

การประเมินความรุนแรงภายใต้การปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย
ในพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณโหลดและกำลังการผลิตสูง
Severity Assessment under Load Shedding to Thailand's Power System in High
Difference of Load and Generation Capacity Areas

ชัยสิทธิ์ วันน้อย¹ และ นฤมล วันน้อย^{2,*}

¹สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ สระเดียง เมือง เพชรบูรณ์ 67000

²สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ สระเดียง เมือง เพชรบูรณ์ 67000

Chaisit Wannoi¹ and Narumon Wannoi^{2,*}

¹Department of Computer Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,
Phetchabun Rajabhat University, Sadiang, Phetchabun, 67000, Thailand

²Department of Industrial Electrical Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology,
Phetchabun Rajabhat University, Sadiang, Phetchabun, 67000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: narumon.wan@pcru.ac.th

Received: Dec 16, 2022; Revised: Apr 17, 2023; Accepted: Apr 21, 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินความรุนแรงภายใต้การปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณโหลดและกำลังการผลิตสูงด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1 โดยได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบใน 2 พื้นที่คือระบบไฟฟ้ากำลังภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งมีกำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่าปริมาณโหลดอยู่ที่ 6,072.08 MW และระบบไฟฟ้ากำลังภาคกลางซึ่งมีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิตอยู่ที่ 8,471.87 MW โดยผลการศึกษาจะพิจารณาจำนวนอุปกรณ์และปริมาณที่ละเมิดค่าควบคุมของระบบ และเปรียบเทียบผลกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่งจำนวนหนึ่งอุปกรณ์ โดยผลการศึกษาพบว่ากรณีการปลดโหลดภายใต้ระบบที่มีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิตจะทำให้ระบบเกิดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลมากกว่าระบบที่มีกำลังผลิตสูงกว่าปริมาณโหลด โดยมีจำนวนอุปกรณ์ละเมิดค่าควบคุม 11 อุปกรณ์และได้รับภาระโหลดสูงสุดที่ 260.50% นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงกลุ่มโหลดและอุปกรณ์ที่สำคัญในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าและยังสามารถจัดลำดับพื้นที่วิกฤตเพื่อใช้วางแผนปรับปรุงความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ: การปลดโหลด, ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหล, เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1, ความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลัง

Abstract

This paper presents severity assessment under load shedding to Thailand's power system in high difference of load and generation capacity areas with n-1 contingency analysis. This impact study focuses in 2 areas which are the Eastern power system with a generation capacity greater than the load capacity at 6,072.08 MW and the Central power system with

load capacity greater than the generation capacity at 8,471.87 MW. The study results will consider the number of equipment and quantity that violates the control values of the system and compare the results with the case of loss of a generator, a transformer and a transmission line. The study found that in case of load group shedding under a system with load greater than the generation capacity, the system will have higher power flow congestion than a system with higher generation capacity than the load capacity. This impact has 11 devices in violation of the control parameters and achieves a maximum load of 260.50%. In addition, it is possible to identify critical load groups and equipment in power transmission, and to rank critical areas for planning to improve power system security.

Keywords: Load shedding, Power flow congestion, N-1 contingency analysis, Power system security

1. บทนำ

การควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังขนาดใหญ่โดยทั่วไปจะมีการแบ่งพื้นที่การควบคุมระบบไฟฟ้ากำลังออกเป็นระบบย่อย ๆ เพื่อความสะดวกในการควบคุมและการวางแผนระบบ โดยในแต่ละระบบไฟฟ้ากำลังย่อยนั้น หากพิจารณาสัดส่วนหรือข้อมูลของปริมาณกำลังผลิตไฟฟ้าและปริมาณโหลดในแต่ละระบบย่อยจะพบว่า ปริมาณกำลังผลิตและปริมาณโหลดนั้นจะมีสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งหมายความว่า บางระบบย่อยอาจมีกำลังการผลิตไฟฟ้าในพื้นที่สูงกว่าปริมาณโหลด และบางระบบก็อาจมีปริมาณโหลดในพื้นที่มากกว่ากำลังผลิตไฟฟ้าเนื่องจากในแต่ละพื้นที่หรือระบบย่อยนั้นมีความเหมาะสมในการติดตั้งหรือสร้างโรงไฟฟ้าไม่เหมือนกัน และบางพื้นที่เป็นพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในด้านการก่อสร้างหรือเป็นฐานการผลิตด้านอุตสาหกรรมจึงทำให้เกิดความแตกต่างด้านปริมาณโหลดหรือกำลังผลิตเกิดขึ้น ดังนั้นในแต่ละระบบย่อยจะถูกเชื่อมต่อกับสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ (Inter-tied lines) เพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าข้ามพื้นที่ซึ่งถือได้ว่าเป็นสายส่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อให้ระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมเกิดความสมดุลระหว่างปริมาณกำลังผลิตและปริมาณโหลด ซึ่ง [1] ได้นำเสนอเทคนิคในการประเมินความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าข้ามพื้นที่โดยพิจารณาจากการสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ และ [2] ได้ทำการศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่ด้วย TCPS นอกจากนี้ยังมี [3] ได้ทำการศึกษาความมั่นคงของสายส่งเชื่อมต่อกันระหว่างพื้นที่โดยพิจารณาช่วงเวลาในการ

