแรงดันของเหตุการณ์ลัดวงจรของโหนดที่ 8 และ โหนดที่ 9 กับตำแหน่งสายไฟฟ้าหน้าอุปกรณ์ป้องกันรีโคสเซอร์ที่เกิดการลัดวงจรได้ดังรูปที่ 6.3 จากมาตรฐาน ITIC นั้นจะเห็นว่าขนาดของแรงดันคงเหลือที่มีโอกาสส่งผลให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะต้องมีค่าต่ำกว่า 0.7 p.u. ซึ่งจากข้อมูลแรงดันและมาตรฐาน ITIC สามารถแสดงตำแหน่งการลัดวงจรที่เกิดขึ้นในระบบที่จะมีโอกาสส่งผลให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะบนตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรม

ทั้งสองซึ่งจากการจำลองพบว่าตำแหน่งที่เกิดการลัดวงจรแล้วมีผลกระทบให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะบนตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีตำแหน่งเดียวกันคือ สายที่ 1, 12, 13, 16 และ 26 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 ขนาดของแรงดันที่เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 9) ในกรณีเกิดการลัดวงจรในตำแหน่งสายป้อนต่างๆ



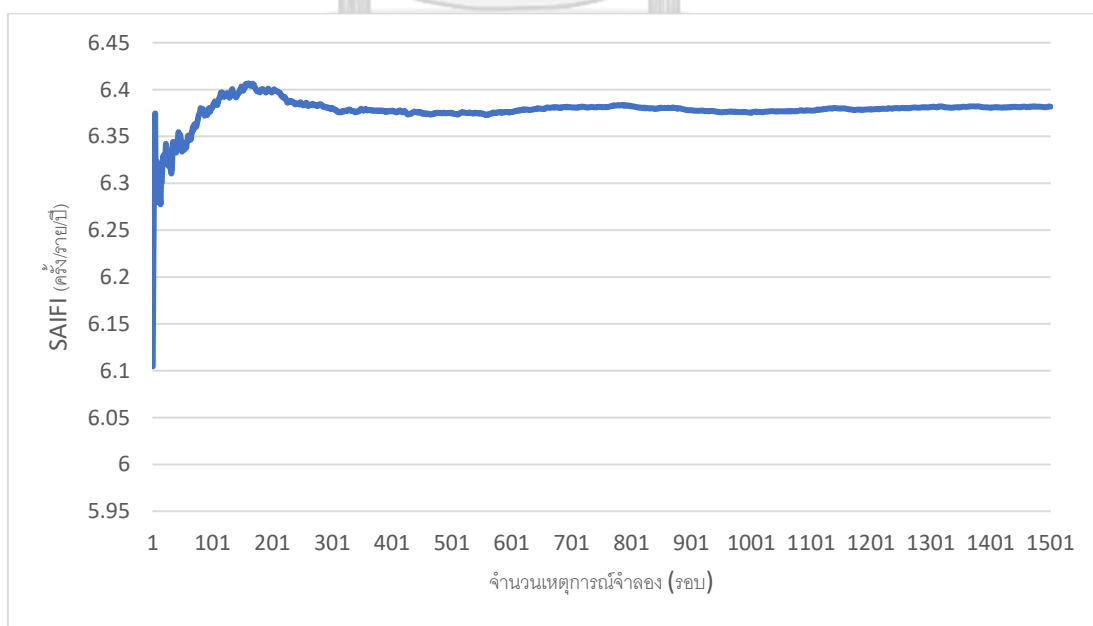
รูปที่ 6.4 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 9)

จากการจำลองสามารถวิเคราะห์ผลการประเมินค่าขนาดของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมต่อตำแหน่งสายที่เกิดการลัดวงจรได้ซึ่งในที่นี้คือตำแหน่งการลัดวงจรที่จะส่งผลกระทบให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมทั้งโหลด 8 (โรงงานไม้) และ โหลด 9 (โรงงานกระดาษ) นั้นมีผลกระทบที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะได้จากตำแหน่งสายที่ 1, 12, 13, 16 และ 26 ซึ่งสามารถนำไปพิจารณาในส่วนของแรงดันตกชั่วขณะได้คือ หากต้องการลดการเกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบนั้นจะต้องให้ความสำคัญกับตำแหน่งสายที่ 1, 12, 13, 16 และ 26 เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวนี้มีโอกาสเกิดการลัดวงจรแล้วส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมได้ทั้ง 2 โหลด

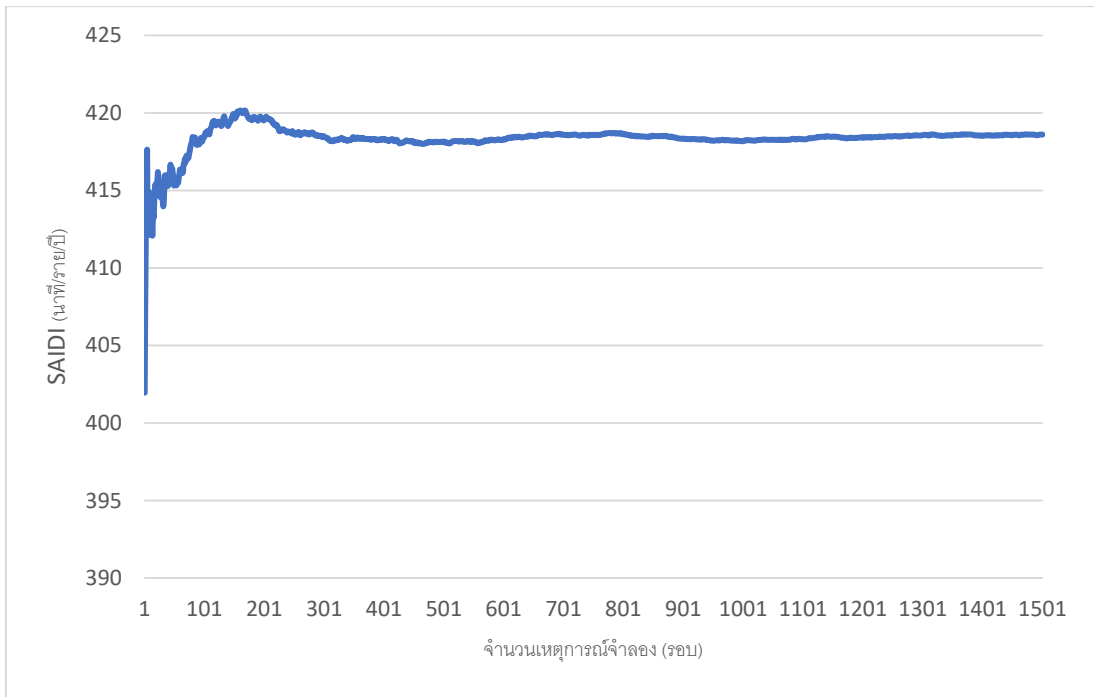
6.3.2 ดัชนีไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

สำหรับเกณฑ์การหยุดคำนวณของการจำลองเหตุการณ์ตามวิธีมอนติคาร์โลนั้นนิยมใช้เกณฑ์สองแบบคือ การกำหนดจำนวนรอบสูงสุดในการทำงาน และการกำหนดค่าสูงสุดของความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative uncertainty) ของดัชนีที่ยอมรับได้ ซึ่งการกำหนดการหยุดการคำนวณของโปรแกรมจะส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์และความถูกต้องของผลการจำลอง

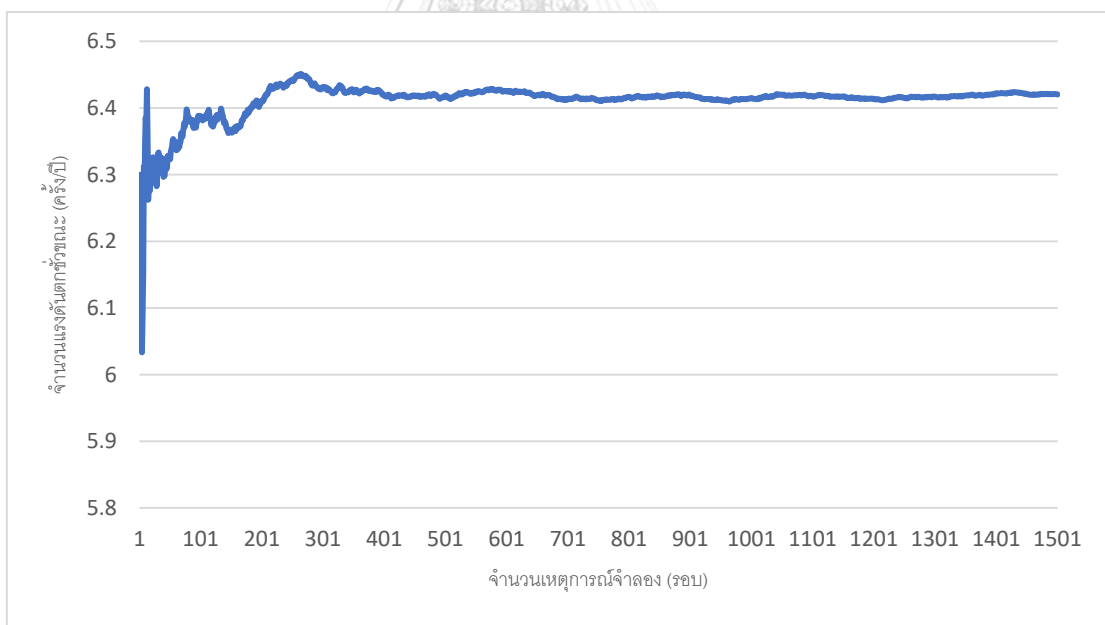
ในการจำลองระบบดัดแปลง RBTS bus 2 เพื่อหาตำแหน่งการลัดวงจรเพื่อใช้ในการพิจารณาไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะนั้น จะใช้การจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล และการจำลองจะสิ้นสุดลงนั้นเมื่อความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10^{-2} โดยจะสนใจค่าความคลาดเคลื่อนของ SAIFI SAIDI จำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม (โหลดที่ 8 และโหลดที่ 9) ต่อปี และจากการจำลองเหตุการณ์จำนวน 1,500 รอบ จะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในทุกค่าที่สนใจนั้นมีค่าที่ต่ำกว่า 10^{-2} ดังนั้นจึงใช้การจำลองโดยกำหนดความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10^{-2} และจำนวนรอบในการจำลอง (Iteration) สูงสุดเท่ากับ 1,500 รอบ ซึ่งเป็นค่าที่มากพอที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของ SAIFI SAIDI และจำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม (โหลดที่ 8 และโหลดที่ 9) ต่อปี เฉลี่ยเข้าสู่ค่าตอบ โดยตัวอย่างการจำลองกรณีสายเหนือดินทั้งหมดจะแสดงค่าเฉลี่ย SAIFI SAIDI จำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม (โหลดที่ 8 และโหลดที่ 9) ต่อปี ดังรูปที่ 6.5 - 6.8



