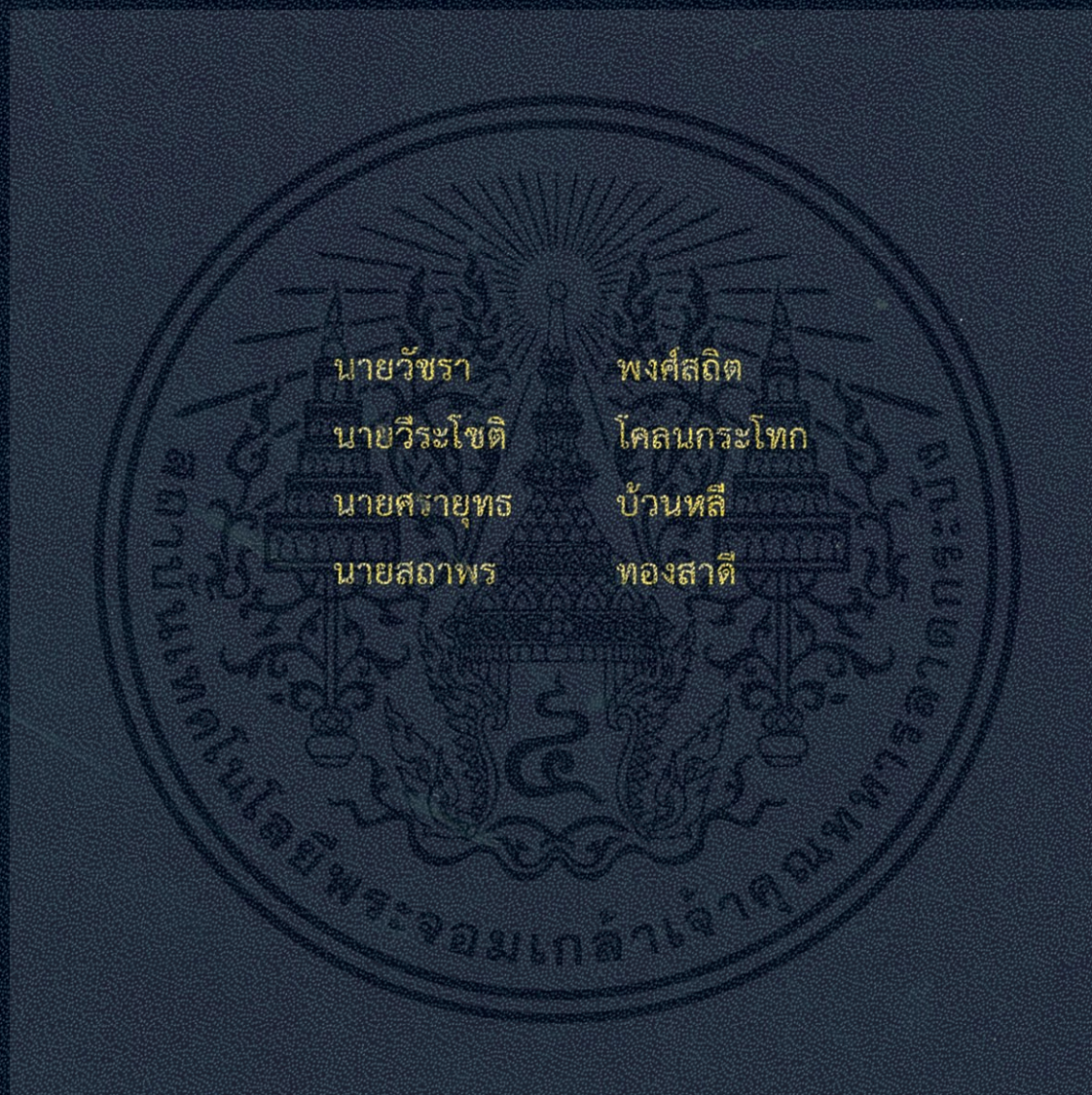


การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 5 kA

THE DEVELOPMENT OF A LONG DURATION IMPULSE CURRENT
GENERATOR FOR TESTING 5 kA ARRESTER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 5 kA

THE DEVELOPMENT OF A LONG DURATION IMPULSE CURRENT
GENERATOR FOR TESTING 5 kA ARRESTER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DEVELOPMENT OF A LONG DURATION IMPULSE CURRENT
GENERATOR FOR TESTING 5 kA ARRESTER



A PAPER SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2555

การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า
พิกัดกระแส 5 kA

THE DEVELOPMENT OF A LONG DURATION IMPULSE CURRENT GENERATOR
FOR TESTING 5 kA ARRESTER



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท
รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า

พิกัดกระแส 5 kA

ผู้จัดทำ

นายวิชา	พงศ์สถิต	รหัส 52011090
นายวีระโชติ	โคลนกระโทก	รหัส 52011155
นายศรายุทธ	บัวนหลิ	รหัส 52011173
นายสถาพร	ทองสาดี	รหัส 52011234




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.พีรุดมิ ยุทธโกวิท)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

นายวัชร	พงศ์สถิต	
นายวีระโชติ	โคลนกระโทก	
นายศรายุทธ	บ้านหลี่	
นายสถาพร	ทองสาดี	
ดร.พีรวิมล	ยุทธโกวิท	อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2555		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA โดยปรับปรุงจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า ใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาค้นคว้า พัฒนา และวิเคราะห์ศักยภาพของกับดักฟ้าผ่า โดยมีรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงยาวเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60099 4 [1] กำหนดทั้งในช่วงเวลา 10 % ช่วงเวลา 90 % และค่ายอดของกระแสไฟฟ้า ในส่วนของเทคนิคและสมการในการคำนวณหาค่าองค์ประกอบความเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์และความต้านทานของวงจรกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว ได้นำเสนออย่างมีลำดับขั้นตอน ความสัมพันธ์ของสมการต่างๆจะเป็นตัวแปรในการกำหนดค่าองค์ประกอบของวงจร ก่อนจะประกอบสร้างและใช้งานจริง ได้ทำการจำลองการทำงานของวงจรเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว โดยโปรแกรม ATP/EMTP

จากการทดสอบใช้งานเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว พบว่าเครื่องกำเนิดสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าช่วงยาวสำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA ได้และเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60099 4 ได้กำหนดไว้

THE DEVELOPMENT OF A LONG DURATION IMPULSE CURRENT GENERATOR FOR TESTING 5 kA ARRESTER

Watchara	Pongsathit	
Wirachot	Khlonkrathok	
Sarayut	Buanlee	
Sataporn	Thongsadee	
Dr. Peerawut	Yutthagowith	Supervisor
Assoc.Porf. Siriwat	Potivejkul	Supervisor
Year 2012		

ABSTRACT

This thesis presents a development of a long duration impulse current generator for testing 5 kA arrester. A long duration impulse current generator improvement of an impulse voltage generator in high voltage engineering laboratory, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang . To created the long duration impulse current for testing surge arrester, In order to make a research and development, performance analysis for surge arrester. The long duration impulse current waveforms have met the requirements in the accordance with IEC 60099 – 4 [1] including 10% duration, 90% duration and peak value. Techniques and equations which be use to determine the inductance, capacitance and matching resistance of the constructed impulse current generator are presented in orders. The relation of equation is an importance variable for circuit component determination. ATP DRAW was use to simulate the waveform of the long duration impulse current generator circuit prior construction.

The long duration impulse current generator was used to generate the impulse current for testing on 5 kA arrester. The waveform characteristics were satisfied to IEC 60099 – 4.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.พีรภูมิ ยุทธโกวิท และ รศ.ศิริวิทย์ โปธิเวชกุล ที่ได้คอยดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดและกรุณาให้คำแนะนำตลอดจนให้ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์แก่การศึกษาและค้นหาข้อมูลเพื่อจัดทำโครงการ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณปณยวีร์ ฉายศิริ และพี่ๆ ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ได้ให้ความรู้และแนะนำการใช้งานอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงช่วยเหลือในการออกแบบการทดสอบ และแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับผลการทดสอบที่ได้ จนโครงการสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณชาติอริยะ ประเสริฐสังข์ ที่คอยช่วยให้คำแนะนำในการออกแบบและปรับปรุงโครงการนี้มาโดยตลอดจนสำเร็จด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยเหลือในทุกๆด้านจนกระทั่งโครงการสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงที่ให้การสนับสนุนด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมทั้งกำลังใจที่ดีจากเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่มีให้มาโดยตลอด จนการทำโครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 หลักการสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	3
2.1 สาเหตุการเกิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	3
2.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ	3
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง	6
3.1 เงื่อนไขในการออกแบบสร้างและข้อกำหนด	6
3.2 การออกแบบองค์ประกอบความเหนียวนำ	6
3.3 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเหนียวนำ	8
3.4 การออกแบบองค์ประกอบความเหนียวนำด้วยโปรแกรม ATP/EMTP	9
3.4.1 วงจรทั่วไปที่ใช้ในการจำลอง	9
3.4.2 จำลองการปรับค่าความเหนียวนำ กรณีไม่คิดผลของ ความต้านทานแฝงภายในตัวเหนียวนำ	10
3.4.2.1 จำลองปรับค่าความเหนียวนำ L_{10}	10
3.4.2.2 จำลองปรับค่าความเหนียวนำ L_1	11
3.4.2.3 ผลการจำลองปรับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ กรณีไม่คิดผลของความต้านทานแฝง ภายในตัวเหนียวนำ	11
3.4.3 จำลองรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว กรณีคิดรวมผล ของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนียวนำ	12
3.4.4 ผลการปรับค่าความเหนียวนำ ของวงจร กำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5 การออกแบบและประกอบสร้างความต้านทานแม่เหล็ก	15
3.6 การออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	16
3.7 การประกอบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	18
3.7.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์	18
3.7.2 การติดตั้งชุดหม้อแปลงอัดประจุ	19
3.7.3 การติดตั้งองค์ประกอบความเหนี่ยวนำ ($L_1 - L_8$)	21
3.7.4 การติดตั้งตัวเหนี่ยวนำ L_{10} ความต้านทานแม่เหล็ก และอุปกรณ์ทดสอบ	23
3.7.5 การติดตั้งช่องว่างทรงกลมของเครื่องกำเนิด กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	25
3.7.5 เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่ประกอบสร้างตามวงจรสมมูล	26
บทที่ 4 การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	27
4.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจร	27
4.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว เมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าฟักัดกระแส 5 kA	31
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผล	35
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	38
- ภาคผนวก ก การจัดแบ่งกลุ่มของกั๊บดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ	39
- ภาคผนวก ข ช่องว่างทรงกลม	42
- ภาคผนวก ค ตารางลวดทองแดงขนาดมาตรฐาน	47
- ภาคผนวก ง ตารางลวดนิโครมขนาดมาตรฐาน	50
- ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการ	53
ประวัติผู้เขียน	58

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ปริมาณและช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่เกิดจากฟ้าผ่าซ้ำ	3
2.2	แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มการทดสอบความทนได้ ต่อกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	4
2.3	วงจรถูกกำหนดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099 4	4
2.4	ลักษณะกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099 4	5
3.1	ตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 mH	8
3.2	วงจรถูกกำหนดกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ	9
3.3	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อ องค์ประกอบความเหนี่ยวนำทุกตัวมีค่า 8 mH	9
3.4	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อทดลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_{10}	10
3.5	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อทดลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_{10}	11
3.6	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า 5 kA	12
3.7	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการจำลอง กรณีคิดผลของความต้านทานแฝง	13
3.8	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ที่ปรับปรุงรูปคลื่นให้ได้ ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน	14
3.9	ภาพตัดขวางของการพันความต้านทานแมทซิ่ง	15
3.10	ความต้านทานแมทซิ่งที่ออกแบบสร้างขนาด 42 Ω	15
3.11	วงจรถูกจำลองของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พิกัด 1200 kV 22.5 kJ	16
3.12	วงจรถูกจำลองของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	17
3.13	ตัวเก็บประจุอิมพัลส์	18
3.14	การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์	18
3.15	ชุดหม้อแปลงอัดประจุ	19
3.16	จุดต่อกราวด์ตัวถังชุดอัดประจุ	20
3.17	จุดต่อสายเคเบิลออกจากชุดอัดประจุ	20
3.18	ความเหนี่ยวนำ L_1 ขนาด 1.0 mH	21
3.19	ความเหนี่ยวนำ L_2 ขนาด 1.2 mH	21
3.20	ความเหนี่ยวนำ L_3 L_6 ขนาด 6.5 mH	21
3.21	ความเหนี่ยวนำ L_7 L_9 ขนาด 7.8 mH	22
3.22	การติดตั้งความเหนี่ยวนำ L_1 L_9	22
3.23	ตัวเหนี่ยวนำ L_{10} ขนาด 13 mH	23
3.24	กับดักฟ้าผ่า พิกัด 5 kA	23

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.25	ความต้านทานแม่ทซิ่ง ขนาด 42 Ω	23
3.26	การติดตั้งความเหนียวนำ L_{10}	24
3.27	ลักษณะการติดตั้งความต้านทานแม่ทซิ่งและArrester 5 kA	25
3.28	ช่องว่างทรงกลมขนาด 12.5 เซนติเมตร	25
3.29	เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA	26
4.1	วงจรทดสอบกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจร	27
4.2	รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 20 kV	27
4.3	รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 30 kV	28
4.4	รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 40 kV	28
4.5	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่แรงดันอัดประจุ 50 kV ในการทดสอบกรณีลัดวงจร	29
4.6	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจรที่ระดับ แรงดัน 20 kV, 30 kV, 40 kV, และ 50 kV	29
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันอัดประจุกับ กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบขณะลัดวงจร	30
4.8	วงจรการทดสอบกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อ กับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA	31
4.9	รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 50 kV	31
4.10	รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 60 kV	32
4.11	รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 70 kV	32
4.12	รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA	33
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับกระแส อิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA	34
4.14	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับ กระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจรและต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA	34
5.1	วงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA	35
ข.1	รูปการติดตั้ง Sphere gap ในแนวตั้ง	44
ข.2	รูปการติดตั้ง Sphere gap ในแนวนอน	44
ข.3	รูปวงจรแบ่งเทียบ Sphere gap	45
ข.4	กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง V_H และ V_L	46

สารบัญดาราราง

ดารารางที่		หน้า
1.1	การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปริญญาานิพนธ์	2
2.1	ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแส อิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4	5
3.1	ข้อกำหนดเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ตามมาตรฐาน IEC 60099 4	6
3.2	พารามิเตอร์จากการคำนวณ ในวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	9
3.3	พารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จำลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_{10}	10
3.4	พารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จำลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_1	11
3.5	พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว กรณีไม่คิดผลของความต้านทานแฝง	12
3.6	พารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว กรณีคิดผลของความต้านทานแฝง	13
3.7	พารามิเตอร์สำหรับการประกอบสร้างวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว	14
4.1	พารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีลัดวงจร	29
4.2	ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ในกรณีต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA	33
5.1	พารามิเตอร์ของวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA	35
5.2	ค่าคุณลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA	36
ก.1	การจัดแบ่งกลุ่มของกับดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ	40
ค.1	ตารางลวดทองแดงขนาดมาตรฐาน	48
ง.1	ตารางลวดนิโครมขนาดมาตรฐาน	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้สายส่งแบบชิงในอากาศ ซึ่งอาศัยอากาศเป็นฉนวนหลักเนื่องจากมีต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ อุปกรณ์ต่างๆในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กลางแจ้งจึงมีโอกาสได้รับแรงดันเกินเสิร์จและกระแสฟ้าผ่า จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบส่งจ่าย ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (Lighting arrester) เพื่อทำหน้าที่กำจัดแรงดันเกินเสิร์จ และกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็ว เพื่อป้องกันความเสียหายกับตัวกับดักเสิร์จเอง และเพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่า กับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าสามารถทำงานป้องกันอุปกรณ์ได้ มาตรฐาน IEC 60099-4 จึงกำหนดให้มีการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกับดักเสิร์จ ซึ่งแบ่งได้เป็นการทดสอบรับรองแบบ (Design test or type test) การทดสอบประจำ (Routine test) และการทดสอบเพื่อการตรวจรับ (Acceptance test)

เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จัดเป็นอุปกรณ์ทดสอบที่สำคัญรายการหนึ่งในการทดสอบกับดักฟ้าผ่า ในหัวข้อการทดสอบความทนได้ต่อกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ซึ่งจัดเป็นการทดสอบย่อยรายการหนึ่งที่สำคัญมากของการทดสอบรับรองแบบ นอกจากนี้การใช้งานกับดักฟ้าผ่าที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน และการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวภายในประเทศไทยยังไม่มี จึงเป็นเหตุจูงใจให้เกิดการพัฒนาออกแบบตัวเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของกับดักฟ้าผ่าที่ผลิตภายในประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว
3. เพื่อส่งเสริมให้เกิดวิจัย และพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
4. เพื่อรองรับการบริการด้านการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาคุณลักษณะของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA
3. ศึกษาทฤษฎีและหลักการใช้งานโปรแกรม ATP/EMTP ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว
4. ออกแบบและพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4

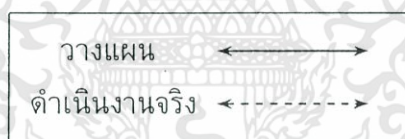
5. ทำการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ด้วยเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการทำปริญญาโท

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2555								
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กระแสिमพัลส์ช่วงยาว	←→	←-----→							
2. ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการ ทดสอบกระแสिमพัลส์ช่วงยาว		←→	←-----→						
3. ทำการจำลองเพื่อดูลักษณะรูปคลื่น กระแสिमพัลส์ช่วงยาวให้ได้ตาม มาตรฐานด้วยโปรแกรม ATP Draw			←-----→	←-----→					
4. ทำการออกแบบและปรับปรุงเครื่อง กำเนิดกระแสिमพัลส์ช่วงยาว				←-----→	←-----→	←-----→			
5. ทำการทดสอบการทำงานเครื่อง กำเนิดกระแสिमพัลส์ช่วงยาว						←-----→	←-----→	←-----→	
6. สรุปลผลการทดสอบและจัดทำ ปริญญาโทฉบับสมบูรณ์							←-----→	←-----→	←-----→



1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

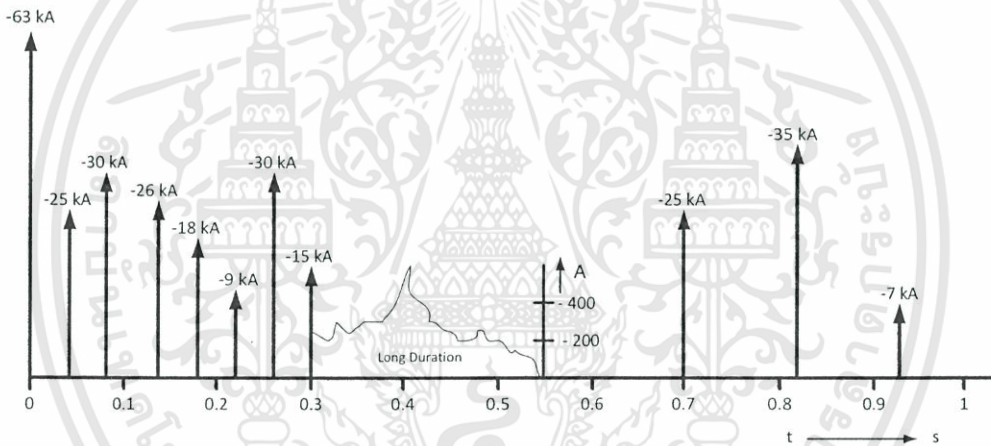
การออกแบบและประกอบสร้าง เครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์ช่วงยาวในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการทดสอบความทนได้กระแสिमพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4 สำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ได้ นอกจากนี้ ความรู้ที่ได้จากการวิจัย สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสिमพัลส์ช่วงยาว และใช้ในการพัฒนากับดักฟ้าผ่าที่ผลิตในประเทศไทยต่อไป