เชื่อมต่อ และระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยก็เช่นเดียวกัน ได้มีการแบ่งพื้นที่ควบคุมออกเป็นทั้งหมด 7 ระบบไฟฟ้ากำลังย่อย และภายใต้ความแตกต่างของกำลังการผลิตและปริมาณ โหลดของแต่ละระบบย่อยนี้ การศึกษาถึงผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้เหตุการณ์ฉุกเฉิน โดยเฉพาะการสูญเสียอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานจำนวนหนึ่งอุปกรณ์ N-1 ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ซึ่งการศึกษผลกระทบต่อภายใต้ระบบสูญเสียอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่ง [4] ได้นำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการคำนวณกำลังไฟฟ้าไหลแบบทำซ้ำในการกำหนดพื้นที่ที่เหมาะสมในการติดตั้ง DRG และยังใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการประเมินความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่ง [5],[6] ได้นำไปศึกษาผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังและนอกจากนี้ [7-9] ยังได้ศึกษาเพื่อนำไปวางแผนป้องกันและยกระดับความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง แต่ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นประกอบด้วยกลุ่มโหลดต่าง ๆ ที่เชื่อมต่อกันอยู่กระจายในแต่ละระบบย่อย ซึ่งหากกลุ่มโหลดเหล่านี้ถูกปลดออกโดยเฉพาะภายใต้ระบบในช่วงเวลาที่มีปริมาณ โหลดสูงสุด ก็อาจส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังได้เช่นเดียวกันและจะมีความแตกต่างกันอย่างไรหากระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมีความแตกต่างของกำลังผลิตไฟฟ้าและปริมาณโหลดที่สูง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความรุนแรง และความแตกต่างของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในพื้นที่ที่มีความแตกต่างสูงของปริมาณ โหลดและกำลังการผลิต

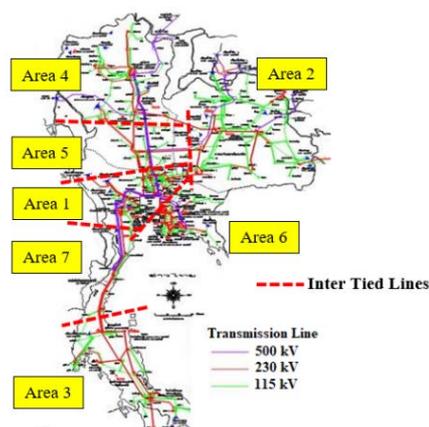
และเพื่อศึกษากลุ่มโหลดและอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงานในระบบเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนปรับปรุงความมั่นคงของระบบด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1 ซึ่งผลกระทบจากการปลดโหลดนั้นก็เป็นที่ประเด็นหนึ่งที่มี [10],[11] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อความเสถียรภาพระบบไฟฟ้าเพื่อใช้ในการวางแผนป้องกันความเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง และยังมี [12],[13] ได้ทำการศึกษาเพื่อนำเสนอวิธีการในการปลดโหลดเพื่อการรักษาความถี่แรงดันไฟฟ้าในระบบ และในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบในกรณีโหลดถูกปลดออกกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง โดยการเปรียบเทียบจะพิจารณาผลกระทบจากจำนวนอุปกรณ์และขนาดที่ละเมิดต่อค่าควบคุมของระบบซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้าและเปอร์เซ็นต์โหลดของอุปกรณ์ (%loading) ซึ่ง [14] ได้นำเสนอการระบุโหลดบัสวิกฤตและเทคนิคการคำนวณความสามารถของโหลดบัส และสำหรับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบกับผลกระทบในกรณีที่ระบบสูญเสีย เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉินระดับ 1 อุปกรณ์เช่นเดียวกัน ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยซึ่งมีกำลังผลิต 30,286.70 MW เป็นระบบฐานในการศึกษา และในการวิเคราะห์ผลในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม PowerWorld Simulator นอกจากนี้ผลการศึกษา

ยังทำให้ทราบถึงอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงาน และลำดับพื้นที่วิกฤตภายใต้การปลดโหลดเพื่อใช้วางแผนปรับปรุงความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ระบบไฟฟ้ากำลังฐานในการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยที่ได้มีการปรับปรุงปี 2019 ซึ่งเป็นข้อมูลช่วงที่มีปริมาณโหลดสูงสุด (Peak load) และระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยที่ใช้ในการศึกษานั้นได้แบ่งพื้นที่ควบคุมออกเป็น 7 ระบบย่อย ซึ่งในแต่ละระบบย่อยนั้นถูกเชื่อมต่อด้วยสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ [15],[16] ดังแสดงในรูปที่ 1 และข้อมูลของระบบดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 ภาพโดยรวมระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทย

ตารางที่ 1 ปริมาณกำลังผลิตและโหลดของระบบไฟฟ้าประเทศไทยปรับปรุง, 2019

Area	Name	Generation (MW)	Loads (MW)	Difference of Power (MW) (Gen.-Loads)	Losses (MW)
1	Central	2,378	10,849.87	-8,471.87	97.98
2	Northeastern	2,859.23	3,229.87	-370.64	134.28
3	Southern	2,090	2,669.37	-579.37	70.25
4	Upper Northern	3,518.59	3,010.56	508.03	133.96
5	Lower Northern	3,972.10	3,162.58	809.52	84.78
6	Eastern	10,134.06	4,061.98	6,072.08	55.79
7	Western	5,334.72	2,675.75	2,658.97	49.68
Total	-	30,286.70	29,659.98	-	626.72

จาก รูปที่ 1 และ ตารางที่ 1 จะพบว่าพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณกำลังผลิตมากกว่าปริมาณโหลดในระบบสูงสุดคือพื้นที่ 6 โดยมีความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 6,072.08 MW และพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณ

โหลดสูงกว่ากำลังผลิตในระบบสูงสุดคือพื้นที่ 1 โดยมีความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 8,471.87 MW ดังนั้นในการศึกษาจะมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบใน 2 พื้นที่ดังกล่าวนี้ โดยจำนวนโหลดบัสในพื้นที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

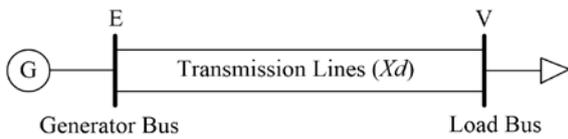
ตารางที่ 2 ปริมาณโหลดในพื้นที่ 1 และ 2 ของระบบไฟฟ้าประเทศไทยปรับปรุง, 2019