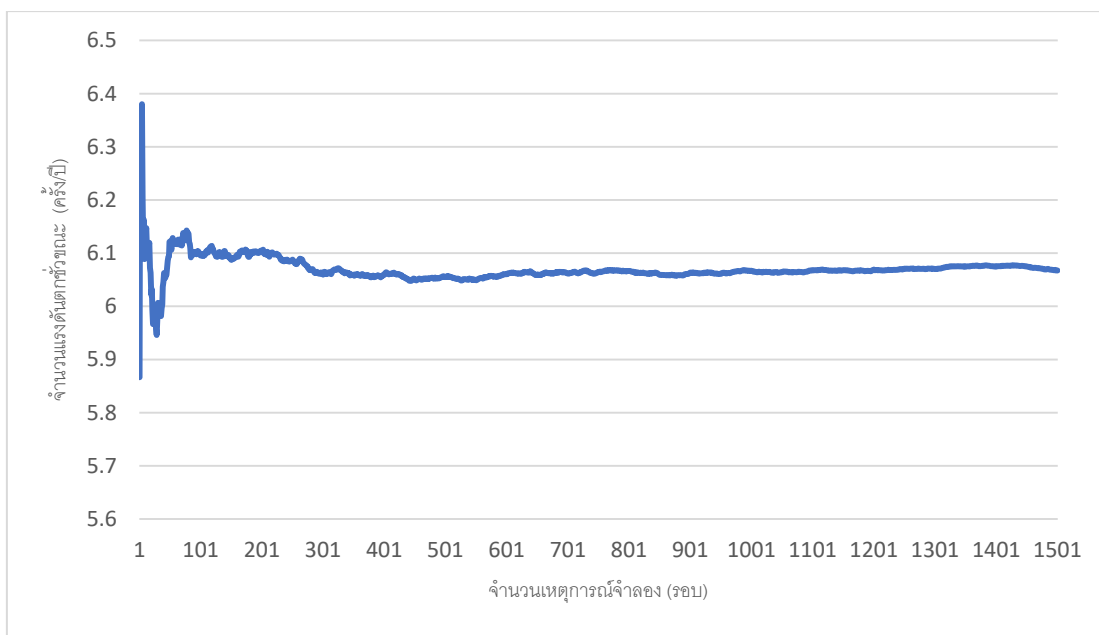
รูปที่ 6.5 ค่า SAIFI ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด (กรณีที่ 1)



รูปที่ 6.6 ค่า SAIDI ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด (กรณีที่ 1)



รูปที่ 6.7 จำนวนแรงดันตกชั่วขณะต่อปีบนโหลดที่ 8 ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด



รูปที่ 6.8 จำนวนแรงดันตกชั่วขณะต่อปีบนโหลดที่ 9 ในกรณีสายเหนือดินทั้งหมด

6.3.3 พิจารณาต้นทุนในการติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าและมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

จากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ คือประเมินค่าความสูญเสียทางการเงินทั้งหมดที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ สามารถสะท้อนถึงความแปรผันของต้นทุนที่ใช้ในการติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้า และคำนึงถึงภาระทางด้านมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะที่ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมต้องแบกรับ ซึ่งในหัวข้อนี้จะเปรียบเทียบค่าเงินในการลงทุนของการติดตั้งระบบไฟฟ้าจำหน่ายกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

1.) ข้อมูลที่ใช้ในการพิจารณาต้นทุนติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้า และปัจจัยของประเภทสายจำหน่ายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

สิ่งที่วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอต่อไปคือการนำค่าการก่อสร้างระบบซึ่งเป็นตัวแทนของระบบจำหน่าย มาพิจารณาร่วมกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ เพื่อนำไปประกอบการหาต้นทุนการติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยต้นทุนติดตั้งของอุปกรณ์ต่างๆในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นำมาอ้างอิงคือต้นทุนติดตั้งของการก่อสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายแห่งหนึ่งของประเทศไทย ดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 เงินลงทุนสำหรับการก่อสร้างระบบตามชนิดของสายไฟ[20]

รายละเอียดอุปกรณ์	หน่วย	เงินลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ (บาท)
สายไฟในระบบจำหน่าย 22/33 kV		
- 22 kV, 1 st Circuit, 185 A	วงจร-กม.	913,740
- 33 kV, 1 st Circuit, 185 A	วงจร-กม.	976,582
สายใต้ดิน (Underground Cable)		
22 kV Underground Cable 240 sqmm	วงจร-กม.	15,034,857
33 kV Underground Cable 240 sqmm	วงจร-กม.	15,159,199

โดยมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะนั้น ในส่วนการคำนวณมูลค่าไฟฟ้าดับซึ่งจะพิจารณาจากค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแบ่งตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า(Composite Customer Damage Function: CCDF)[27] ดังตารางที่ 6.7 ในส่วนของข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมซึ่งในระบบจำลองกำหนดให้เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานไม้และโรงงานกระดาษบนโหลด 8 และ โหลด 9 ตามลำดับ หลังจากได้ข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมแล้วจะนำมาพิจารณารวมกับข้อมูลค่าเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะสำหรับภาคอุตสาหกรรมในประเทศมาเลเซีย[28] โดยใช้เป็นค่าอัตรามูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะต่อครั้ง (Sag Cost Per Event, SCPE)ดังตารางที่ 6.8 และฐานข้อมูลที่ใช้ในการอ้างอิงในการใช้สายคือข้อมูลชนิดสายป้อนของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ดังตารางที่ 6.9 จะเห็นว่าระบบจำหน่ายนี้มีสัดส่วนการใช้สายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือยที่มากกว่าสายไฟฟ้าเหนือดินชนิดหุ้มฉนวน และจากผลการใช้สายป้อนของประเทศต่างๆในทวีปยุโรปจะเห็นว่าเริ่มมีการใช้สายเคเบิลใต้ดินดังตารางที่ 6.10 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้สาย 2 ประเภทในการจำลองคือ สายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือยและสายเคเบิลใต้ดิน

ตารางที่ 6.7 ฟังก์ชันความเสียหาย CCDF แบ่งแยกตามประเภทผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟภ.

ประเภทผู้ใช้ ไฟฟ้า	ค่าความเสียหายที่ระยะเวลาไฟฟ้าดับต่างๆ (หน่วย: บาท/กิโลวัตต์เฉลี่ย)						
	3นาทิต	30นาทิต	60นาทิต	90นาทิต	180นาทิต	240นาทิต	480นาทิต
บ้านอยู่อาศัย	0	2.26	11.47	20.67	58.85	71.58	97.04
กิจการขนาดเล็ก	2.83	32.99	66.85	101.15	204.04	272.63	547.89
กิจการขนาด กลาง	12.89	48.49	89.69	121.16	225.20	311.64	586.88
กิจการขนาด ใหญ่	24.69	41.69	60.42	70.46	101.36	121.46	202.07

ตารางที่ 6.8 มูลค่าความเสียหายเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะประเทศมาเลเซีย

ประเภทอุตสาหกรรม	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันตก ชั่วขณะต่อครั้ง(บาทต่อครั้ง)
โรงงานประเภทแก้ว, หิน, ปูน	3,228,796
โรงงานโลหะ	5,650,393
โรงงานพลาสติก/ยาง	1,235,014
พาณิชยกรรม (โรงพยาบาล, ธนาคาร)	807,199
โรงงานประเภทสารกึ่งตัวนำ	24,215,970
โรงงานเคมี	1,614,398
โรงงานไม้	1,614,398
โรงงานอาหาร	1,614,398
โรงงานยานยนต์	1,852,820
โรงงานกระดาษ	734,551

ค่าเงิน 1 RM = 8.07199 บาท

ตารางที่ 6.9 ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายป้อนในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายของประเทศไทย[25]

เขตพื้นที่การทำงาน	ความยาวสายจำหน่ายระบบ 22/33 kV			
	สายเมนและสายแยก (วงจรถ.กม.)		สายเมนและสายแยก (%)	
	สายหุ้มฉนวน	สายเปลือย	สายหุ้มฉนวน	สายเปลือย
ภาคเหนือ	14,760.89	50,619.67	22.58	77.42
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	17,250.10	63,705.03	21.31	78.69
ภาคกลาง	20,972.52	36,100.21	36.75	63.25
ภาคใต้	22,835.49	34,343.57	36.75	63.25
รวม	75,819	184,768.48	29.10	70.90

ตารางที่ 6.10 ข้อมูลสัดส่วนชนิดของสายป้อนประเภทสายเคเบิลใต้ดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศต่างๆในทวีปยุโรป[26]

ประเทศ	สัดส่วนของสายเคเบิลใต้ดินในระบบจำหน่ายแรงดันกลาง	สัดส่วนของสายเคเบิลใต้ดินในระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ
Austria	57.80%	77.80%
Belgium	92.00%	59.00%
Czech Republic	22.90%	56.30%
France	44.90%	41.90%
Germany	78.10%	89.00%
Greece	10.60%	61.70%
Hungary	19.80%	26.90%
Italy	44.40%	37.20%
Netherlands	100.00%	100.00%
Norway	40.70%	53.30%
Switzerland	73.60%	91.80%
United Kingdom	48.30%	83.70%

2.) การพิจารณามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

จากข้อมูลข้างต้นนั้นจะสามารถคำนวณมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ รวมไปถึงมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันตกชั่วขณะ เปรียบเทียบกับการใช้สาย 2 ประเภทคือ สายเหนือดินชนิดเปลือย และ สายเคเบิลใต้ดิน โดยระบบจำหน่ายไฟฟ้าในการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ระบบตัดแปลง RBTS bus 2 เท่านั้น และจะพิจารณาการเปลี่ยนสายเหนือดินชนิดเปลือยในกรณีหน้าอุปกรณ์ป้องกันรีโครสเซอร์ เนื่องจากด้านไฟฟ้าดับจะกำหนดให้หากเกิดการลัดวงจรบริเวณหลังรีโครสเซอร์จะเกิดไฟฟ้าดับเฉพาะผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่หลังรีโครสเซอร์เท่านั้น แต่ถ้าหากเกิดเหตุการณ์ลัดวงจรหน้ารีโครสเซอร์ เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำการตัดวงจรทั้งสายป้อนจะส่งผลให้เกิดไฟฟ้าดับทั้งสายป้อน และจากข้อมูลแรงดันตกชั่วขณะจะเห็นได้ว่าสายไฟฟ้าที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นเป็นสายที่อยู่หน้าอุปกรณ์รีโครสเซอร์ทั้งหมด นอกจากนี้ได้ทดสอบเพิ่มในการใช้สายหลังอุปกรณ์ป้องกันรีโครสเซอร์ 2 เส้นคือเส้นที่ 18 และ 19 เพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองหากมีการใช้สายไฟฟ้าเคเบิลใต้ดินบริเวณหลังอุปกรณ์ป้องกันรีโครสเซอร์กับบริเวณอื่นๆ ซึ่งจะได้ผลดังตารางที่ 6.11