บทที่ 2

หลักการสร้างกระแสไอพัสช่วงยาว

2.1 สาเหตุการเกิดกระแสไอพัสช่วงยาว

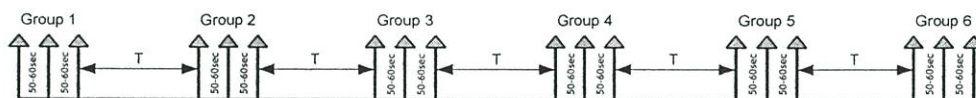
จากผลงานการวิจัยของ [Berger] พบว่าความเครียดที่เกิดจากแรงดันเกินเสิร์จบนกับดักฟ้าผ่า เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสไอพัสช่วงยาว นอกจากนี้ในงานการวิจัยยังแสดงให้เห็นถึงปริมาณและช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่เกิดจากฟ้าผ่าซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่าง กระแสไอพัสช่วงยาว กับกระแสไอพัสรูปแบบอื่น เช่น กระแสไอพัสสวิตชิง หรือ กระแสไอพัสฟ้าผ่า โดยจะเห็นได้ว่ากระแสไอพัสช่วงยาวจะให้ปริมาณพลังงานสูงกว่ากระแสไอพัสรูปแบบอื่นอยู่มาก ความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถทำให้กับดักฟ้าผ่าเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการทดสอบความทนได้กระแสไอพัสช่วงยาวจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ก่อนการนำกับดักฟ้าผ่ามาใช้ในงานในระบบ



รูปที่ 2.1 ปริมาณและช่วงเวลาของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ที่เกิดจากฟ้าผ่าซ้ำ

2.2 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

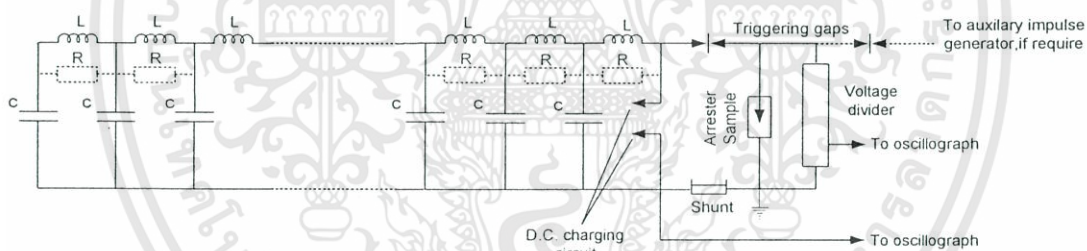
มาตรฐาน [IEC 60099-4] ได้กำหนดเงื่อนไขเกี่ยวกับการทดสอบความทนได้ต่อกระแสไอพัสช่วงยาวไว้ว่าการทดสอบกระแสไอพัสช่วงยาวบนกับดักฟ้าผ่า วัสดุที่ใช้ในการทดสอบหรือกับดักฟ้าผ่าจะต้องมีพิคัดแรงดันไม่น้อยกว่า 3 kV นอกจากนี้ในการทดสอบ กับดักฟ้าผ่าต้องมีความสมบูรณ์และก่อนที่จะทำการทดสอบกับดักฟ้าผ่า ต้องทำการวัดค่าแรงดันคงค้างที่สภาวะปกติก่อนเพื่อที่จะได้ใช้เป็นข้อมูลในการประเมินผลเปรียบเทียบต่อไป โดยการทดสอบ จะทำการจ่ายกระแสไอพัสฟ้าผ่าให้แก่วัสดุทดสอบ หรือกับดักฟ้าผ่าเป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง โดยแบ่งเป็นหกกลุ่ม กลุ่มละสามครั้งระยะห่างของช่วงเวลาในการจ่ายกระแสไอพัสแต่ละครั้งห่างกัน 50 ถึง 60 วินาที และระยะห่างของช่วงเวลาระหว่างกลุ่มการทดสอบ จะพิจารณาจากอุณหภูมิของวัสดุทดสอบ (T) หากวัสดุทดสอบมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมก็สามารถทำการทดสอบกลุ่มต่อไปได้ทันที ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพแสดงการแบ่งกลุ่มการทดสอบความทนได้ต่อกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

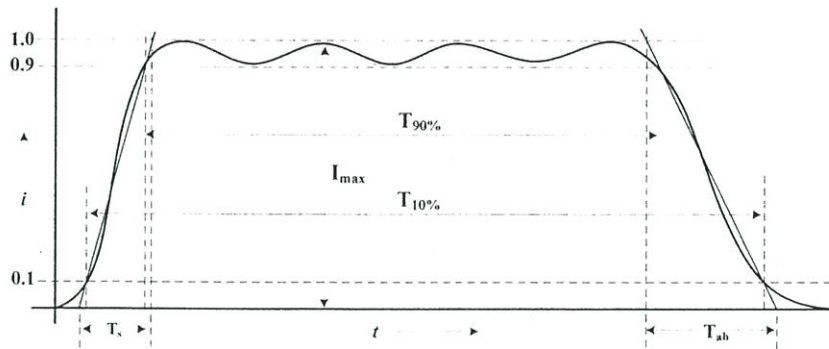
หลังจากทำการทดสอบครบทั้งหกกลุ่ม เมื่ออุณหภูมิของวัสดุทดสอบเย็นตัวลงจนมีค่าเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม ขั้นตอนต่อไปคือการวัดค่าแรงดันคงค้าง ซึ่งค่าแรงดันคงค้างที่วัดนี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ทำกรวัดก่อนการทดสอบ ซึ่งจะต้องมีความแตกต่างกันไม่เกิน 5 % นอกจากนี้แล้ววัสดุทดสอบจะต้องไม่มีร่องรอยของการเกิด วาบไฟตามผิว เจาะทะลุ รอยแตกร้าวหรือ อาการอย่างหนึ่งอย่างใดที่แสดงให้เห็นว่าวัสดุทดสอบเกิดความเสียหาย

ในการออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว มาตรฐานได้แนะนำวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งปริมาณของค่าพารามิเตอร์ R, L และ C มีส่วนสำคัญทำให้ลักษณะรูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้แก่วัสดุทดสอบ เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้ อย่างไรก็ตามในการออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวควรที่จะออกแบบให้มีจำนวนขั้นน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการประกอบสร้าง



รูปที่ 2.3 วงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4

ลักษณะสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว คือลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ได้กำหนดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าขึ้น โดยพยายามเลียนแบบรูปคลื่นให้ใกล้เคียงมากที่สุดกับที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่า ลักษณะสมบัติของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่พิจารณาประกอบไปด้วย ช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$), ช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) และขนาดค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว (I_{max})



รูปที่ 2.4 ลักษณะกระแสไอพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4

สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA มาตรฐานได้กำหนดค่าคุณลักษณะของรูปคลื่นกระแสไอพัลส์ช่วงยาวที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีข้อกำหนดตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าคุณลักษณะของรูปคลื่นกระแสไอพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน IEC 60099-4

Arrester classification	Peak current	Impulse duration	
	$I_{max}(A)$	$T_{90\%}(ms)$	$T_{10\%}(ms)$
5000 A	75	$1 \leq T_{90\%} \leq 1.2$	$T_{10\%} \leq 1.5T_{90\%}$

จากข้อกำหนดค่าคุณลักษณะของรูปคลื่นกระแสไอพัลส์ช่วงยาว ในตารางที่ 2.1 หมายความว่า ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5000 A ค่ายอดกระแสไอพัลส์ช่วงยาวต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 75 A และช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1 ms แต่ไม่เกิน 1.2 ms โดยช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) จะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5 เท่าหรือ 150% ของช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$)

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

3.1 เงื่อนไขในการออกแบบสร้างและข้อกำหนด

ในปฏิญญาพันธบัตรฉบับนี้ได้ทำการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA ให้ได้ตามมาตรฐาน IEC 60099 4 ซึ่งมีข้อกำหนดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ตามมาตรฐาน IEC 60099 4

Arrester classification	Peak current $I_{max}(A)$	Impulse duration $T_{90\%}(ms)$	Impulse duration $T_{10\%}(ms)$
5000 A	75	$1 \leq T_{90\%} \leq 1.2$	$T_{10\%} \leq 1.5 T_{90\%}$

จากตารางที่ 3.1 การทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kV นั้นต้องออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่มีค่ากระแสสูงสุด (I_{max}) 75 A และเมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่สร้างได้แล้ว ต้องมีค่าช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) อยู่ระหว่าง 1 ms ถึง 1.2 ms และค่าช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) น้อยกว่า 1.5 เท่าของค่าช่วงเวลา 90% จึงจะสามารถใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA ได้

สำหรับการสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเพื่อทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA นี้ จะทำการออกแบบสร้างโดยใช้โครงสร้างและตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีอยู่เดิม ดังนั้นเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA ใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์พิกัด 0.5 μ F พิกัดแรงดัน 75 kV จำนวน 10 ชุด

3.2 การออกแบบองค์ประกอบความเหนี่ยวนำ

การออกแบบองค์ประกอบความเหนี่ยวนำของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวสามารถคำนวณได้จาก ค่าช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) ของกระแสสูงสุดดังสมการที่ 3.1

$$T_{90\%} = 2 \times \frac{n-1}{n} \times \sqrt{LC} \quad (3.1)$$

- เมื่อ
- L คือ ค่าความเหนี่ยวนำรวมของวงจรในหน่วยเฮนรี (H)
 - C คือ ค่าความจุไฟฟ้ารวมของวงจรในหน่วยฟารัด (F)
 - n คือ จำนวนองค์ประกอบ LC ในวงจร

จากสมการที่ 3.1 แทนค่าในสมการหาค่าความเหนี่ยวนำรวมในวงจรโดยให้ $T_{90\%} = 1.13$ ms จำนวนองค์ประกอบ LC เท่ากับ 10 ชั้น ($n = 10$) และความจุไฟฟ้ารวมของวงจรเท่ากับ 50 μ F ได้ดังสมการ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{\left[\frac{T_{90\%} \times n}{2(n-1)} \right]^2}{C} \quad (3.4)$$

จากสมการ 3.4 ได้ความเหนี่ยวนำรวมในวงจรเท่ากับ 78.8 mH และเพื่อความสะดวกในการออกแบบสร้างจะประมาณให้อุปกรณ์ประกอบความเหนี่ยวนำในแต่ละชั้นมีค่าประมาณ 8 mH

การหาค่ากระแสอิมพัลส์สูงสุด (I_{max}) และค่าความต้านทานเมทซิ่งของวงจรได้สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.2 3.3

$$I_{max} = V_{ch} / (2R_m) \quad (3.2)$$

$$R_m = \sqrt{L / C} \quad (3.3)$$

เมื่อ V_{ch} คือ ค่าแรงดันอัดประจุในหน่วยโวลต์ (V)
 R_m คือ ค่าความต้านทานเมทซิ่งในหน่วยโอห์ม (Ω)

จากสมการที่ 3.3 จะสามารถคำนวณหาความต้านทานเมทซิ่ง R_m ได้ดังนี้

$$R_m = \sqrt{78.8 \times 10^{-3} \text{H} / 5 \times 10^{-6} \text{F}} \quad \text{ได้} \quad R_m = 125 \Omega$$

ดังนั้นเมื่อให้แรงดันอัดประจุ (V_{ch}) กับวงสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเท่ากับพิกัดของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ คือ 75 kV จะได้กระแสสูงสุด (I_{max}) ตามสมการที่ 3.2

$$I_{max} = 75000 \text{ V} / (2 \times 125 \Omega) \quad \text{ได้} \quad I_{max} = 300 \text{ A}$$

3.3 การออกแบบและประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำ

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่จะประกอบเข้ากับตัวเก็บประจุอิมพัลส์เพื่อสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA นั้นสามารถทำได้โดย การพันขดลวดทองแดงเคลือบฉนวน บนท่อ PVC โดยใช้อากาศเป็นแกน สามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.5

$$L = \frac{2.5 \times 10^{-4} N^2 D^2}{(228D/2) + 254l} \quad (3.5)$$

เมื่อ	D	คือ ค่าความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดในหน่วยมิลลิเมตร
	N	คือ จำนวนรอบของขดลวด
	l	คือ ความยาวของท่อ PVC ที่มีขดลวดพันอยู่ในหน่วยมิลลิเมตร

ในการสร้างตัวเหนี่ยวนำในวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวนี้จะใช้ลวดทองแดง SWG เบอร์ 21 ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.812 mm และใช้ท่อ PVC ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ได้ค่าความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางขดลวด 115 mm ใช้เส้นลวดทองแดงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.813 mm ซึ่งจำนวนรอบจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด จะได้ความสัมพันธ์ $l = 0.812 N$

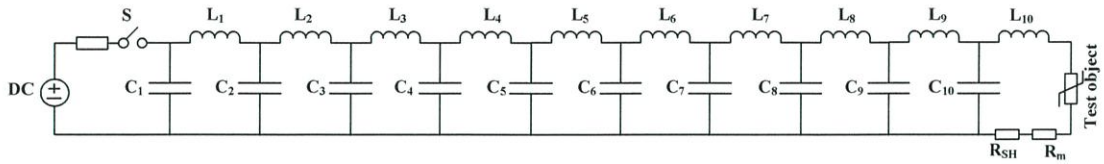
จากการคำนวณหาจำนวนรอบของการพันขดลวดได้ประมาณ 550 รอบ ความยาวของท่อ PVC ที่มีทองแดงพันอยู่มีความยาว 440 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวดเท่ากับ 115 mm ซึ่งจะได้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำ 8 mH ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 mH

3.4 การออกแบบองค์ประกอบความเหนี่ยวนำด้วยโปรแกรม ATP/EMTP

3.4.1 วงจรทั่วไปที่ใช้ในการจำลอง



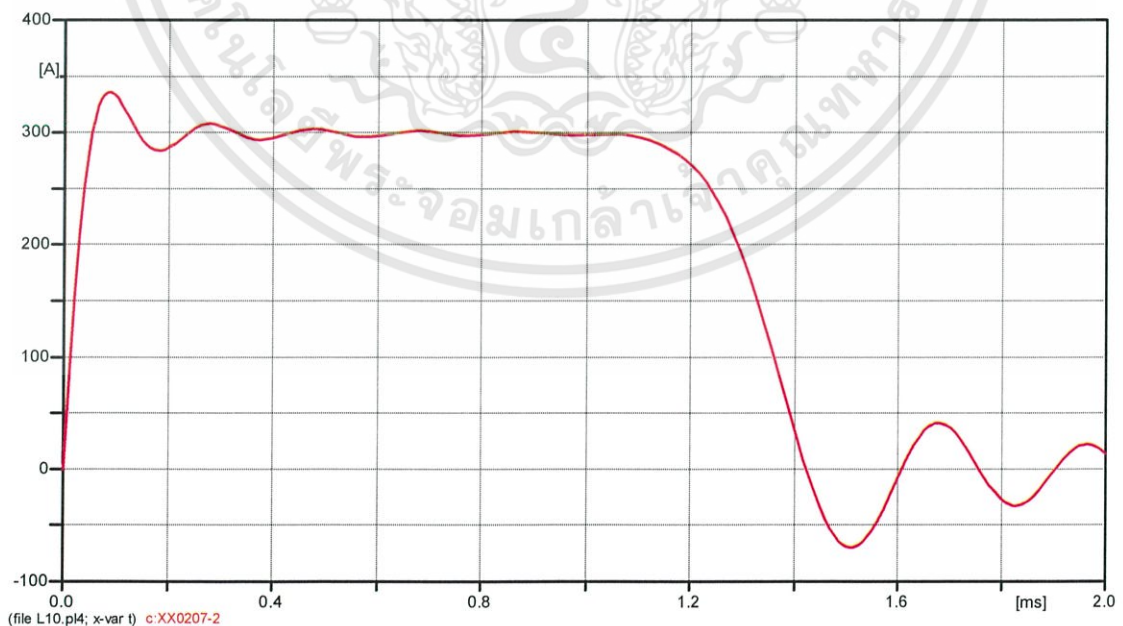
รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ

ขั้นแรกของการจำลอง ให้ค่าความเหนี่ยวนำในวงจรมีค่าตามหัวข้อ 3.2 คือความเหนี่ยวนำแต่ละตัวมีค่า 8 mH และพารามิเตอร์อื่นๆดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์จากการคำนวณ ในวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

L ₁ (mH)	L ₂ (mH)	L ₃ (mH)	L ₄ (mH)	L ₅ (mH)	L ₆ (mH)	L ₇ (mH)	L ₈ (mH)	L ₉ (mH)	L ₁₀ (mH)	C (μF)	R _m (Ω)
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	0.5	125

จากรูปที่ 3.2 เมื่อจำลองให้ค่าแรงดันอัดประจุ (V_{ch}) มีค่า 75 kV อัดประจุให้กับตัวเก็บประจุขนาด 0.5 μF โดยให้ความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมาก จนไม่ต้องนำมาคิดในวงจรได้ เมื่อทำการ simulation จะได้รูปคลื่นกระแสดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อองค์ประกอบความเหนี่ยวนำทุกตัวมีค่า 8 mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 เมื่อทำการป้อนแรงดันอัดประจุ 75 kV จะได้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่มีค่ากระแสสูงสุด (I_m) 335.2 A เกิดกระแสฟุ้งพรวดที่หน้าคลื่นและสันคลื่นมีการแกว่งซึ่งทำให้รูปคลื่นไม่ได้ตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4 จึงต้องมีการปรับปรุงค่าองค์ประกอบความเหนียวนำภายในวงจร

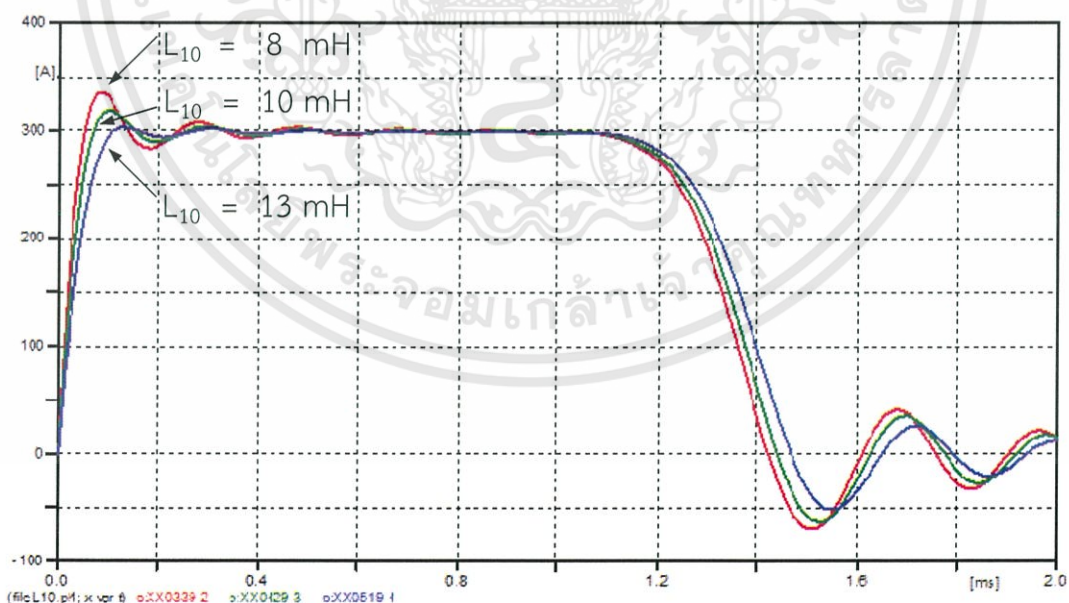
3.4.2 จำลองการปรับค่าความเหนียวนำ กรณีไม่คิดผลของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนียวนำ

3.4.2.1 จำลองปรับค่าความเหนียวนำ L_{10}

ตามผลการวิจัยของ [Modrusan] เมื่อทำการปรับเพิ่มค่าความเหนียวนำ L_{10} จะสามารถลดกระแสฟุ้งพรวดโดยใช้วงจรดังรูปที่ 3.2 ในการจำลองแล้วปรับค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.3 และได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จำลองปรับค่าความเหนียวนำ L_{10}

ครั้งที่	$L_1 - L_9$ (mH)	L_{10} (mH)	R_m (Ω)
1	8	8	125
2	8	10	125
3	8	13	125



รูปที่ 3.4 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อทดลองปรับค่าความเหนียวนำ L_{10}

จากรูปที่ 3.4 พบว่าเมื่อเพิ่มค่า L_{10} จะทำให้กระแสฟุ้งพรวดลดลงและการแกว่งของสันคลื่นลดลง แต่ความยาวของรูปคลื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ $T_{10\%}$ เพิ่มขึ้นด้วย

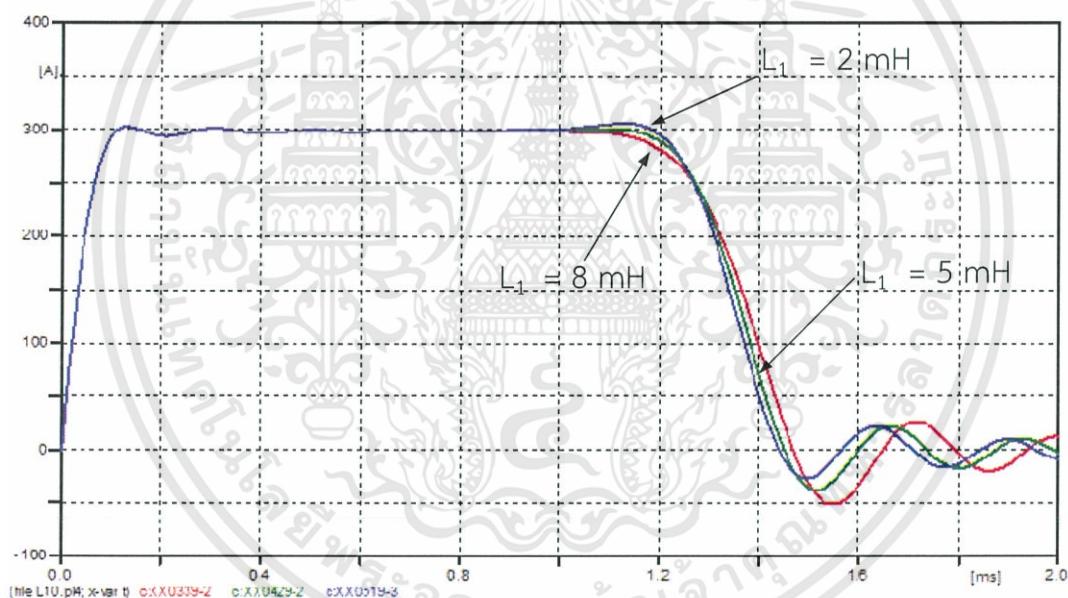
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.2 จำลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_1

เพื่อให้ได้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐาน จำเป็นต้องลดช่วงเวลาหลังคลื่นลง เนื่องจากการปรับค่า L_{10} จะส่งผลให้ความยาวของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จึงต้องปรับค่า L_1 เพื่อให้ $T_{10\%}$ มีค่าลดลง ในการจำลองจะใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.4 ไปแทนในวงจรในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ของวงจรถูกกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว จำลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_1

ครั้งที่	L_1 (mH)	$L_2 - L_9$ (mH)	L_{10} (mH)	R_m (Ω)
1	8	8	13	125
2	5	8	13	125
3	2	8	13	125



รูปที่ 3.5 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงยาวเมื่อทดลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_{10}

จากรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงยาว จากการทดลองปรับค่าความเหนี่ยวนำ L_1 ปรากฏว่าความยาวของรูปคลื่นมีค่าลดลงซึ่งทำให้ช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) ลดลง และทำให้ช่วงท้ายของคลื่นยกตัวสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$)

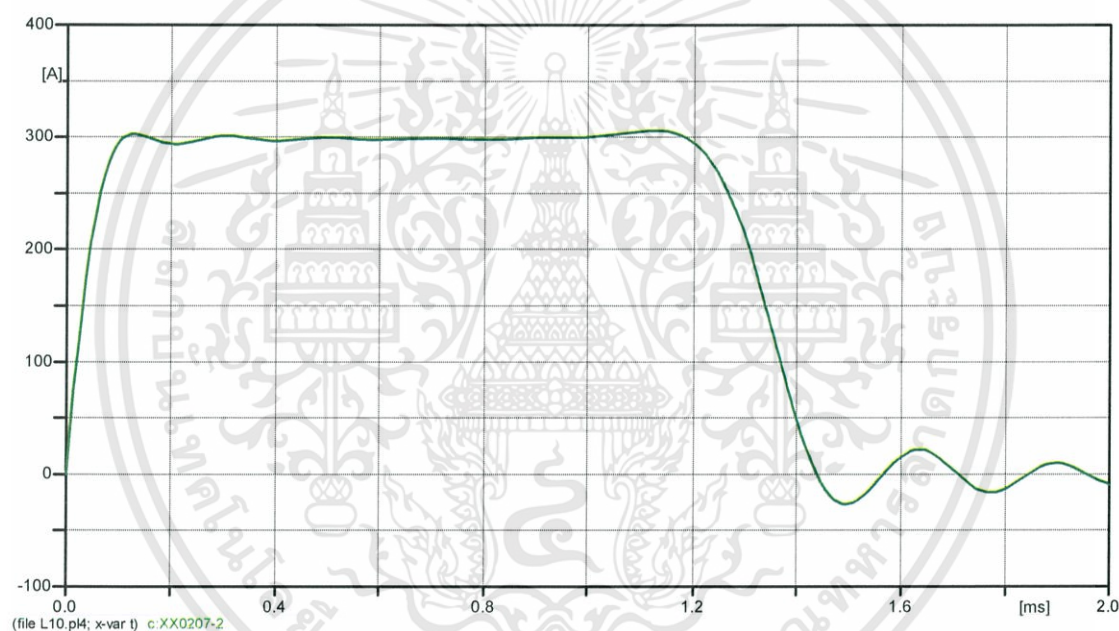
3.4.2.3 ผลการจำลองปรับรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า กรณีไม่คิดผลของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ

จากการจำลองปรับค่าความเหนี่ยวนำของวงจรถูกกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว โดยสมมติให้ความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมาก จนไม่ต้องนำมาคิดในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำลองวงจร จากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 และวิเคราะห์รูปคลื่นที่ได้จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 จะสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวงจรเครื่องกำเนิดกระแสสลับพัลส์ช่วงยาวได้ดังตารางที่ 3.5 และได้รูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ดังรูปที่ 3.6 โดยวงจรนี้ไม่ได้คิดผลของความต้านทานแฝงภายในความเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับเครื่องกำเนิดกระแสสลับพัลส์ช่วงยาว กรณีไม่คิดผลของความต้านทานแฝง

L_1 (mH)	$L_2 - L_9$ (mH)	L_{10} (mH)	C (μ F)	R_m (Ω)
2	8	13	0.5	125



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า 5 kA

จากรูปที่ 3.6 เมื่อเพิ่มความเหนี่ยวนำ L_{10} ให้มีค่า 13 mH และลดค่าความเหนี่ยวนำ L_1 ให้มีค่า 2 mH จะได้รูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ที่มีค่ากระแสสูงสุด (I_{max}) เท่ากับ 305.7 A ลักษณะของรูปคลื่นเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด ได้ค่าช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) เท่ากับ 1.19 ms และค่าช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) เท่ากับ 1.41ms แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ได้นี้เป็นการจำลองโดยไม่คิดผลของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ

3.4.3 จำลองรูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ช่วงยาว กรณีคิดรวมผลของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ

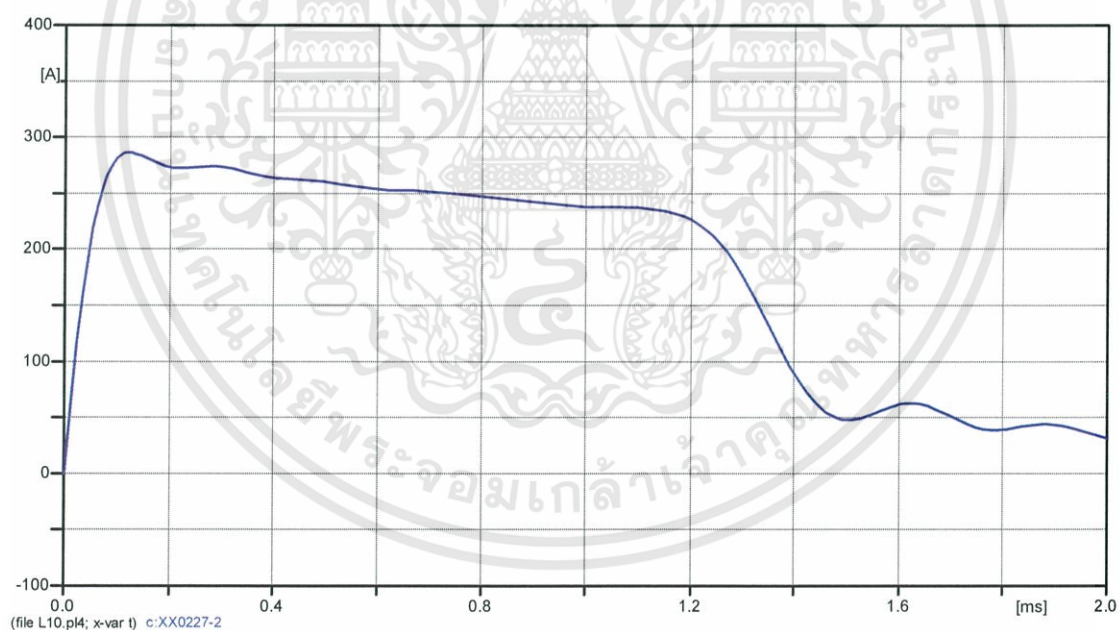
จากหัวข้อที่ 3.2 ได้จำลองวงจรสร้างกระแสสลับพัลส์ช่วงยาว และปรับค่าองค์ประกอบความเหนี่ยวนำจนได้รูปคลื่นที่เหมาะสมแล้ว แต่ยังไม่ได้อธิบายถึงผลที่เกิดขึ้นเมื่อคิดรวมผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบสร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานแฝงนี้สามารถกำหนดค่าที่ควรจะเป็นที่ใช้ในการจำลองได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบสร้างพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำ 8 mH จะสามารถวัดความต้านทานแฝงได้ประมาณ 8 Ω ดังนั้นในการจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวนี้จะใช้ค่าประมาณความต้านทานแฝงคือค่าความต้านทาน 1 Ω ต่อค่าความเหนี่ยวนำ 1 mH ดังนั้น จะสามารถจำลองวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.5 ให้เป็นการจำลองกรณีคิดผลของความต้านทานแฝงดังพารามิเตอร์ในตารางตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว กรณีคิดผลของความต้านทานแฝง

ค่าความเหนี่ยวนำ			ค่าความต้านทาน			C (μ F)	R _m (Ω)
L ₁ (mH)	L ₂ - L ₉ (mH)	L ₁₀ (mH)	R ₁ (Ω)	R ₂ - R ₉ (Ω)	R ₁₀ (Ω)		
2	8	13	2	8	13	0.5	125



รูปที่ 3.7 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการจำลองกรณีคิดผลของความต้านทานแฝง

จากรูปที่ 3.7 เมื่อจำลองโดยคิดผลของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำในวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวปรากฏว่าได้ค่ากระแสสูงสุด (I_{max}) เท่ากับ 285.9 A ทางด้านหน้าคลื่นมีลักษณะปกติเหมือนกันกับผลการจำลองในรูปที่ 3.6 แต่เมื่อพิจารณาคลื่นและช่วงหลังคลื่นพบว่ากระแสอิมพัลส์มีค่าลดต่ำลง จนทำให้รูปคลื่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน จึงต้องมีการจำลององค์ประกอบ

ความต้านทานแฝงใหม่เพื่อให้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงหลังคลื่นยกตัวสูงขึ้นอีก และให้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงยาวเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4

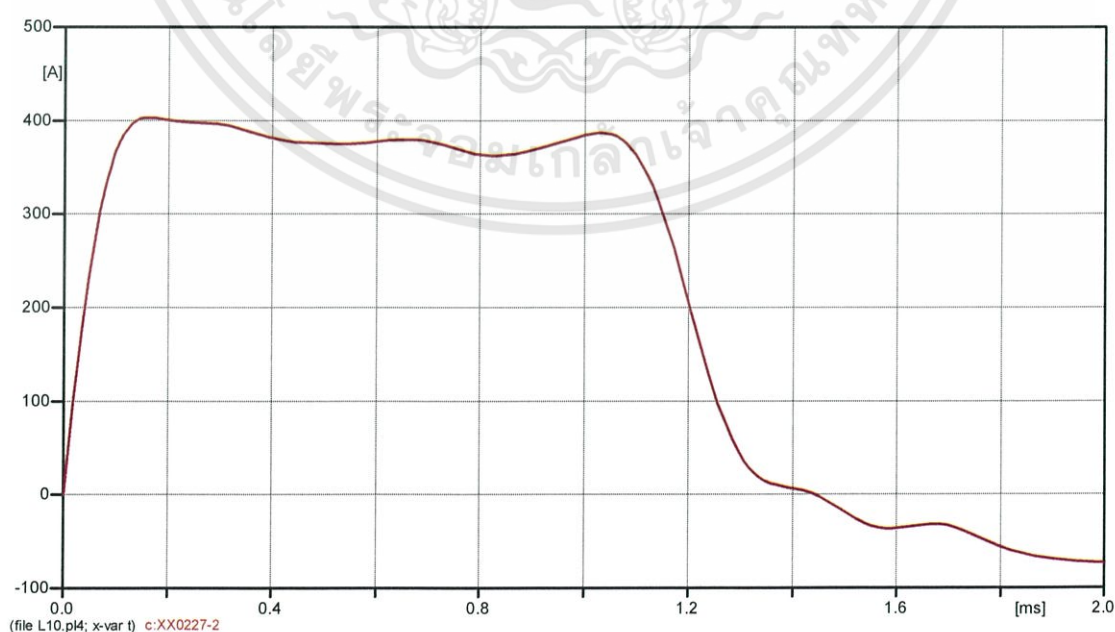
3.4.4 ผลการปรับค่าความเหนี่ยวนำ ของวงจรกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว

จากการจำลองวงจรกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาวที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆส่งผลกระทบต่อรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าอย่างไร จึงได้มีการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง $L_1 - L_{10}$ R_m และคิดผลของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำด้วย โดยใช้โปรแกรม ATP/EMTP เพื่อให้ได้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงยาวที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60099 - 4 ทั้งค่ากระแสสูงสุด (I_{max}) ค่าช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) และค่าช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$)

หลังจากการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ในวงจรกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาวแล้ว ปรากฏว่าได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าช่วงยาวได้จริง โดยค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3.7 และได้รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าดังรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์สำหรับการประกอบสร้างวงจรกำเนิดกระแสไฟฟ้าช่วงยาว

ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)		ค่าความต้านทาน(Ω)	
L_1	1.0	R_1	1.0
L_2	1.2	R_2	1.2
$L_3 - L_6$	6.5	$R_3 - R_6$	6.5
$L_7 - L_9$	7.8	$R_7 - R_9$	7.8
L_{10}	13	R_{10}	13
		R_m	42



รูปที่ 3.8 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าช่วงยาว ที่ปรับปรุงรูปคลื่นให้ได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ช่วงยาวที่ได้นี้ ปรากฏว่าได้ค่ากระแสสูงสุด (I_{max}) เท่ากับ 402.7 A ได้ค่าช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) เท่ากับ 1.00 ms และได้ค่าช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) เท่ากับ 1.29 ms ซึ่งค่าที่ได้ทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน จึงสามารถสร้างองค์ประกอบตัวเหนี่ยวนำและความต้านทานแม่เหล็กตามค่าในตารางที่ 3.7 ได้

3.5 การออกแบบและประกอบสร้างความต้านทานแม่เหล็ก

การสร้างความต้านทานแม่เหล็ก ใช้ลวดนิเกิล - โครเมียม (Ni-Cr) เบอร์ 23 ซึ่งเป็นขดลวดความต้านทานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.725 mm พื้นที่หน้าตัด 0.412 mm² ค่าความต้านทาน 3.25 Ω /m พันใส่ท่อ PVC โดยใช้เอ็นเป็นฉนวนกั้นระหว่างขดลวดความต้านทาน โดยก่อนที่จะพันใส่ PVC นั้นต้องหุ้ม PVC ด้วยไมลาก่อนและเมื่อพันลวดนิเกิล - โครเมียมรอบที่ 1 แล้วจะพันไมลาอีกเพื่อใช้เป็นฉนวนกั้นระหว่างชั้นของขดลวดนิเกิล - โครเมียม โดยการพันนั้นจะพันเป็นเป็นสองชั้น โดยให้แต่ละชั้นต่อกันแบบขนาน และพันสวนทิศทางการพันให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นหักล้างกันเป็นศูนย์ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในหัวข้อ 3.3.3 ได้ค่าความต้านทานแม่เหล็กขนาด 42 Ω จึงสามารถประกอบสร้างได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของการพันความต้านทานแม่เหล็ก

