

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้งก็จะมีมีความรุนแรงที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของการเกิด ซึ่งฟ้าผ่าสามารถที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ตำแหน่งที่โดนฟ้าผ่าโดยตรง หรือแม้แต่บริเวณใกล้เคียงตำแหน่งที่โดนฟ้าผ่า ระบบไฟฟ้าก็เป็นหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดฟ้าผ่าเช่นเดียวกัน โดยสามารถก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานสูญเสียเสถียรภาพ และอาจพัฒนาความรุนแรงไปจนเกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ในกรณีของผลกระทบเหล่านี้แล้วแต่ทำให้ขาดความน่าเชื่อถือเกิดขึ้นสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยกันทั้งสิ้น

การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่งสำหรับงานวิจัยนี้ จะดำเนินการวิเคราะห์ด้วยการใช้โปรแกรม ATP-EMTP เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นชั่วขณะในช่วงเวลาที่เกิดฟ้าผ่า โดยจะพิจารณาถึงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วย ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสจะสูงกว่าหรือเท่ากับกระแสคายอด กระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ในการทดลองจะพิจารณาผลการทดลองของแต่ละกรณีศึกษา โดยในแต่ละกรณีศึกษาจะให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกรณีศึกษาแต่ละกรณี

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ จะแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ขั้นตอนที่ 2. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ขั้นตอนที่ 3. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย แรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่นหลังจากที่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าคอนกรีต (External Ground)

ขั้นตอนที่ 5 เปรียบเทียบผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ของระบบส่ง 69 kV ของแต่ละระยะห่างระหว่างเสา เพื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเกิดผลการทดลองดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 6 เปรียบเทียบผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ระหว่างกรณีไม่ติดตั้งสายดินนอกเสา และติดตั้งสายดินนอกเสา

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณอัตราความเสียหายจากไฟฟ้าดับ ในระยะ 10 ปี ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เปรียบเทียบระหว่างกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา และไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาของรูปคลื่น 0.25/100 และ 10/350 μ s

ในการทดลองขั้นตอนที่ 1-4 ได้จำลองโดยใช้กระแสฟ้าผ่าบวก โดยจากการศึกษา และจากการรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้พบว่าผลกระทบของกระแสฟ้าผ่าบวก ส่งผลกระทบนานกว่ากระแสฟ้าผ่าลบ

4.2.1 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 1

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อที่จะทราบถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่นดังกล่าว

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
25	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
50	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
75	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
100	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
125	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	492.15	956.44	1420.7	1885	2349.3
25	506.63	985.4	1464.2	1942.9	2421.7
50	523.54	1019.2	1514.9	2010.6	2506.2
75	543.81	1059.8	1575.7	2091.6	2607.6
100	566.85	1105.8	1644.8	2183.8	2722.7
125	594.95	1162	1729.1	2296.2	2863.3

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	269.16	510.44	751.72	993	1234.3
25	295.87	563.86	831.85	1099.8	1367.8
50	325.4	622.93	920.45	1218	1515.5
75	351.5	675.12	998.74	1322.4	1646
100	374.85	721.8	1068.8	1415.8	1762.7
125	395.98	764.08	1132.2	1500.3	1868.4

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	198.06	368.22	538.38	708.53	878.69
25	226.4	424.91	623.41	821.91	1020.4
50	255.4	482.9	710.39	937.89	1165.4
75	279.13	530.36	781.59	1032.8	1284.1
100	298.88	569.86	840.84	1111.8	1382.8
125	315.48	603.06	890.64	1178.2	1465.8

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	155.52	283.14	410.76	538.38	665.99
25	176.91	325.91	474.9	623.9	772.9
50	207.29	386.67	566.04	745.42	924.79
75	230.29	432.65	635.02	837.39	1039.8
100	247.9	467.88	687.86	907.85	1127.8
125	261.45	494.97	728.5	962.03	1195.6

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	78.949	130	181.04	232.09	283.14
25	102.69	177.38	252.06	326.75	401.43
50	119.97	211.94	303.91	395.88	487.85
75	128.48	228.96	329.44	429.91	530.39
100	132.66	237.32	341.98	446.64	551.29
125	134.72	241.43	348.14	454.86	561.57