ตารางที่ 6.11 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 1

ตำแหน่งสายที่ใช้สายเคเบิลใต้ดิน	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น (ล้านบาท)		
	ไฟฟ้าดับ	แรงดันตกชั่วขณะ	รวม
0	0.67	444.62	445.29
1	0.63	384.57	385.2
2	0.62	444.5	445.13
12	0.62	355.04	355.66
13	0.62	394.5	395.13
16	0.64	386.64	387.28
17	0.65	443.84	444.48
18	0.61	443.92	444.52
19	0.6	442.52	443.12
26	0.64	363.82	364.47
27	0.62	437.1	437.72

จากผลการทดสอบตารางที่ 6.11 แสดงให้เห็นว่ามูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันตกชั่วขณะนั้นมีมูลค่าที่สูงกว่ามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับเป็นอย่างมาก ดังนั้นหากต้องการลดความเสี่ยงในการเกิดแรงดันตกชั่วขณะจากหัวข้อที่ 6.3.1 แสดงให้เห็นว่าหากเกิดการลัดวงจรในสายไฟฟ้าตำแหน่งที่ 1,12,13,16 และ 26 จะส่งผลให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมได้ ดังนั้นในการทดสอบจะเน้นไปในการปรับปรุงสายในตำแหน่งดังกล่าวที่สามารถลดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่จะเกิดขึ้นต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้น

โดยจะแบ่งกรณีการเปรียบเทียบความแตกต่างกันตามจำนวนสายไฟฟ้าใต้ดินที่มีการติดตั้งในระบบโดยเทียบกับกรณีสายไฟฟ้าทุกเส้นในระบบเป็นสายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือย ซึ่งสามารถแบ่งได้ 4 กรณีดังต่อไปนี้

2.1) กรณีที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมีเพียง 1 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

2.2) กรณีที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมี 2 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

2.3) กรณีที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมี 3 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

2.4) กรณีที่ 4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมี 4 ถึง 5 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการใช้สายเคเบิลใต้ดินกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับโดยกรณีที่ 1 ได้แสดงผลแล้วข้างต้นดังตารางที่ 6.12 และอีก 3 กรณีที่เหลือได้ดังตารางที่ 6.12-6.14

ตารางที่ 6.12 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 2

ตำแหน่งสายที่ใช้สายเคเบิลใต้ดิน	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น (ล้านบาท)		
	ไฟฟ้าดับ	แรงดันตกชั่วขณะ	รวม
-	0.67	444.62	445.29
1,12	0.58	294.6	295.18
1,13	0.6	344.62	345.23
1,16	0.59	328.07	328.66
1,26	0.59	307.68	308.27
12,13	0.56	313.41	313.96
12,16	0.61	298.93	299.55
12,26	0.59	279.62	280.21
13,16	0.6	342.81	343.41
13,26	0.59	323.04	323.64
16,26	0.6	304.35	304.94

ตารางที่ 6.13 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 3

ตำแหน่งสายที่ใช้สายเคเบิลใต้ดิน	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น (ล้านบาท)		
	ไฟฟ้าดับ	แรงดันตกชั่วขณะ	รวม
-	0.67	444.62	445.29
1,12,13	0.56	255.64	256.20
1,12,16	0.57	238.01	238.58
1,12,26	0.53	219.41	219.94
1,13,16	0.58	285.07	285.65
1,13,26	0.55	264.27	264.82
1,16,26	0.57	245.86	246.44
12,13,16	0.59	256.79	257.38
12,13,26	0.56	234.31	234.87
12,16,26	0.54	219.79	220.33
13,16,26	0.60	262.80	263.41

ตารางที่ 6.14 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในกรณีที่ 4

ตำแหน่งสายที่ใช้สายเคเบิลใต้ดิน	มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้น (ล้านบาท)		
	ไฟฟ้าดับ	แรงดันตกชั่วขณะ	รวม
-	0.67	444.62	445.29
1,12,13,16	0.52	176.18	176.7
1,12,13,26	0.52	176.36	176.87
1,12,16,26	0.52	159.15	159.67
1,13,16,26	0.53	206.79	207.32
12,13,16,26	0.53	174.57	175.09
1,12,13,16,26	0.48	142.05	142.53

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการจำลองพบว่าบริเวณที่มีโอกาสเกิดแรงดันตกชั่วขณะบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมคือสายตำแหน่งที่ 1, 12, 13, 16 และ 26 จากตารางที่ 6.11 – 6.14 จะพบว่ามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะนั้นมีมูลค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ ดังนั้นการแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะจะสามารถลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบได้ การใช้สายใต้ดินบนตำแหน่งที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันตกชั่วขณะสามารถลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างมากเมื่อเทียบกับปริมาณการใช้สายเคเบิลใต้ดินขนาดเดียวกัน และการปรับปรุงโดยการใช้สายเคเบิลใต้ดินบริเวณเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นยังมีการใช้สายเคเบิลใต้ดินมากขึ้นจะส่งผลให้มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบลดลงได้

3.) การพิจารณาต้นทุนติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าร่วมกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสายบนดินชนิดเปลือยและสายเคเบิลใต้ดินเท่านั้น โดยแสดงออกมาในรูปของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ SAIFI SAIDI จำนวนครั้งของแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม (โหลดที่ 8 และ 9) ซึ่งจะนำมา

เปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิตตั้งระบบไฟฟ้าจำหน่าย รวมถึงมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ และแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจำหน่าย โดยจะแบ่งเป็นกรณี 4 กรณีดังต่อไปนี้

3.1) กรณีที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมีเพียง 1 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

3.2) กรณีที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมี 2 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

3.3) กรณีที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมี 3 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

3.4) กรณีที่ 4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้สายเหนือดินชนิดเปลือยทั้งระบบและมี 4 ถึง 5 เส้นใช้สายเคเบิลใต้ดิน

ตารางที่ 6.15 ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.1

line	SAIFI (ครั้ง/ ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	SAIDI (ชั่วโมง /ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	จำนวนแรงดันตก ชั่วขณะ (ครั้งต่อปี)		มูลค่าก่อสร้าง ระบบ (ล้านบาท)	มูลค่าความ เสียหาย (ล้านบาท)
			โหลตที่ 8	โหลตที่ 9		
-	6.38	418.88	6.43	6.06	119.24	445.29
1	5.86	385.10	5.54	5.28	172.20	385.20
2	5.87	385.38	6.42	6.06	172.20	445.13
12	6.24	409.19	5.15	4.80	172.20	355.66
13	6.27	411.29	5.80	5.48	161.61	395.13
16	5.94	389.84	5.56	5.33	172.20	387.28
17	5.93	389.22	6.41	6.04	175.73	444.48
18	6.18	405.67	6.41	6.05	161.61	444.52
19	6.17	405.06	6.40	6.02	172.20	443.12
26	5.84	383.94	5.27	4.94	175.73	364.47
27	5.87	385.54	6.33	5.92	172.20	437.72

ตารางที่ 6.16 ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.2

line	SAIFI (ครั้ง/ ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	SAIDI (ชั่วโมง /ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	จำนวนแรงดันตก ชั่วขณะ (ครั้งต่อปี)		มูลค่าก่อสร้าง ระบบ (ล้านบาท)	มูลค่าความ เสียหาย (ล้านบาท)
			โหลตที่ 8	โหลตที่ 9		
-	6.38	418.88	6.43	6.06	119.24	445.29
1,12	5.73	376.62	4.26	4.01	225.15	295.18
1,13	5.75	377.96	4.94	4.79	214.56	345.23
1,16	5.43	357.00	4.70	4.56	225.15	328.66
1,26	5.32	350.06	4.43	4.23	228.68	308.27
12,13	6.12	401.77	4.56	4.19	214.56	313.96
12,16	5.79	380.74	4.32	4.06	225.15	299.55
12,26	5.70	374.68	4.06	3.76	228.68	280.21
13,16	5.84	383.92	4.94	4.70	214.56	343.41
13,26	5.72	375.74	4.68	4.38	218.09	323.64
16,26	5.39	354.78	4.38	4.19	228.68	304.94

ตารางที่ 6.17 ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.3

line	SAIFI (ครั้ง/ ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	SAIDI (ชั่วโมง /ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	จำนวนแรงดันตก ชั่วขณะ (ครั้งต่อปี)		มูลค่าก่อสร้าง ระบบ (ล้านบาท)	มูลค่าความ เสียหาย (ล้านบาท)
			โหลตที่ 8	โหลตที่ 9		
-	6.38	418.88	6.43	6.06	119.24	445.29
1,12,13	5.61	368.52	3.70	3.46	267.51	256.20
1,12,16	5.61	368.93	3.42	3.29	278.11	238.58
1,12,26	5.18	341.06	3.17	2.98	281.64	219.94
1,13,16	5.31	349.59	4.08	3.96	267.51	285.65
1,13,26	5.20	342.22	3.81	3.62	281.64	264.82
1,16,26	4.88	321.62	3.51	3.44	281.64	246.44

line	SAIFI (ครั้ง/ ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	SAIDI (ชั่วโมง /ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	จำนวนแรงดันตก ชั่วขณะ (ครั้งต่อปี)		มูลค่าก่อสร้าง ระบบ (ล้านบาท)	มูลค่าความ เสียหาย (ล้านบาท)
			โหลดที่ 8	โหลดที่ 9		
12,13,16	5.68	373.60	3.72	3.48	267.51	257.38
12,13,26	5.58	366.75	3.42	3.12	271.05	234.87
12,16,26	5.25	345.88	3.18	2.98	281.64	220.33
13,16,26	5.28	347.61	3.78	3.61	271.05	263.41

ตารางที่ 6.18 ดัชนีความเชื่อถือได้ จำนวนไฟตกชั่วขณะ และมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่ 3.4