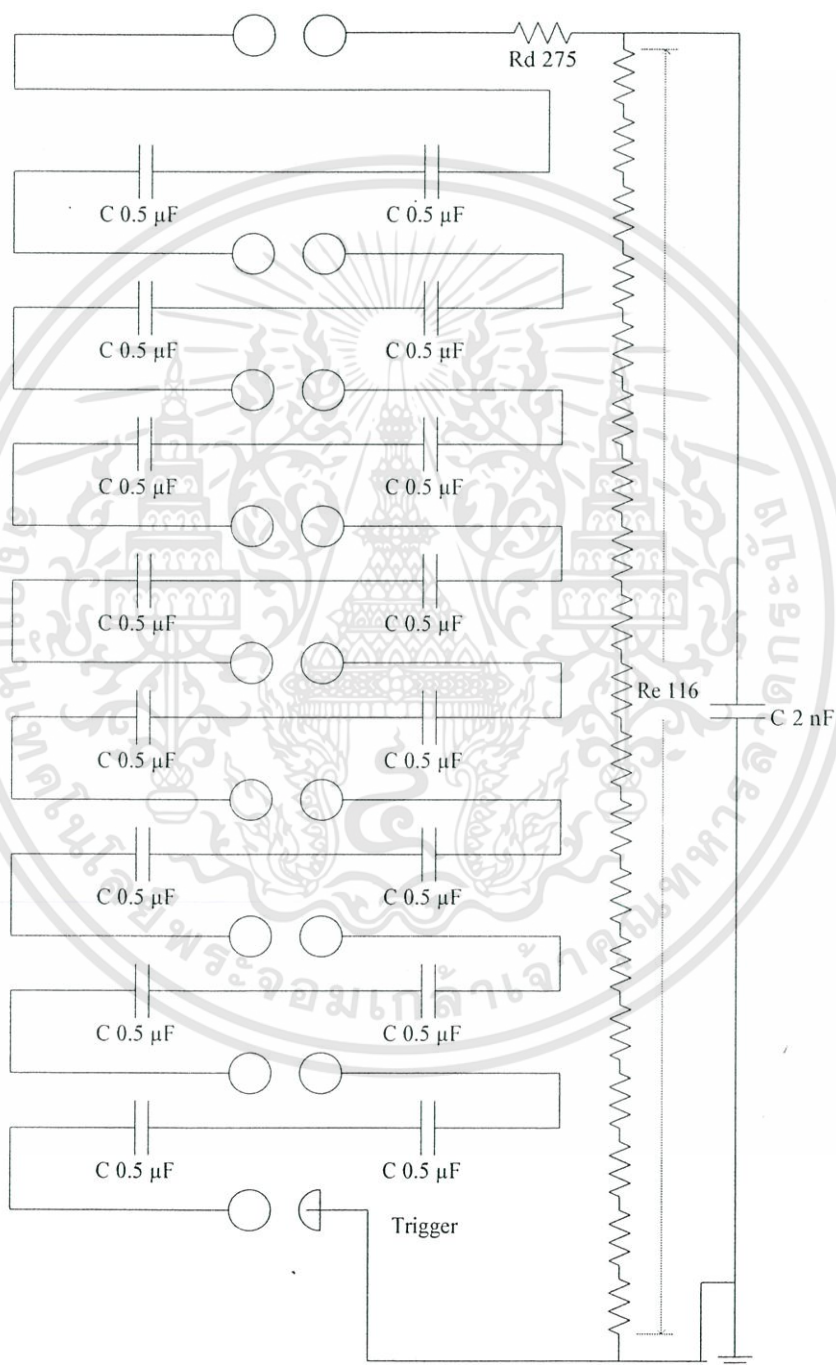


รูปที่ 3.10 ความต้านทานแม่เหล็กที่ออกแบบสร้างขนาด 42 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

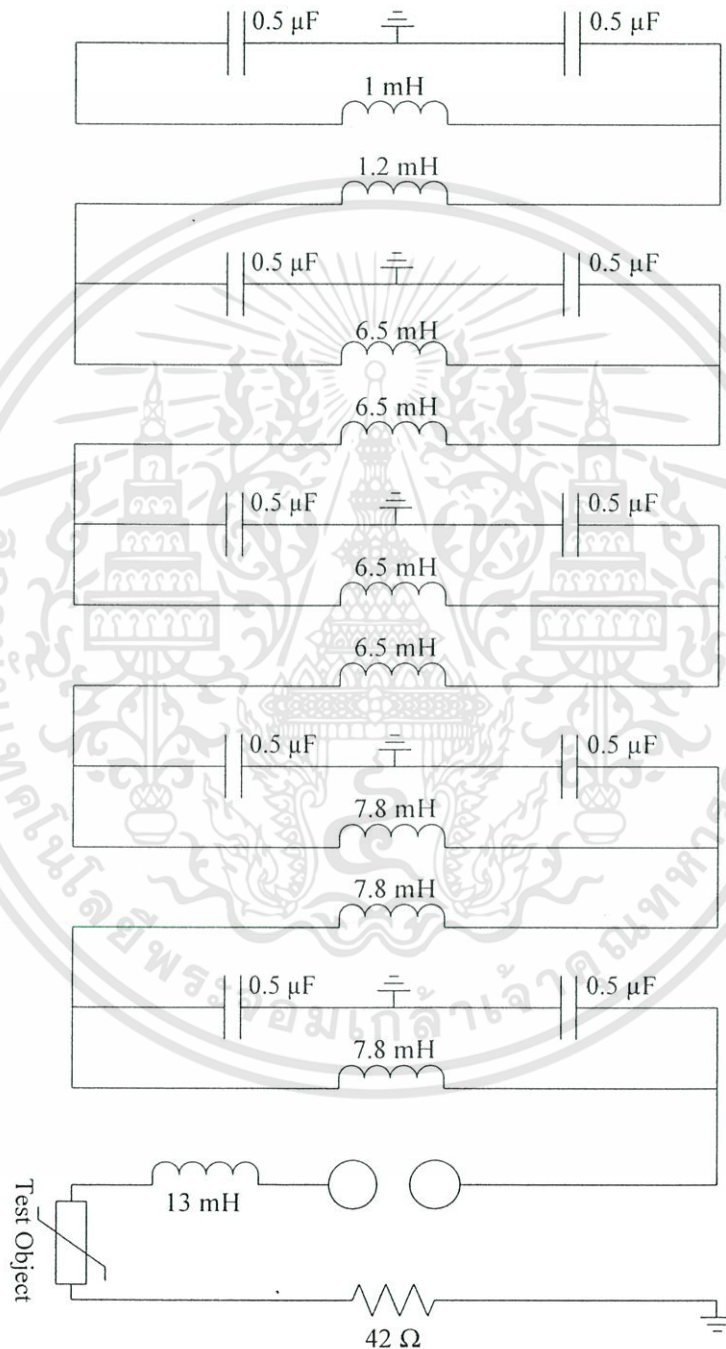
การออกแบบสร้างวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวมีการออกแบบสร้างโดยใช้โครงสร้างและตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ชั้นละ 2 ตัว ซึ่งวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นี้แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พิกัด 1200 kV 22.5 kJ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปรับปรุงแก้ไขวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1200 kV 22.5 kJ ให้สามารถสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวได้ จะใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทั้งหมด 10 ตัว แบ่งเป็น 5 ชั้นประกอบเข้ากับองค์ประกอบความเหนียวและความต้านทานแม่เหล็กที่ได้ทำการออกแบบไว้แล้ว ซึ่งวงจรสมมูลของวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การประกอบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวถูกประกอบสร้างเพื่อให้สามารถสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ตามมาตรฐานของ IEC 60099 – 4 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

3.7.1 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์

ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ในวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จะใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 10 ตัวติดตั้งเป็น 5 ชั้น ชั้นละ 2 ตัว



รูปที่ 3.13 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์



รูปที่ 3.14 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์

ผลิตโดย	SHIZUKI ELECTRIC COMPANY INC.
ชนิด	น้ำมัน
ความจุ	0.5 $\mu\text{F} \pm 10\%$
แรงดันใช้งาน	75 KVDC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การติดตั้งชุดหม้อแปลงอัดประจุ



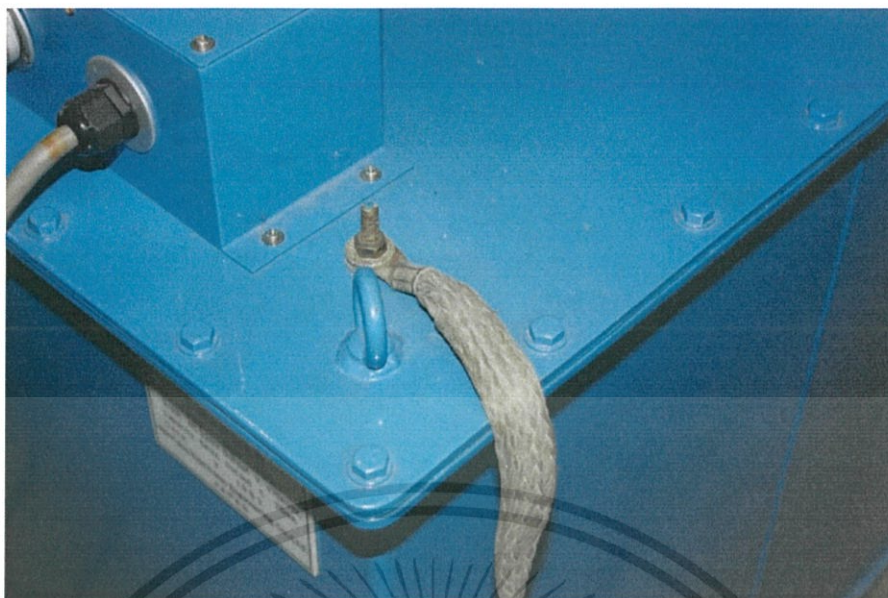
ก) ด้านหน้า

ข) ด้านหลัง

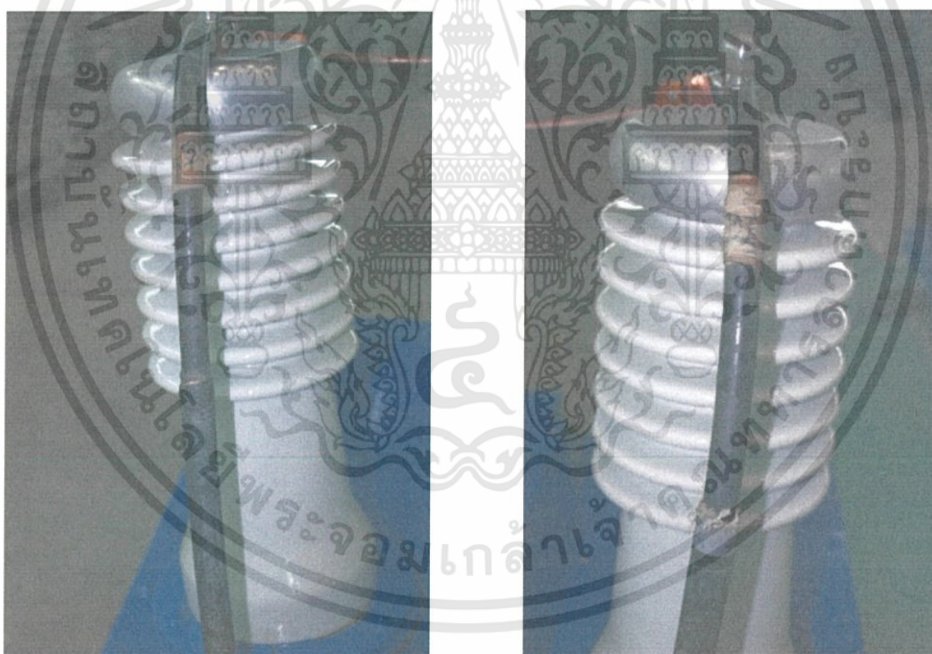
รูปที่ 3.15 ชุดหม้อแปลงอัดประจุ

ผลิตโดย	Pulse Electronic Engineering Co.,Ltd
กำลัง	5 kVA
แรงดันเข้า	~220 V
แรงดันขาออก	± 75 kVDC
กระแส	25 mA

ชุดหม้อแปลงอัดประจุที่ใช้งานจะมีจุดต่อสายเคเบิลเพื่อรับกำลังไฟฟ้าเข้าหม้อแปลง ดังรูป คือสายด้านซ้ายมือ และสายเคเบิลทางด้านขวามือคือสายควบคุมการทำงานของชุดอัดประจุ เช่น การสลับขั้ว การวัดแรงดัน และการกราวด์อัตโนมัติ ส่วนด้านไฟฟ้าขาออกจะต่อกับสายเคเบิล 75 kVDC เพื่อส่งไปยังเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์



รูปที่ 3.16 จุดต่อกราวด์ตัวถังชุดอัดประจุ



ก) ด้านซ้าย

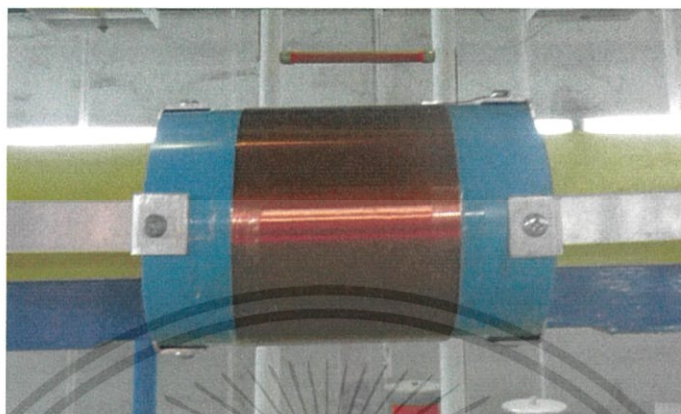
ข) ด้านขวา

รูปที่ 3.17 จุดต่อสายเคเบิลออกจากชุดอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การติดตั้งองค์ประกอบความเหนี่ยวนำ ($L_1 - L_8$)

จากการออกแบบองค์ประกอบความเหนี่ยวนำสำหรับวงจรกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ช่วงยาวนั้น ได้ค่าความเหนี่ยวนำดังตาราง ที่ 3.7 สามารถประกอบสร้างได้ดังนี้



รูปที่ 3.18 ความเหนี่ยวนำ L_1 ขนาด 1.0 mH

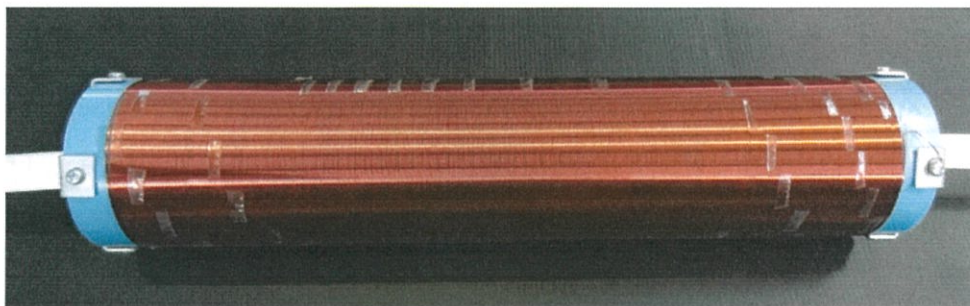


รูปที่ 3.19 ความเหนี่ยวนำ L_2 ขนาด 1.2 mH



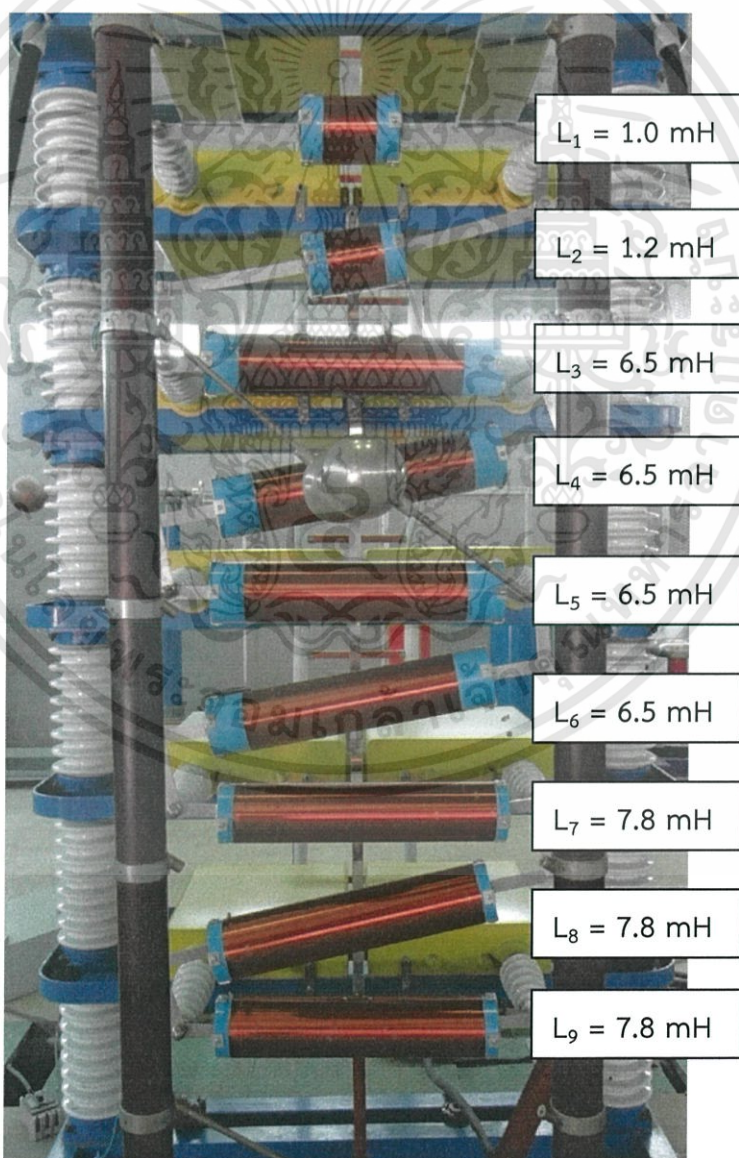
รูปที่ 3.20 ความเหนี่ยวนำ $L_3 - L_6$ ขนาด 6.5 mH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ความเหนี่ยวนำ $L_7 - L_9$ ขนาด 7.8 mH

เมื่อนำความเหนี่ยวนำ $L_1 - L_9$ ไปติดตั้งกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ โดยมีลำดับการติดตั้งตัวเหนี่ยวนำตามวงจรสมมูลในรูปที่ 3.12 ได้ดังรูปที่ 3.21

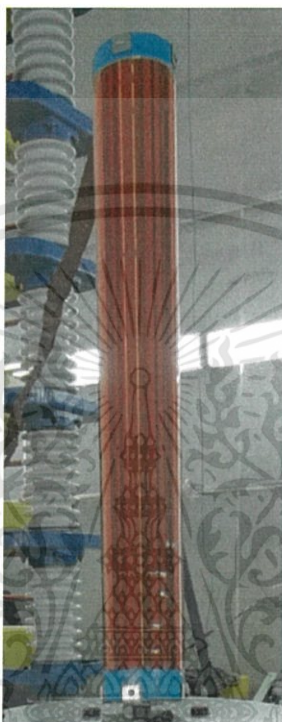


รูปที่ 3.22 การติดตั้งความเหนี่ยวนำ $L_1 - L_9$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 การติดตั้งตัวเหนี่ยวนำ L_{10} ความต้านทานแม่เหล็ก และอุปกรณ์ทดสอบ

ในวงจรกำเนิดกระแสแอมป์สช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA จะต้องมีการนำอุปกรณ์ทดสอบนั้นคือ กับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA มาติดตั้งในวงจรด้วย ซึ่งอุปกรณ์ 3 อย่างนี้จะติดตั้งอยู่บนฐานรองซึ่งแยกออกมาจากวงจรอัดประจุ แล้วเชื่อมต่อกับวงจรอัดประจุด้วยแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.23 ตัวเหนี่ยวนำ L_{10} ขนาด 13 mH

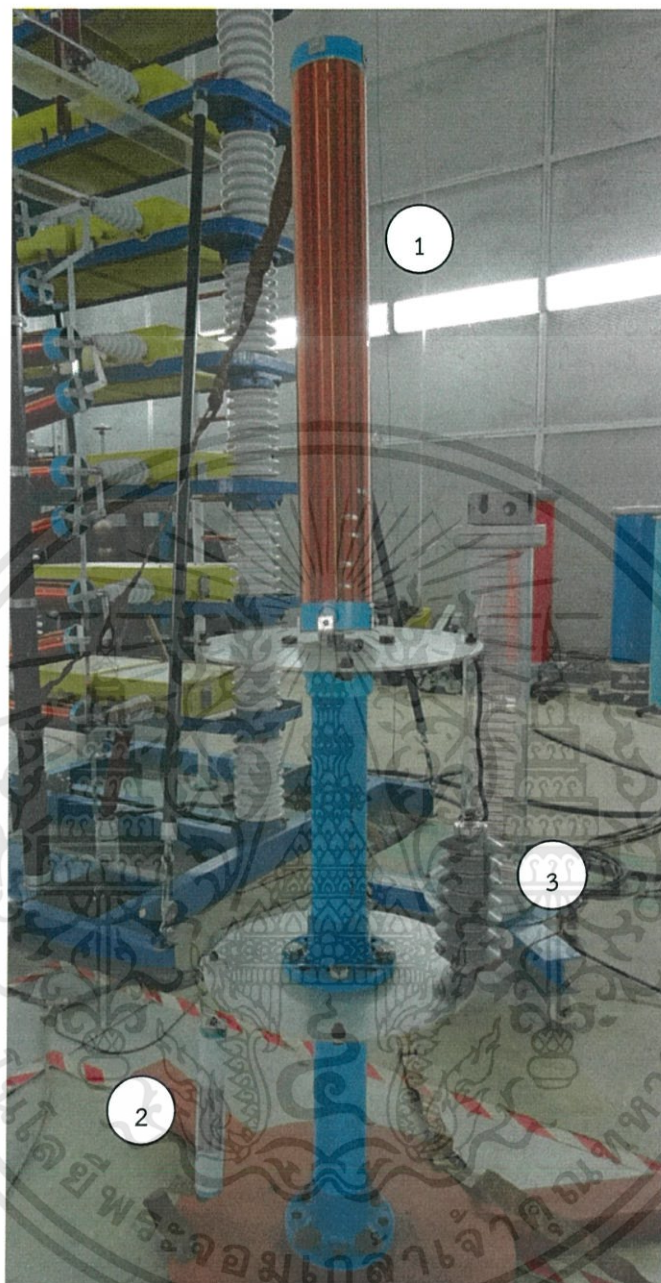


รูปที่ 3.24 กับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA



รูปที่ 3.25 ความต้านทานแม่เหล็ก ขนาด 42 Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 การติดตั้งความเหนี่ยวนำ L_{10} (1)
ความต้านทานแมทซ์ชิง(2) และกั๊บดั๊กฟ้าผ่าพิกัฏกระแส 5 kA (3) บนฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 ลักษณะการติดตั้งความต้านทานแมทซิ่งและกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

3.7.5 การติดตั้งช่องว่างทรงกลมของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

จากวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในรูปที่ 3.12 จะใช้ช่องว่างทรงกลมที่ใช้อากาศเป็นฉนวน กั้นระหว่างชุดอัดประจุกับอุปกรณ์ทดสอบ เพื่อให้สามารถอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ตามความต้องการในการทดสอบ และควบคุมการเบรกดาว์นของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

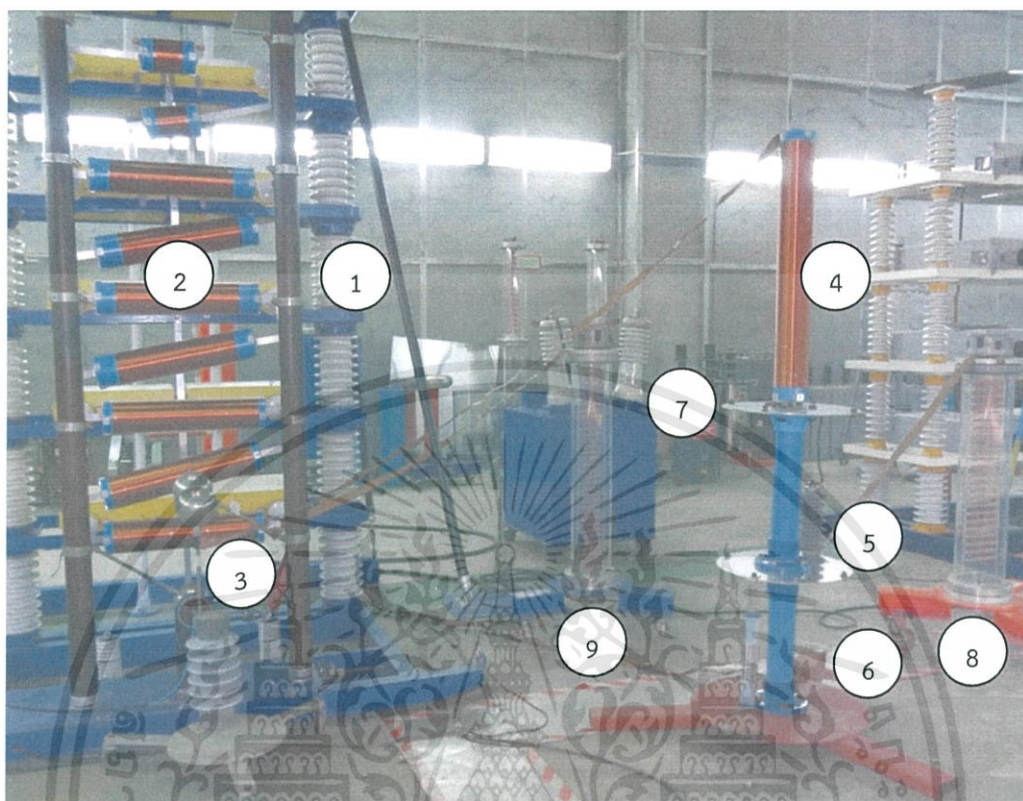


รูปที่ 3.28 ช่องว่างทรงกลมขนาด 12.5 เซนติเมตร

ชนิด	แอสตนเลส สตีล
เส้นผ่านศูนย์กลาง	12.5 เซนติเมตร
ระยะปรับแกป	0.5 – 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.6 เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ประกอบสร้างตามวงจรสมมูล



รูปที่ 3.29 เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA

โดยที่อุปกรณ์ในวงจรมีดังนี้

1. ตัวเก็บประจุอิมพัลส์
2. องค์กรประกอบความเหนี่ยวนำ $L_1 - L_9$
3. ช่องว่างทรงกลม
4. องค์กรประกอบความเหนี่ยวนำ L_{10}
5. กักดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA
6. ตัวต้านทานแมทซิ่ง
7. ชุดหม้อแปลงอัดประจุ
8. โวลเตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์
9. โวลเตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

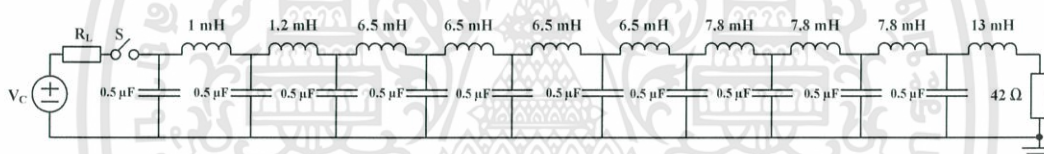
บทที่ 4

การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

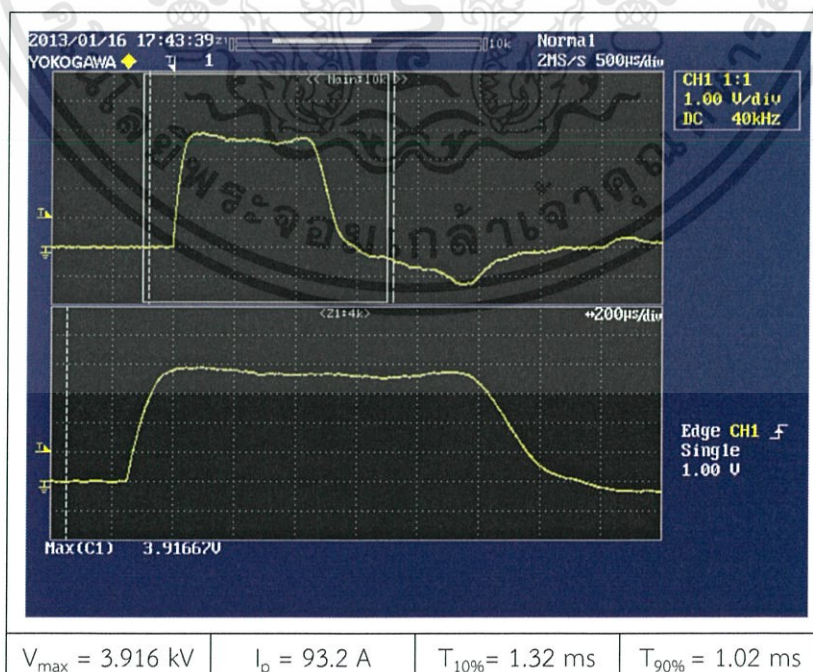
การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จะแบ่งการทดสอบออกเป็นสองการทดสอบ ประกอบด้วย การทดสอบขณะลัดวงจร และการทดสอบกับดักฟ้าผ่าฟักัดกระแส 5 kA เพื่อวิเคราะห์รูปคลื่นให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ซึ่งข้อกำหนดของมาตรฐานประกอบด้วย ช่วงเวลา 10%, 90% ของค่ายอดกระแส และค่ายอดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว นอกจากนี้เสถียรภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ก็เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาถึงด้วย โดยหัวข้อการทดสอบจะเป็นไปตามลำดับดังนี้

4.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจร

สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจร วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะทดสอบที่ระดับแรงดัน 20 kV 30 kV 40 kV และ 50 kV ตามลำดับ โดยเลือกใช้โวลเตจดีไวเดอร์วัดค่าแรงดันและบันทึกผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคป ผลแสดงดังรูปที่ 4.2 - 4.5 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะได้ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีลัดวงจรด้วยโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 4.6 และค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1

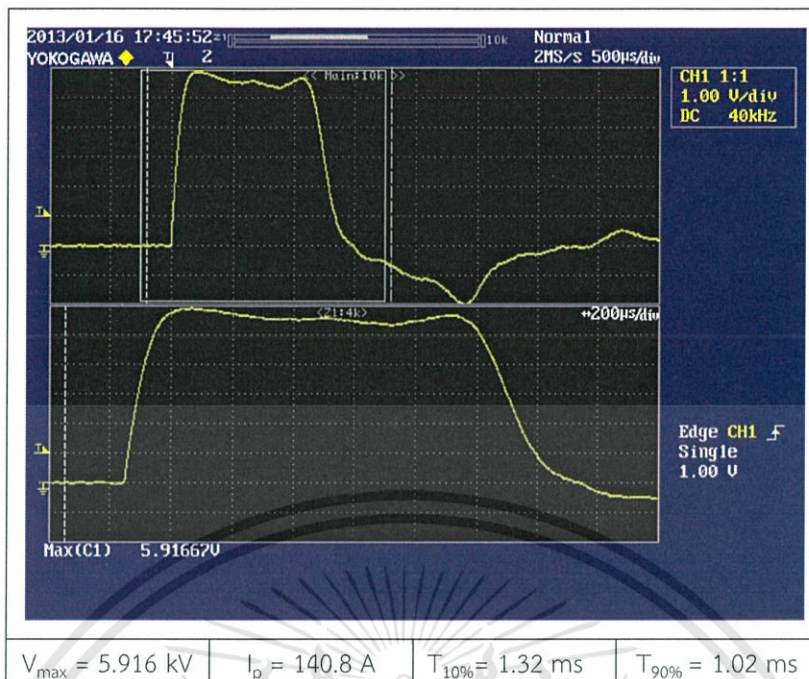


รูปที่ 4.1 วงจรทดสอบกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจร

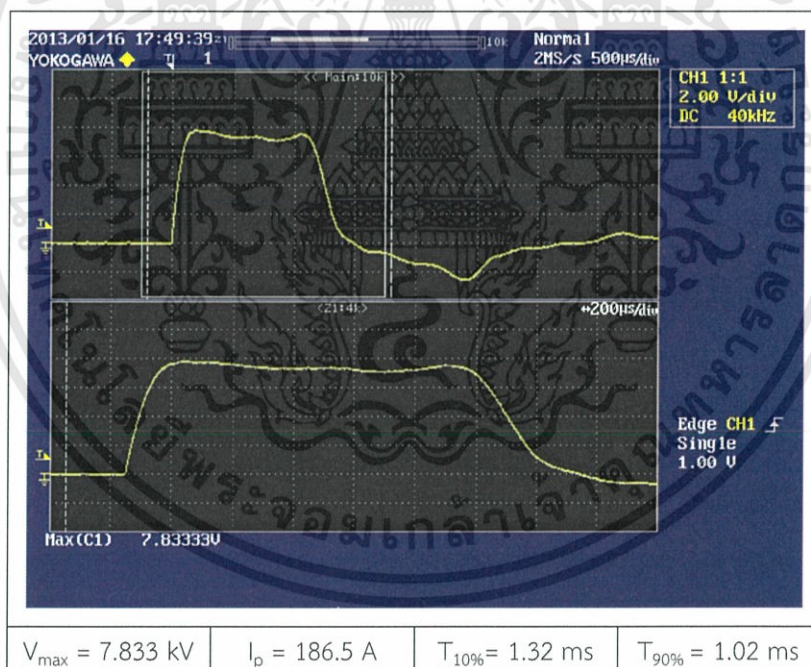


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 20 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

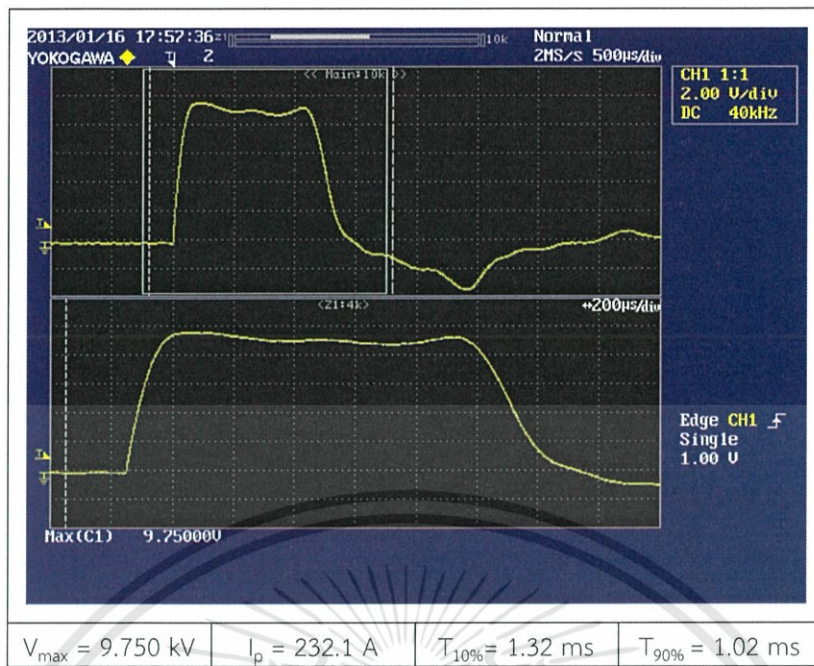


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 30 kV

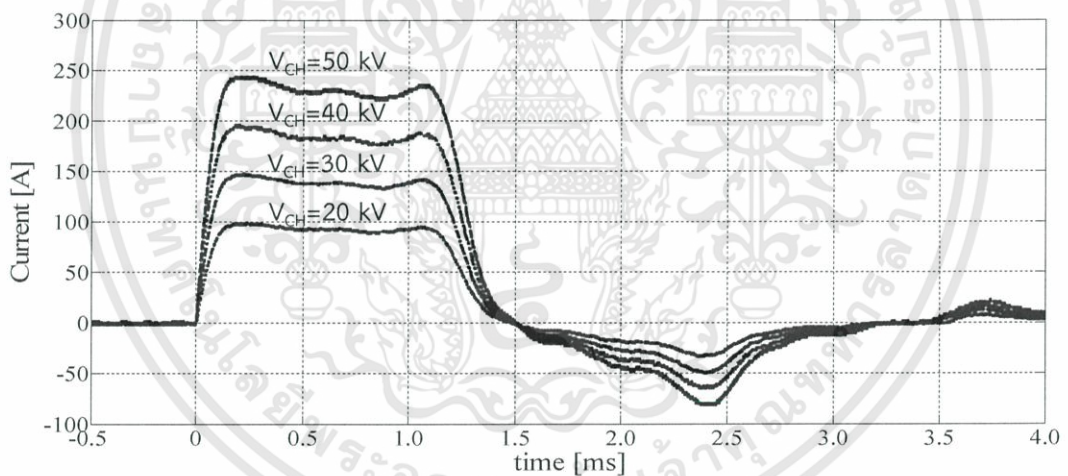


รูปที่ 4.4 รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 40 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ที่แรงดันอัดประจุ 50 kV
ในการทดสอบกรณีลัดวงจร



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจร
ที่ระดับแรงดัน 20 kV 30 kV 40 kV และ 50 kV ตามลำดับ

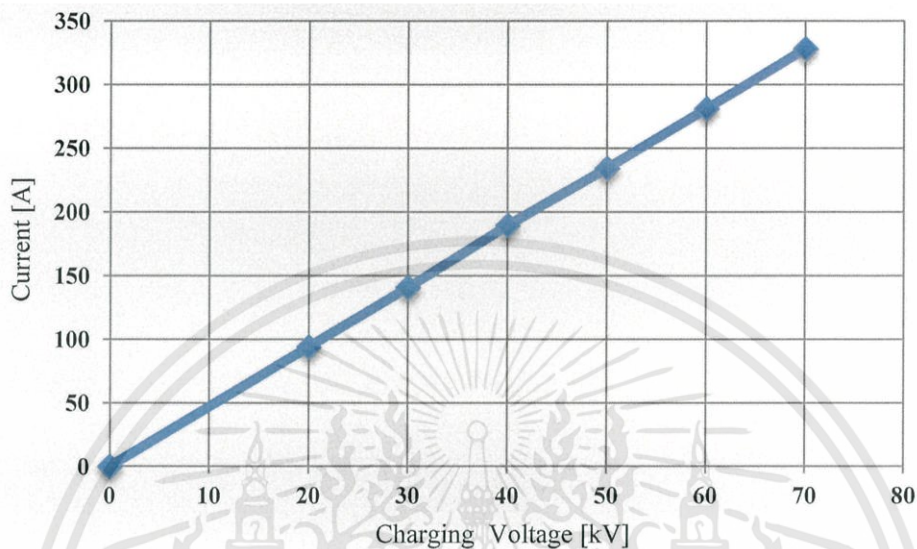
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีลัดวงจร

พารามิเตอร์ของ รูปคลื่น	แรงดันอัดประจุ			
	20 kV	30 kV	40 kV	50 kV
I _{peak}	93.2 A	140.8 A	186.5 A	232.1 A
T _{10%}	1.32 ms	1.32 ms	1.32 ms	1.32 ms
T _{90%}	1.02 ms	1.02 ms	1.02 ms	1.02 ms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางผลการทดสอบพบว่ารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจรที่ระดับแรงดัน 20 kV 30 kV 40 kV และ 50 kV เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 60099-4

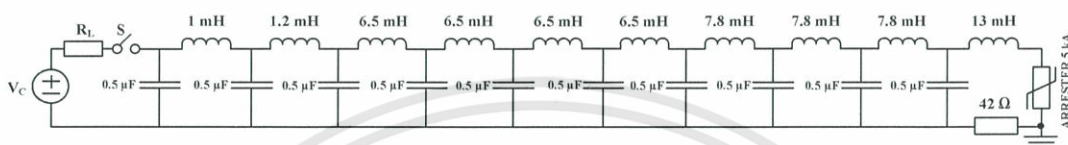
จากข้อมูลผลการทดสอบสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับขนาดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจรดังรูป 5.7



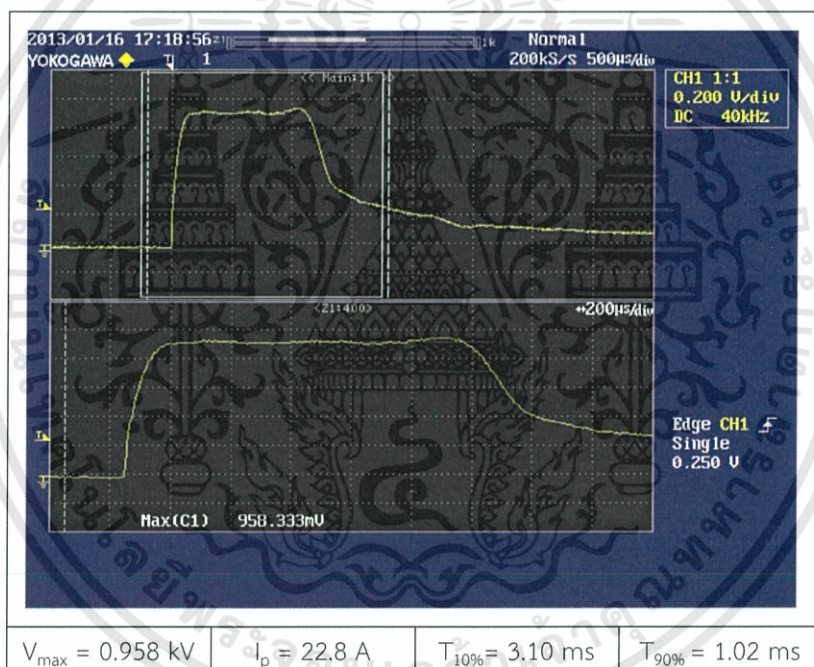
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันอัดประจุกับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวจากการทดสอบขณะลัดวงจร

4.2 การทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA วงจรการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งจะทดสอบที่ระดับแรงดัน 50 kV 60 kV และ 70 kV ตามลำดับ โดยเลือกใช้โวลเตจดีไวเดอร์วัดค่าแรงดันและบันทึกผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคป ผลแสดงดังรูปที่ 4.9 – 4.11 ตามลำดับ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะได้ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ด้วยโปรแกรม MATLAB ในรูปที่ 4.12 และค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.2

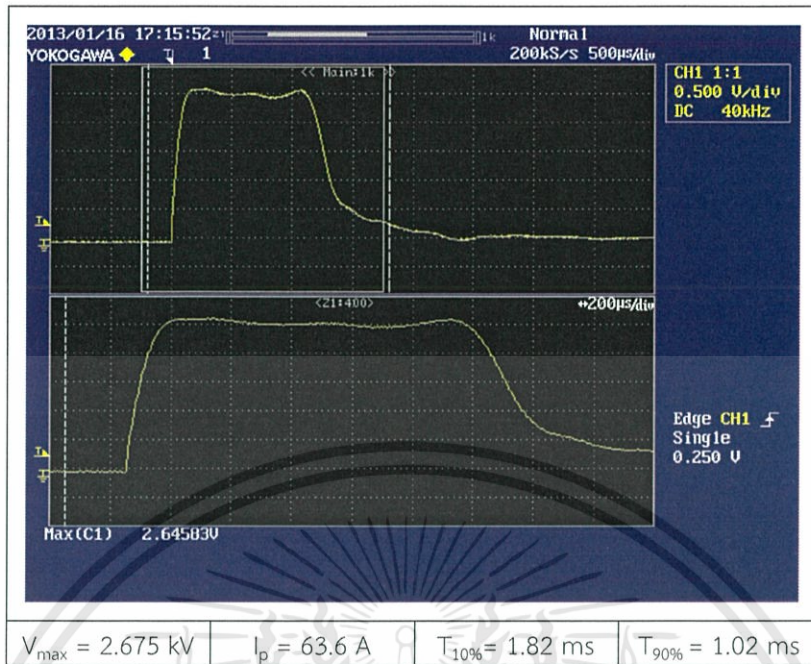


รูปที่ 4.8 วงจรการทดสอบกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

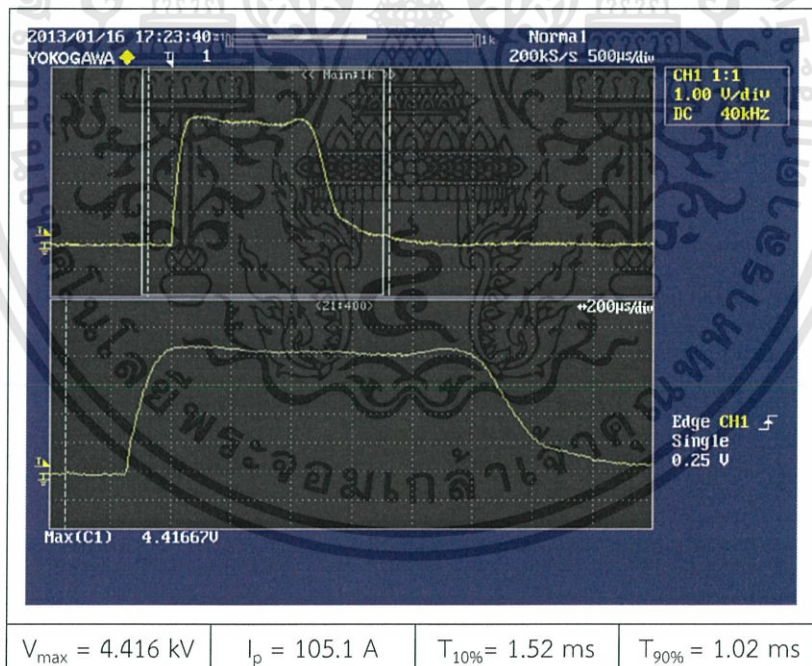


รูปที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 50 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

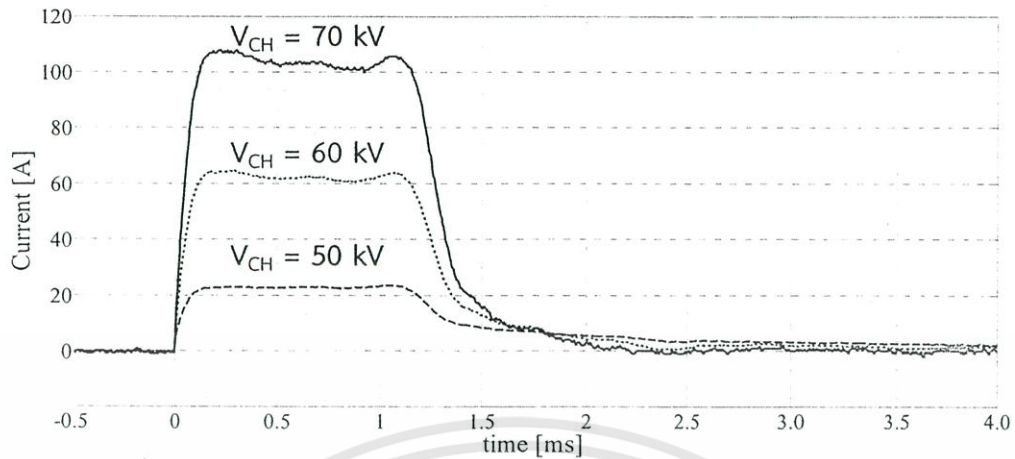


รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 60 kV



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันอัดประจุ 70 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



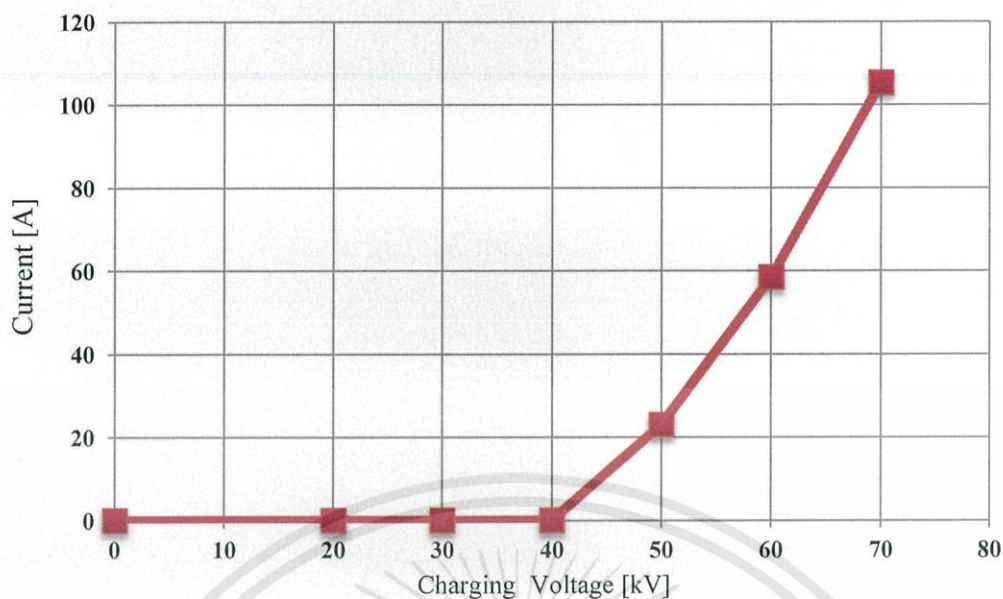
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA

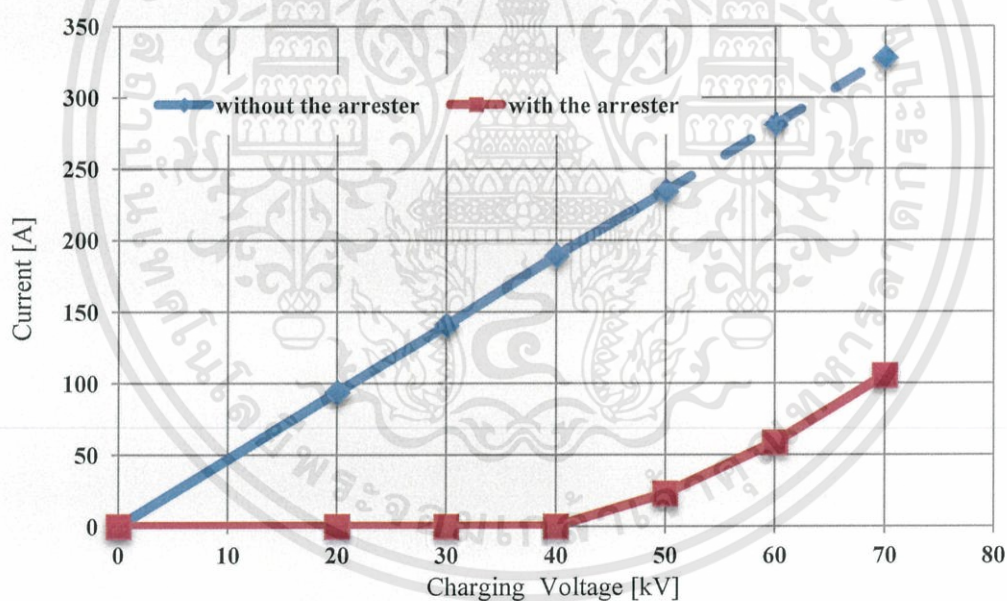
พารามิเตอร์ของรูปคลื่น	แรงดันอัดประจุ		
	50 kV	60 kV	70 kV
I_p	22.8 A	63.6 A	105.1 A
$T_{10\%}$	3.10 ms	1.82 ms	1.52 ms
$T_{90\%}$	1.02 ms	1.02 ms	1.02 ms

เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีต่อ Arrester จะพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันอัดประจุ 50 kV 60 kV และ 70 kV ค่ายอดของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนดให้ค่ายอดของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวมีค่าไม่น้อยกว่า 75 A ซึ่งจากการทดสอบปรากฏว่า เมื่อทดสอบด้วยแรงดันอัดประจุ 70 kV จะได้กระแสค่ายอดเท่ากับ 105.1 A, $T_{10\%} = 1.52$ ms และ $T_{90\%} = 1.02$ ms ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันอัดประจุ 50 kV และ 60 kV $T_{10\%}$ ไม่อยู่ในมาตรฐานกำหนด

จากข้อมูลที่ได้ในการทดสอบสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่า 5 kA ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจรและต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA

จากรูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวขณะลัดวงจรและต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ในกรณีขณะลัดวงจรนั้นกระแสอิมพัลส์และแรงดันอัดประจุมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น (Linear) ส่วนในกรณีต่อกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA จะพบว่ากับดักฟ้าผ่าเริ่มทำงานที่แรงดันอัดประจุมีค่า 40 kV และความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear)

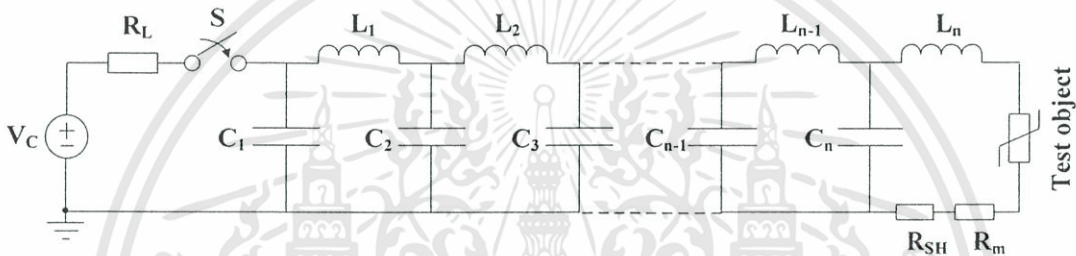
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผล

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานวิทยานิพนธ์นี้ ใช้สร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวรูปคลื่นทดสอบสำหรับกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานเป็นตัวกำหนด ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว จากผลการทดสอบพบว่า เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ประกอบสร้าง สามารถสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA ได้จริงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยมีวงจรที่ใช้ในการทดสอบดังรูป 5.1



รูปที่ 5.1 วงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของวงจรสร้างกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวสำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA

ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)		ค่าความต้านทาน (Ω)	
L_1	1.0	R_1	1.0
L_2	1.2	R_2	1.2
L_3 L_6	6.5	R_3 R_6	6.5
L_7 L_9	7.8	R_7 R_9	7.8
L_{10}	13	R_{10}	13
		R_m	42

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA

ค่าคุณลักษณะของรูปคลื่น	เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวที่ประกอบสร้าง	มาตรฐาน IEC 60099 - 4
I_{peak}	มากกว่า 75 A	มากกว่า 75 A
$T_{10\%}$	1.32 ms	$T_{10\%} \leq 1.5 T_{90\%}$
$T_{90\%}$	1.02 ms	$1 \leq T_{90\%} \leq 1.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA ที่ประกอบสร้างสามารถสร้างรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าสลับที่มีคุณลักษณะค่าช่วงเวลา 90 % ($T_{90\%}$) เท่ากับ 1.02 ms ค่าช่วงเวลา 10 % ($T_{10\%}$) เท่ากับ 1.32 ms และสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาวให้มีค่ากระแสสูงสุดได้มากกว่า 75 A ซึ่งค่าคุณลักษณะต่างๆเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 กำหนดไว้ทุกประการ จึงสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาวเพื่อการทดสอบกับดักฟ้าผ่าพิกัด 5 kA และสามารถรองรับการทดสอบเพื่อการวิจัยด้านกับดักฟ้าผ่าได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบความทนได้กระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาว บนกับดักฟ้าผ่าพิกัดกระแส 5 kA มีข้อเสนอแนะที่สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ดังนี้

1. พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากค่าความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาวลดลง ดังนั้นในการประกอบสร้างตัวเหนี่ยวนำสำหรับเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าสลับ จะต้องพิจารณาถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดทองแดงที่นำมาใช้
2. ผลของความต้านทานแฝงภายในขดลวดเหนี่ยวนำเหนี่ยวนำทำให้วงจรที่ออกแบบสร้างมีความคลาดเคลื่อนจากการจำลองเพื่อเป็นการลดความต้านทานแฝงภายในขดลวดเหนี่ยวนำควรใช้ขดลวดทองแดงที่มีพื้นที่หน้าตัดมากๆ ซึ่งจะทำให้ใช้ลวดทองแดงสั้นลงและจะส่งผลให้ความต้านทานแฝงลดลงด้วย
3. กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการทดสอบ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานมาเป็นเวลานาน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของอุปกรณ์ภายในตัวกับดักฟ้าผ่า เมื่อนำมาใช้ทดสอบจึงอาจทำงานได้ไม่เต็มที่ตั้งผลในการทดสอบการทดสอบกระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาว เมื่อต่อกับกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA ซึ่งค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าสลับช่วงยาว ไม่อยู่ในมาตรฐานอย่างที่ควรจะเป็นเท่าที่ควร

บรรณานุกรม

- [1] IEC 60099-4. Surge arresters - Part 2 , Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 2001 12.
- [2] Berger, Novel Observations on lightning discharges, 1967
- [3] Modrusan, M. Long-duration impulse current generator for arrester tests according to IEC recommendations, Switzerland, Haefely, 1977
- [4] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2547
- [5] นายอรรถพงศ์ ปาตีบ, การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับคัทไฟผ่าฟัด 5 kA และ 2.5 kA, ปริญญาโทวิศวกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- [6] นายกิตติ ชูหอม และคณะ, การปรับปรุงและพัฒนาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1200 kV 22.5 kJ, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การจัดแบ่งกลุ่มของกั๊บดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ

ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 ได้ทำการแบ่งกลุ่มของกั๊บดักฟ้าผ่าตามพิคัดกระแส โดยกั๊บดักฟ้าผ่าในแต่ละกลุ่มมีข้อกำหนดทางการทดสอบดังแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การจัดแบ่งกลุ่มของกั๊บดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ

	Standard nominal discharge current				
	20,000 A	10,000 A	5,000 A	2,500 A	1,500 A
1) Rated voltage U_r (kVrms)	$360 < U_r \leq 756$	$3 \leq U_r \leq 360$	$U_r \leq 132$	$U_r \leq 132$	See note 3
2) Insulation withstand tests on the arrester housing	7.2.6, 7.2.7	7.2.6, 7.2.7, 7.2.8	7.2.6, 7.2.8	7.2.6, 7.2.8	7.2.6, 7.2.8
3) Residual Voltage test	Table K.1	Table K.1	Table K.2	Table K.2	Table K.2
a) Steep current impulse residual voltage test	7.3.1	7.3.1	7.3.1	7.3.1	7.3.1
b) Lightning impulse residual voltage test	7.3.2	7.3.2	7.3.2	7.3.2	7.3.2
c) Switching impulse residual voltage test	7.3.3	7.3.3	Not required	Not required	Not required
4) Long duration current impulse withstand test	7.4.2	7.4.2	7.4.2	7.4.2	Not required
5) Operating duty test	Not required	7.5.4 Table 6	7.5.4 Table 6	7.5.4 Table 6	7.5.4 Table 6
a) High current impulse operating duty test					
b) Switching surge operating duty test	7.5.5 Table 4	7.5.5 Table 4	Not required	Not required	Not required
6) Power frequency voltage versus time curve	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 การจัดแบ่งกลุ่มของกับดักฟ้าผ่าและข้อกำหนดการทดสอบ (ต่อ)

	Standard nominal discharge current				
	20,000 A	10,000 A	5,000 A	2,500 A	1,500 A
7) Pressure relief (when fitted with relief device)	5.11	5.11	5.11	Not required	Not required
8) Arrester disconnecter (when fitted)	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12
9) Polluted housing test	Annex F				
10) Internal partial discharge test	7.8	7.8	7.8	7.8	-
11) Mechanical tests	13	13	13	13	13

Note

- 1) Numbers in rows 2 to 8, 10 and 11 refer to clauses and sub-clauses in this standard.
- 2) In some countries it is customary to classify arrester:
 - Station for 10 000 A and 20 000 A arresters:
 - Intermediate or distribution for 5 000 A arresters:
 - Secondary for 1 500 A arresters.
- 3) This low voltage range is under consideration



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ช่องว่างทรงกลม (Sphere gap)

การวัดแรงดันสูงด้วยช่องว่างทรงกลมเป็นวิธีที่ง่ายและมีความแน่นอนเชื่อถือได้ อาศัยการเกิดสปาร์ค หรือเบรกดาวน์ระหว่างทรงกลมโลหะที่วางอยู่ในอากาศหรือก๊าซ ซึ่งเป็นไปตามกฎการเกิดดิสชาร์จของก๊าซ หรือ สปาร์ค การเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้าถึงค่าหนึ่ง นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวน์ขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์สถิติ (Statistic breakdown voltage) ที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอนทำซ้ำได้ ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์คหรือเบรกดาวน์นั้นขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ หรือก๊าซ หรือระยะห่างระหว่าง

ทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม นั่นคือ

$$U_b = f(d, D, \delta)$$

เมื่อ	U_b	คือ	แรงดันที่ทำให้เกิดการสปาร์ค
	D	คือ	ช่องว่างระหว่างทรงกลม
	d	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม
	δ	คือ	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศ และ อุณหภูมิ

ตามมาตรฐาน IEC No.52 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศระหว่างทรงกลมไว้ที่สภาวะมาตรฐานคือ ความดันบรรยากาศ 760 มม.ปรอท และอุณหภูมิ 20 °C ซึ่งถือว่าเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์มาตรฐาน

ฉะนั้นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่วัดได้ที่ความดันใด อุณหภูมิใดเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานจะต้องแปลงค่าที่วัดได้ไปเป็นค่าที่สภาวะมาตรฐานคือ

$$U_{bn} = \frac{U_b}{K_d}$$

เมื่อ	U_{bn}	คือ	ค่ามาตรฐาน
	U_b	คือ	ค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมิและความดันห้อง
	K_d	คือ	ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ

โดยที่ค่าตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ (K_d) จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศขึ้นอยู่กับความดันบรรยากาศ และ อุณหภูมิ δ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

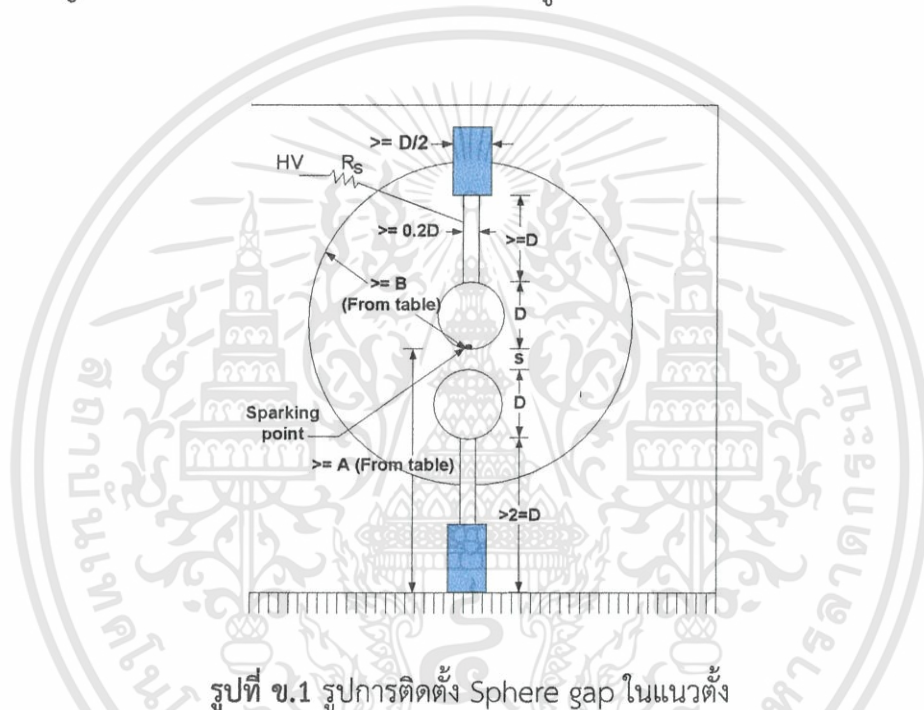
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta = \frac{P}{760} \left[\frac{273+20}{273+t} \right] = 0.386 \left[\frac{P}{273+t} \right]$$

เมื่อ	P	คือ	ความดันของอากาศมีหน่วยเป็น มม.ปรอท
	T	คือ	อุณหภูมิของห้องในขณะที่วัดมีหน่วยเป็น °C
	K _d	คือ	ตัวประกอบแปลงผันจะเท่ากับ δ เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.05

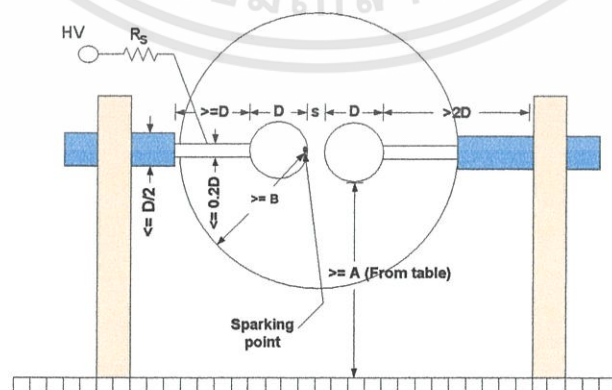
ข้อพึงปฏิบัติในการใช้ Sphere gap

การติดตั้งและการยึดควรปฏิบัติตามมาตรฐาน IEC no. 52 ถ้าทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 cm. ให้ทำการติดตั้งในแนวตั้ง ดังรูป



รูปที่ ข.1 รูปการติดตั้ง Sphere gap ในแนวตั้ง

แต่ถ้าทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 25 cm. ให้ทำการติดตั้งในแนวนอน ดังรูป



รูปที่ ข.2 รูปการติดตั้ง Sphere gap ในแนวนอน

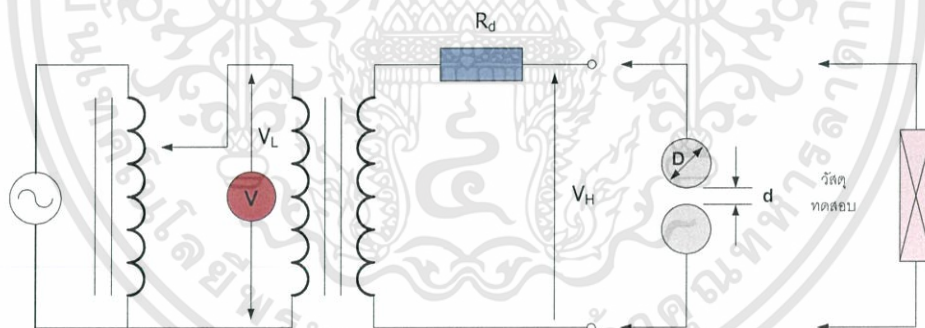
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในรัศมี 3.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (D) โดยวัดจากจุดผิวพื้นทรงกลมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะต้องไม่มีโลหะหรือตัวนำใด
- ระยะห่างระหว่างทรงกลมจะต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม ($d = D/2$)
- กระแสที่เกิดจากการสปาร์คไม่ควรเกิน 1 A. โดยต่อความต้านทานต่ออนุกรมไว้กับทรงกลม ($R_d = 0.1 - 1M$)
- ควรจะมียางจรป้องกัน ให้ตัดไฟที่ป้อนให้กับทรงกลมทันทีเมื่อเกิดการสปาร์ค
- ค่าที่ถูกต้อง จะได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลายๆครั้ง ประมาณ 5 ครั้ง เพราะค่าที่วัดได้ครั้งแรกจะมีค่าต่ำ เนื่องจากมีฝุ่นละอองที่ผิวของทรงกลม ดังนั้นก่อนใช้จึงควรขัดทำความสะอาดพื้นผิวทรงกลมก่อนเสมอ

วิธีการวัดแรงดันสูงโดย Sphere gap

เป็นการวัดด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่มีตัวชี้ ไม่ทราบว่าจะขณะนี้แรงดันที่ป้อนเข้าไปมีค่าเท่าใด จนกว่าจะเกิดการสปาร์คในช่องแคบ ดังนั้นเพื่อที่ทราบค่าของแรงดันที่ป้อนเข้าไปได้ตลอดเวลา จะต้องทำการแบ่งเทียบ Volt meter ที่วัดทางด้านแรงต่ำก่อน

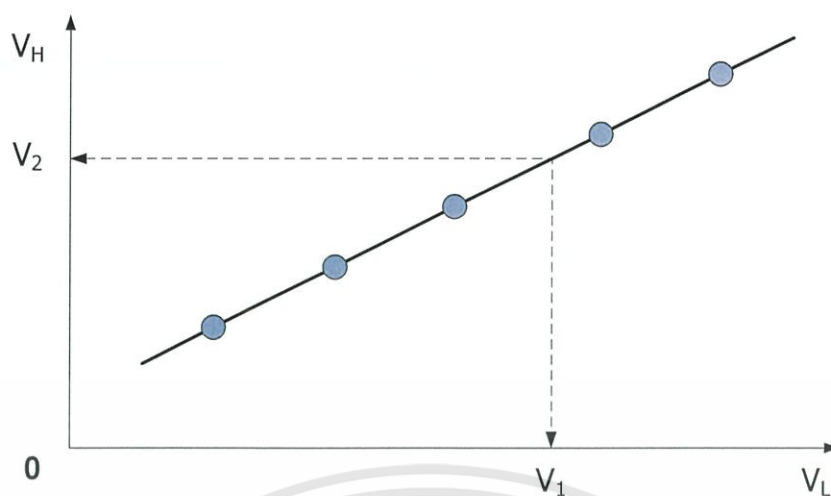
- ที่ระยะช่องว่างหนึ่งจะได้แรงดันสปาร์คทางแรงสูง V_H ค่าหนึ่ง ซึ่งขณะนั้น voltmeter แรงต่ำ จะอ่านค่าเป็น V_L เมื่อเปลี่ยนระยะช่องว่างหลายๆค่า ก็จะทำให้ได้เส้นกราฟแบ่งเทียบ (Calibration curve) V_H กับ V_L



รูปที่ ข.3 รูปวงจรมัดเทียบ Sphere gap

- ค่า V_H ที่ระยะช่องว่างของทรงกลมใดที่ standard condition หาได้จากตารางที่เป็น standard ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวัดแรงดันด้วย ช่องว่างทรงกลม เช่น IEC standard no.52 ดูได้จากตารางหรือเส้นกราฟมาตรฐานดังรูป ถ้านำเอาค่า V_H

จากมาตรฐาน (ที่ 20 C ,760 mmHg) มาเขียนเส้นกราฟ V_H , V_S และ V_L ก็จะได้เส้นกราฟ calibrate ที่ค่ามาตรฐาน ดังรูป



รูปที่ ข.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง V_H และ V_L



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางลวดทองแดงขนาดมาตรฐาน

ลวดทองแดงถือได้ว่ามีบทบาทสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับการทดสอบนี้เนื่องจาก มีการใช้ลวดทองแดงในการประดิษฐ์ตัวเหนี่ยวนำขึ้นมาใช้ในการทดสอบ นอกจากนี้ลวดทองแดงแต่ละขนาดนั้นมีความสามารถในการทนกระแสที่แตกต่างกัน ซึ่งถ้าผู้ทำการทดสอบเลือกขนาดลวดทองแดงในการใช้งานได้ไม่เหมาะสมก็อาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ ดังนั้น เราควรเลือกลวดทองแดงเพื่อให้เหมาะแก่การทดสอบโดยเลือกลวดทองแดงตามตารางลวดทองแดงขนาดมาตรฐานดังนี้

ตาราง ค.1 ตารางลวดทองแดงขนาดมาตรฐาน

เบอร์ลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G.	เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter)	พื้นที่หน้าตัด (Area)	ทนกระแสได้ (A)
	mm	mm ²	
0000	10.2	81.71	270.11
000	9.5	70.88	233.62
00	8.8	60.82	199.77
0	8.2	52.81	177.22
1	7.6	45.36	151.94
2	7.0	38.48	128.60
3	6.4	32.17	107.21
4	5.9	27.34	90.86
5	5.4	22.90	75.87
6	4.9	18.86	62.23
7	4.5	15.90	52.29
8	4.1	13.20	43.22
9	3.7	10.75	35.01
10	3.3	8.55	27.66
11	2.9	6.61	22.72
12	2.6	5.31	18.26
13	2.3	4.15	14.29
14	2.0	3.14	10.80
15	1.9	2.54	8.751
16	1.8	2.01	6.915
17	1.4	1.54	5.294

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.1 ตารางลวดทองแดงขนาดมาตรฐาน (ต่อ)

เบอร์ลวดทองแดง มาตรฐาน S.W.G.	เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter)	พื้นที่หน้าตัด (Area)	ทนกระแสได้ (A)
	mm	mm ²	
18	1.2	1.15	3.890
19	1.0	0.79	2.701
20	0.91	0.65	2.188
21	0.81	0.51	1.729
22	0.72	0.41	1.324
23	0.61	0.2922	0.972
24	0.56	0.2463	0.817
25	0.51	0.2047	0.675
26	0.45	0.1624	0.547
27	0.40	0.1288	0.432
28	0.38	0.1134	0.370
29	0.36	0.1021	0.312
30	0.31	0.0755	0.243
31	0.29	0.0661	0.204
32	0.28	0.0616	0.176
33	0.25	0.0510	0.169
34	0.23	0.0451	0.137
35	0.21	0.0346	0.108
36	0.19	0.0285	0.098
37	0.17	0.0227	0.078
38	0.15	0.0177	0.063
39	0.13	0.0133	0.046
40	0.12	0.0114	0.039
41	0.11	0.0101	0.033
42	0.10	0.0081	0.027
43	0.091	0.0065	0.022
44	0.081	0.0052	0.017
45	0.071	0.0040	0.013
46	0.061	0.0029	0.0097
47	0.051	0.0020	0.0068
48	0.041	0.0013	0.0047
49	0.030	0.0007	0.0024
50	0.025	0.0005	0.0017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง

ตารางลวดนํโครมขนาดมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางลวดนิโครมขนาดมาตรฐาน

ในการทดสอบนี้จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีตัวต้านทาน ซึ่งในการทดสอบนี้จะเรียกว่า "ตัวต้านทานแมทซิ่ง" และเนื่องจากในการทดสอบเป็นการทดสอบที่ใช้กระแสและพลังงานสูง แน่แน่นอนว่าเมื่อตัวต้านทานของเราได้รับกระแสที่สูงนั้น จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นสูงที่ตัวต้านทาน ซึ่งถ้าตัวต้านทานไม่สามารถทนความร้อนได้สูงได้ก็จะทำให้ตัวต้านทานนั้นเสียหายได้ เป็นที่ทราบกันดีว่าลวดนิเกิล โครมเมียม มีคุณสมบัติที่เป็นตัวต้านทานอีกทั้งยังสามารถทนความร้อนได้สูงโดยสังเกตได้จากการใช้ลวดนิเกิล โครมเมียมเป็นขดลวดความร้อนในอุตสาหกรรมเครื่องทำความร้อน เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการใช้ลวดนิเกิล โครมเมียมในการสร้างตัวต้านทานแมทซิ่งในการทดสอบ โดยเลือกตามความเหมาะสมจากตารางลวดนิโครมขนาดมาตรฐาน ดังนี้

ตารางที่ ง.1 ตารางลวดนิโครมขนาดมาตรฐาน

Dia. (mm)	Sectional Area (mm ²)	Surface Area/m ² cm ² /m	NiCr 80/20		NiCr 70/30		NiCr 60/15	
			Weight/m kg/m	Resistance /m Ω/m,20°C	Weight/m kg/m	Resistance /m Ω/m,20°C	Weight/m kg/m	Resistance /m Ω/m,20°C
0.10	0.00785	3.142	0.0000659	138.8	0.0000636	150.2	0.0000644	142.6
0.12	0.01131	3.770	0.0000950	96.38	0.0000916	104.3	0.0000927	99.03
0.15	0.01767	4.712	0.0001484	61.68	0.0001431	66.77	0.0001449	63.38
0.17	0.02270	5.341	0.0001907	48.02	0.0001839	51.99	0.0001861	49.34
0.19	0.02835	5.969	0.0002382	38.44	0.0002297	41.62	0.0002325	39.50
0.21	0.03464	6.597	0.0002909	31.47	0.0002806	34.07	0.0002840	32.34
0.25	0.04909	7.854	0.0004123	22.21	0.0003976	24.04	0.0004025	22.82
0.27	0.05726	8.482	0.0004809	19.04	0.0004638	20.61	0.0004695	19.56
0.29	0.06605	9.111	0.0005548	16.50	0.0005350	17.86	0.0005416	16.96
0.31	0.07548	9.739	0.0006340	14.44	0.0006114	15.63	0.0006189	14.84
0.35	0.09621	11.00	0.0008082	11.33	0.0007793	12.26	0.0007889	11.64
0.40	0.1257	12.57	0.001056	8.674	0.001018	9.390	0.001030	8.913
0.45	0.1590	14.14	0.001339	6.835	0.001288	7.419	0.001304	7.042
0.50	0.1963	15.71	0.001469	5.551	0.001590	6.010	0.001610	5.704
0.60	0.2827	18.85	0.002375	3.855	0.002290	4.173	0.002318	3.961
0.70	0.3848	21.99	0.003233	2.832	0.003117	3.066	0.003156	2.910
0.80	0.5027	25.13	0.004222	2.168	0.004072	2.348	0.004122	2.228

ตารางที่ ง.1 ตารางลวดนิโครมขนาดมาตรฐาน (ต่อ)

Dia. (mm)	Section al Area (mm ²)	Surfac e Area/ m cm ² / m	NiCr 80/20		NiCr 70/30		NiCr 60/15	
			Weight/m kg/m	Resistance/ m Ω/m,20°C	Weight/m kg/m	Resistance /m Ω/m,20°C	Weight/m kg/m	Resistance /m Ω/m,20°C
0.90	0.6362	28.27	0.005344	1.713	0.005153	1.855	0.005217	1.761
1.00	0.7854	31.42	0.006597	1.388	0.006362	1.502	0.006440	1.426
1.20	1.131	37.70	0.009500	0.9638	0.009161	1.043	0.009274	0.9903
1.40	1.539	43.98	0.01293	0.7081	0.01247	0.7665	0.01262	0.7276
1.60	2.011	50.27	0.01689	0.5421	0.01629	0.5869	0.01649	0.5570
1.80	2.545	56.55	0.02138	0.4283	0.02061	0.4637	0.02087	0.4401
2.00	3.142	62.83	0.02639	0.3470	0.02545	0.3756	0.02576	0.3565
2.20	3.801	69.12	0.03139	0.2867	0.03079	0.3104	0.03117	0.2946
2.50	3.976	70.69	0.03340	0.2741	0.03221	0.2968	0.03260	0.2817
2.80	6.158	87.96	0.05172	0.1770	0.04988	0.1916	0.05049	0.1819
3.00	7.069	94.25	0.05938	0.1542	0.05726	0.1669	0.05796	0.1584
3.50	9.621	110.0	0.08082	0.1133	0.07793	0.1226	0.07889	0.1164
4.00	12.57	125.7	0.1056	0.08674	0.1018	0.09390	0.1030	0.08913
4.50	15.90	141.4	0.1336	0.06853	0.1288	0.07419	0.1304	0.07042
5.00	19.63	157.1	0.1649	0.05551	0.1590	0.06010	0.1610	0.05704
5.50	23.76	172.8	0.1996	0.04588	0.1924	0.04967	0.1948	0.04714
6.00	28.27	188.5	0.2375	0.03855	0.2290	0.04173	0.2318	0.03961
6.50	33.18	204.2	0.2787	0.03285	0.2688	0.03556	0.2721	0.03375
7.00	38.48	219.9	0.3233	0.02832	0.3117	0.03066	0.3156	0.02910

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA
THE DEVELOPMENT OF A LONG DURATION IMPULSE CURRENT GENERATOR
FOR TESTING 5 kA ARRESTERS

วัชรพงษ์สถิต วีระโชติ โคลนกระโทก สราวุธ บัววนหลี และสถาพร ทองชาติ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 0-2739-2478

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์ช่วงยาว เพื่อใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัด 5 kA โดยใช้โครงสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีอยู่แล้ว จำนวน 5 ชั้น โดยในแต่ละชั้นมีตัวเก็บประจุขนาด 0.5 μF พิกัดแรงดัน 75 kV จำนวน 2 ตัว รวมทั้งสิ้นมีจำนวน 10 ตัว ได้ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์รวมเท่ากับ 5 μF ผลการจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการพบว่า เครื่องกำเนิดกระแสพัลส์ช่วงคลื่นยาวสามารถสร้างรูปคลื่นกระแสพัลส์ช่วงยาวได้ตามมาตรฐาน IEC60099-4 [1] กำหนด เพื่อนำไปทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัด 5 kA

คำสำคัญ : กระแสพัลส์ช่วงยาว, กระแสพัลส์สูงสุด, กับดักฟ้าผ่า

Abstract

This paper present the development of long duration impulse current generator for testing 5 kA arresters. By using the existing impulse voltage generator in the HV laboratory, the 5 stages of the generator were employed for constructing the long duration impulse current generator. Each stage has 2 capacitors of 0.5 μF and 75 kV rating. The total capacitance is 5 μF . From the simulation and testing in laboratory the results shows that the long duration impulse current generator is able to generate waveform according to the standard and can be used for testing on 5 kA arrester .

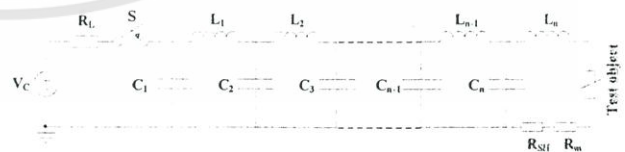
Keywords : Long duration impulse current, Impulse current, Surge Arrester

1. บทนำ

เนื่องจากการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้สายส่งแบบขึงในอากาศ อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจึงมีโอกาสดังรับแรงดันเกินเสิร์จและกระแสฟ้าผ่า จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งมีผลกระทบต่ออารมณ์ของอุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบส่งจ่าย ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ จึงจำเป็นต้องทำการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (Lighting arrester) เพื่อทำหน้าที่กำจัดแรงดันเกินเสิร์จ และกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็ว เพื่อป้องกันความเสียหายกับตัวกับดักเสิร์จเอง รวมไปถึงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ร่วมกับกับดักเสิร์จที่ใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าสามารถทำงานป้องกันอุปกรณ์ให้มาตรฐาน IEC 60099-4 [1] จึงกำหนดให้มีการทดสอบคุณสมบัติของไฟฟ้าของกับดักเสิร์จ โดยใช้รูปคลื่นกระแสพัลส์ช่วงยาว

2. หลักการและทฤษฎี

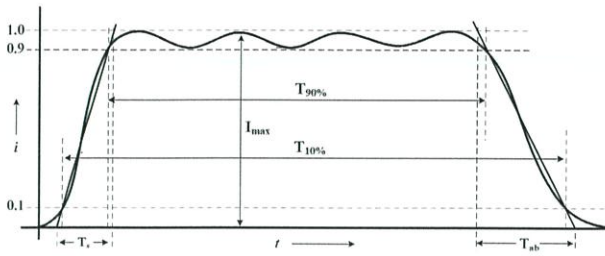
ในการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐานได้แนะนำวงจรกำเนิดกระแสพัลส์ช่วงยาวสำหรับกรทดสอบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งค่าองค์ประกอบ R L และ C มีส่วนสำคัญที่ทำให้ลักษณะรูปคลื่นกระแสที่จ่ายให้แก่วัสดุทดสอบ เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดไว้



รูปที่ 1 วงจรกำเนิดกระแสพัลส์ช่วงยาว

คุณลักษณะที่สำคัญของรูปคลื่นกระแสพัลส์ช่วงยาว ตามมาตรฐาน IEC 60099-4 [1] สำหรับใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่า แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยช่วงเวลา 90% ($T_{90\%}$) ช่วงเวลา 10% ($T_{10\%}$) และขนาดค่ายอดกระแสพัลส์ช่วงยาว (I_{max})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 ลักษณะกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐาน

สำหรับการทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดกระแส 5 kA มาตรฐาน ได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดสำหรับการทดสอบความทนได้กระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

ประเภทของ กับดักฟ้าผ่า	กระแสสูงสุด I_{max} (A)	ช่วงเวลา $T_{90\%}$ (ms)	ช่วงเวลา $T_{10\%}$ (ms)
5000 A	75	$1 \leq T_{90\%} \leq 1.2$	$T_{10\%} \leq 1.5T_{90\%}$

การคำนวณหาองค์ประกอบสำหรับสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวสามารถอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1

$$T_{90\%} = 2 \frac{n-1}{n} \sqrt{LC} \quad (1)$$

ค่ากระแสสูงสุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3

$$I_p = V_{ch} / (2R_m) \quad (2)$$

$$R_m = \sqrt{L/C} \quad (3)$$

- เมื่อ
- $T_{90\%}$ คือช่วงเวลา 90% ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์
 - n คือจำนวนชั้นของตัวเก็บประจุอิมพัลส์
 - L คือค่าความเหนี่ยวนำรวมทั้งหมดในวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว
 - C คือค่าความจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์รวมทั้งหมดในวงจร
 - R_m คือความต้านทานแมทซิ่ง
 - I_p คือกระแสสูงสุด

3. การออกแบบและประกอบสร้าง

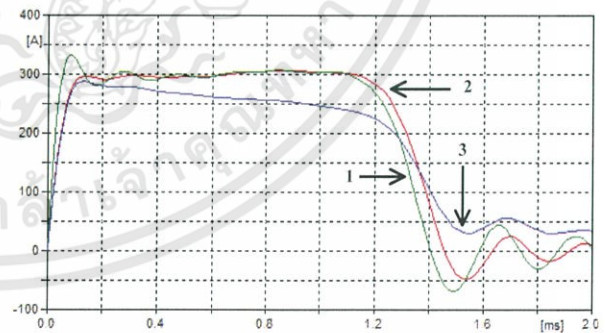
การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สร้างขึ้นโดยใช้โครงสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่มีอยู่แล้วจำนวน 5 ชั้น

โดยในแต่ละชั้นมีตัวเก็บประจุขนาด 0.5 μ F พิกัดแรงดัน 75 kV จำนวน 2 ตัว รวมทั้งสิ้นมีจำนวน 10 ตัว ได้ค่าตัวเก็บประจุอิมพัลส์รวมเท่ากับ 5 μ F แสดงดังรูปที่ 6 เพื่อใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าผ่า พิกัดสูงสุด 5 kA จากสมการที่ 1 ถึง 3 สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำรวมได้ประมาณ 80 mH ซึ่งแบ่งออกเป็น 10 ชั้น จะได้ค่าความเหนี่ยวนำในแต่ละชั้นเท่ากับ 8 mH เมื่อจ่ายแรงดันอัดประจุ 75 kV จะได้กระแสสูงสุด 300A

เมื่อนำค่าที่ได้จากการออกแบบและประกอบสร้างไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3 ซึ่งกราฟเส้นที่ 1 ได้จากการจำลอง โดยกำหนดให้ L , ถึง L_{10} มีค่าเท่ากับ 8 mH จะพบว่าค่ากระแสพุ่งพรวดที่หน้าคลื่นกระแสจะมีค่าสูงเกินไป กราฟเส้นที่ 2 ได้จากการปรับเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำ L_{10} ให้มีค่าเท่ากับ 13 mH [2] ปรากฏว่าจะทำให้กระแสพุ่งพรวด การแกว่งของคลื่นสั้น และความยาวของรูปคลื่นมีค่าลดลง ส่งผลให้ช่วงเวลา 10% ลดลงตามไปด้วย และยังทำให้ช่วงท้ายของคลื่นสั้นยกตัวสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ช่วงเวลา 90% มากขึ้น จึงทำการสร้างตัวเหนี่ยวนำตามขนาดที่ได้จำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการออกแบบสร้างตัวเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$L = 2.5 \times 10^{-4} N^2 D^2 / ((228 D / 2) + 254 I) \quad (4)$$

- เมื่อ
- D คือ ค่าความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด(mm)
 - N คือ จำนวนรอบของขดลวด
 - L คือ ความยาวของท่อ PVC ที่มีขดลวดพันอยู่(mm)

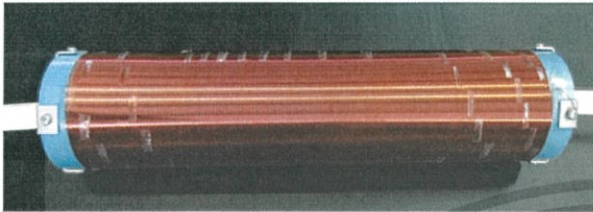


รูปที่ 3 รูปคลื่นกระแสที่ได้จากการจำลอง

ตัวเหนี่ยวนำที่ออกแบบสร้าง เป็นแบบขดลวดพันบนท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความยาว 50 เซนติเมตร ซึ่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 8 mH เมื่อนำไปต่อวงจรและทำการทดสอบผลปรากฏว่ารูปคลื่นที่ได้เป็นดังเส้นกราฟที่ 3 ซึ่งมีช่วงเวลา 90% และ 10%

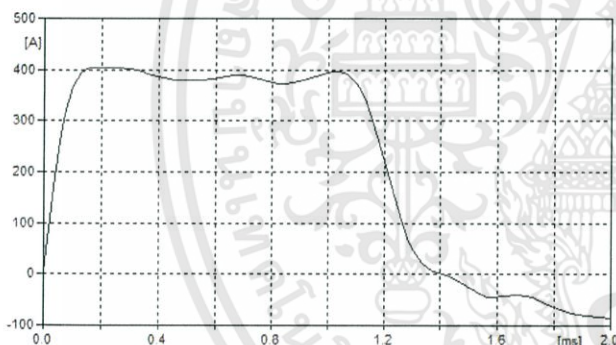
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด อันเนื่องมาจากค่าความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำที่ประกอบสร้าง พบว่าค่าความเหนี่ยวนำ 8 mH จะมีความต้านทานแฝงประมาณ 8 Ω



รูปที่ 4 ตัวเหนี่ยวนำขนาด 8 mH

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปจำลองอีกครั้ง โดยคิดผลของค่าความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ และทำการปรับค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานในการจำลองเพื่อให้ได้ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นไปตามมาตรฐาน จะได้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวตามมาตรฐานดังรูปที่ 5 และค่าองค์ประกอบของวงจร แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 5 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากการจำลอง โดยคิดผลของความต้านทานแฝงภายในตัวเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 2 ค่าคุณลักษณะของวงจร

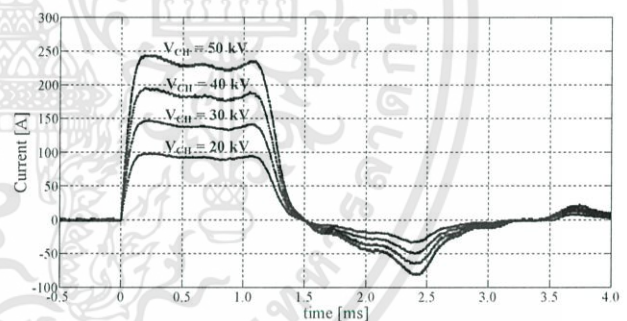
ความเหนี่ยวนำ (mH)		ความต้านทาน (Ω)	
L_1	1.0	R_1	1.0
L_2	1.2	R_2	1.2
L_3 to L_6	6.5	R_3 to R_6	6.5
L_7 to L_9	7.8	R_7 to R_9	7.8
L_{10}	13	R_{10}	13
		R_m	42

4. การทดสอบ



รูปที่ 6 วงจรทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

ในการทดสอบแรกเป็นการทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวแบบลัดวงจรหรือไม่มีกับดักฟ้าผ่าเชื่อมต่อในวงจร ซึ่งจะทดสอบที่ระดับแรงดัน 20 kV 30 kV 40 kV และ 50 kV ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 7 และค่า I_p , $T_{10\%}$ และ $T_{90\%}$ แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 7 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ในการทดสอบกรณีลัดวงจร

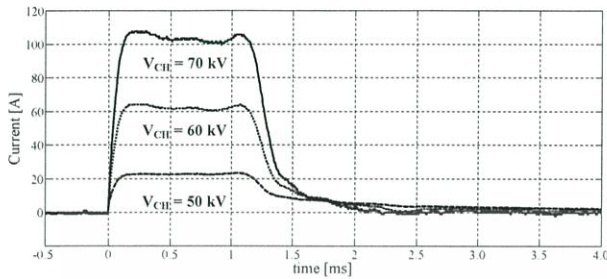
ตารางที่ 3 คุณลักษณะของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีลัดวงจร

พารามิเตอร์ของรูปคลื่น	แรงดันอัดประจุ			
	20 kV	30 kV	40 kV	50 kV
I_p	93.2 A	140.8 A	186.5 A	232.1 A
$T_{10\%}$	1.32 ms	1.32 ms	1.32 ms	1.32 ms
$T_{90\%}$	1.02 ms	1.02 ms	1.02 ms	1.02 ms

สำหรับการทดสอบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าผ่าที่กักกระแส 5 kA ซึ่งจะทดสอบที่ระดับแรงดัน 50 kV 60 kV และ 70 kV ตามลำดับ ผลการทดสอบจะได้ค่าคุณลักษณะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวเมื่อต่อกับดักฟ้าฟ้าพิคกระแสด 5 kA ดังรูปที่ 8 และค่าคุณลักษณะ I_p , $T_{10\%}$, และ $T_{90\%}$ แสดงดังในตารางที่ 4

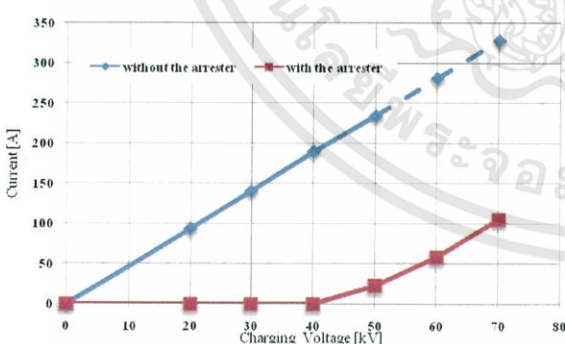


รูปที่ 8 รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว ในการทดสอบกรณีสู่ดักฟ้าฟ้า

ตารางที่ 4 ค่าคุณลักษณะของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีต่อกับดักฟ้าฟ้า

พารามิเตอร์ของรูปคลื่น	แรงดันอัดประจุ		
	50 kV	60 kV	70 kV
I_p	22.8 A	63.6 A	105.1 A
$T_{10\%}$	3.10 ms	1.82 ms	1.52 ms
$T_{90\%}$	1.02 ms	1.02 ms	1.02 ms

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอัดประจุกับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีลัดวงจรและต่อกับดักฟ้าฟ้า ในกรณีของการลัดวงจรนั้น กระแสอิมพัลส์และแรงดันอัดประจุมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น ส่วนในกรณีต่อกับดักฟ้าฟ้า จะพบว่าเริ่มมีกระแสอิมพัลส์เกิดขึ้นเมื่อแรงดันอัดประจุมีค่าประมาณ 40 kV และความสัมพันธ์เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแรงดันอัดประจุกับกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีลัดวงจรและต่อกับดักฟ้าฟ้าพิคกระแสด 5 kA

5. สรุปผลการดำเนินงาน

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในงานบทความนี้ เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบกับดักฟ้าฟ้าพิคกระแสด 5 kA

ตามที่มาตรฐาน IEC 60099-4 [1] กำหนด โดยอาศัยองค์ประกอบระหว่างตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทานเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวในกรณีต่อกับดักฟ้าฟ้า เมื่อทดสอบที่แรงดันอัดประจุ 50 kV 60 kV และ 70 kV ค่ายอดของกระแสอิมพัลส์ช่วงยาวก็จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งที่แรงดันอัดประจุ 70 kV จะได้รูปคลื่นกระแสและค่ายอดเป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนการทดสอบด้วยแรงดันอัดประจุ 50 kV และ 60 kV ค่าช่วงเวลา 10 % ($T_{10\%}$) ไม่อยู่ในมาตรฐานกำหนด เนื่องจากกระแสสูงสุด (I_{max}) มีค่าน้อยกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.พีรวิชญ์ ยุทธโกวิท รศ.ศิริวัฒน์ โทษะเกษกุล คุณปณชวีร์ ฉายศิริ คุณชชาติอริยะ ประเสริฐสังข์ และพี่ๆ ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่การทำโครงการ จนโครงการสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC 60099-4. Surge arresters - Part 2 , Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems, 2001 – 12.
- [2] Berger, Novel Observations on lightning discharges, 1967
- [3] Modrusan, M. Long-duration impulse current generator for arrester tests according to IEC recommendations, Switzerland, Haefely, 1977
- [4] สำรวช สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, กรุงเทพมหานคร, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2547
- [5] นายอรุณพงศ์ ปาติบ, การพัฒนาเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ช่วงยาว สำหรับทดสอบกับดักฟ้าฟ้าพิค 5 kA และ 2.5 kA, ปริญญาโทวิศวกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- [6] นายกิตติ ชูหอม และคณะ, การปรับปรุงและพัฒนาเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1200 kV 22.5 kJ, ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



นายวัชร พงศ์สถิต เกิดวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2533
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิบูลมังสาหาร
อำเภอพิบูลมังสาหาร จังหวัดอุบลราชธานี
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเขต 2 จ.อุบลราชธานี



นายวีรโชติ โคลนกระโทก เกิดวันที่ 1 กรกฎาคม 2533
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองก๊กพิทยาคม
อำเภอหนองก๊ก จังหวัดบุรีรัมย์
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่บริษัท คิวทีซี เอ็นเนอร์ยี่ จำกัด (มหาชน)



นายศรายุทธ บ้วนหลี่ เกิดวันที่ 27 ธันวาคม 2533
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนครสวรรค์
อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่บริษัท คิวทีซี เอ็นจิเนียริง จำกัด



นายสถาพร ทองสาดี เกิดวันที่ 12 ธันวาคม 2533
สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย
อำเภอจตุรพักตรพิมาน จังหวัดร้อยเอ็ด
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ฝึกงานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือเขต 2 จ.อุบลราชธานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้