No.	Load group in Area 1					Load group in Area 6				
	Bus.No.	Bus.Name	MW	MVar	MVA	Bus.No.	Bus.Name	MW	MVar	MVA
1	1601	NB-1236	588.1	175.94	613.85	6704	WNK	46.84	17.5	50
2	1602	LPR-12	323.81	75.56	332.51	6708	BBG	77.42	46.76	90.45
3	1603	BK-12	255.27	108.91	277.53	6709	AP	312.28	257.19	404.56
4	1604	BPL-1467	339.23	81.49	348.88	6710	BL	134.87	108.51	173.1
5	1605	SB-12	448.8	199.36	491.08	6717	CT	161.85	52.92	170.28
6	1606	STB-12	321.81	152.82	356.25	6718	TR	13.16	2.24	13.35
7	1607	BN-2378	573.99	280.58	638.89	6723	BWN	549.4	280.02	616.64
8	1609	RS-1247	275.85	152.34	315.12	6724	KLM	672.77	394.91	780.11
9	1612	LPR-34	269.07	84.28	281.96	6726	PA2	278.76	137.77	310.94
10	1613	BK-34	517.31	209.09	557.97	6809	SSM	112.01	28	115.45
11	1615	SB-4	167.03	55.84	176.12	6901	MTP1	118.76	39.04	125.01
12	1616	STB-34	309.55	146.93	342.65	6902	RYB2	65.34	28.52	71.29
13	1625	SB-5	148.26	55.24	158.22	6902	RYB2	65.34	28.52	71.29
14	1640	RPS-12	444.6	185.29	481.67	6902	RYB2	65.34	28.52	71.29
15	1663	TPR-34	120.07	49.83	130	6904	RYB1	54.04	23.75	59.03
16	1704	BPL-235	650.07	285.16	709.86	6904	RYB1	109.25	23.75	111.8
17	1705	SB-3	126.12	67.78	143.18	6905	MTP2	307.42	110.84	326.79
18	1707	BN-46	205.46	13.81	205.92	6936	NPC	83.89	12.34	84.8
19	1708	SNO-12	249.44	177.73	306.29	6937	RY_LOAD	59.92	12.17	61.15
20	1709	RS-568	95.12	28.36	99.26	6938	SPR_LAOD	35.95	17.98	40.2
21	1710	NCO-456	614.39	364.68	714.47	6939	TPI_LAOD	88.69	17.98	90.49
22	1711	ON-1	354.89	99.86	368.67	6971	TPI	177.29	98.01	202.58
23	1715	SB-6	160.52	52.06	168.75	-	-	-	-	-
24	1717	CHW-12	532.34	198.28	568.07	-	-	-	-	-
25	1763	TPR-12	354.72	207.28	410.85	-	-	-	-	-
26	1802	LPR	367.49	101.37	381.21	-	-	-	-	-
27	1803	BK	443.4	39.3	445.13	-	-	-	-	-
28	1806	STB	511.33	244.81	566.91	-	-	-	-	-

2.2 การวิเคราะห์ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหล

ความมั่นคงของระบบไฟฟ้า (Power system security) คือ การที่ระบบไฟฟ้ายังคงสามารถ จ่ายโหลดได้เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่ได้คาดหมาย (Contingency) ขึ้นในระบบ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจเกิดจากการหลุด (Outage) ของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง หรือ โหลดขนาดใหญ่ โดยทั่วไประบบไฟฟ้าจะคำนึงถึงความมั่นคงในระดับ N-1 contingency คือ การสูญเสียของอุปกรณ์ไฟฟ้า 1 อุปกรณ์ในระบบแล้วระบบยังคงมี กำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่าย โหลดได้ และในโครงการวิจัยยังได้ทำการจัดอันดับพื้นที่วิกฤตด้วยการวิเคราะห์สภาวะฉุกเฉิน (N-1) ภายใต้อผลกระทบการปลดโหลดในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการศึกษานี้ได้ประเมินความรุนแรงของระบบไฟฟ้าจากผลกระทบต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลในระบบ ซึ่งหากพิจารณาความสามารถในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าที่ส่งผ่านในสายส่งเส้นใดเส้นหนึ่ง จากบัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังบัสโหลดนั้น โดยสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังโหลดผ่านสายส่ง

โดยการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจะมีขีดจำกัดอยู่ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้าส่งผ่านจากบัส E ไปยัง บัส V นั้นสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$P_{E-V} = \frac{EV}{X_d} \sin \delta_c \tag{1}$$

โดยที่

- P_{E-V} คือ กำลังไฟฟ้าส่งผ่านจากบัส E ไปยัง บัส V
- E คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- V คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัสของโหลด
- δ_c คือ มุมโรเตอร์
- X_d คือ อิมพีแดนซ์ของสายส่ง

จากสมการที่ (1) ค่าจำกัดในการควบคุมกำลังผ่านกำลังไฟฟ้าจะมีอยู่ 3 ปัจจัยด้วยกันคือในส่วนแรกค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและบัสของโหลด ส่วนที่สองคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง (X_d) และส่วนสุดท้ายคือค่ามุมโรเตอร์ (δ_c) ซึ่งหากมีการรบกวนอย่างรุนแรงเกิดขึ้นเช่น ระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า สายส่ง และกลุ่มโหลดในระบบก็จะส่งผลให้การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไป และอาจส่งผลให้เกิดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหล [9],[17] ได้โดยจะส่งผลให้แรงดันในระบบต่ำกว่าหรือมากกว่าค่าควบคุม และอาจส่งผลให้อุปกรณ์ได้รับการโหลดเกิน ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบไฟฟ้ากำลังไม่เสถียรภาพ โดยค่าควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ กำหนดค่าจำกัดของการละเมิดการควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังจะประกอบไปด้วย 2 ค่าคือ ค่าจำกัดด้านแรงดันไฟฟ้า และค่าจำกัดด้านภาระโหลดของอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงาน ซึ่งจะแปรผันตามค่าความต้านทานของสายส่งโดยข้อกำหนดในการวิเคราะห์ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหล โดยพิจารณาจากจำนวนอุปกรณ์และขนาดที่ละเมิดค่าควบคุม โดยค่าควบคุมระบบนั้นได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 3

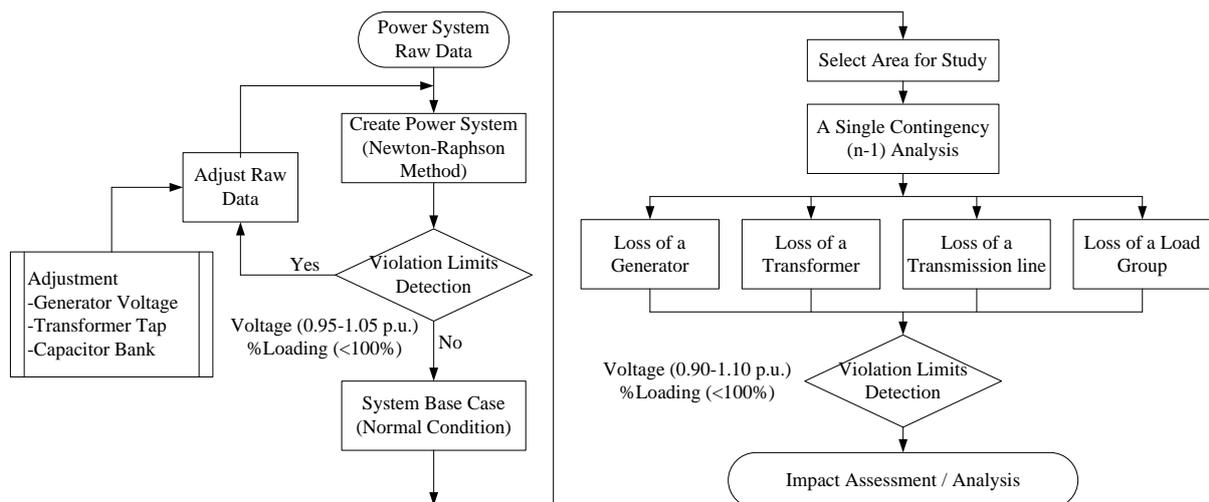
ตารางที่ 3 ค่าจำกัดการควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังฐาน

Case study	Violation Limits	Control Setting	Unit
Power system base Case	Voltage	0.95-1.05	p.u.
	%Loading	<100	%
Congestion impact assessment	Voltage	0.90-1.10	p.u.
	%Loading	<100	%

2.3 กระบวนการวิจัย

แผนผังกระบวนการในการศึกษาวิจัยสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3 โดยในการศึกษาได้เริ่มจากการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังฐานเพื่อใช้ในการศึกษา โดยในการศึกษาได้ใช้ข้อมูลระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยปี 2019 ซึ่งในการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังนั้นจะใช้วิธีการคำนวณของ Newton-Raphson สำหรับค่าควบคุมของระบบไฟฟ้ากำลังได้มีการกำหนดค่าควบคุมไว้ 2 ค่าด้วยกันซึ่งประกอบไปด้วยค่าจำกัดแรงดันไฟฟ้า และภาวะโหลดของอุปกรณ์ โดยค่าควบคุมทั้งสองค่าได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งในกระบวนการสร้างระบบไฟฟ้ากำลังนั้นหากพบว่าระบบมีการละเมิดค่าควบคุม ก็จะทำการปรับฐานข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดการละเมิดค่าควบคุมจะประกอบไปด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แท็บของหม้อแปลง

และแท็บของชุดคาปาซิเตอร์ (capacitors bank) เมื่อระบบไฟฟ้ากำลังไม่มีการละเมิดค่าควบคุมแล้วก็จะได้ระบบไฟฟ้ากำลังฐานในการศึกษา จากนั้นก็จะทำการกำหนดพื้นที่ในการศึกษาโดยได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบจากการปลดโหลดใน 2 พื้นที่คือ พื้นที่ 6 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความแตกต่างของปริมาณกำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่าปริมาณโหลดในระบบสูงสุด และพื้นที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณโหลดสูงกว่ากำลังผลิตในระบบสูงสุด โดยในการศึกษาจะทำการเปรียบเทียบผลกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่งในระบบจำนวน 1 อุปกรณ์ โดยได้กำหนดค่าควบคุมไว้ 2 ค่าประกอบด้วยค่าควบคุมด้านแรงดัน 0.90-1.10 p.u. และค่าภาวะโหลดน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาความรุนแรงที่เกิดขึ้น และการจัดลำดับพื้นที่ที่วิกฤตจากผลกระทบภายใต้การปลดโหลด



รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการประเมินผลกระทบภายใต้เหตุการณ์ฉุกเฉิน (N-1 contingency)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาในการวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาผลกระทบภายใต้ระบบสูญเสียกลุ่มโหลด ในสองพื้นที่ที่มีความแตกต่างด้านปริมาณโหลดและกำลังผลิตสูงซึ่งผลการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบผลในกรณีที่ระบบเกิดการสูญเสียอุปกรณ์จำนวน 1 อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยการสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง พร้อม

ค้นหากลุ่มโหลดและอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงาน รวมถึงการจัดลำดับความสำคัญของอุปกรณ์ดังกล่าวโดยผลการศึกษานั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.1 ผลการศึกษาผลกระทบจากการปลดโหลด

ผลการศึกษาผลกระทบหรือความรุนแรงจากการปลดโหลด [18-21] ในแต่ละพื้นที่หรือในแต่ละระบบไฟฟ้ากำลังย่อย ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาผลกระทบภายใต้การวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉินในแต่ละกรณี (N-1 contingency) ในพื้นที่ 1

Contingency record	Type of N-1 contingency			
	Generator	Transformer	Transmission Line	Load group
Device quantity	23	162	148	28
Device quantity to impact	14	75	66	18
Impact proportion (%)	60.87	46.30	44.59	64.29
Max. Violations	9	13	18	11
Device name to highest impact	G_1013SB-T3U3 G_1014SB-T4U4 G_1015SB-T5U5	X_1908SNO-904SNO X_1908SNO-905SNO	L_1808SNO-904SNO	Lo_1710NCO-456
Max. Branch %	105.40	268.10	268	113.30
Device name to highest impact	G_1013SB-T3U3 G_1014SB-T4U4 G_1015SB-T5U5	X_1808SNO-142SNO	L_1708SNO-142SNO	Lo_1710NCO-456
Min. Volt (p.u.)	-	0.72	0.72	-
Device name to highest impact	-	X_1808SNO-142SNO	L_01804BPL-6801BPK-AC1	-
Max. Volt (p.u.)	-	1.14	1.14	1.15
Device name to highest impact	-	X_1803BK-113BK-3JC3	L_01711ON-105ON-2JC2	Lo_1710NCO-456

โดยจากตารางที่ 4 นั้นได้ทำการแสดงผลการศึกษาผลกระทบภายใต้การปลดโหลดและเปรียบเทียบผลกับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังพื้นที่ 1 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิต โดยผลการศึกษาพบว่าประเภทอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดสถานะความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหล หากถูกปลดออกจากระบบคือ หม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีถึง 75 เครื่อง แต่ในกรณีการปลดกลุ่มโหลดพบว่ามี 18 กลุ่มโหลดด้วยกัน และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบพบว่ากรณีการปลดกลุ่มโหลดส่งผลกระทบมากที่สุดโดยผลการคำนวณสัดส่วนอยู่ที่ 64.29 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้หากพิจารณาจำนวนการละเมิดค่าควบคุม พบว่ากรณีระบบ

สูญเสียสายส่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลสูงสุด โดยมีจำนวนการละเมิดอยู่ที่ 18 อุปกรณ์ ภายใต้การสูญเสียสายส่งหมายเลข L_1808SNO-904SNO แต่ในกรณีการปลดโหลดมีเพียง 11 อุปกรณ์ โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือ กลุ่มโหลดหมายเลข Lo_1710NCO-456 และหากพิจารณาความรุนแรงของเหตุการณ์พบว่ากรณีระบบสูญเสียหม้อแปลงจะส่งผลให้เกิดความรุนแรงสูงสุดโดยทำให้มีอุปกรณ์ได้รับการปลดเกินสูงถึง 268.10 เปอร์เซ็นต์ และทำให้แรงดันในระบบมีพื้นที่ที่มีแรงดันต่ำถึง 0.72 p.u. ภายใต้การสูญเสียหม้อแปลง หมายเลข X_1908SNO-904SNO หรือ X_1908SNO-905SNO แต่ในกรณีปลดโหลดทำให้อุปกรณ์ในระบบได้รับการปลดเกินสูงถึง 113.30

เปอร์เซ็นต์โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือกลุ่มโหลดหมายเลข Lo_1710NCO-456 และสำหรับผลการศึกษาผลกระทบที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าระบบสูงเกินพิกัดพบว่าผล

จากการปลดโหลดทำให้แรงดันในระบบเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ 1.15 p.u. โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือ กลุ่มโหลดหมายเลข Lo_1710NCO-456

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาผลกระทบภายใต้การวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉินในแต่ละกรณี (N-1 contingency) ในพื้นที่ 6

Contingency record	Type of N-1 contingency			
	Generator	Transformer	Transmission line	Load group
Device quantity	109	215	150	22
Device quantity to impact	63	86	45	2
Impact proportion (%)	57.80	40.00	30.00	9.09
Max. Violations	8	7	9	5
Device name to highest impact	G_6001BPK-T1U1 G_6002BPK-T2U2	X_6801BPK- 6002BPK-T2C1	L_1804BPL- 6801BPK-AC1	Lo_6724 KLM
Max. Branch (%)	116	155	155	116.40
Device name to highest impact	G_6003BPK-T3U3 G_6004BPK-T4U4	X_6803RY2- 615RY2-6JC6	L_6734RY2-B- 615RY2-6JC6	Lo_6724 KLM
Min. Volt (p.u.)	-	-	0.89	-
Device name to highest impact	-	-	L_6704WNK- 6726PA2C1	-
Max. Volt (p.u.)	-	1.19	1.11	-
Device name to highest impact	-	X_6709AP-606AP- 1JC1	L_06717CT- 00642CT-5JC4	-

จากผลการศึกษาในตารางที่ 5 นั้นได้แสดงผลการศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบภายใต้การปลดโหลดในพื้นที่ 6 กับกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ซึ่งพื้นที่ 6 นั้นเป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีปริมาณกำลังผลิตมากกว่าปริมาณโหลดสูงสุด โดยผลการศึกษาพบว่าประเภทของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบทำให้เกิดสภาวะความหนาแน่นการไหลกำลังไฟฟ้ามากที่สุดหากถูกปลดออก คือ กรณีระบบสูญเสียหม้อแปลงซึ่งมีถึง 86 เครื่อง และสำหรับในกรณีการปลดกลุ่มโหลดนั้นส่งผลกระทบต่อผู้น้อยสุดโดยมีกลุ่มโหลดสำคัญเพียง 2 กลุ่มโหลดแต่เมื่อ

พิจารณาสัดส่วนของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบพบว่ากรณีการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่งผลกระทบมากที่สุดโดยมีสัดส่วนอยู่ที่ 57.80 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การปลดโหลดอยู่ที่ 9.09 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้หากพิจารณาจำนวนการละเมิดค่าควบคุมพบว่ากรณีระบบสูญเสียสายส่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลสูงสุดโดยมีจำนวนการละเมิดอยู่ที่ 9 อุปกรณ์ โดยสายส่งที่มีความสำคัญนี้คือสายส่งหมายเลข L_1804BPL-6801BPK-AC1 แต่กรณีการปลดโหลดส่งผลให้เกิดการละเมิดเพียง 5 อุปกรณ์ โดยกลุ่ม

โหลดที่มีความสำคัญนี้คือโหลดหมายเลข Lo_6724KLM และหากพิจารณาความรุนแรงของเหตุการณ์พบว่ากรณีระบบสูญเสียหม้อแปลงจะส่งผลให้เกิดความรุนแรงสูงสุดโดยมีอุปกรณ์ที่ได้รับภาระ โหลดเกินสูงถึง 155 เปอร์เซ็นต์ และทำให้แรงดันในระบบมีพื้นที่ที่มีแรงดันต่ำถึง 0.89 p.u. แต่กรณีการปลดโหลดส่งผลกระทบทำให้มีอุปกรณ์ที่ได้รับภาระ โหลดเกินสูงถึง 116.40 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น โดยกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญนี้คือกลุ่มโหลดหมายเลข Lo_1804BPL-6801BPK และสำหรับผลกระทบด้านแรงดันไฟฟ้าสูง พบว่ามีทั้งกรณีในระบบไฟฟ้าสูญเสียหม้อแปลง ภายใต้การสูญเสียหม้อแปลงหมายเลข X_6709AP-606AP-1JC1 โดยแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 1.19 p.u. แต่สำหรับกรณีปลดโหลดไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดันในระบบ

3.2 ผลการศึกษาความรุนแรงสูงสุดต่อระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การปลดโหลด

ผลการศึกษาความรุนแรงต่อระบบจากการปลดโหลดใน 2 พื้นที่ โดยในพื้นที่ 1 และจากผลการศึกษาในตารางที่ 4 พบว่ากรณีที่โหลดหมายเลข Lo_1710NCO-456 ถูกปลดออกส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลเป็นบริเวณกว้างมากที่สุดโดยพิจารณา การละเมิดค่าควบคุมของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีค่าสูงสุดที่ 11 อุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วย บัสแรงดันเกิน 3 บัส (Buses) ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่สำคัญในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 6 และทำให้

หม้อแปลงได้รับภาระโหลดเกิน 8 เครื่อง ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งผลกระทบดังกล่าวได้เรียงลำดับ (ranking) เพื่อแสดงให้เห็นถึงลำดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งสำหรับบัสที่ได้รับผลกระทบด้านแรงดันสูงสุดคือ บัสหมายเลข 1710 NCO-456 ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยแรงดันเพิ่มขึ้นสูงถึง 1.15 p.u. และสำหรับภาระโหลดของหม้อแปลงที่ได้รับภาระโหลดสูงสุดคือ หมายเลข 1810 NCO-192 NCO_6J และ 1710 NCO_456-192 NCO_6J โดยภาระโหลดอยู่ที่ 113.30 เปอร์เซ็นต์

และสำหรับผลการศึกษารายละเอียดจากการปลดโหลดในพื้นที่ 6 และจากผลการศึกษาในตารางที่ 5 ผลการศึกษาพบว่ากรณีที่โหลดหมายเลข Lo_6724KLM ถูกปลดออกส่งผลให้เกิดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลเป็นบริเวณกว้างมากที่สุดโดยพิจารณา การละเมิดค่าควบคุมของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังโดยมีค่าสูงสุดที่ 5 อุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วย สายส่งได้รับภาระโหลดเกิน 1 สายส่ง และหม้อแปลงได้รับภาระโหลดเกิน 4 อุปกรณ์ ซึ่งถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่สำคัญในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งผลกระทบดังกล่าวได้เรียงลำดับ เพื่อแสดงให้เห็นถึงลำดับความรุนแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งสำหรับสายส่งที่ได้รับผลกระทบการรับภาระโหลดเกินสูงสุดคือ สายส่งหมายเลข 1804BPL-6801BPK_A โดยมีภาระโหลดเพิ่มขึ้นสูงถึง 116.40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลกระทบด้านแรงดันพบว่าจากการปลดโหลดในพื้นที่ 6 นั้นไม่ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบ

ตารางที่ 6 ผลการจัดลำดับบัสที่วิกฤตด้านแรงดันในพื้นที่ 1

Ranking	Number	Name	Area Name	PU Volt	Volt (kV)
1	1710	NCO-456	1	1.15	132.04
2	192	NCO-6J	1	1.11	127.76
3	160	NCO-5J	1	1.11	127.69

ตารางที่ 7 ผลการจัดลำดับอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่ได้รับภาระโหลดเกินในพื้นที่ 1

Ranking	From Number	From Name	To Number	To Name	Used Limiting Flow	Limit (MVA)	%Loading
1	1810	NCO	192	NCO-6J	260.50	230	113.30
2	1710	NCO-456	192	NCO-6J	260.50	230	113.30

ตารางที่ 7 ผลการจัดลำดับอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่ได้รับภาระโหลดเกินในพื้นที่ 1 (ต่อ)

Ranking	From Number	From Name	To Number	To Name	Used Limiting Flow	Limit (MVA)	%Loading
3	1810	NCO	160	NCO-5J	258.40	230	112.40
4	1710	NCO-456	160	NCO-5J	258.40	230	112.40
5	1810	NCO	155	NCO-4J	241.20	220	109.60
6	1710	NCO-456	155	NCO-4J	242.20	225	107.60
7	4701	BB	401	BB-1J	117.60	115	102.30
8	4701	BB	402	BB-4J	117.60	115	102.30

ตารางที่ 8 ผลการจัดลำดับบัสที่วิกฤตด้านแรงดันในพื้นที่ 6

Ranking	From Number	From Name	To Number	To Name	Used Limiting Flow	Limit (MVA)	%Loading
1	1804	BPL	6801	BPK-A	1110	953.70	116.40
2	4701	BB	402	BB-4J	118.10	115	102.70
3	4701	BB	401	BB-1J	118.10	115	102.70
4	4801	BB	401	BB-1J	120.10	120	100.10
5	4801	BB	402	BB-4J	120.10	120	100.10

ดังนั้นจากข้อมูลของผลการศึกษาที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6-8 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงจำนวนอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังและการจัดลำดับของบัสและอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานที่ได้รับผลกระทบภายใต้การปลดโหลด ซึ่งอุปกรณ์หรือพื้นที่ที่เหล่านี้ถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงานและรองรับการถ่ายโอนพลังงาน และมีจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการวางแผนปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบเพื่อป้องกันไม่ทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความล้มเหลวขึ้นได้

4. อภิปรายผลและสรุป

ผลการศึกษาวิจัยความรุนแรงภายใต้การปลดโหลดในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความแตกต่างของปริมาณโหลดและกำลังผลิตสูงโดยใช้การวิเคราะห์ระบบสูญเสียอุปกรณ์ในระบบระดับ 1 อุปกรณ์ (n-1 contingency) ซึ่งผลการศึกษา

นี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับผลกระทบจากกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ซึ่งเป็นข้อกำหนดพื้นฐานในการศึกษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากผลการศึกษาในพื้นที่หรือระบบไฟฟ้ากำลังย่อยที่มีปริมาณโหลดน้อยกว่ากำลังผลิตมาก ๆ (พื้นที่ 1) ซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวนี้ต้องอาศัยการส่งถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าจากระบบอื่นเข้ามาช่วยจ่ายโหลดในพื้นที่หรือระบบผ่านสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ ซึ่งหากเกิดเหตุการณ์กลุ่มโหลดถูกปลดออกจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าทั้งด้านภาระโหลดของอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานและผลกระทบต่อความเสถียรภาพแรงดันในระบบซึ่งดูจากปริมาณการละเมิดค่าควบคุมของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบจากกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลงและสายส่งและหากพิจารณาจากสัดส่วนของจำนวนอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลใน

ระบบพบว่ามีสัดส่วนที่สูง และสำหรับในพื้นที่หรือระบบที่มีปริมาณกำลังผลิตที่มากกว่าปริมาณโหลดมากๆ ซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังดังกล่าวนี้ต้องส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปจ่ายให้ระบบอื่นผ่านสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ จะพบว่ากรณีเกิดเหตุการณ์กลุ่มโหลดถูกปลดออกในพื้นที่ที่จะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะด้านภาระโหลดของอุปกรณ์ส่งผ่านพลังงานถึงแม้ผลกระทบด้านแรงดันจะไม่มีรวมถึงสัดส่วนของจำนวนอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไหลในระบบมีสัดส่วนที่น้อยกว่ากรณีอื่นๆ แต่ก็ส่งผลกระทบทำให้ระบบไฟฟ้ากำลังเกิดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลได้ซึ่งพิจารณาได้จากอุปกรณ์ได้รับภาระโหลดเกินได้เช่นเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับผลกระทบจากกรณีระบบสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง เช่นเดียวกัน ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าระบบหรือพื้นที่ที่มีปริมาณโหลดมากกว่ากำลังผลิตมากๆ หากเกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิดจนทำให้ระบบเกิดการสูญเสียอุปกรณ์จำนวนหนึ่งอุปกรณ์จะส่งผลกระทบทำให้ระบบเกิดความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลมากกว่าระบบที่กำลังผลิตสูงกว่าปริมาณโหลดมากๆ

ดังนั้นผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงผลกระทบและความแตกต่างที่เกิดขึ้นในกรณีที่โหลดถูกปลดออกใน 2 พื้นที่ที่มีความแตกต่างด้านปริมาณโหลดและกำลังผลิตสูงในระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ผลกระทบต่อความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลที่เกิดขึ้นภายใต้การปลดโหลดนี้ทำให้ทราบถึงกลุ่มโหลดที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลัง หากถูกปลดออกจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบ และขณะเดียวกันยังสามารถชี้และลำดับอุปกรณ์หรือพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด ซึ่งข้อมูลจากผลการศึกษาดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลที่สำคัญที่สามารถนำไปวางแผนเพื่อการปรับปรุงความมั่นคงระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในอนาคตได้

5. ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของการปลดโหลดต่อระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยในพื้นที่ที่มี

ความแตกต่างสูงของปริมาณโหลดและกำลังการผลิตเพื่อการปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบด้วยการวิเคราะห์เหตุการณ์ฉุกเฉิน N-1 ซึ่งได้เปรียบเทียบกับกรณีที่ระบบสูญเสียอุปกรณ์เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง โดยใช้การวิเคราะห์ระดับการสูญเสีย จำนวน 1 อุปกรณ์ (contingency n-1) เท่านั้น ซึ่งหากต้องศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าไหลที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้น สามารถเพิ่มระดับการวิเคราะห์ที่สูงกว่าได้เช่น Contingency n-2 เป็นต้น และในการพิจารณากำลังผลิตในพื้นที่ซึ่งสามารถพิจารณาความสามารถคงเหลือของสายส่งเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ว่ามีมากน้อยเพียงไรซึ่งจะมีผลในการส่งผ่านพลังงานข้ามพื้นที่หากกำลังผลิตไม่เพียงพอ

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ผลหาระบบไฟฟ้ากำลังใดที่มีความยืดหยุ่นของระบบในการรองรับการสูญเสียอุปกรณ์ในระบบได้น้อย นั้นสามารถปรับหรือลดค่าควบคุม (violation limit) ของระบบลงได้เพื่อใช้ในการค้นหาหรือระบุพื้นที่วิกฤตที่ได้รับผลกระทบรวมถึงอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการส่งผ่านพลังงานในระบบเพื่อใช้ในการวางแผนปรับปรุงความมั่นคงของระบบไฟฟ้ากำลังได้มากยิ่งขึ้น และที่สำคัญกระบวนการในการศึกษาวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังประเทศไทยเท่านั้นแต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้ากำลังระบบอื่นๆ ได้ และผลกระทบภายใต้การศึกษา n-1 contingency จากการปลดโหลด สามารถนำไปประกอบกับผลกระทบภายใต้การศึกษา n-1 contingency ทั้ง 3 กรณี กล่าวคือผลกระทบภายใต้การสูญเสียเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หม้อแปลง และสายส่ง ในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อทำการศึกษาในการค้นหาพื้นที่วิกฤตและจัดเรียงพื้นที่หรืออุปกรณ์ที่ได้รับผลกระทบบ่อยครั้งในแต่ละกรณีหรือจากทุกกรณีเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน อุปกรณ์ FACTS หรือแม้แผนการปลดโหลดที่เหมาะสมเพื่อการวางแผนปรับปรุงความเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังต่อไปได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาวิจัยนี้ ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและ

เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยสนับสนุนห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการดำเนินการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และคณาจารย์สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาพร้อมคำแนะนำในการทำงานวิจัย นอกจากนี้ทีมผู้วิจัยขอขอบคุณทุกคำแนะนำและทุกผลการตอบกลับที่ช่วยให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Wannoi and N. Wannoi, "Techniques for Assessment Inter-area Power Transfer Capacity for Large Power Systems to Improve System Stability," *SNRU Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 126–134, 2021.
- [2] N. S. Deepika, I. Tejaswini, K. Naveen and Dr. J. Ravindra, "Multi Area Frequency and Tie Line Power Flow Control with TCPS," *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol.7, no. 6, pp. 1809–1814, 2020.
- [3] W. Lin, Z. Yang, J. Yu, K. Xie, X. Wang and W. Li, "Tie-Line Security Region Considering Time Coupling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.36, no. 2, pp. 1274–1284, 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3015483.
- [4] N. Wannoi, N. Jirsuwankul, P. Sarikprueck, C. Chompoo-inwai and C. Wannoi, "A Novel Technique to Identify Proper Locations for Distributed Renewable Generation Integration to Minimize Contingency Impact," presented at the 2020 Int. Conf. IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia Technical Conference, Weihai, China, Jul. 13–16, 2020, Paper 20007169.
- [5] A. R. A. Wafa, A. F. E. Garably and S. Nasser, "Power System Security Assessment under N-1 and N-1-1 Contingency Conditions," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 12, no. 11, pp.1854–1863, 2019.
- [6] Z. Lu, L. He, D. Zhang, B. Zhao, J. Zhang and Hao Zhao, "A Security Level Classification Method for Power Systems under N-1 Contingency," *Energies*, vol. 10, no. 12, 2017, Art. no. 2055, doi: 10.3390/en10122055.
- [7] R. Kumar, R. Singh, H. Ashfaq, S. K. Singh and M. Badoni, "Power System Stability Enhancement by Damping and Control of Sub-synchronous Torsional Oscillations using Whale Optimization Algorithm based Type-2 Wind Turbines," *ISA Transactions*, vol. 108, pp. 240–256, 2021, doi: 10.1016/j.isatra.2020.08.037.
- [8] K. Teeparthi and D. M. V. Kumar, "Power System Security Assessment and Enhancement: A Bibliographical Survey," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 101, pp. 163–176, 2020, doi: 10.1007/s40031-020-00440-1.
- [9] A. Kanchanaharuthai and E. Mujjalinvimut, "Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation for Power Systems with Statcom via a Backstepping-Like Scheme," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 17, no. 2, pp. 701–714, 2021.
- [10] J. Liu, Y. Zhang, K. Meng, Z. Y. Dong, Y. Xu and S. Han, "Real-time Emergency Load Shedding for Power System Transient Stability Control: A Risk-Averse Deep Learning Method," *Applied Energy*, vol. 307, 2022, Art. no. 118211.
- [11] R. H. Al-Rubayi and M. K. Abd, "Emergency Load Shedding for Voltage Stability Enhancement: With Particular Reference to the Iraqi National Power

- Grid,” *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 52–62, 2020, doi: 10.22266/ijies2020.0430.06.
- [12] S. F. A. Shukor, I. Musirin, Z. A. Hamid, M. K. M. Zamani, M. Zellagui and H. Suyono, “Intelligent Based Technique for Under Voltage Load Shedding in Power Transmission Systems,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 17, no. 1, pp. 110–117, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v17.i1.pp110-117.
- [13] O. T. Amusan, N. I. Nwulu and S. L. Gbadamosi, “Identification of Weak Buses for Optimal Load Shedding Using Differential Evolution,” *Sustainability*, vol. 14, no. 6, 2022, Art. no. 3146, doi: 10.3390/su14063146.
- [14] N. Wannoi, N. Jirsuwankul, C. Chompoo-inwai, C. Chompoo-inwai and C. Wannoi, “Novel Techniques for Critical Load Buses Identification and Load Bus’s Available Capacity Calculation to Improve Power System Stability,” presented at the 2020 Int. Conf. IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia Technical Conference, Weihai, China, Jul. 13–16, 2020, Paper 20007335.
- [15] B. Taheri and A. Safdarian, “Tie-line Planning for Resilience Enhancement in Unbalanced Distribution Networks,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 5, pp. 1030–1046, 2022, doi: 10.1049/gtd2.12347.
- [16] N. Suganthi, “Tie line power control of Two Area System using Tie-line bias Controller,” *International Journal of Advances in Engineering and Management*, vol. 2, no. 6, pp. 630–633, 2020, doi: 10.35629/5252-0206630633.
- [17] A. A. J. Basha, M. Anitha and E. B. Elanchezhian, “Optimal Placement of TCSC for Congestion Management in Deregulated Power System using Firefly Algorithm,” *International Journal of Process Systems Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 4–29, 2019, doi: 10.1504/IJPSE.2019.096675.
- [18] T. G. Tran, H. T. Trang, T. N. Le, N. A. Nguyen and P. T. N. Hieu, “Load Shedding in Power System Considering the Generator Control and AHP Algorithm,” *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*, vol. 6, no. 12, pp. 484–492, 2020, doi: 10.22161/ijaems.612.1.
- [19] L. T. Nghia1, Q. H. Anh, P. T. T. Binh, N. T. An and P. H. Hau, “A Voltage Electrical Distance Application for Power System Load Shedding Considering the Primary and Secondary Generator Controls,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 3993–4002, 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i5.pp3993-4002.
- [20] Y. Y. Hong and C. Y. Hsiao, “Event-based under-Frequency Load Shedding Scheme in a Standalone Power System,” *Energies*, vol. 14, no. 18, 2021, Art. no. 5659, doi: 10.3390/en14185659.
- [21] A. Sauhats, A. Utans, J. Silinevics, G. Junghans and D. Guzs, “Enhancing Power System Frequency with a Novel Load Shedding Method Including Monitoring of Synchronous Condensers’ Power Injections,” *Energies*, vol. 14, no. 5, 2021, Art. no. 1490, doi: 10.3390/en14051490.