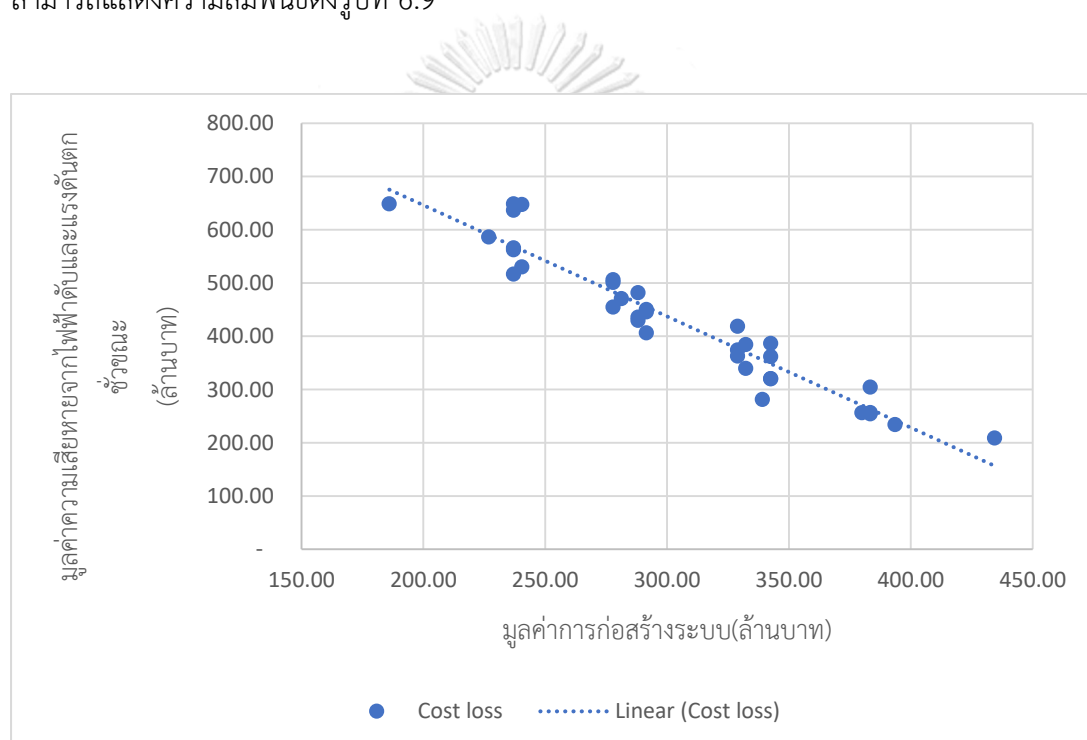
line	SAIFI (ครั้ง/ ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	SAIDI (ชั่วโมง /ปี/ผู้ใช้ ไฟฟ้า)	จำนวนแรงดันตก ชั่วขณะ (ครั้งต่อปี)		มูลค่าก่อสร้าง ระบบ (ล้านบาท)	มูลค่าความ เสียหาย (ล้านบาท)
			โหลดที่ 8	โหลดที่ 9		
-	6.38	418.88	6.43	6.06	119.24	445.29
1,12,13,16	5.16	339.70	2.56	2.38	320.47	176.70
1,12,13,26	5.06	333.11	2.56	2.38	324.00	176.87
1,12,16,26	4.73	311.46	2.28	2.21	334.59	159.67
1,13,16,26	4.76	313.58	2.95	2.90	324.00	207.32
12,13,16,26	5.14	338.16	2.53	2.36	324.00	175.09
1,12,13,16,26	4.61	304.10	2.03	1.97	376.95	142.53

ในการลงทุนติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ เมื่อพิจารณาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ พบว่ามีเพียงปัจจัยของชนิดสายและตำแหน่งในการใช้สายแต่ละชนิดนั้นสามารถนำมาพิจารณาร่วมกับต้นทุนการติดตั้งระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้

จากตารางที่ 6.10 แสดงให้พบว่าการใช้สายเคเบิลใต้ดินบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (ตำแหน่งที่ 1,12,13,16 และ 26) นั้นสามารถลดมูลค่าความเสียหายรวมถึงมูลค่าทั้งหมดได้อย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้สายเคเบิลใต้ดินบริเวณอื่นๆ และจากตารางที่ 6.10 -

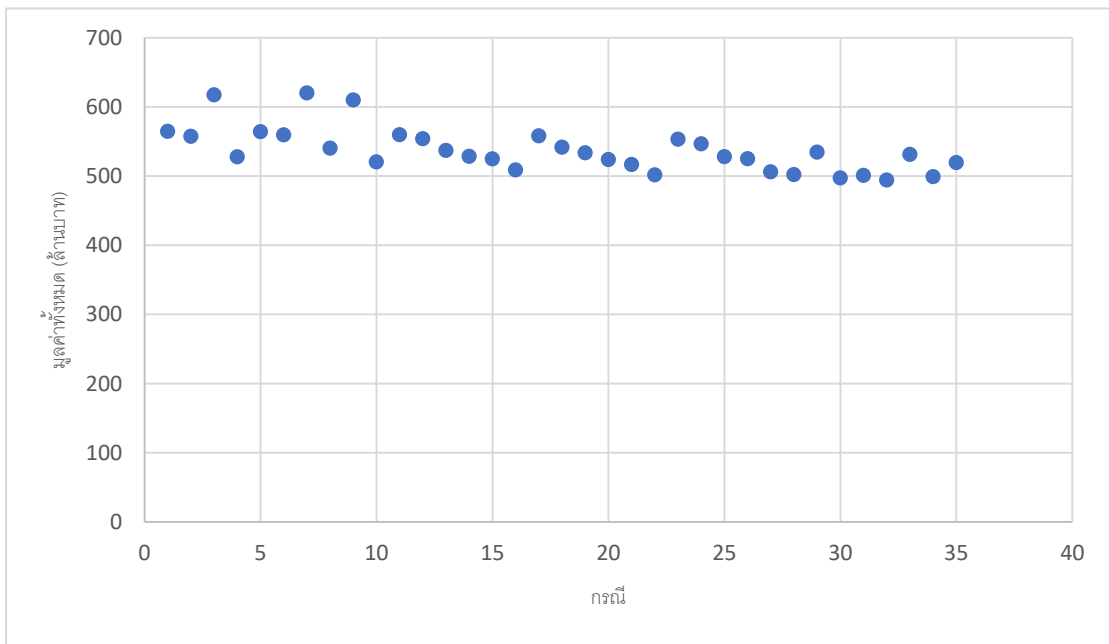
6.13 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินสามารถช่วยลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะได้ ซึ่งหากมีการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินบริเวณที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่จะเกิดต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรมจะส่งผลให้มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามหากมีการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินมากเกินไปจะส่งผลให้มูลค่าการก่อสร้างระบบไฟฟ้านั้นสูงมากเมื่อเทียบกับมูลค่าความเสียหายที่ลดลง

ดังนั้นจากผลการทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่า การเพิ่มมูลค่าการผลิตหรือการปรับปรุงระบบโดยใช้สายเคเบิลใต้ดินจะช่วยลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะได้ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.9



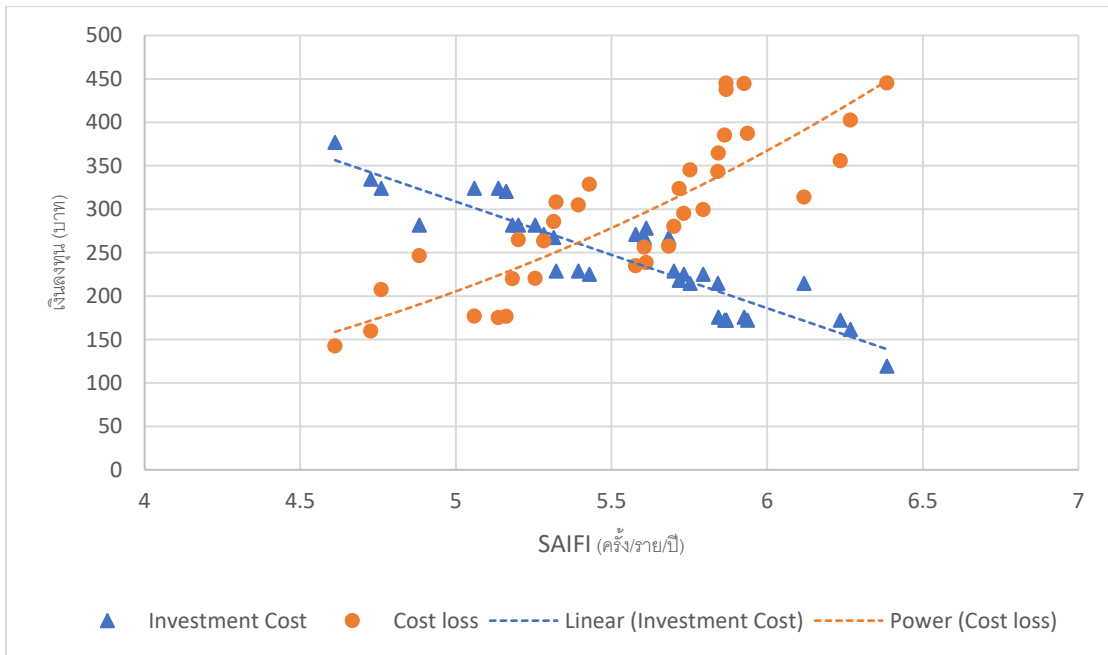
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์มูลค่าการก่อสร้างระบบกับมูลค่าความเสียหายภายในระบบ

หากพิจารณามูลค่ารวมทั้งหมดประกอบด้วยมูลค่าการติดตั้งระบบร่วมกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะในทุกกรณีดังรูปที่ 6.10 พบว่ามูลค่ารวมทั้งหมดจะต่ำสุดเมื่อมีการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินบริเวณตำแหน่งที่ 1 12 16 และ 26 ซึ่งจะมีมูลค่าการติดตั้งระบบอยู่ที่ 334.59 ล้านบาท มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะอยู่ที่ 159.67 ล้านบาท และมูลค่ารวมทั้งหมดอยู่ที่ 494.26 ล้านบาท แต่ในกรณีดังกล่าวพบว่าผู้ใช้ไฟฟ้าจะได้ประโยชน์เนื่องจากมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับทางผู้ติดตั้งระบบที่เสียประโยชน์เนื่องจากมูลค่าการติดตั้งระบบ