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

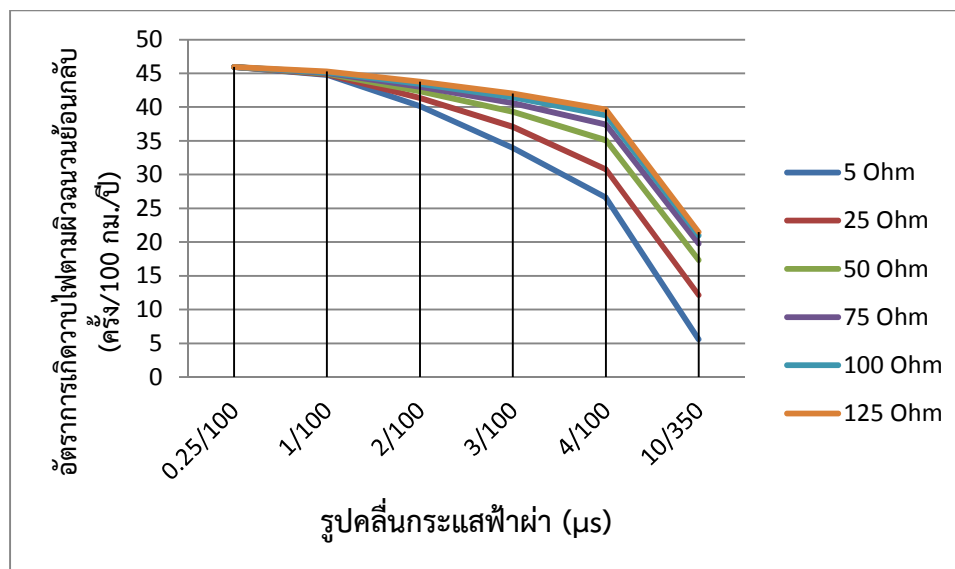
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	2.812	8.340	16.05	22.76	30.35	75.85
25	2.812	8.090	14.45	19.505	25.995	51.850
50	2.812	7.815	13.015	17.02	21.58	42.1
75	2.812	7.505	11.965	15.41	19.13	38.54
100	2.812	7.185	11.16	14.2875	17.6	36.98
125	2.812	6.830	10.52	13.465	16.578	36.275

ตารางที่ 4.8 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสไฟฟ้าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

R	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	99.809316	97.187268	87.055437	73.742544	57.765398	12.166541
25	99.809316	97.387956	89.737621	80.509755	66.827221	26.390968
50	99.809316	97.599110	91.907799	85.310550	76.237124	37.637155
75	99.809316	97.825141	93.340297	88.159270	81.260051	42.944883
100	99.809316	98.045223	94.344378	89.995087	84.229368	45.492232
125	99.809316	98.273791	95.082506	91.252856	86.115904	46.687843

ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

R	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	45.96767	44.76007	40.09381	33.96249	26.60414	5.60336
25	45.96767	44.8525	41.3291	37.07916	30.7776	12.15449
50	45.96767	44.94975	42.32858	39.29019	35.11138	17.33398
75	45.96767	45.05385	42.98833	40.60218	37.42471	19.77848
100	45.96767	45.1552	43.45076	41.44768	38.79225	20.95167
125	45.96767	45.26047	43.79071	42.02695	39.6611	21.50231



รูปที่ 4.1 แสดงอัตราการเกิดวาปไฟตามผิวนวณย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

4.2.1.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 หากพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/ 100 พบว่า ที่ค่าความต้านทานอิมพีดลั 5, 25, 50, 75, 100 และ 125 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงเลย เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า แรงดันที่หัวเสาไม่สามารถทำให้ลดลงด้วยคลื่นสะท้อนที่มาจากอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน เพราะความเร็วของการสะท้อนกลับของคลื่นที่เดินทางผ่านสายดินมีค่า 123 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งใช้ความเร็วในการเดินทางน้อยไปกว่าจะเดินทางถึงยอดเสา ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับจากอิมพีแดนซ์ของรากสายดินไปหักล้างแรงดันที่หัวเสาจึงทำได้ไม่มากนัก จึงเป็นสาเหตุให้แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยมีค่าเพิ่มขึ้น น้อยมาก หรือแทบจะคงที่ แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่น 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 μs จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลัมีค่ามากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากว่าเวลาหน้าคลื่นมีระยะเวลาที่มากขึ้นเพียงพอที่จะทำให้การสะท้อนกลับมาหักล้างแรงดันที่หัวเสาของคลื่นจากรากสายดิน และเสาดันข้างเคียงสามารถทำได้ทัน เมื่อพิจารณาที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 μs ที่ค่าความต้านทานอิมพีดลัคงที่ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าน้อยลง เมื่อเวลาหน้าคลื่นมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากว่า เวลาหน้าคลื่นยิ่งมากขึ้น ทำให้การสะท้อนกลับมาหักล้างแรงดันที่หัวเสาของคลื่นจากรากสายดิน และเสาดันข้างเคียงทำได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด พบว่า ที่ความต้านทานอิมพีดลั 5, 25, 75, 100, และ 125 โอห์ม ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลัมากขึ้นตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่าง 40, 80 และ 120 เมตร ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด มีค่าน้อยลง

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด อัตราการวาบไฟตามผิวนวณย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค่ายอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวนวณย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

4.2.2 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 2

กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวนวณย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
25	1410.2	2796	4181.8	5567.7	6953.5
50	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
75	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
100	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
125	1410.2	2796.1	4181.9	5567.7	6953.5

ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	567.68	1110.7	1654.2	2197.5	2740.8
25	583.88	1143.3	1702.8	2262.3	2821.8
50	603.02	1181.6	1760.3	2338.9	2917.5
75	626.52	1228.6	1830.7	2432.9	3035
100	661.51	1298.6	1935.7	2572.8	3209.9
125	711.25	1398.1	2084.9	2771.8	3458.6

ตารางที่ 4.12 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	326.13	627.84	929.56	1231.3	1533
25	352.81	681.21	1009.6	1338	1666.4
50	382.71	741	1099.3	1457.6	1815.9
75	409.62	794.82	1180	1565.2	1950.4
100	434.15	843.89	1253.6	1663.4	2073.1
125	457.93	891.43	1324.9	1758.4	2191.9

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	225.56	426.7	627.84	828.99	1030.1
25	243.35	462.28	681.21	900.14	1119.1
50	277.37	530.3	783.24	1036.2	1289.1
75	308.87	593.3	877.73	1162.2	1446.6
100	335.03	645.63	956.23	1266.8	1577.4
125	356.85	689.26	1021.7	1354.1	1686.5

ตารางที่ 4.14 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	175.28	326.13	476.99	627.84	778.7
25	197.96	371.48	545.01	718.53	892.05
50	225.32	426.2	627.09	827.97	1028.9
75	250.06	475.66	701.27	926.88	1152.5
100	272.86	521.27	769.68	1018.1	1266.5
125	289.81	555.18	820.54	1083.7	1351.2

ตารางที่ 4.15 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	84.761	145.1	205.45	265.79	326.13
25	108.92	193.31	277.7	362.1	446.49
50	129.79	235.06	340.33	445.6	550.87
75	140.43	256.33	372.23	488.13	604.03
100	145.72	266.9	388.09	509.28	630.47
125	148.45	272.37	396.29	520.21	644.14

ตารางที่ 4.16 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

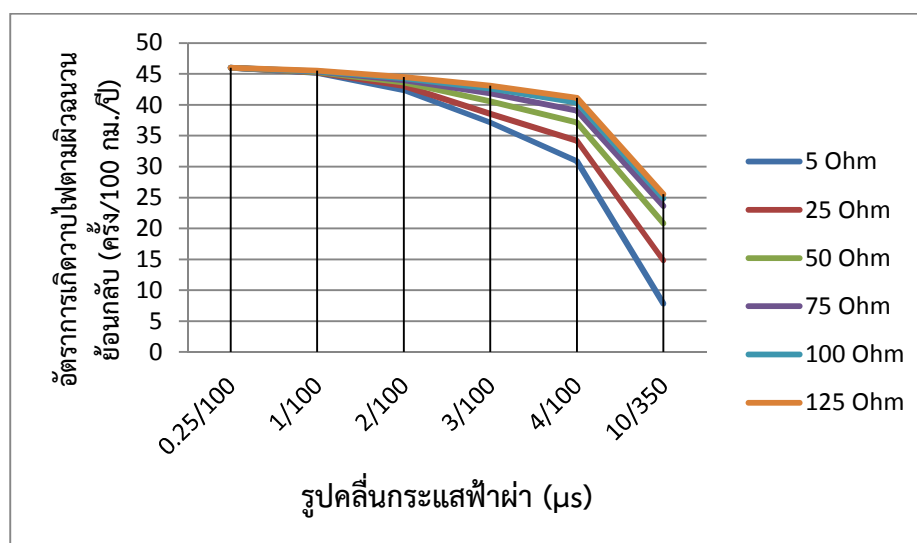
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μ s)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	2.82	7.19	12.95	19.44	25.9	64.75
25	2.82	6.99	11.9	17.87	22.52	46.33
50	2.82	6.76	10.91	15.45	19.45	37.12
75	2.82	6.49	10.15	13.74	17.32	33.7
100	2.82	6.14	9.55	12.58	15.74	32.25
125	2.82	5.7	9.03	11.75	14.74	31.52

ตารางที่ 4.17 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μ s)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	99.807960	98.041887	92.000404	80.640370	67.029818	17.062661
25	99.807960	98.172792	93.424453	83.717172	74.252462	32.205740
50	99.807960	98.316942	94.639116	88.091451	80.620290	45.258085
75	99.807960	98.477516	95.484539	90.840912	84.754657	51.284638
100	99.807960	98.671938	96.097660	92.517776	87.595043	54.024930
125	99.807960	98.894741	96.589992	93.616609	89.271027	55.442989

ตารางที่ 4.18 ค่าอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับของฉนวนลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	45.96704	45.15367	42.37123	37.13932	30.87091	7.858292
25	45.96704	45.21396	43.02709	38.55635	34.19733	14.83251
50	45.96704	45.28035	43.58651	40.57095	37.13007	20.84383
75	45.96704	45.3543	43.97587	41.83722	39.03417	23.61939
100	45.96704	45.44384	44.25825	42.60951	40.34232	24.88144
125	45.96704	45.54645	44.48499	43.11559	41.11421	25.53454



รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

4.2.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 หากพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/ 100 พบว่า ที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ 5, 25, 50, 75, 100 และ 125 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงเลย แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่น 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพัลส์มีค่ามากขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 ที่ความต้านทานอิมพัลส์คงที่ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าน้อยลง เมื่อเวลาหน้าคลื่นมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เหตุที่เป็นเช่นนี้ เหตุผลก็เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์การทดลองในกรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอด พบว่า ที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5, 25, 75, 100, และ 125 โอห์ม ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอดมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพัลส์มากขึ้นตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่าง 40, 80 และ 120 เมตร ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอดมีค่าน้อยลง

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแส ค่ายอด อัตราการวาบไฟตามผิวนวณย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค่ายอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวนวณย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองขั้นตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่ากระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอด อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวนวณย้อนกลับที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรจะมีค่าที่มากกว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

4.2.3 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 3

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 3. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวนวณย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน่วงและ หางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ตารางที่ 4.19 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1407.2	2792.7	4178.2	5563.7	6949.2
25	1407.3	2792.8	4178.3	5563.9	6949.4
50	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.4
75	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.4
100	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.5
125	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.5

ตารางที่ 4.20 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	583.52	1145.3	1707.1	2268.9	2830.6
25	610.99	1200.2	1789.5	2378.7	2968
50	649.3	1276.9	1904.4	2532	3159.5
75	689.04	1356.3	2023.6	2690.9	3358.2
100	736.2	1450.6	2165.1	2879.5	3594
125	786.29	1550.8	2315.4	3079.9	3844.4

ตารางที่ 4.21 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	309.06	596.35	883.65	1170.9	1458.2
25	350.69	679.62	1008.6	1337.5	1666.4
50	395.66	769.55	1143.4	1517.3	1891.2
75	434.64	847.53	1260.4	1673.3	2086.2
100	469.02	916.28	1363.5	1810.8	2258.1
125	499.73	977.7	1455.7	1933.6	2411.6

ตารางที่ 4.22 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	216.98	412.21	607.43	802.66	997.88
25	246.82	471.88	696.94	922	1147.1
50	279.88	537.99	796.11	1054.2	1312.3
75	308.46	595.16	881.85	1168.6	1455.2
100	343.71	665.65	987.59	1309.5	1631.5
125	372.77	712.21	1074.8	1425.8	1776.8

ตารางที่ 4.23 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	180.8	339.82	498.85	657.87	816.89
25	214.03	406.29	598.54	790.79	983.05
50	246.7	471.62	696.54	921.46	1146.4
75	272.36	522.94	773.51	1024.1	1274.7
100	292.92	564.07	835.21	1106.4	1377.5
125	310.98	600.16	889.35	1178.5	1467.7

ตารางที่ 4.24 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	85.386	149	212.6	276.21	339.82
25	112.58	203.31	294.04	384.77	475.5
50	138.21	254.56	370.91	487.25	603.6
75	150.63	279.4	408.17	536.94	665.72
100	156.75	291.64	426.54	561.43	696.32
125	159.79	297.73	435.66	573.6	711.54

ตารางที่ 4.25 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

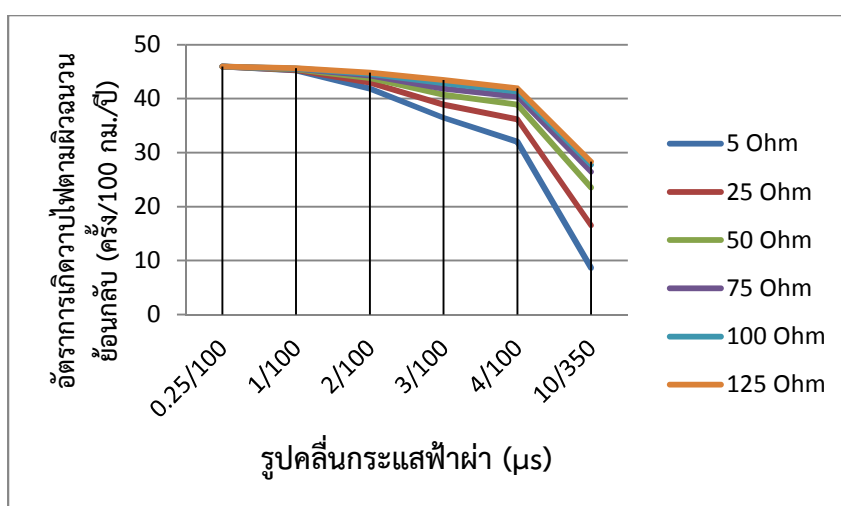
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	2.85	7.0001	13.695	20.150	24.730	61.83
25	2.84	6.68	11.960	17.48	20.460	43.35
50	2.84	6.27	10.52	15.24	17.485	33.8
75	2.84	5.895	9.530	13.72	15.694	30.55
100	2.84	5.505	8.795	12.22	14.505	29.15
125	2.84	5.145	8.235	11.21	13.6	28.51

ตารางที่ 4.26 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสดำยอด (%) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	99.802822	98.166306	90.908920	79.201769	69.531758	18.757722
25	99.804544	98.365489	93.346790	84.455239	78.566024	35.936407
50	99.804544	98.601520	95.082506	88.445714	84.445850	51.099558
75	99.804544	98.798937	96.117267	90.871167	87.674332	57.364287
100	99.804544	98.985924	96.800579	93.004993	89.649825	60.204760
125	99.804544	99.142318	97.272572	94.284450	91.051725	61.526639

ตารางที่ 4.27 ค่าอัตราการเกิดวาปไฟตามพิกัดนวนย้อนกลับ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	45.96468	45.21097	41.86855	36.47676	32.02319	8.63896
25	45.96547	45.30271	42.99132	38.89627	36.18397	16.55069
50	45.96547	45.41141	43.79071	40.7341	38.89195	23.53415
75	45.96547	45.50233	44.26728	41.85116	40.37884	26.4194
100	45.96547	45.58845	44.58198	42.8339	41.28866	27.7276
125	45.96547	45.66048	44.79936	43.42316	41.93432	28.33639



รูปที่ 4.3 แสดงอัตราการเกิดวาปไฟตามพิกัดนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

4.2.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 3 หากพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/ 100 พบว่า ที่ค่าความต้านทานอิมพีดลั 5, 25, 50, 75, 100 และ 125 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงเลย แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่น 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลัมีค่ามากขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 ที่ค่าความต้านทานอิมพีดลัคงที่ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าน้อยลง เมื่อเวลาหน้าคลื่นมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เหตุที่เป็นเช่นนี้ เหตุผลก็เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์การทดลองในกรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ในกรณีนี้ สาเหตุที่แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยเป็นเช่นนี้ ก็เป็นเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และ 80 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด พบว่า ที่ความต้านทานอิมพีดลั 5, 25, 75, 100, และ 125 โอห์ม ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลัมากขึ้นตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่าง 40, 80 และ 120 เมตร ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมีค่าน้อยลง

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด อัตราการวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค่ายอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

วิเคราะห์ผลการทดลองขั้นตอนที่ 3 เปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2 พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ที่ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตรจะมีค่าที่มากกว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

4.2.4 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 4

กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพีดลั 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพีดลัฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่นหลังจากที่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าคอนกรีต (External Ground)

ตารางที่ 4.28 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า				
	10	20	30	40	50
5	847.76	1671.1	2494.5	3317.9	4141.2
25	862.94	1701.5	2540	3378.6	4217.1
50	877.21	1730	2582.8	3435.6	4288.4
75	888	1751.6	2615.2	3478.8	4342.4
100	896.39	1768.4	2640.4	3512.3	4384.3
125	903.17	1781.9	2660.7	3539.5	4418.2

ตารางที่ 4.29 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย รูปคลื่น 10/350 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า				
	10	20	30	40	50
5	61.788	99.048	136.31	173.57	210.83
25	107.71	190.9	274.08	357.27	438.12
50	132.24	239.95	347.65	455.36	563.07
75	142.76	260.99	379.22	497.45	615.68
100	147.39	270.26	392.64	515.98	638.85
125	149.47	274.41	399.35	524.28	649.21

ตารางที่ 4.30 กระแสฟ้าผ่าวิกฤต (kA) กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

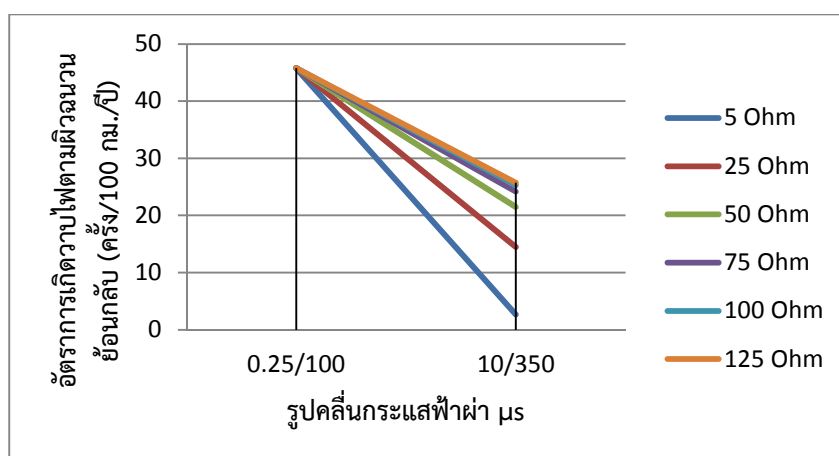
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า	
	0.25/100	10/350
5	4.745	104.8
25	4.66	46.95
50	4.583	36.3
75	4.525	33.05
100	4.48	31.8
125	4.445	31.3

ตารางที่ 4.31 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร กรณีติดตั้งสายดินนอกเสา

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)	
	0.25/100	10/350
5	99.298324	5.814053
25	99.329119	31.484458
50	99.356314	46.644975
75	99.376361	52.500101
100	99.391657	54.896152
125	99.403398	55.875139

ตารางที่ 4.32 ค่าอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวนวนย้อนกลับ กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)	
	0.25/100	10/350
5	45.73233	2.677691
25	45.74651	14.50032
50	45.75903	21.48257
75	45.76827	24.17918
100	45.77531	25.28269
125	45.78072	25.73357



รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวนวนย้อนกลับ กรณีติดตั้งสายดินนอกเสา ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

4.2.4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 4 หากพิจารณาแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/100 μs และ 100/350 μs พบว่าเมื่อความต้านทานอิมพีดซ์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เมื่อนำผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมาเปรียบเทียบกับทั้งสองรูปคลื่น พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/100 μs มีค่ามากกว่ารูปคลื่น 100/350 μs

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสคายอด พบว่าเมื่อความต้านทานอิมพีดซ์มากขึ้น ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสคายอดมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่น 0.25/100 และ 100/350 μs พบว่า รูปคลื่น 100/350 μs มีค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสคายอดมากกว่ารูปคลื่น 0.25/100 μs

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสคายอด อัตราการวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับคายอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

วิเคราะห์ผลการทดลองขั้นตอนที่ 4 เปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2 พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสคายอด ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรจะมีค่าที่มากกว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา จากผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งสายดินนอกเสาทำให้สามารถลดแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยลงได้ค่อนข้างมาก สามารถทำให้กระแสฟ้าผ่าวิกฤตมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้โอกาสเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนน้อยลงตามไปด้วย

4.2.5 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 5

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 5 จะเป็นการนำผลการทดลองในกระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2 และกระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 4 มาเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลของการเกิดทั้ง 2 กรณี เพื่อที่จะทราบว่า ทั้ง 2 กรณี ให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันอย่างไร โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นฟ้าผ่า 0.25/100 μs และ 100/350 μs ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 4 เป็นผลการทดลอง ในกรณีที่ได้ปรับปรุงระบบ โดยการเพิ่มสายดินนอกเสาคอนกรีต (External Ground) เข้าไปเพื่อที่จะช่วยลดทอนแรงดันที่ตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

ตารางที่ 4.33 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
25	1410.2	2796	4181.8	5567.7	6953.5
50	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
75	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
100	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
125	1410.2	2796.1	4181.9	5567.7	6953.5

ตารางที่ 4.34 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	847.76	1671.1	2494.5	3317.9	4141.2
25	862.94	1701.5	2540	3378.6	4217.1
50	877.21	1730	2582.8	3435.6	4288.4
75	888	1751.6	2615.2	3478.8	4342.4
100	896.39	1768.4	2640.4	3512.3	4384.3
125	903.17	1781.9	2660.7	3539.5	4418.2

จากตารางที่ 4.33 และตารางที่ 4.34 เป็นแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีที่ยังไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าตามลำดับ ของระบบ 69 kV โดยมีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร โดยหากพิจารณาแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ทั้ง 2 ตาราง พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยในกรณีที่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า มีค่าแรงดันไฟฟ้า ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้ง

ตารางที่ 4.35 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	84.761	145.1	205.45	265.79	326.13
25	108.92	193.31	277.7	362.1	446.49
50	129.79	235.06	340.33	445.6	550.87
75	140.43	256.33	372.23	488.13	604.03
100	145.72	266.9	388.09	509.28	630.47
125	148.45	272.37	396.29	520.21	644.14

ตารางที่ 4.36 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย รูปคลื่น 10/350 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า				
	10	20	30	40	50
5	61.788	99.048	136.31	173.57	210.83
25	107.71	190.9	274.08	357.27	438.12
50	132.24	239.95	347.65	455.36	563.07
75	142.76	260.99	379.22	497.45	615.68
100	147.39	270.26	392.64	515.98	638.85
125	149.47	274.41	399.35	524.28	649.21

จากตารางที่ 4.33 และตารางที่ 4.34 เป็นแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 10/350 μ s กรณีที่ยังไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าตามลำดับ ของระบบ 69 kV โดยมีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร จะพบว่า ค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยก็เป็น ไปในทิศทางเดียวกับกับกรณีของรูปคลื่น 0.25/100 โดยมีแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยที่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ที่น้อยกว่าค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา

4.2.6 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 6

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 6 จะเป็นการคำนวณอัตราความเสียหายจากไฟฟ้าดับ ในระยะ 10 ปี ของระบบส่ง 69 kV ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เปรียบเทียบระหว่างกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา และไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาของรูปคลื่น 0.25/100 และ 10/350 μ s

มูลค่าเงินลงทุนในการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.37 โดยข้อมูลที่แสดงในตารางจะเป็นค่าใช้จ่ายต่อเสาไฟฟ้า 1 ต้น แต่ในการคิดค่าใช้จ่ายทั้งโครงการจะพิจารณาที่ระยะ 100 วงจร-กิโลเมตร ได้มีการศึกษาการเรื่องอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ โดยสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่า อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (Interruption Cost) ต่อครั้ง ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง 147,500 บาทต่อครั้ง ในปี พ.ศ.2544 โดยเมื่อคิดเทียบออกมาเป็นปี 2556 อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับต่อครั้งคือ 341251 บาท เงินลงทุนสำหรับทั้งหมดของโครงการในการติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้ามีมูลค่า 712069.20 บาท

ตารางที่ 4.37 รายละเอียดของการลงทุนติดตั้งสายดินนอกเสา (บาท/ต้น)

รายการ	ค่าลงทุน (บาท/ต้น)
วัสดุ	425.65
ค่าแรงงาน	54.25
ค่าควบคุมงาน	16.28
ค่าขนส่ง	21.28
ค่าดำเนินการ	25.87
เบ็ดเตล็ด	25.87
รวม(บาท/ต้น)	569.20

4.2.6.1 อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ

การคำนวณอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ จะเป็นการคำนวณอัตราค่าเสียหายในกรณีของระบบส่ง 69 kV ที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และที่มีการติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า เปรียบเทียบกัน เพื่อหาจุดคุ้มทุนของการลงทุนติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุนที่จะคืนทุนในระยะเวลาเท่าใด ซึ่งในกรณีนี้เราจะพิจารณากรณีที่ระบบมีความต้านทานอิมพีลล์ 5 โอห์ม ซึ่งถือเป็นความต้านทานอิมพีลล์มาตรฐานที่น้อยที่สุดที่ควรพิจารณา

ตารางที่ 4.38 อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ กรณีไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา รูปคลื่น 0.25/100 μ s

ปีที่	อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (บาท)	
	กรณีไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า	กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า
1	15,686,298.37	16,318,272.54
2	31,372,596.73	31,924,475.89
3	47,058,895.1	47,530,679.23
4	62,745,193.47	63,136,882.58
5	78,431,491.84	78,743,085.92
6	94,117,790.2	94,349,289.27
7	109,804,088.6	109,955,492.6
8	125,490,386.9	125,561,696
9	141,176,685.3	141,167,899.3
10	156,862,983.7	156,774,102.6

4.2.6.2 วิเคราะห์อัตราค่าเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ

จากการคำนวณอัตราค่าเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ ระยะเวลา 10 ปี ของกรณีไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า พบว่ากรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะเวลาผ่านไป 10 ปี ค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับมีค่าที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดตั้งเสาไฟฟ้า ซึ่งเมื่อย้อนกลับไปพิจารณา ปีต่อปีจะเห็นว่า ในปีที่ 9 ค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของกรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า มีความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าสะสมรวม 9 ปีที่น้อยกว่าในกรณีไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า ในระยะ 9 ปี หลังจากติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า จะทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้ามูลค่าลดลงตามลำดับต่อเนื่องไปจากปีที่ 9 ของการติดตั้ง