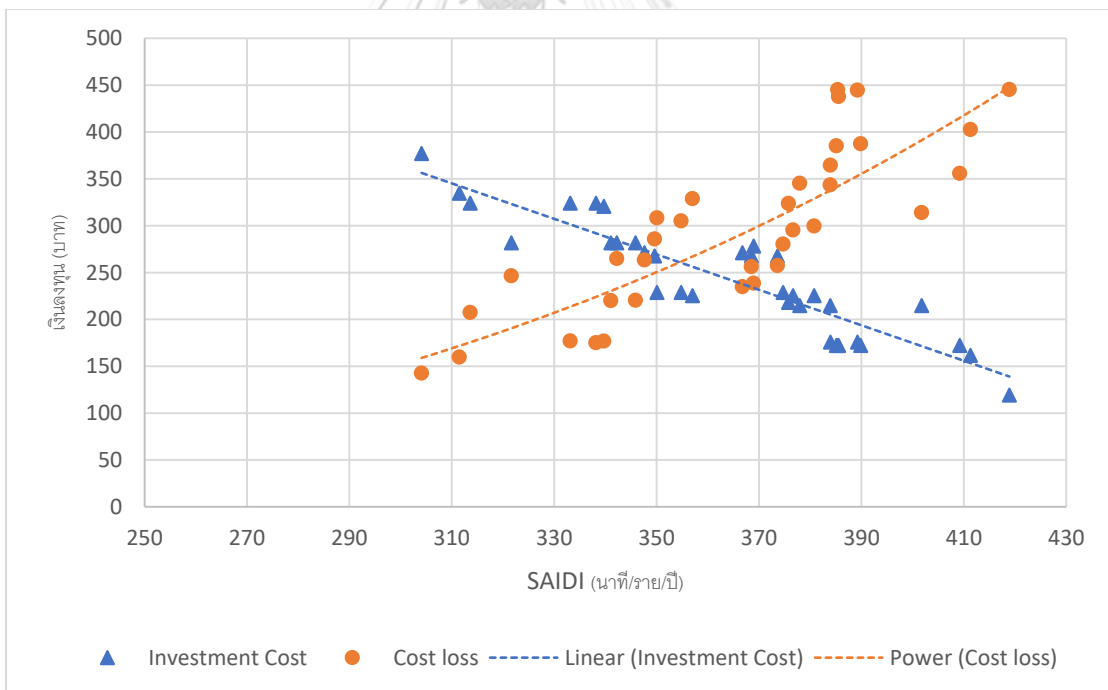


รูปที่ 6.10 มูลค่าทั้งหมดในกรณีต่างๆ

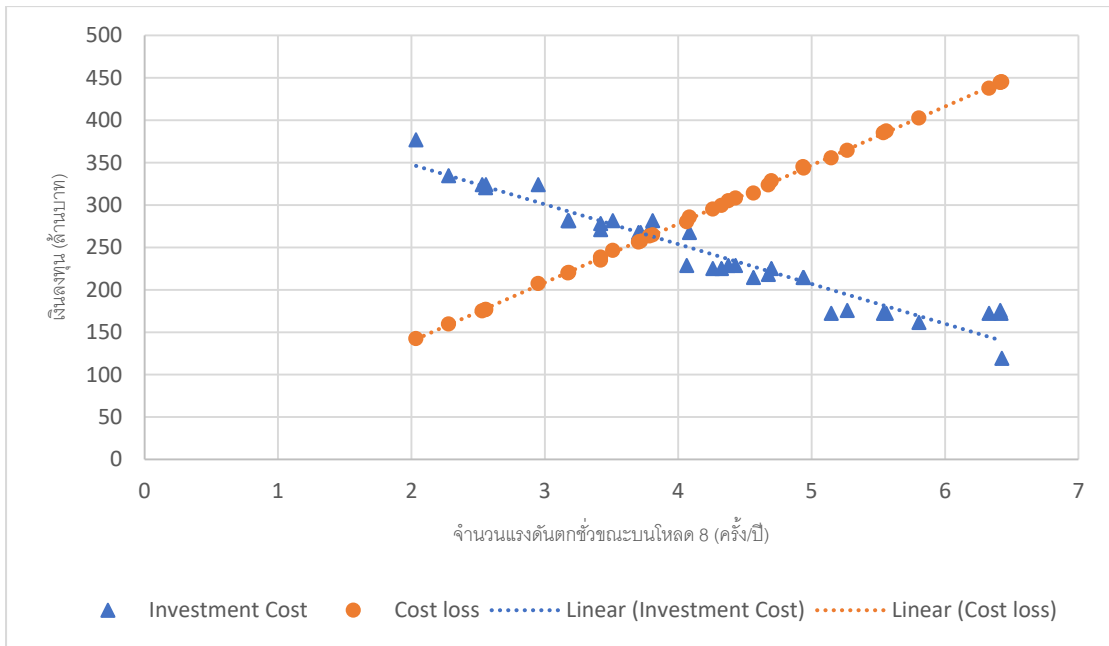
นอกจากนั้นยังสามารถนำผลการจำลองที่ข้างต้นมาเปรียบเทียบกับเพื่อนำมาวิเคราะห์หาแนวทางการกำหนดมาตรฐานไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้แนวคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งจะนำข้อมูลมูลค่าการติดตั้งสายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าในกรณีต่างๆกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะมาพิจารณาร่วมกับดัชนีไฟฟ้าดับ (SAIFI, SAIDI) รวมไปถึงจำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนโหลด 8 (โรงงานไม้) และ โหลด 9 (โรงงานกระดาษ) โดยการจำลองดังกล่าวจะเป็นผลการเปรียบเทียบที่จะนำไปวิเคราะห์เพื่อใช้ในการกำหนดแนวคิดการพิจารณาค่ามาตรฐานของแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับ ซึ่งจะแสดงผลดังรูปที่ 6.11 – 6.14



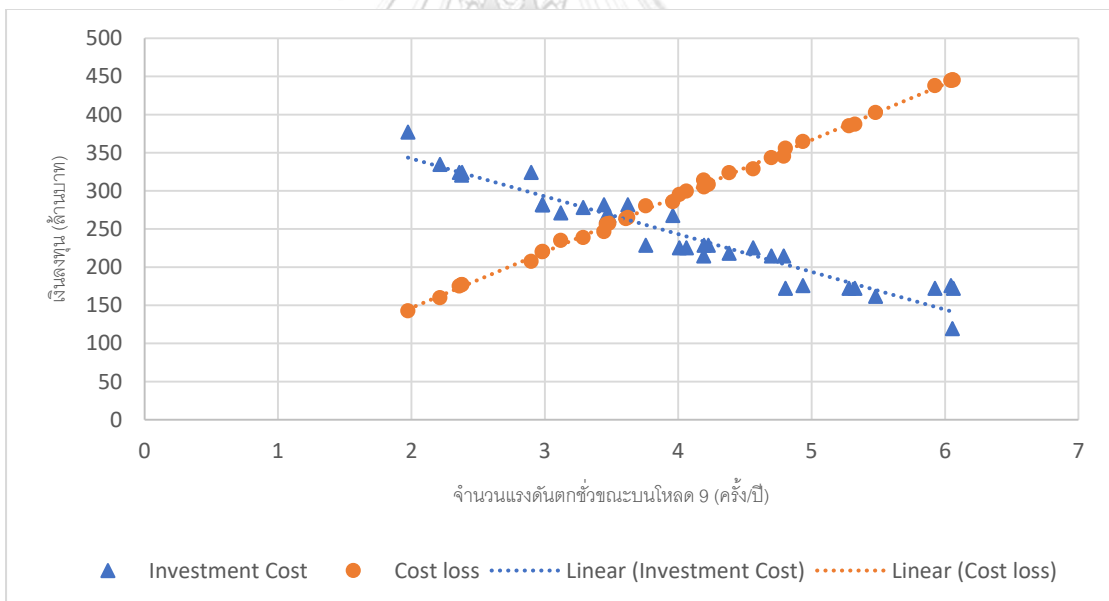
รูปที่ 6.11 SAIFI ในระบบไฟฟ้าจำหน่าย โดยเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 6.12 SAIDI ในระบบไฟฟ้าจำหน่าย โดยเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 6.13 จำนวนแรงดันตกบนโหลด 8 โดยเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 6.14 จำนวนแรงดันตกบนโหลด 9 โดยเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการเปรียบเทียบมูลค่าการติดตั้งระบบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะเพื่อใช้ในการพิจารณาถึงแนวทางการตั้งค่ามาตรฐานของระบบเกี่ยวกับค่าดัชนีไฟฟ้าดับซึ่งประกอบด้วย ค่า SAIFI และ ค่า SAIDI รวมไปถึงจำนวนเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะตามมาตรฐาน ITIC ที่เกิดจะเกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมในตำแหน่งโหลดที่ 8

(โรงงานไม้) และ โหลด 9 (โรงงานกระดาษ) จะสามารถสรุปได้โดยพิจารณาจุดคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าดัชนีไฟฟ้าดับและจำนวนเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่จะนำไปเป็นแนวทางในการตั้งค่ามาตรฐานได้ผลดังตารางที่ 6.19 โดยตารางดังกล่าวได้แสดงถึงปริมาณของค่าดัชนีไฟฟ้าดับ SAIFI และ SAIDI รวมไปถึงจำนวนเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลดที่ 8 และโหลดที่ 9) ซึ่งค่าดังกล่าวจะบ่งบอกถึงปริมาณที่เหมาะสมสำหรับดัชนีไฟฟ้าดับและจำนวนเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม หากค่าดัชนีไฟฟ้าดับ SAIFI SAIDI และจำนวนเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นนั้นสามารถลดได้น้อยกว่าค่าดังกล่าวจะส่งผลให้ทางผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับประโยชน์มากขึ้นเนื่องจากมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับจะลดลง แต่อาจจะส่งผลให้ผู้ติดตั้งระบบเสียผลประโยชน์เนื่องจากการลงทุนด้านมูลค่าการติดตั้งระบบที่สูงขึ้น ในทางกลับกันหากมีค่าดัชนีไฟฟ้าดับและจำนวนเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบจะส่งผลให้ภาระด้านเงินลงทุนอันเนื่องมาจากมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับที่เกิดแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าสูงขึ้นแต่ผู้ติดตั้งระบบจะได้รับผลประโยชน์เนื่องจากสามารถลดต้นทุนในการติดตั้งระบบได้

ตารางที่ 6.19 ค่ามาตรฐานไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ

ชนิดของมาตรฐาน	ค่ามาตรฐานจากการจำลอง
SAIFI (ครั้ง/ราย/ปี)	5.390
SAIDI (นาทีก/ราย/ปี)	378.00
จำนวนแรงดันตกชั่วขณะบนโหลดที่ 8 (ครั้ง/ปี)	3.795
จำนวนแรงดันตกชั่วขณะบนโหลดที่ 9 (ครั้ง/ปี)	3.672

6.3.4 การจำลองการเปลี่ยนตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรม

นอกจากนี้ได้ทำการจำลองเพิ่มเพื่อพิจารณาถึงผลกระทบของตำแหน่งสายไฟฟ้าที่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจรที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ โดยในการจำลองนี้จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม 2 กรณีคือ สลับตำแหน่งผู้ใช้ไฟฟ้าระหว่างตำแหน่งโหลดที่ 9 กับโหลดที่ 11 และตำแหน่งโหลดที่ 9 กับโหลดที่ 15 โดยจะเสนอตำแหน่งสายที่ลัดวงจรว่าจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของขนาดของแรงดันตกชั่วขณะส่งผลให้ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมเกิดเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะ จะได้ผลการจำลองดังต่อไปนี้

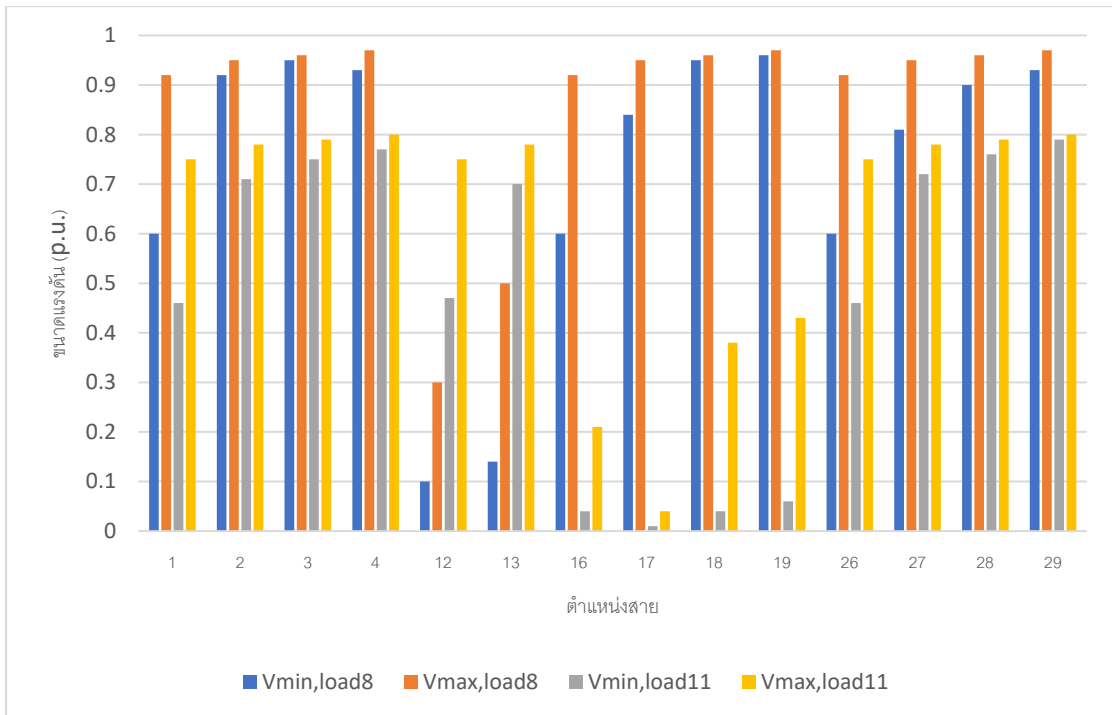
กรณีที่ 1 สลับตำแหน่งโหลดที่ 9 กับโหลดที่ 11

จากการจำลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการลัดวงจรและขนาดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลดที่ 8 และ โหลดที่ 11) เพื่อเป็นตัวแทนของตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรมหน้าอุปกรณ์ป้องกันรีโครเซอร์ ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 6.20

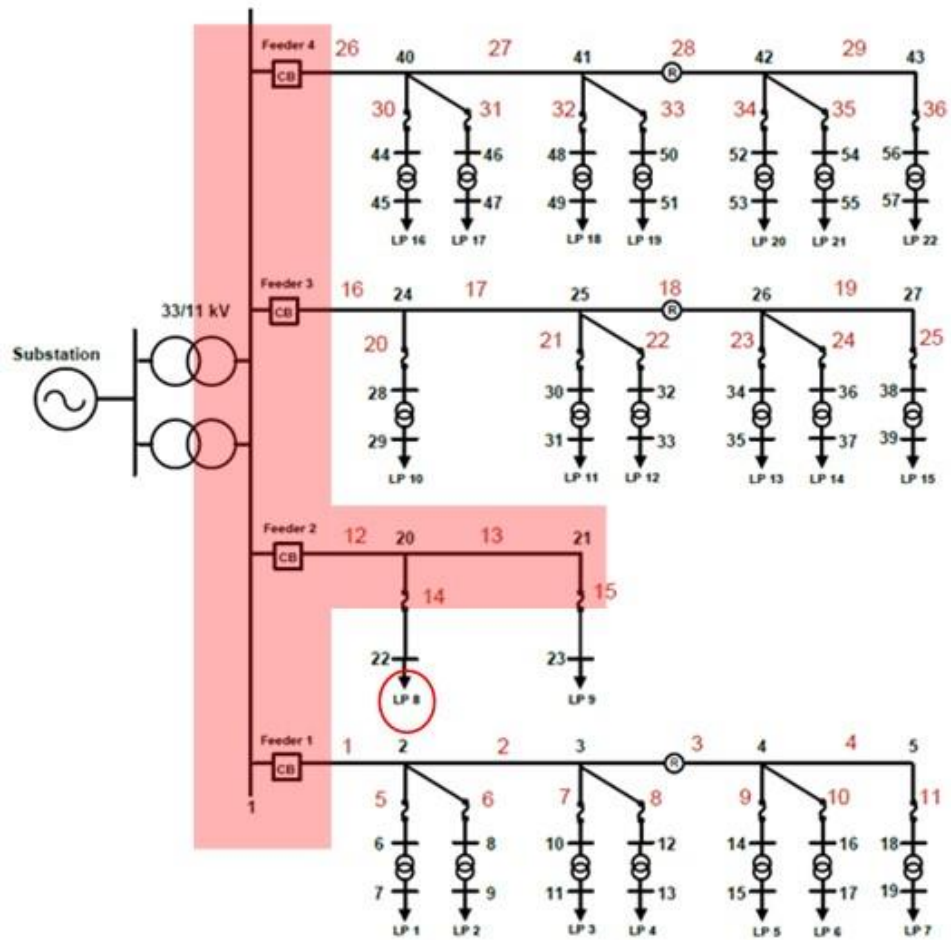
ตารางที่ 6.20 ตำแหน่งสายที่ลัดวงจรต่อแรงดันตกบนชั่วขณะโหลด 8 และ โหลด11

ตำแหน่ง สายที่ ลัดวงจร	แรงดันบนโหลดที่ 8 (p.u.)		ตำแหน่ง สายที่ ลัดวงจร	แรงดันบนโหลดที่ 11 (p.u.)	
	V_{min}	V_{max}		V_{min}	V_{max}
1	0.60	0.92	1	0.46	0.75
2	0.92	0.95	2	0.71	0.78
3	0.95	0.96	3	0.75	0.79
4	0.93	0.97	4	0.77	0.80
12	0.10	0.30	12	0.47	0.75
13	0.14	0.50	13	0.70	0.78
16	0.60	0.92	16	0.04	0.21
17	0.84	0.95	17	0.01	0.04
18	0.95	0.96	18	0.04	0.38
19	0.96	0.97	19	0.06	0.43
26	0.60	0.92	26	0.46	0.75
27	0.81	0.95	27	0.72	0.78
28	0.90	0.96	28	0.76	0.79
29	0.93	0.97	29	0.79	0.80

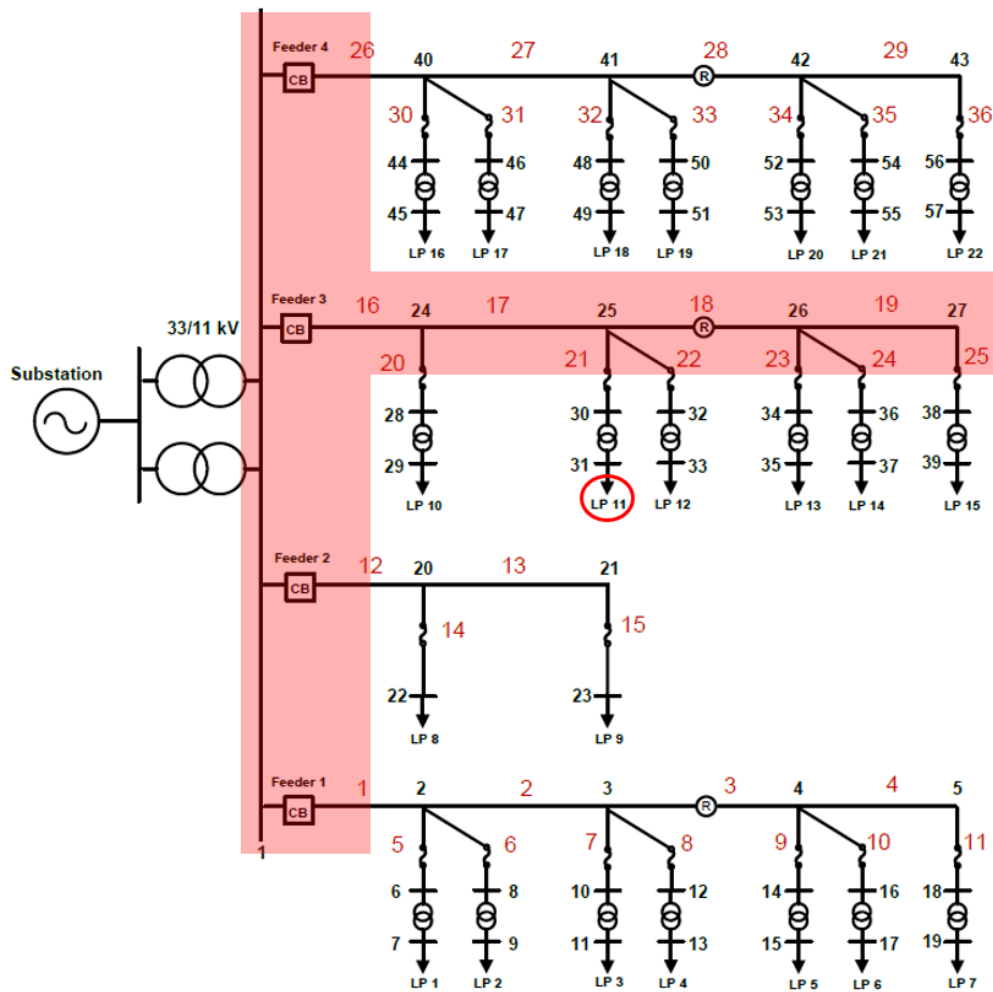
จากการจำลองผลข้างต้นสามารถแสดงได้ในรูปของกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งและแรงดันได้ดังรูปที่ 6.15 นอกจากนี้ยังแสดงแผนภาพของตำแหน่งสายไฟฟ้าที่มีโอกาสส่งผลกระทบเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมบนโหลดที่ 8 และ โหลดที่ 11 ได้ดังรูปที่ 6.16 และ 6.17 ตามลำดับ



รูปที่ 6.15 ขนาดของแรงดันที่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจรบนตำแหน่งสายป้อนต่างๆกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท โรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 11)ในกรณีเกิดการลัดวงจรในตำแหน่งสายป้อนต่างๆ



รูปที่ 6.16 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8) กรณี
โรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 11



รูปที่ 6.17 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 11) กรณีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 11

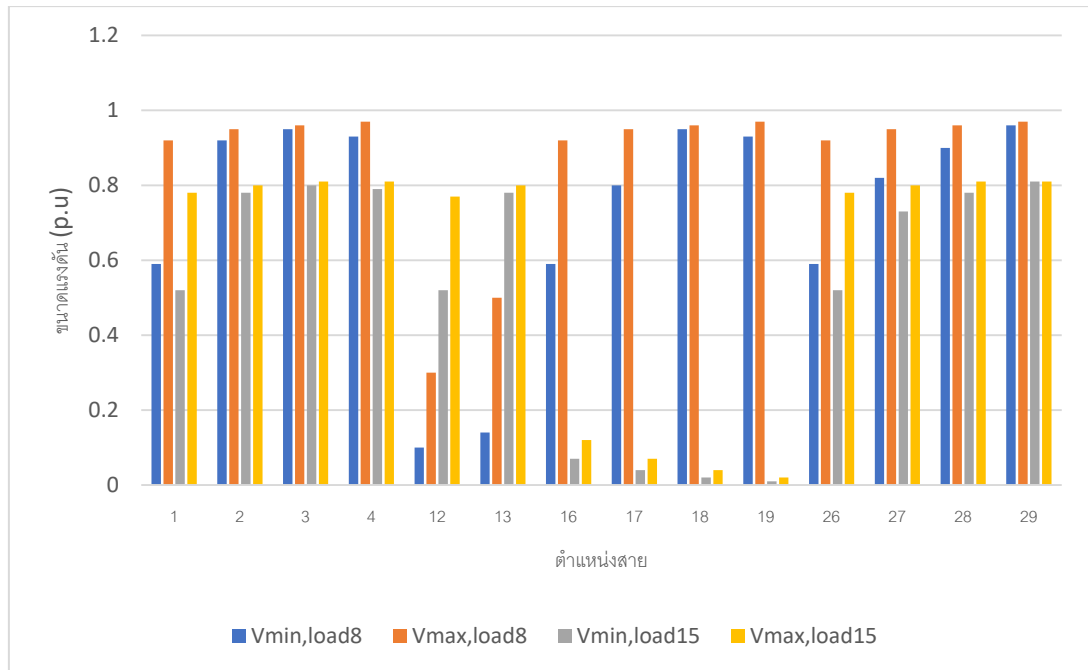
กรณีที่ 2 สลับตำแหน่งโหลดที่ 9 กับโหลดที่ 15

จากการจำลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการลัดวงจรและขนาดแรงดันที่เปลี่ยนบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลดที่ 8 และ โหลดที่ 15) เพื่อเป็นตัวแทนของตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรมหลังอุปกรณ์ป้องกันโรครีโอสเซอร์ ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 6.21

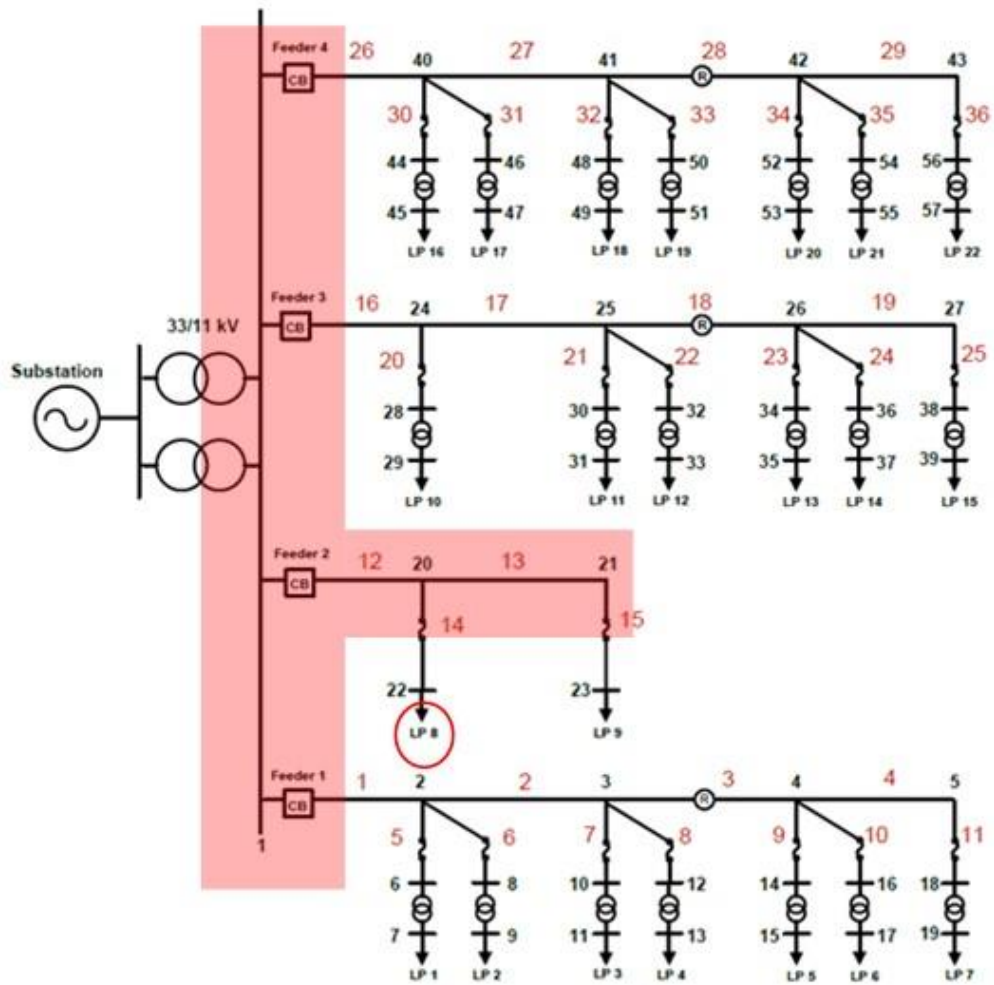
ตารางที่ 6.21 ตำแหน่งสายที่ลัดวงจรต่อแรงดันตกชั่วขณะบนโหลด 8 และ โหลด15

ตำแหน่ง สายที่ ลัดวงจร	แรงดันบนโหลดที่ 8 (p.u.)		ตำแหน่ง สายที่ ลัดวงจร	แรงดันบนโหลดที่ 15 (p.u.)	
	V_{\min}	V_{\max}		V_{\min}	V_{\max}
1	0.59	0.92	1	0.52	0.78
2	0.92	0.95	2	0.78	0.80
3	0.95	0.96	3	0.80	0.81
4	0.93	0.97	4	0.79	0.81
12	0.10	0.30	12	0.52	0.77
13	0.14	0.50	13	0.78	0.80
16	0.59	0.92	16	0.07	0.12
17	0.80	0.95	17	0.04	0.07
18	0.95	0.96	18	0.02	0.04
19	0.93	0.97	19	0.01	0.02
26	0.59	0.92	26	0.52	0.78
27	0.82	0.95	27	0.73	0.80
28	0.90	0.96	28	0.78	0.81
29	0.96	0.97	29	0.81	0.81

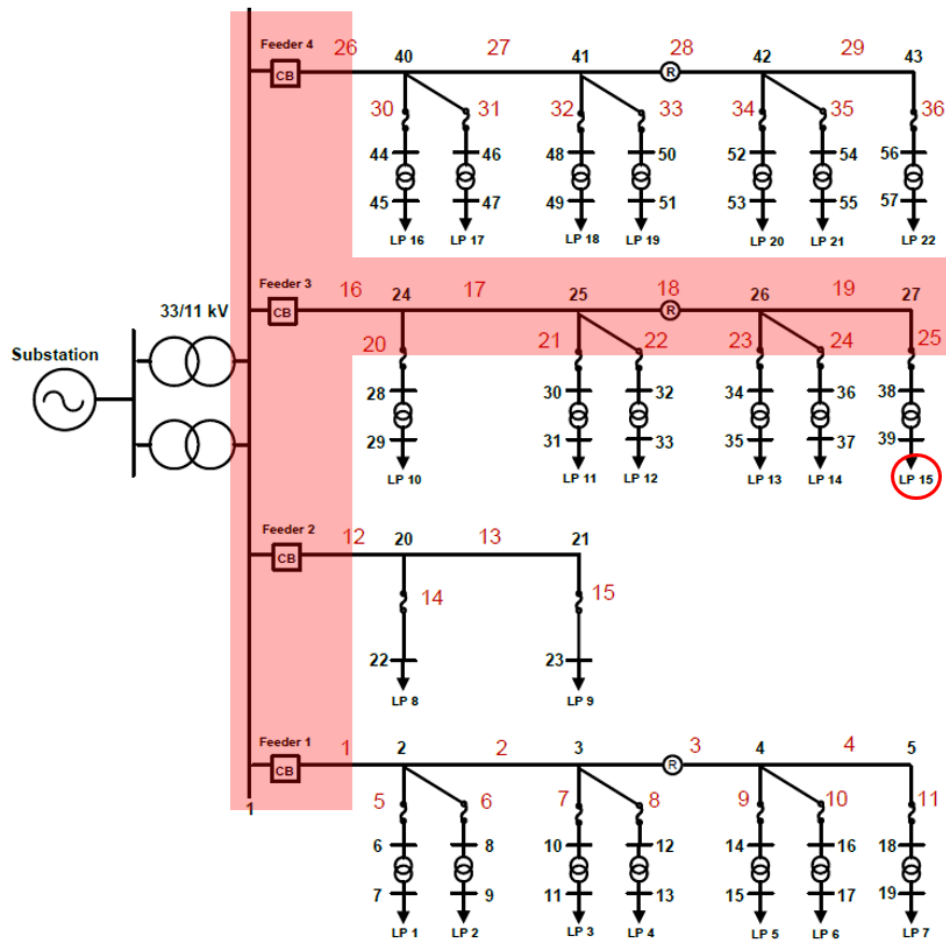
จากการจำลองผลข้างต้นสามารถแสดงได้ในรูปของกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งและแรงดันได้ดังรูปที่ 6.18 นอกจากนี้ยังแสดงแผนภาพของตำแหน่งสายไฟฟ้าที่มีโอกาสส่งผลกระทบเนื่องจากแรงดันตกชั่วขณะต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมบนโหลดที่ 8 และ โหลดที่ 11 ได้ดังรูปที่ 6.19 และ 6.20 ตามลำดับ



รูปที่ 6.18 ขนาดของแรงดันที่เกิดเหตุการณ์ลัดวงจรบนตำแหน่งสายป้อนต่างๆกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภท โรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8 และ 15)ในกรณีเกิดการลัดวงจรในตำแหน่งสายป้อนต่างๆ



รูปที่ 6.19 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 8) กรณี
โรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 15



รูปที่ 6.20 ตำแหน่งสายป้อนที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม (โหลด 15)

กรณีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่โหลดที่ 8 และโหลดที่ 15

จากการจำลอง 2 กรณีคือสลับตำแหน่งของโรงงานอุตสาหกรรมกับตำแหน่งโหลดอื่นๆได้แก่ โหลดอุตสาหกรรมตำแหน่งโหลดที่ 9 กับโหลดที่ 11 และตำแหน่งโหลดที่ 9 กับโหลดที่ 15 เพื่อศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการลัดวงจรที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของแรงดันบนตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าไม่ว่าโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ตำแหน่งหน้าหรือหลังอุปกรณ์ป้องกันรีโครสเซอร์หากเกิดการลัดวงจรบนสายป้อนเดียวกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมจะได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะได้เหมือนกันทั้งสายป้อน แต่ในการจำลองดังกล่าวนี้วิเคราะห์ผลเฉพาะส่วนของแรงดันเท่านั้น ซึ่งในระบบมีการใช้อุปกรณ์ป้องกันรีโครสเซอร์ด้วย หากพิจารณาการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเกิดแรงดันตกชั่วขณะได้ เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันรีโครสเซอร์จะช่วยลดระยะเวลาในการเกิดแรงดันตกชั่วขณะและทำให้เหตุการณ์ลัดวงจรหลังอุปกรณ์ป้องกันรีโครสเซอร์จะไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าหน้าอุปกรณ์ป้องกัน

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการกำหนดเกณฑ์ดัชนีความเชื่อถือได้ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ด้วยแบบจำลองสังเคราะห์แบบสุ่มในโปรแกรม MATLAB โดยสิ่งที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คำนึงถึงสำหรับการกำหนดเกณฑ์ดัชนีความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือการจำลองพฤติกรรมหรือรูปแบบของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งเงื่อนไขในการนำมาประกอบการพัฒนาแบบจำลองคือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าดัชนีความเชื่อถือได้ประกอบด้วยไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาปัจจัยในการเปลี่ยนชนิดของสาย 2 ประเภทคือ สายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือย และสายเคเบิลใต้ดิน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยวัตถุประสงค์ 2 ประการคือ การคำนวณหามูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้าดับและแรงดันตก และการนำเสนอวิธีในการหามาตรฐานที่จะใช้ในระบบไฟฟ้าจำหน่ายเพื่อใช้ในการคำนวณมาตรฐานไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะที่จะเกิดขึ้นในระบบ โดยจะเปรียบเทียบมูลค่าการก่อสร้างของระบบกับผู้ใช้ไฟฟ้า เพื่อหาความสมดุลและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของทั้งสองฝ่าย

ในการคำนวณมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะพบว่ามูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะจะมีมูลค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับเนื่องจากมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะมีค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ ดังนั้นผลกระทบทางฝั่งของผู้ใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมาจากการเกิดแรงดันตกชั่วขณะซึ่งผู้รับภาระด้านแรงดันตกชั่วขณะคือผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นก่อนจะทำการเปลี่ยนชนิดของสายไฟจากสายไฟเหนือดินชนิดเปลือยเป็นสายเคเบิลใต้ดินนั้นจะต้องหาดำเนินการสายไฟที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะบนผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะช่วยลดมูลค่าความเสียหายได้ทั้งไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะได้ เนื่องจากตำแหน่งที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นมักจะเป็นต้นสายของสายป้อนซึ่งจะช่วยลดโอกาสไฟฟ้าดับทั้งสายป้อนได้และยังช่วยลดอัตราการเกิดแรงดันตกชั่วขณะบนโรงงานอุตสาหกรรมได้อีกด้วย และอีกปัจจัยที่สามารถลดมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะได้คือ ความยาวสายในตำแหน่งที่ทำการเปลี่ยนจากสายเหนือดินชนิดเปลือยเป็นสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งจะพบว่าหากทำการเปลี่ยนสายไฟที่มีความยาวจะสามารถลดมูลค่าความเสียหายได้มากกว่าทำการเปลี่ยนสายในตำแหน่งที่มีสายสั้นกว่า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเน้นไปที่การเปลี่ยน

สายไฟฟ้าเหนือดินชนิดเปลือยเป็นสายใต้ดินบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดแรงดันตกชั่วขณะต่อผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และจากการจำลองพบว่าเมื่อเพิ่มการใช้สายเคเบิลใต้ดินในระบบจะส่งผลให้มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจำหน่ายลดลง

ทั้งนี้จากขอบเขตของวิทยานิพนธ์สำหรับการวิเคราะห์ค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับกรณีการเกิดแรงดันตกและไฟดับ จากการคำนวณมูลค่าการก่อสร้างระบบเทียบกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะนั้น พบว่ามูลค่าการก่อสร้างระบบแปรผกผันกับมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะคือ เมื่อเพิ่มมูลค่าการก่อสร้างหรือเพิ่มการใช้สายเคเบิลใต้ดินจะส่งผลให้มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะนั้นลดลง ถึงแม้ว่าการใช้สายเคเบิลใต้ดินเพิ่มขึ้นจะช่วยลดมูลค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับและแรงดันตกชั่วขณะได้แต่หากทำการเปลี่ยนมากเกินไปภาระจะตกไปอยู่ที่ฝั่งผู้ก่อสร้างระบบเนื่องจากมูลค่าการก่อสร้างระบบไฟฟ้าจำหน่ายจะสูงขึ้นตามการใช้สายเคเบิลใต้ดิน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ใช้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เข้ามาช่วยเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการก่อสร้างระบบและดัชนีความเชื่อถือได้รวมไปถึงจำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทโรงงานอุตสาหกรรมต้องแบกรับ ให้มีค่าที่เหมาะสม จากการจำลองพบว่าระบบทดสอบนี้จะมีความเหมาะสมเมื่อมีค่า SAIFI 5.39 ครั้งต่อรายต่อปี และ SAIDI 378.00 นาทีต่อรายต่อปี จำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนโหลดที่ 8 3.795 ครั้งต่อปี และจำนวนแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดบนโหลดที่ 9 3.672 ครั้งต่อปี

สำหรับข้อเสนอแนะในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีดังนี้ คือ

1. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่ได้พิจารณาเงินลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าตามราคาจริงในปัจจุบัน แต่อ้างอิงเงินลงทุนจากโครงการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าระยะที่ 3 ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ปี พ.ศ. 2552) เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ผลของเงินลงทุนมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้
2. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการพิจารณาเฉพาะการลัดวงจรประเภทหนึ่งเฟสลงดิน และ สามเฟสสมมาตรเท่านั้น ควรจะมีการพิจารณาการลัดวงจรประเภทเฟสถึงเฟส และการลัดวงจร ประเภทเฟสถึงเฟสลงดินร่วมด้วย ทั้งนี้เพื่อให้การคำนวณดัชนีแรงดันตกชั่วขณะมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3. ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเฉพาะสายไฟฟ้า 2 ประเภทคือสายไฟฟ้าเหนือนดินชนิดเปลือย และสายเคเบิลใต้ดินเท่านั้น ควรมีการพิจารณาสายเคเบิลเหนือนดินด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณมากขึ้น
4. ทดสอบและวิเคราะห์กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจริง เนื่องจากการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เพียงระบบทดสอบดัดแปลง RBTS bus 2 เท่านั้น
5. ถ้าหากพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าเงินตามเวลา รวมถึงการพิจารณาค่าบำรุงรักษาจะส่งผลให้การพัฒนาแบบจำลองและการวิเคราะห์มีความเหมาะสมมากขึ้น
6. ในการทดสอบและวิเคราะห์ควรพิจารณากรณีผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นโรงงานอื่นๆด้วย เช่น โรงงานประเภทสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะใช้มาตรฐาน SEMI-F47 ในการพิจารณา เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเฉพาะโรงงานไม้และโรงงานกระดาษเท่านั้น





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

จากเอกสารอ้างอิง [9, 10, 28] สมรรถแสดงมูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะในแต่ละประเทศได้ดังนี้

ตารางที่ ก.1 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากแรงดันตกชั่วขณะในประเทศต่างๆ

ประเภทโรงงานอุตสาหกรรม	มูลค่าความเสียหายจากแรงดันตกชั่วขณะ (บาทต่อเหตุการณ์)		
	ยุโรป	สหรัฐ	มาเลเซีย
โรงงานอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	131,212,624	76,950,000	24,215,970
องค์กรการค้า (Financial trading)	207,177,828 ต่อชั่วโมง	-	-
ศูนย์คอมพิวเตอร์	25,897,229	-	-
องค์กรโทรคมนาคม	1,035,889.14 ต่อนาที	-	-
อุตสาหกรรมเหล็ก	12,085,373	-	5,650,393
โรงงานประเภทแก้ว, หิน, ปูน	8,632,410	1,539,000	3,228,796
อุตสาหกรรมเกี่ยวกับบัตรเครดิต	-	15,390,000	-
อุตสาหกรรมการผลิต	-	3,078,000	-
อุตสาหกรรมยานยนต์	-	2,308,500	1,852,820
อุตสาหกรรมกระดาษ	-	923,400	734,551
โรงงานพลาสติก/ยาง	-	-	1,235,014
โรงงานเคมี	-	-	1,614,398
โรงงานไม้	-	-	1,614,398
โรงงานอาหาร	-	-	1,614,398

บรรณานุกรม

- [1] J. V. Milanovic and C. P. Gupta, "Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags-part I: the methodology," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 2, pp. 918-924, 2006.
- [2] A. P. Q. INITATIVE, "Power Quality Loss Survey Report for Thailand," 2012.
- [3] Horak, "Power Quality: Measurements of Sags and Interruptions," in 2005/2006 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2006, pp. 733-739.
- [4] J. A. Martinez and J. Martin-Arnedo, "Voltage sag studies in distribution Networks-part III: Voltage sag index calculation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1689-1697, 2006.
- [5] E. E. Juarez and A. Hernandez, "An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1493-1500, 2006.
- [6] "IEEE Guide for Voltage Sag Indices," *IEEE Std 1564-2014*, pp. 1-59, 2014.
- [7] J. V. Milanovic and C. P. Gupta, "Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags - part II: practical implementation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 2, pp. 925-932, 2006.
- [8] I. C. A. S. Asia, "Power Quality Loss Survey Report," 2012.
- [9] D. Chapman, *Cost of Poor Power Quality-Power Quality Application Guide*. UK: Copper Development Association, 2011.
- [10] B. H. Chowdhury, "Power quality," *IEEE potentials*, vol. 20, no. 2, pp. 5-11, 2001.
- [11] การไฟฟ้านครหลวง, *คู่มือแรงดันตกชั่วขณะสาเหตุและวิธีป้องกัน*. 2012.
- [12] *Voltage Disturbances Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems*, 2004.
- [13] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," presented at the IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995), 2009.

- [14] L. V. Tien, "Impacts of voltage sags and protection coordination on sensitive equipment in distribution systems," Doctoral Degree, Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Chulalongkorn University, 2009.
- [15] ALSTOM, *Network protection and automation guide 3rd edition*. 2002.
- [16] M. F. M. Roger C. Dugan, Surya Santoso and H.Wayne Beaty., "Electrical Power Systems Quality second edition," November 26, 2002 2002.
- [17] ก. อุดมวงศ์เสรี, "การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่ โดยใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์มอนติคาร์โลและการแบ่งแยกโครงข่าย," ปริญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [18] ๓. สุริสุนทร, "ผลกระทบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายต่อแรงดันตกชั่วขณะ," วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [19] A. Baggingi, *Handbook of Power Quality*. 2008.
- [20] "IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices," *IEEE Std 1366-2012 (Revision of IEEE Std 1366-2003)*, pp. 1-43, 2012.
- [21] S. Katithummarugs, A. Apiwattananon, P. Labchareonwong, N. Sirisophonwattana, N. Teera-achariyakul, and D. Rerkpreedapong, "Reliability index forecast by fuzzy principle," in *Proceedings of the International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies (ESD 2010)*, 2010, pp. 1-6.
- [22] T. N. Berhad, "Voltage Sag Solutions for Industrial Customers," March 2007.
- [23] M. Bollen *et al.*, *Voltage dip immunity of equipment and installations - Status and need for further work*. 2010.
- [24] E. P. R. I. (EPRI), "Distribution Reliability Indices Tracking Within the United States," 2003.
- [25] สถาบันวิจัยพลังงาน, "โครงการเพิ่มความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าระยะที่ ", จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2552.
- [26] L. R. 1092E, "Tracking the Reliability of the U.S. Electric Power System: An Assessment of Publicly Available Information Reported to State Public Utility Commissions," 2008.

- [27] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, "รายงานฉบับสมบูรณ์: โครงการศึกษา อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (Outage Cost)," มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,, 2556.
- [28] F. Salim, K. M. Nor, D. M. Said, and A. A. A. Rahman, "Voltage sags cost estimation for malaysian industries," in 2014 *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2014, pp. 41-46.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธนัทไชย สมรักษ์
วัน เดือน ปี เกิด	7 ธันวาคม 2536
สถานที่เกิด	ภูเก็ต
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	1655/31 The address asoke ถนนเพชรบุรี แขวงมักกะสัน เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY