รายงานผลการประดิษฐ์
ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์

เรื่อง

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
1000 kV 30 kJ

621.37
ส697ค

โดย

สำรวย สังข์สะอาด
วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

2538

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการสิ่งประดิษฐ์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงาน

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1000 kV 30 kJ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

สำรวย สังข์สะอาด

วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา

หน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูง

พฤษภาคม 2538

I 17342983

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

1000 kV 30 kJ

I19342983

คำนำ

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้เป็นภาคแรก หรือส่วนเริ่มต้นของโครงการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 2500 kV/μs โดยจะใช้เครื่องกำเนิด 1000 kV นี้เป็นต้นกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs จ่ายให้กับวงจรผันคลื่นตัด ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุโหลดคับปลิง สปาร์กแกป ไกสวิตช์ โดยปรับค่าองค์ประกอบความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d ให้สอดคล้องกับค่าความจุไฟฟ้าโหลดคับปลิง เพื่อให้ได้แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ที่จะนำไปศึกษาวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของวัสดุฉนวน เช่น คุณภาพของเนื้อพอร์ซเลน และสารสังเคราะห์คาสเรซิน เป็นต้น

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นี้ ใช้เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงและอาศัยประสบการณ์ ที่ทางหน่วยปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้าแรงสูงได้เคยพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 kV ประสบผลสำเร็จมาแล้ว คือ ลักษณะโครงสร้างได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4 ชั้น 400 kV 4 kJ โดยใช้ลูกถ้วยพอร์ซเลนแบบแท่ง (Post insulator) เป็นเสาฉนวนรองรับและคั่นระหว่างชั้น และท่อฉนวนพีวีซีเป็นเสายึดสปาร์กแกปทองแดงทรงกลม ส่วนการออกแบบสร้างองค์ประกอบความต้านทานแบบไร้ความเหนี่ยวนำสำหรับปรับรูปคลื่นนั้นใช้เทคโนโลยีและประสบการณ์ ที่ได้จากการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบคิท 400 kV 1000 J และองค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดอีกชิ้นหนึ่งก็คือ สปาร์กแกปทำด้วยทองแดงทรงกลม ซึ่งออกแบบสร้างได้สำเร็จก็โดยอาศัยช่างฝีมือทำได้ตามแบบที่กำหนด

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้มีคุณภาพ สมรรถภาพ และประสิทธิภาพได้ตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดทุกประการ สามารถนำไปใช้ทดสอบวัสดุหรืออุปกรณ์ที่จะนำไปใช้กับระบบไฟฟ้าสูงถึง 245 kV ซึ่งมีค่า BIL = 950 kV มีจุดเด่นที่ลักษณะโครงสร้างที่ประกอบสร้างได้ง่ายและสะดวก การปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบในกรณีที่โหลดเปลี่ยนไปทำได้ง่าย องค์ประกอบต่างๆ และส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดที่ออกแบบสร้างใช้วัสดุส่วนใหญ่ที่ผลิตได้ภายในประเทศ ยกเว้นตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ การประกอบสร้างทำเองทั้งหมด จึงทำให้ต้นทุนในการสร้างได้ในราคาถูกเพียงประมาณ 50 % ของราคาต่างประเทศ ผลที่ได้มิใช่เพียงว่าจะช่วยให้เกิดการประหยัดเท่านั้น หากแต่จะก่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีที่ทำให้มีความสามารถสร้างขึ้นเองและพัฒนาต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ นี้ ได้รับความสนับสนุนเงินทุนโครงการสิ่งประดิษฐ์จากฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณอย่างยิ่งต่อคณะกรรมการฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไว้ ณ. โอกาสนี้ และขอขอบคุณอย่างมากต่อ คุณมงคล ท้วมรุ่งโรจน์ ผู้จัดการบริษัท ศรีมงคลมาเก็ตติ้ง จำกัด ที่ช่วยรับทำชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ตามแบบกำหนดให้ได้อย่างประณีต และขอขอบคุณ คุณสาเรศ ดีภาพร และคุณพงศ์ภัทร อะสีติรัตน์ นิสิตวิศวกรรมไฟฟ้าที่ช่วยประกอบและทำการทดสอบเครื่องกำเนิดให้ และขอขอบคุณคณะผู้ร่วมงานในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ได้ให้ความช่วยเหลือในรูปแบบต่าง ๆ จนโครงการประสบผลสำเร็จตามเป้าหมาย และขอขอบคุณ คุณวิมล ประทักษ์นุกูล ที่ได้กรุณาช่วยพิมพ์รายงานให้สำเร็จเรียบร้อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อสิ่งประดิษฐ์ เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ
ชื่อผู้ประดิษฐ์ สำรวย สังข์สะอาด และ วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา
เดือนและปีที่เสร็จ พฤษภาคม 2538

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000kV 30kJ ตามหลักการวงจรของมารกซ์ 12 ขั้น ตัวเก็บประจุอิมพัลส์มีค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 50 nF ใช้ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลดเท่ากับ 1000 pF เป็นค่าที่กำหนดสำหรับคำนวณค่าองค์ประกอบความต้านทานปรับหน้าคลื่นและหางคลื่น ซึ่งทำด้วยเส้นลวดความต้านทาน Ni-Fe-Cr พันแบบไร้ความเหนี่ยวนำบนท่อฉนวนพีวีซี สปาร์กแกปทำด้วยทรงกลมทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ผลการทดสอบพบว่า เครื่องกำเนิดสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นได้ตามที่มาตรฐานกำหนดทุกประการ แม้จะมีโหลดตัวเก็บประจุถึง 2000 pF และมีประสิทธิภาพถึง 83 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NAME OF INVENT	1000 kV 30 kJ Impulse voltage generator
NAME OF INVENTOR	Samruay Sangkasaad and Weerapan Rungsivijitprapa
FINISHED DATE	May 1995

Abstract

This report presents design and construction of an impulse generator rated 1000 kV 30 kJ. The generator was constructed in accordance with Marx's circuit of 12 stages, which has the total capacitance of 50 nF. The load capacitance of 1000 pF was selected to determine the wavefront and wavetail resistors, which are made of Ni-Fe-Cr wire and wounded on PVC tubes with low inductance. The spark gaps are made of copper sphere with 15 cm in diameter. The performance of the generator was carried out. The test results showed that the generator can generate standard impulse waveform at rated voltage with load capacitance up to 2000 pF and efficiency of 83 %.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้าที่
คำนำ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อภาษาไทย	III
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	IV
สารบัญ	V
รายการรูปประกอบ	VIII
รายการตารางประกอบ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา	1
1.3 การออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านมา	2
1.4 ขอบข่ายของงานวิจัย	4
บทที่ 2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์	5
2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์	5
2.2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	7
2.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น	9
2.4 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	11
2.4.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์	11
2.4.2 ตัวเก็บประจุโหลด	11
2.4.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ	12
2.4.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น	12
2.4.5 สปาร์กแกปและไกสวิตช์	14
2.5 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์	15
2.5.1 แรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลา	15
2.5.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร	17
2.5.3 ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	17

หน้าที่

บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง 19
3.1 เงื่อนไขการออกแบบสร้างและค่าที่กำหนด 19
3.2 การออกแบบโครงสร้าง 20
3.3 การออกแบบการฉนวน 21
3.4 การออกแบบสร้างความต้านทานปรับรูปคลื่น 23
3.4.1 การคำนวณหาค่าความต้านทานปรับรูปคลื่น 23
3.4.2 การประกอบสร้างความต้านทานปรับรูปคลื่น 25
3.4.3 การประกอบติดตั้งความต้านทานปรับรูปคลื่น 25
3.5 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L 27
3.5.1 การหาค่าความต้านทาน R_L 27
3.5.2 การประกอบสร้างความต้านทาน R_L 27
3.5.3 การประกอบติดตั้งความต้านทาน R_L 28
3.6 การออกแบบสปาร์กแกปและการติดตั้ง 29
3.6.1 ขนาดสปาร์กแกปทรงกลม 29
3.6.2 การติดตั้งสปาร์กแกป 31
บทที่ 4 การทดสอบและการวิเคราะห์ผล 32
4.1 การทดสอบการฉนวนองค์ประกอบแต่ละชั้น 32
4.1.1 การทดสอบการฉนวนรองรับแต่ละชั้น 32
4.1.2 การทดสอบการฉนวนของความต้านทานปรับรูปคลื่น 33
4.2 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบความต้านทาน 34
4.3 การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ 35
4.3.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่โหลดกำหนด 1000 pF 36
4.3.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ค่าโหลดเก็บประจุต่างๆ 36
4.3.3 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดันอัดประจุต่างๆ 37
4.4 การทดสอบสร้างรูปคลื่นตัดด้วยแกป 37
4.5 การทดลองใช้งาน 39
บทที่ 5 สรุปผลและแนวคิดต่อเนื่อง 40
5.1 สรุปผล 40
5.2 แนวคิดต่อเนื่อง 41

หน้าที่

เอกสารอ้างอิง 43

ภาคผนวก 44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้าที่
1-1	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 4 kJ ที่ออกแบบสร้างขึ้นเองในปี 2530	2
1-2	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบคิท 400 kV 1000 J ที่ทำการออกแบบสร้างเองทั้งหมด (ทุนสิ่งประดิษฐ์ 2533)	3
2-1	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า	6
2-2	วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสร้างแรงดันอิมพัลส์	7
2-3	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นตามวงจรมารกซ์	10
2-4	การพันความต้านทานแบบปลอดความเหนี่ยวนำ	13
2-5	สปาร์กแกปมีไกสวิตช์	14
2-6	ลาพลาสทรานสฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน	15
2-7	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอกซ์โปเนนเชียลสองเทอม	16
2-8	เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์	18
3-1	การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์บนถาดเหล็ก	20
3-2	โครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ	21
3-3	การฉนวนความต้านทานจำกัดกระแส และความต้านทานปรับรูปคลื่น	23
3-4	การพันความต้านทานปรับรูปคลื่น	26
3-5	การประกอบติดตั้ง R_d, R_e	26
3-6	การยึดตัวความต้านทานย่อยบนโครงเบกะไลท์ 4 ขา	29
3-7	การประกอบยึดความต้านทาน R_L เข้ากับเสาฉนวนด้วยสปริงล็อกก้ามปู	30
3-8	สปาร์กแกปทำด้วยทรงกลมทองแดง 15 ซม ϕ ยึดอยู่บนเสาฉนวนพีวีซี 4 นิ้ว ϕ	31
4-1	แสดงวงจรทดสอบการฉนวนของ R_d และ R_e	33
4-2	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้าง 1000 kV 30 kJ	35
4-3	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 358 kV ที่ได้จากเครื่องกำเนิดที่ออกแบบสร้าง	36
4-4	รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจากแรงดันอัดประจุ 1000 kV โหลด 1000 pF	38
4-5	การทำให้เกิดรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นที่แรงดันอัดประจุประมาณ 300-400 kV	38
4-6	การทดลองใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างทำการทดสอบหาค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Cl.52-4 จำนวน 7 ลูก	39
5-1	วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน	42

รูปที่ หน้าที่

ผ-1 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ 45
ผ-2 รายละเอียดด้านหน้าและฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ 46

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการตารางประกอบ

ตารางที่ หน้าที่

2-1 ค่าแรงดันทดสอบ BIL 9

4-1 อุณหภูมิและความต้านทานของ R_d และ R_e หลังจากดีสชาร์จที่โหลดเก็บประจุที่จำนวนครั้งต่างๆ กันที่แรงดันอิมพัลส์ที่โหลด 100 kV 34

4-2 แรงดันอิมพัลส์ที่โหลดเก็บประจุต่างๆ จากเครื่องกำเนิดที่มี C_s = 50 nF, R_e = 1380 Ω และ R_d ปรับค่าได้ตั้งแต่ 408 Ω ถึง 558 Ω 37

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

แรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิด เป็นแรงดันที่สร้างขึ้นให้มีรูปคลื่นเลียนแบบจากรูปคลื่นแรงดันที่เกิดจากฟ้าผ่า หรือการทำงานของสวิตช์ตัดตอน เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยปรากฏการณ์เกี่ยวกับฟ้าผ่า หรือแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่าย ใช้วิจัยเพื่อพัฒนาวัสดุฉนวนและการฉนวนอุปกรณ์และระบบไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายพลังไฟฟ้าที่ดีจะต้องเป็นระบบที่มีเสถียรภาพและความเชื่อมั่นได้สูง ไม่มีความผิดพร่องหรือมีน้อยที่สุด หรือกล่าวง่ายๆ ก็คือจะไม่เกิดไฟฟ้าดับหรือเกิดแต่น้อยที่สุด การฉนวนของอุปกรณ์และของระบบไฟฟ้าถือเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งประการหนึ่ง ที่จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพและความเชื่อมั่นได้สูง ปลอดภัยจากความผิดพร่องอันเนื่องมาจากความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันเกินหรือแรงดันอิมพัลส์ การที่จะทำให้เกิดความมั่นใจในคุณภาพ และความคงทนต่อแรงดันของฉนวนในขณะใช้งานอยู่ในระบบได้นั้น จำเป็นต้องมีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ก่อนนำไปติดตั้งใช้งานในระบบ

1.2 ที่มาของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยกำลังพัฒนาการผลิตและส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้เพียงพอกับความต้องการที่ได้ขยายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดความต้องการด้านวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่นำไปใช้ในระบบส่งจ่ายมากขึ้น ปัจจุบันได้มีโรงงานผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 115 kV ได้แล้วหลายชนิด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังตั้งแต่ 50,000 kVA ขึ้นไป เคเบิลแรงสูง XLPE 115 kV และมีแนวโน้มที่จะขยายเป็น 230 kV ในอนาคตอันใกล้นี้ อุปกรณ์ที่ใช้กับระบบ 115 kV จำเป็นต้องทดสอบความคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (BIL) 550 kV และสำหรับหาค่าวาบไฟตามผิว (flashover) หรือเบรกดาวน์ถึง 750 kV วัสดุและอุปกรณ์แรงสูงเหล่านี้จำเป็นต้องผ่านการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานกำหนด [1] นั่นคือต้องมีเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งปัจจุบันยังต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศด้วยราคาที่แพงมาก ทางหน่วยปฏิบัติการวิจัยจึงคิดออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV ขึ้นเอง

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาดแรงดัน 1000 kV นี้ ยังไม่เคยมีการผลิตหรือออกแบบสร้างขึ้นในประเทศไทย เครื่องที่จะสร้างขึ้นนี้ถือว่าเป็นต้นแบบ ที่จะช่วยให้สามารถพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดันระดับนี้และสูงขึ้นต่อไปในอนาคต โดย

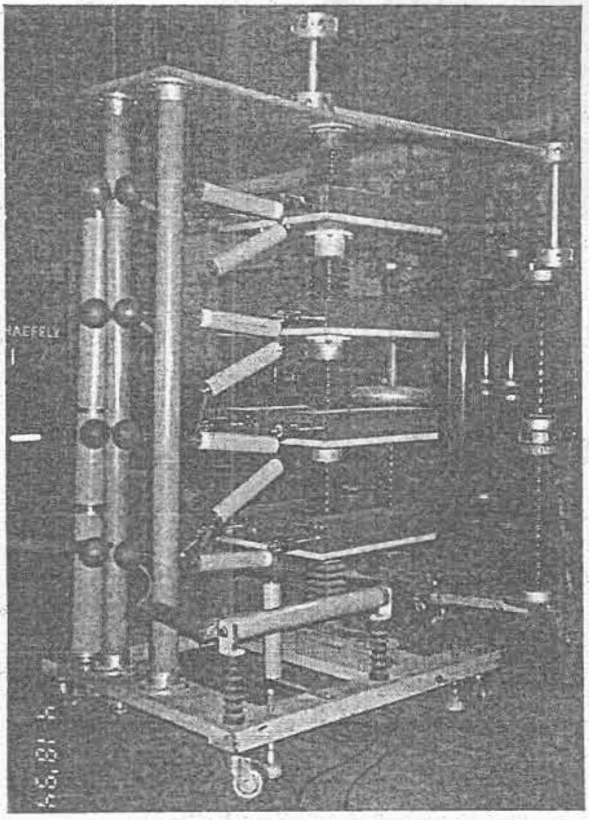
พยายามใช้วัสดุโครงสร้างที่ผลิตได้ในประเทศเป็นส่วนใหญ่ เพื่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีและลดต้นทุนการทำเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV นี้จะนำไปใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 2500 kV/μS เพื่อการศึกษาวิจัยและพัฒนาลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน การวิเคราะห์ปัญหาของ EMP (Electromagnetic Pulse)

1.3 ผลงานการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านมา

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV นี้ จะใช้ทฤษฎีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเป็นพื้นฐาน และอาศัยประสบการณ์ และเทคโนโลยีที่ได้จากการที่เคยออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มาแล้ว 2 โครงการ คือ

1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 4 kJ

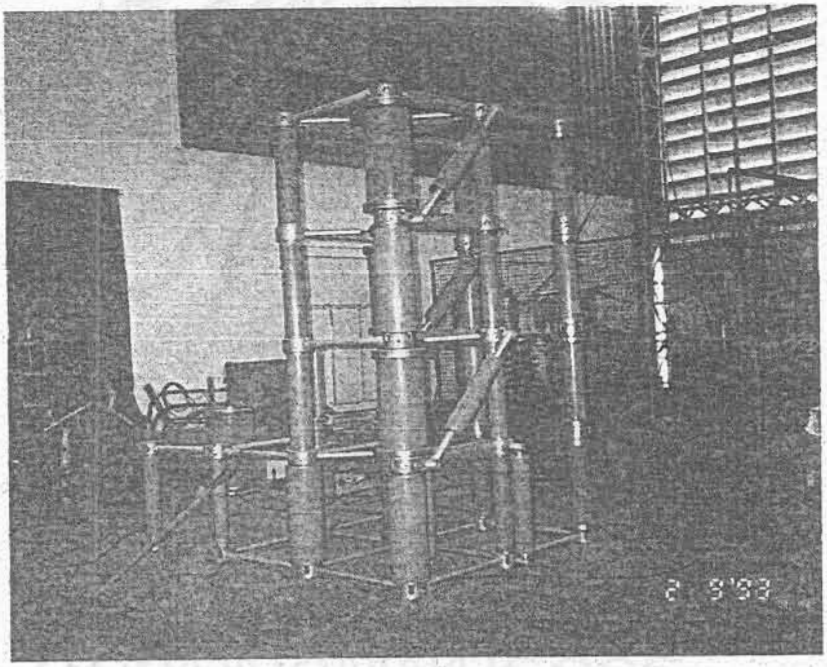
ในปี 2530 ผู้วิจัยได้เคยออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 kV 4 kJ เพื่อแสดงในงานนิทรรศการจุฬาวิชาการ 2530 ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ และความต้านทานแรงสูงที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ แต่สปาร์กแกปและโครงสร้างได้ทำการออกแบบสร้างขึ้นเอง ต่อมาได้พัฒนาออกแบบสร้างตัวความต้านทานขึ้นเองได้เป็นผลสำเร็จ สามารถใช้งานเพื่อการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการได้ดีอยู่ถึงปัจจุบัน ดังในรูปที่ 1-1 [2]



รูปที่ 1-1
เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 4 kJ
ที่ออกแบบสร้างขึ้นเองในปี 2530

2) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบคิท 400 kV 1000 J

ปี 2534 ผู้วิจัยเคยได้รับทุนสิ่งประดิษฐ์โครงการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบคิท 400 kV 1000 J โดยทำการออกแบบสร้างองค์ประกอบเองทั้งหมด ได้แก่ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ ตัวเก็บประจุโหลด โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ สปาร์กแกป ส่วนประกอบโครงสร้าง ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง 100 kV ดังแสดงในรูปที่ 1-2 ทั้งนี้ได้อาศัยประสบการณ์จากผลงานการวิจัยออกแบบสร้างอุปกรณ์ชุดประกอบสร้างแรงดันสูง 100 kV [3] เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์เพื่อการศึกษาภาคปฏิบัติการทดลอง และการวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงได้เป็นอย่างดีจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 1-2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบคิท 400 kV 1000 J
ที่ทำการออกแบบสร้างเองทั้งหมด (ทุนสิ่งประดิษฐ์ 2533)

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ ที่ออกแบบสร้างในโครงการนี้จะมีลักษณะทำนองเดียวกับเครื่องกำเนิด 400 kV 4 kJ ดังในรูปที่ 1-1 โดยแบ่งออกเป็น 10 ขั้นๆ ละ 100 kV ซึ่งจะต้องใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ขนาด 1.2 μF 50 kV จำนวน 20 ตัว ส่วนองค์ประกอบความต้านทานปรับรูปคลื่นก็อาศัยประสบการณ์จากการทำความต้านทานไร้ความเหนี่ยวนำในโครงการเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบคิท 400 kV 1000 J ดังรูปที่ 1-2

1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย

เพื่อออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50μS ขนาด 1000 kV 30 kJ โดยใช้วัสดุที่ผลิตได้ภายในประเทศให้มากที่สุด ยกเว้นตัวเก็บประจุแรงสูงของเครื่องกำเนิดจะเป็นผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศ เมื่อประกอบสร้างเสร็จแล้วก็ทดลองใช้งานทดสอบวัสดุและอุปกรณ์แรงสูงในห้องปฏิบัติการ ทำการวิเคราะห์ผลของการออกแบบสร้าง แล้วเขียนรายงาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
การสร้างแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ โดยทั่วไปหมายถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า เรียกรูปคลื่นว่า 1.2/50 μS หรือแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิ่ง เรียกรูปคลื่นว่า 250/2500 μS แรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการสร้างในที่นี้ก็คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานจะกำหนดลักษณะของรูปคลื่น ค่าขนาดแรงดันและระบุว่าเป็นขั้วบวกหรือขั้วลบ คือมีค่าเป็นบวกหรือลบเมื่อเทียบกับดิน

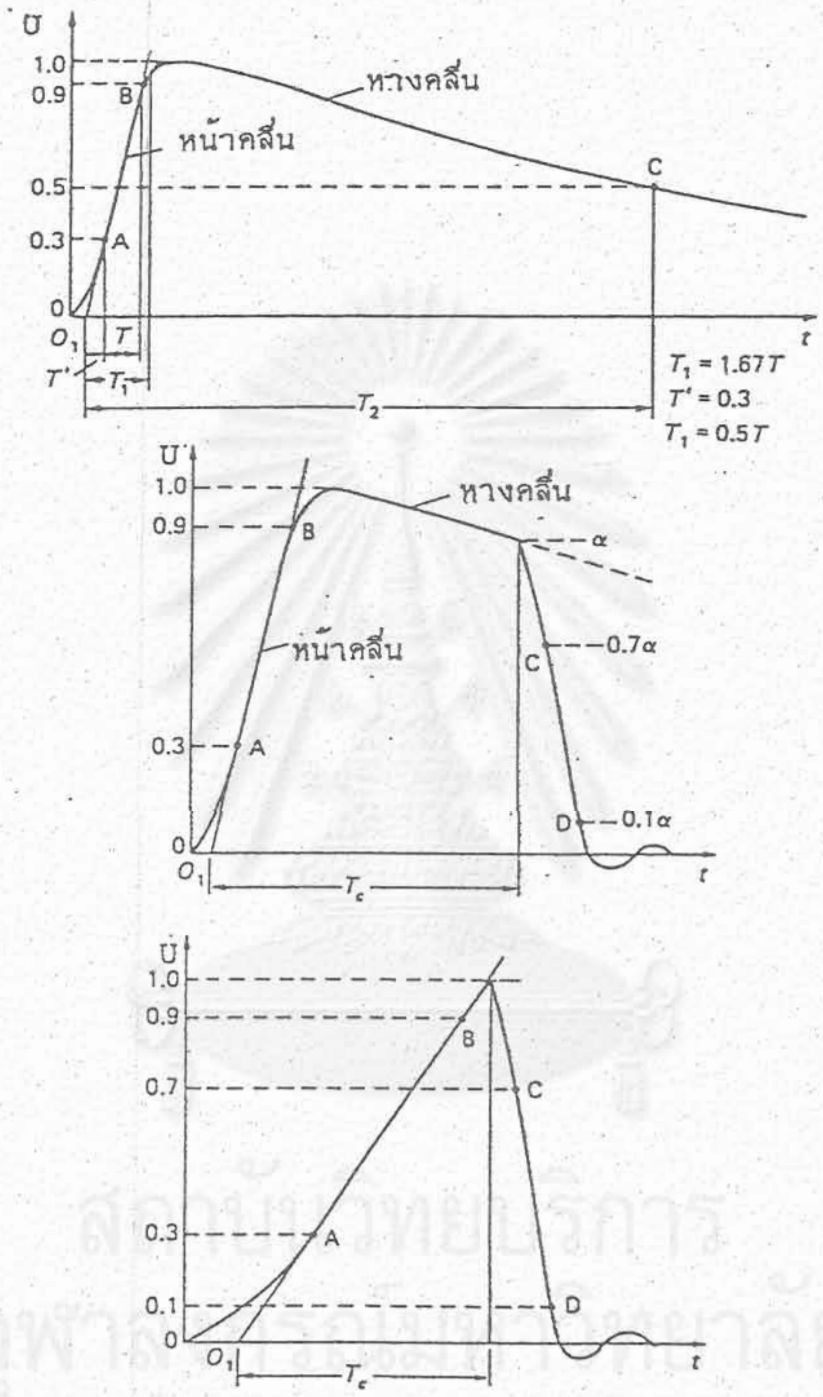
ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะกำหนดด้วย

- เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 คือ ช่วงเวลาที่แรงดันเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงค่ายอด
- เวลาช่วงหางคลื่น T_2 คือช่วงเวลานับจากแรงดันเริ่มต้นจากศูนย์ผ่านค่ายอด แล้วขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด

แรงดันอิมพัลส์ที่ค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่ายอดแล้วค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนเป็นศูนย์ เรียกแรงดันอิมพัลส์นี้ว่า รูปคลื่นเต็ม (full wave) ดังรูปที่ 2-1 a เมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มเข้าไปที่วัสดุทดสอบ ถ้าการฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นทนต่อแรงดันไม่ได้ ก็จะเกิดเบรกดาวน์หรือวาบไฟตามผิว ก็จะเกิดการยุบตัวของแรงดัน เกิดเป็นรูปคลื่นตัด (chopped wave) ซึ่งอาจเกิดคลื่นตัดขึ้นที่ส่วนหางหรือส่วนหน้าของรูปคลื่นก็ได้ ดังในรูปที่ 2-1 b และ c ตามลำดับ ลักษณะของรูปคลื่นตัดจะมีข้อกำหนดเพิ่มเติมก็คือ เวลาช่วงคลื่นตัด (chopped time) T_c

ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะสร้างแรงดันอิมพัลส์ให้มีรูปคลื่น T_1/T_2 ได้ 1.2/50 μS พอดี หรือขนาดแรงดันได้แม่นยำตามที่กำหนด มาตรฐานจึงยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้บ้าง นั่นคือ มาตรฐานจะกำหนดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เวลาหางคลื่น T_2 และขนาดค่ายอด U_m ไว้ดังนี้คือ [4]

- เวลาช่วงหน้าคลื่น $T_1 = 1.2\ \mu S \pm 30\ \%$
- เวลาช่วงหางคลื่น $T_2 = 50\ \mu S \pm 20\ \%$
- ค่ายอดแรงดัน $U_m \pm 3\ \%$



รูปที่ 2-1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

a) รูปคลื่นเต็ม

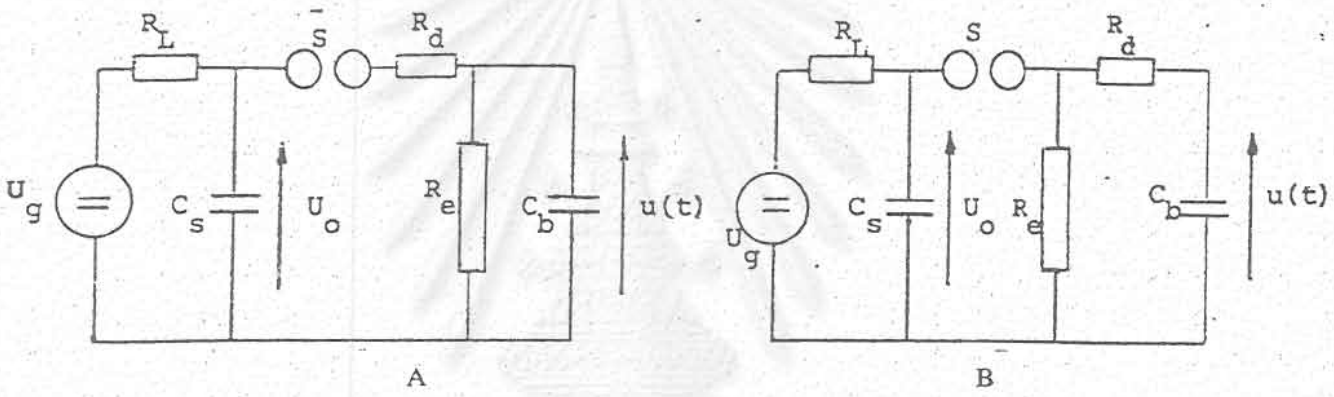
b) รูปคลื่นตัดช่วงหางคลื่น

c) รูปคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่น

ขนาดของออสซิลเลชันเกิดขึ้นในบริเวณยอดคลื่นยอมให้ ± 5 % ของค่ายอด ถ้าเกิดในช่วงหน้าที่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของค่ายอด ยอมให้ขนาดออสซิลเลชันได้ ± 25 % ของค่ายอด

2.2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

การสร้างแรงดันอิมพัลส์จะอาศัยหลักการของวงจรทรานเซียนต์ RC โดยการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุจนถึงค่าแรงดันที่ต้องการ แล้วปล่อยให้ดีสชาร์จประจุผ่านวงจร RC ที่สามารถปรับค่าคงตัวเวลาให้มีรูปคลื่นตามต้องการได้ วงจรพื้นฐานที่นิยมใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วยองค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 2-2 [5]



รูปที่ 2-2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดสร้างแรงดันอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร

U_g = แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์

U_o = แรงดันอัดประจุกระแสตรง

C_s = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

C_b = ตัวเก็บประจุโหลด (รวมทั้งความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดแรงดันและอื่นๆ)

R_L = ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

R_d = ความต้านทานหน่วง เป็นตัวปรับหน้าคลื่น T_1

R_e = ความต้านทานปล่อยประจุ เป็นตัวปรับหางคลื่น T_2

$U(t)$ = แรงดันอิมพัลส์ที่ได้แปรไปตามเวลา

S = สปาร์กแกป เป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุ และทำหน้าที่เป็นไกสวิตช์ให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ดีสชาร์จประจุให้กับโหลด

หน้าที่ของส่วนประกอบในวงจร คือ ตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง U_g เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ซึ่งมีค่าแรงดันที่กำหนด U_o โดยให้ผ่านความต้านทาน R_L ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุเร็วหรือช้า ค่าแรงดันอัดประจุได้ U_o นี้ขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์กแกป S ที่ปรับได้ เพื่อให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้มากน้อยตามต้องการ สปาร์กแกปนอกจากจะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันอัดประจุแล้ว ยังทำหน้าที่เหมือนกับสวิตช์หรือไกสวิตช์ (Trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_s ทำการปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดสปาร์กในช่องสปาร์กแกปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว คือ ใช้เวลาน้อยกว่า 100 μS เมื่อเกิดสปาร์กที่แกป S แรงดันอัดประจุ U_o จะคร่อม R_d และ C_b ประจุจะถ่ายทอดไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_b การถ่ายทอดหรือปล่อยประจุนี้จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ R_d และ C_b นับเป็นเวลาช่วงหน้าคลื่น ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่า R_d และ C_b นี้จะเป็นตัวกำหนดเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 เมื่อถ่ายประจุให้ C_b จนเต็มที่แล้วประจุนี้ก็จะดีสชาร์จหรือปล่อยประจุออกไปสู่ R_e จึงกล่าวได้ว่า R_e ทำหน้าที่ควบคุมเวลาช่วงหางคลื่น T_2 คือถ้า R_e มีค่าสูง T_2 ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย ค่าคงตัวเวลาคายประจุเท่ากับ C_sR_e

ค่ายอดแรงดันที่จ่ายออกที่ปลายแรงสูง U จะน้อยกว่าแรงดันอัดประจุ U_o เพราะประจุจะกระจายให้กับ C_s และ C_b ฉะนั้นอัตราส่วนของ U ต่อ U_o จะน้อยกว่า 1 เสมอ และเรียกอัตราส่วนนี้เป็นประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ นั่นคือ

$$\text{ประสิทธิภาพของวงจร } \eta = \frac{U}{U_o} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b}$$

ฉะนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของวงจรมีค่าสูงๆ และให้ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนดควรเลือกให้ C_s มีค่าสูงกว่าโหลด C_b มากๆ โดยทั่วไปจะให้ $C_s \geq 10\, C_b$ [5]

ข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปจะกำหนดด้วย

- แรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- แรงดันอัดประจุรวมทั้งหมด U_o
- ค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด C_s
- พลังงานที่กำหนดของเครื่องกำเนิด
- อัตราการดีสชาร์จจำนวนครั้งต่อนาที
- รูปคลื่นแรงดัน

ค่าแรงดันที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันทดสอบ BIL ตามมาตรฐานกำหนด ตามระดับแรงดันของระบบที่จะนำเอาอุปกรณ์ไปใช้ ดังในตาราง 2-1 [1]

ตารางที่ 2-1 ค่าแรงดันทดสอบ BIL

แรงดันระบบ kV_{rms}	24	36	52	72.5	123	145	170	245
BIL kV	125	170	250	325	450	650	750	1050

พลังงานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า C_s และแรงดันอัดประจุ U_o ซึ่งค่าพลังงานคำนวณได้จากสมการ

$$W = 1/2\ C_s\ U_o^2$$

$$= 1/2\ C_s\ U_o^2 \times 10^{-3} \quad kJ$$

เมื่อ W คือ พลังงานอัดประจุรวมเป็น kJ

C_s คือ ความจุไฟฟ้ารวมของตัวเก็บประจุเป็น μF

U_o คือ แรงดันอัดประจุรวมเป็น kV

2.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น

จากวงจรพื้นฐานของการกำเนิดสร้างแรงดันอิมพัลส์ในรูปที่ 2-1 ปกติจะออกแบบให้สร้างแรงดันได้ถึง 200 kV ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการทดสอบ BIL ของอุปกรณ์ที่ใช้กับแรงดันระบบ 52 kV หรือสูงกว่า ดังค่า BIL ที่แสดงในตารางที่ 2-1 ค่าแรงดันอิมพัลส์สูงๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ตามหลักการของวงจรมารกซ์ (Marx's circuit) [5] ดังในรูปที่ 2-3

ในวงจรรูปที่ 2-3 ตัวเก็บประจุ C'_s แต่ละขั้นจะได้รับการอัดประจุในลักษณะที่ต่อกันแบบขนานด้วยแรงดัน U'_o เมื่อส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไกสวิตช์ทำให้สปาร์กแกปของขั้นแรกทำงานก่อน สปาร์กแกปขั้นต่อๆ ไปก็จะเกิดสปาร์กตามลำดับ เป็นผลให้ตัวเก็บประจุ C'_s ทั้งหมดต่อกันแบบอนุกรม และได้แรงดันสูงเป็นทวีคูณของจำนวนขั้น ถ้าเครื่องกำเนิดมี n ขั้นก็จะได้แรงดันสูงจ่ายออกเป็น

$$U_o = nU'_o$$

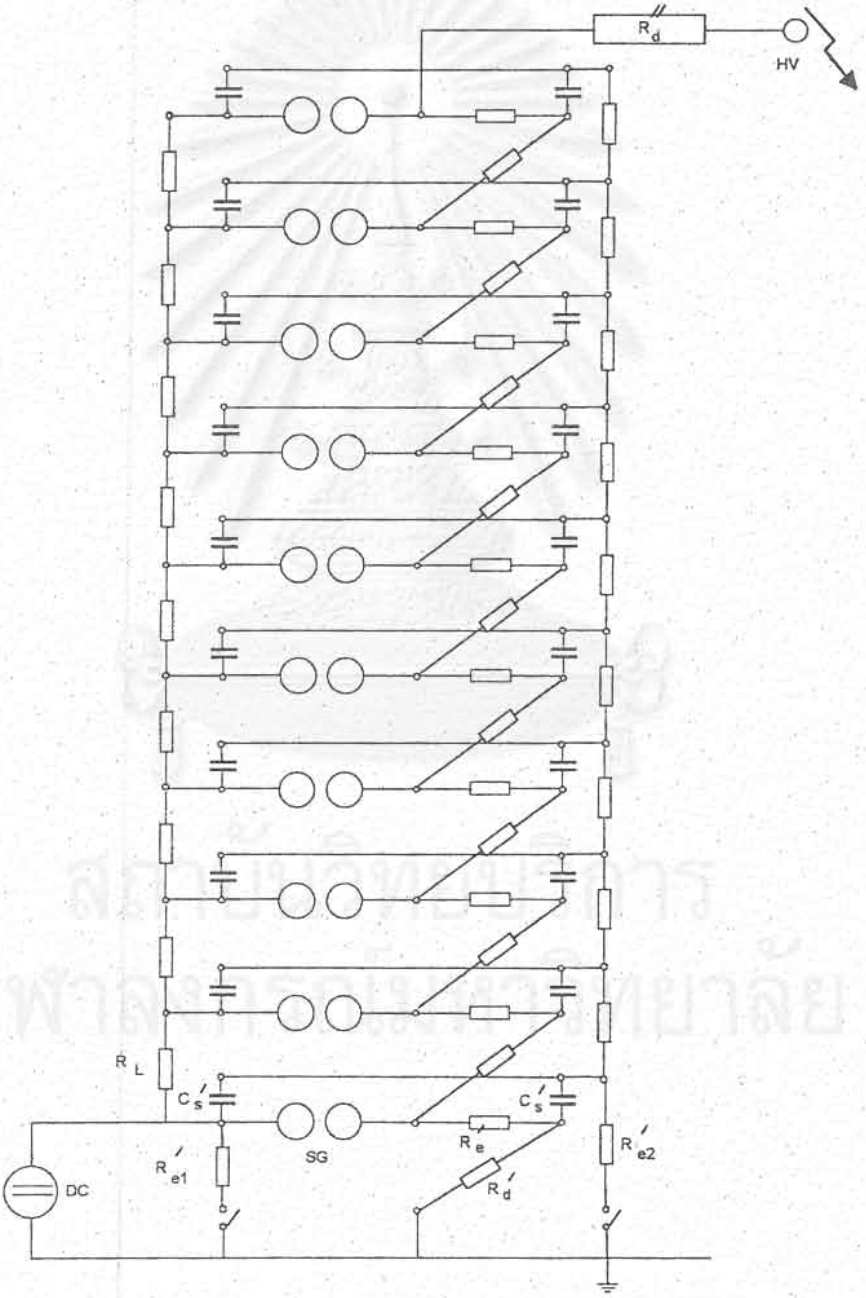
ส่วนค่าความจุไฟฟ้ารวมของ $C_s = C'_s / n$

และความต้านทานขององค์ประกอบรวม $R_d = nR'_d$ และ $R_e = nR'_e$

เมื่อ U'_o คือ แรงดันอัดประจุแต่ละขั้น

C'_s คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละขั้น

R'_d ,R'_e คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่นและหางคลื่นแต่ละขั้นตามลำดับ



รูปที่ 2-3 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นตามวงจรมารกซ์

2.4 องค์ประกอบของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะประกอบด้วย องค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s

2) ตัวเก็บประจุโหลด C_b

3) ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L

4) ความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d และความต้านทานปรับหางคลื่น R_e

5) สปาร์กแกปและไกสวิตช์

2.4.1 ตัวเก็บประจุอิมพัลส์

ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ทำหน้าที่เก็บพลังงานไว้ในรูปสนามไฟฟ้า โดยการอัดประจุด้วยแรงดันสูงกระแสตรง แล้วดีสชาร์จพลังงานออกไปอย่างรวดเร็วในเวลาสั้นๆ แบบทรานเซี้ยนต์ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์จึงต้องเป็นประเภทที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ หรือไม่มีเลยก็ยิ่งดี เพื่อป้องกันมิให้รูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้นเกิดออสซิลเลชัน

ค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะต้องให้ใหญ่พอที่จะสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน (1.2/50 μS) ได้ โดยปกติค่า C_s จะต้องมีค่าอย่างน้อย 10 เท่า ของตัวเก็บประจุโหลด C_b [5] นั่นคือ

$$C_s \geq 10\, C_b$$

ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด C_b หมายถึง ผลรวมของความจุไฟฟ้าวัสดุ และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ปลอกฉนวนนำสาย หม้อแปลงไฟฟ้าโวลเตจดิไวเดอร์ รวมกับตัวเก็บประจุที่ต่อเพิ่มเติมเข้าไปเพื่อปรับรูปคลื่นให้ได้ตามมาตรฐาน

2.4.2 ตัวเก็บประจุโหลด

ตัวเก็บประจุโหลด C_b มีส่วนสำคัญในการปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหน้าคลื่น แต่จะมีผลน้อยต่อหางคลื่น ในกรณีที่วัสดุทดสอบมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ และค่าความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d ก็มีค่าต่ำ เวลาหน้าคลื่น T_1 ก็อาจจะน้อยกว่าค่ามาตรฐานกำหนด จำเป็นต้องปรับหน้าคลื่นให้ยาวขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยเพิ่มค่า C_b เข้าไปที่โหลด คือต่อขนานเข้ากับวัสดุทดสอบ ทั้งนี้เพราะว่าค่าเวลาหน้าคลื่น T_1 จะแปรตามค่า C_b ฉะนั้นในทาง

ปฏิบัติจึงควรต้องมีตัวเก็บประจุโหลดหลายๆ ค่าเพื่อให้สามารถใช้ช่วยปรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ได้ในช่วงกว้างตามการเปลี่ยนแปลงค่า ความจุไฟฟ้าของวัสดุหรืออุปกรณ์ทดสอบดังกล่าวข้างต้น

2.4.3 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

การดีสชาร์จเป็นสภาวะทรานเซี้ยนต์ มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นก็คือเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีผลกระทบต่อการฉนวนขององค์ประกอบเครื่องกำเนิด ในด้านความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้าอันจะทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลง ถ้าหากให้เกิดการดีสชาร์จอย่างต่อเนื่องถี่เกินไปโดยไม่มีการเว้นช่วง การดีสชาร์จเร็วก็หมายถึงการชาร์จหรือการอัดประจุเร็วด้วยเช่นกัน ฉะนั้นจึงต้องไม่ใช้เครื่องกำเนิดให้ดีสชาร์จถี่จนเกินไป การจำกัดอัตราการอัดประจุอาจทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L ซึ่งต่ออนุกรมคั่นอยู่ระหว่างตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s ให้มีค่าสูงมากพอ เพื่อให้กระแสอัดประจุมีค่าต่ำ คือ ไม่เกินค่าพิกัดกระแสของตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง I_o ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ du/dt ไม่ควรเร็วเกินไป ค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ว่า

$$i = C.du/dt$$

ฉะนั้นค่า R_L อาจหาได้จาก $R_L \geq u/i$

และมีความคงทนต่อแรงดันอัดประจุของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ได้ เพราะความต้านทาน R_L จะต้องรับแรงดันเท่ากับแรงดันอัดประจุที่กำหนดเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็มแล้ว นอกจากต้องเลือกค่าโอห์มและแรงดันแล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของการอัดประจุด้วย กล่าวคือความต้านทาน R_L ต้องทนต่อกระแสอัดประจุสูงสุดได้

2.4.4 ความต้านทานปรับรูปคลื่น

ความต้านทานปรับรูปคลื่นในที่นี้หมายถึงความต้านทาน R_d และ R_e ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2-2 ซึ่ง R_d มีผลต่อเวลาหน้าคลื่น T_1 กล่าวคือ T_1 จะแปรตามค่า R_d และเช่นเดียวกัน R_e มีผลต่อเวลาหางคลื่น T_2 นั่นคือ T_2 จะแปรตามค่า R_e

คุณสมบัติของความต้านทาน R_d และR_e จะต้องทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ รับพลังงานดีสชาร์จ ทรานเซี้ยนต์ที่เกิดในเวลาสั้นๆได้ โดยไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงเกินไป โดยทั่วไปมัก

จะใช้ความต้านทานที่ทำด้วยลวดความต้านทาน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจคำนวณได้จากสมการของพลังงานที่ผ่านความต้านทาน [5] คือ

$$W = mc\Delta T$$

เมื่อ W คือพลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)

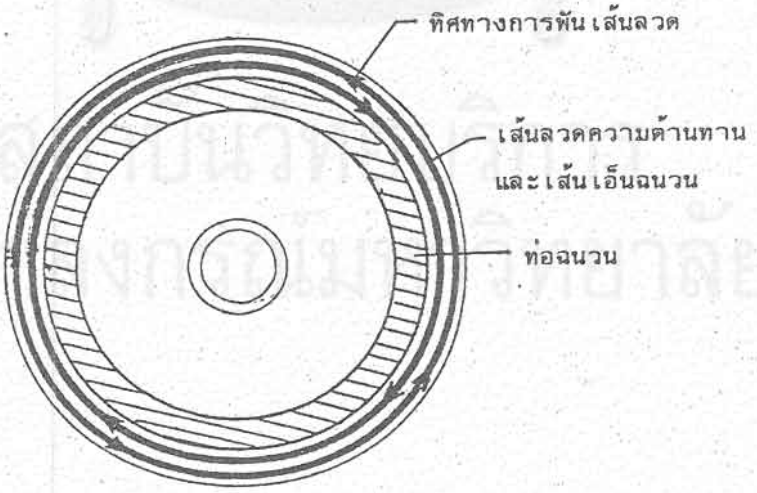
m คือมวลสารของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน (kg)

c คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg^{o}K)

ΔT คืออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น ^{o}C

สิ่งสำคัญประการหนึ่งของการทำความต้านทาน R_d และ R_e ก็คือจะต้องเป็นความต้านทานปลอดความเหนี่ยวนำหรือมีแต่น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อมิให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

ในทางปฏิบัติมักใช้เส้นลวดความต้านทานที่สามารถทนความร้อนได้สูง พันเป็นตัวความต้านทาน โดยให้ลักษณะการพันสวนทางกัน เพื่อให้กระแสที่ไหลในเส้นลวดความต้านทานที่พันอยู่ใกล้กันไหลสวนทางกัน จะทำให้เส้นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสนั้นหักล้างกัน ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้วิธีพันสวนทางกัน โดยชั้นเดียวกันจะพันเวียนไปทางเดียวกัน ชั้นต่อไปจะพันสวนทางกับชั้นก่อน ซึ่งจะได้ความต้านทานปลอดความเหนี่ยวนำ ใช้สร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ประสบผลสำเร็จมาแล้ว [6] ดังแสดงในรูปที่ 2-4

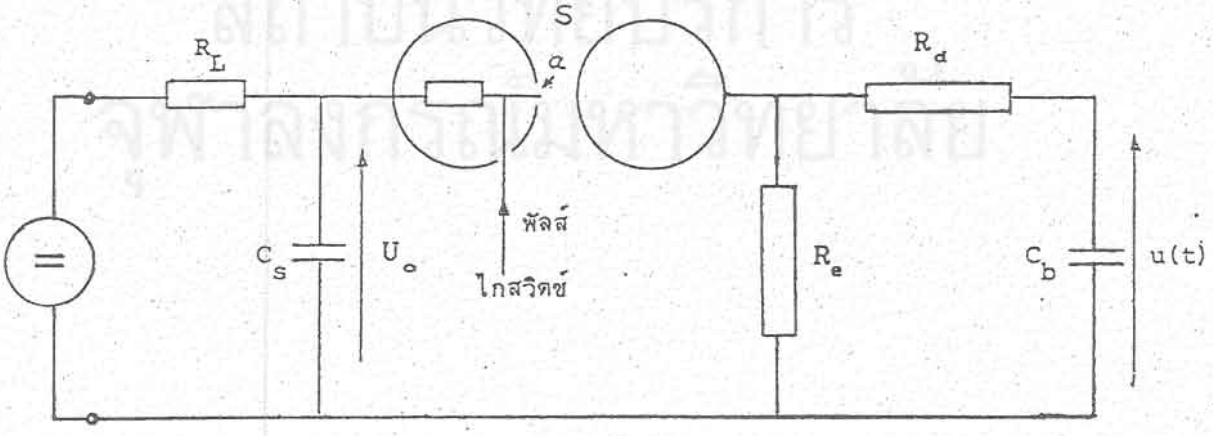


รูปที่ 2-4 การพันความต้านทานแบบปลอดความเหนี่ยวนำ

2.4.5 สปาร์กแกปและไกสวิตช์

แรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบ หรือการศึกษาวิจัยจะต้องสร้างให้มีขนาดเท่าเดิมกี่ครั้งก็ได้ มาตรฐาน IEC ได้กำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 3 % [4] การควบคุมให้ขนาดแรงดันเท่าเดิมดังกล่าวทำได้โดยการใช้พัลส์ไกสวิตช์บังคับ ให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เริ่มต้นดีสชาร์จที่แรงดันอัดประจุที่กำหนด พัลส์ไกสวิตช์จะเป็นตัวทำให้เกิดสปาร์กที่แกปช่วย (auxiliary gap) ซึ่งเป็นแกปแคบๆ ช่องแกปประมาณ 2-3 มิลลิเมตร อยู่ที่ด้านหนึ่งของสปาร์กแกปคู่แรกของเครื่องกำเนิดดังรูปที่ 2-5 แกปช่วยนี้จะได้รับสัญญาณพัลส์ทำให้เกิดสปาร์กขึ้นในแกปช่วยก่อน ผลของการเกิดสปาร์กในแกปช่วยนี้ทำให้เกิดไอออไนเซชันมีอิเล็กตรอนอิสระขึ้นในสปาร์กแกปคู่แรก และเกิดดีสชาร์จที่สปาร์กแกปคู่นั้น เป็นผลให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวแรกต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ตัวที่สอง สปาร์กแกปคู่ที่สองจึงได้รับแรงดันเป็นสองเท่าของแรงดันอัดประจุ และเกิดสปาร์กเป็นลำดับถัดมา ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นแก่สปาร์กแกปคู่ถัดไปตามลำดับ จนเกิดดีสชาร์จแกปคู่สุดท้ายหรือคู่บนสุด เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ก็จะดีสชาร์จพลังงานที่เก็บไว้ออกไปสู่โหลด ได้แรงดันอิมพัลส์ตามที่ต้องการ ฉะนั้นการใช้ไกสวิตช์ช่วยเริ่มต้นจุดสปาร์กจึงทำให้สามารถกำหนดเวลา หรือคาดหมายการเริ่มต้นดีสชาร์จของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ และค่าแรงดันที่สร้างก็มีค่าเท่าเดิม หรือเลือกขนาดได้ตามต้องการ และยังช่วยให้สามารถบังคับออสซิลโลสโคปเริ่มต้นบันทึกภาพรูปคลื่นอิมพัลส์ U(t) ได้อีกด้วย

สัญญาณพัลส์ที่ใช้สำหรับทำให้เกิดสปาร์กในแกปช่วยนั้น โดยทั่วไปจะใช้หลอดไธราตรอน (Thyratron) ประกอบวงจรอิเล็กทรอนิกส์สร้างพัลส์ แล้วใช้หม้อแปลงเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นเป็นประมาณ 10 กิโลโวลต์ ป้อนแรงดันพัลส์นี้ให้กับแกปช่วยโดยคับปลิงผ่านตัวเก็บประจุแรงสูง

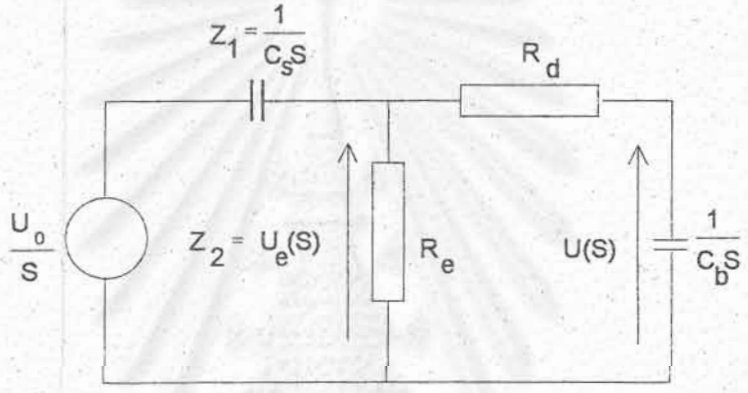


รูปที่ 2-5 สปาร์กแกปมีไกสวิตช์

2.5 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

2.5.1 แรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลา

จากวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันอิมพัลส์วงจร B ในรูปที่ 2-3 เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s ด้วยแรงดันอัดประจุ U_o และเกิดสปาร์กที่สปาร์กแกป S จะทำให้ C_s ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์อาจใช้ Laplace transform เขียนวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ดังในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ลาพลาสทรานสฟอร์มของวงจรอิมพัลส์พื้นฐาน

จากวงจรในรูปที่ 2-6 ค่าแรงดันคร่อม R_e จะเขียนได้ว่า

$$U_e(S) = \frac{U_0}{S}\frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)}$$

เมื่อ

$$Z_1 = \frac{1}{C_s S}$$

$$Z_2 = \frac{R_e(R_d + \frac{1}{C_b S})}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b S}}$$

ฉะนั้น

$$U_e(S) = \frac{U_0(R_d R_e C_s C_b S + R_e C_s)}{R_d C_b S + R_e C_b S + R_e C_s S + R_d R_e C_s C_b S^2}$$

แรงดันที่จ่ายออกที่โหลดคิดจาก $U_e(S)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแด็นซ์จะได้

$$U(S) = \frac{U_e(S)\frac{1}{C_b S}}{R_d + \frac{1}{C_b S}} = \frac{U_e(S)}{R_d C_b S + 1}$$

$$U(s) = \frac{U_0 R_e C_s}{R_d R_e C_s C_b S^2 + (R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b)S + 1}$$

$$U(S)=\frac{U_0}{R_dC_b}\frac{1}{S^2+\dfrac{(R_dC_b+R_eC_s+R_eC_b)S}{R_dR_eC_sC_b}+\dfrac{1}{R_dR_eC_sC_b}}$$

ซึ่งอาจเขียนในรูปแบบง่ายๆ ได้คือ

$$U(S)=\frac{U_0}{K}\frac{1}{S^2+aS+b}=\frac{U_0}{K}\frac{1}{(\alpha_2-\alpha_1)}\left[\frac{1}{(S-\alpha_1)}-\frac{1}{(S-\alpha_2)}\right]$$

เมื่อ

$$a=\frac{R_dC_b+R_eC_s+R_eC_b}{R_dR_eC_sC_b}$$

$$b=\frac{1}{R_dR_eC_sC_b}$$

$$K=R_dC_b$$

α_1 , α_2 เป็นค่ารากที่สองของสมการ $S^2 + aS + b = 0$

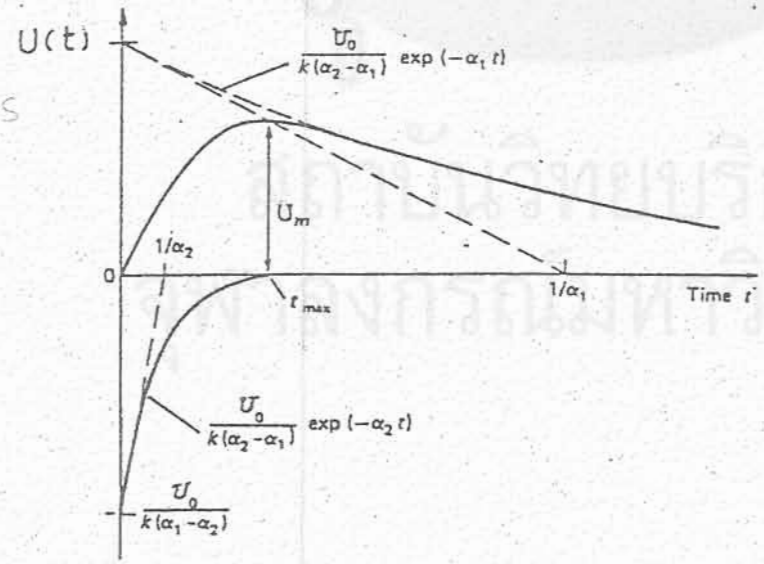
นั่นคือ

$$\alpha_1,\alpha_2=\frac{a\pm\sqrt{a^2-4b}}{2}$$

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลาได้ว่า

$$U(t)=\frac{U_0}{K}\frac{1}{(\alpha_2-\alpha_1)}\left[\exp(-\alpha_1 t)-\exp(-\alpha_2 t)\right]$$

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรอิมพัลส์จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลา ประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัวเวลา (time constant) เท่ากับ $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ดังภาพสเก็ตในรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์
ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียล
สองเทอม

รูปที่ 2-7 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่กำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่นและหลังคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ T_1/T_2 อันเป็นตัวแสดงถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น ค่า T_1 และ T_2 อาจหาได้ดังนี้ [5]

$$T_1 = k_2/\alpha_2$$

$$T_2 = k_1/\alpha_1$$

กรณีของรูปคลื่น 1.2/50 μS ค่าคงตัวจะมีค่า

$k_1 = 0.73$ $\quad k_2 = 2.96$

$1/\alpha_1 = 68.5$ $\quad 1/\alpha_2 = 0.405$

2.5.2 การคำนวณค่าองค์ประกอบวงจร

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์จะกำหนดด้วยเวลาหน้าคลื่น T_1 และเวลาหางคลื่น T_2 การคำนวณหาค่าองค์ประกอบจะขึ้นอยู่กับ C_b และ C_s ซึ่งอาจหาได้จากค่าคงตัวเวลา α_1, α_2 คือ

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2}$$

จะได้

$$\alpha_1 . \alpha_2 = b$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = a$$

จากความสัมพันธ์ α_1, α_2 กับ a และ b จะคำนวณหาค่าองค์ประกอบ R_d, R_e ของวงจรพื้นฐาน B ได้คือ

$$R_e = \frac{1}{2(C_s + C_b)} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\}$$

$$R_d = \frac{1}{2C_b} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}\right)^2 - \frac{4(C_s + C_b)}{\alpha_1 \alpha_2 C_s}} \right\}$$

2.5.3 ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ประสิทธิภาพของวงจรหรือเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เป็นแฟกเตอร์ที่ชี้บอกคุณภาพและความสามารถของเครื่องกำเนิด ที่จะสร้างแรงดันค่ายอดออกมาได้มากน้อยเป็นสัดส่วนเท่าใด

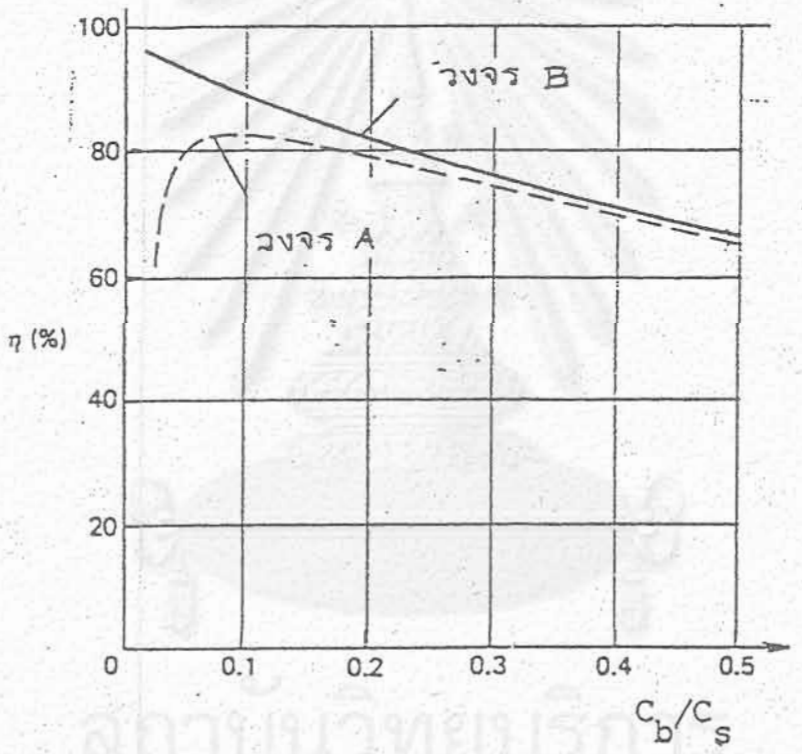
ของแรงดันอัดประจุ ซึ่งโดยปกติแล้วประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ทั้งวงจร A และวงจร B

$$\eta = U_m/U_o < 1$$

เมื่อ U_m คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ u(t)

U_o คือ แรงดันอัดประจุให้กับ C_s

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (1.2/50 μS) ประสิทธิภาพของวงจรอิมพัลส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า C_b ต่อ C_s ดังรูปที่ 2-8 [5]



รูปที่ 2-8 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์

บทที่ 3

การออกแบบและประกอบสร้าง

การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในโครงการนี้จะใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศ ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ได้ออกแบบสร้างขึ้นเองทั้งหมด เช่น องค์ประกอบความต้านทานต่างๆ สปาร์กแกปทรงกลม การฉนวนยึดและรองรับ โดยใช้วัสดุและผลิตภัณฑ์ภายในประเทศให้มากที่สุด การออกแบบลักษณะโครงสร้างอาศัยรูปแบบผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศมาดัดแปลงให้ง่ายต่อการประกอบสร้างและการใช้งาน ในด้านสมรรถนะและคุณภาพใช้เกณฑ์มาตรฐานเป็นเงื่อนไขในการออกแบบและประเมินผล ใช้เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเป็นพื้นฐานในการออกแบบสร้าง

3.1 เงื่อนไขการออกแบบสร้างและค่าที่กำหนด

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการออกแบบสร้างขึ้นนี้จะมีข้อกำหนดคือ

- ใช้สร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μS
- ขนาดแรงดันที่กำหนด 1000 kV ทั้งขั้วบวกและลบ
- ใช้ตัวเก็บประจุที่มีอยู่แล้วขนาด 1.2μF 50kV จำนวน 20 ตัวเป็นตัวเก็บประจุอิมพัลส์อัดประจุเก็บพลังงาน

ค่าแรงดันและพลังงานของเครื่องกำเนิด

เนื่องจากตัวเก็บประจุอิมพัลส์แต่ละตัวมีแรงดันพิกัด 50 kV และโดยลักษณะของโครงสร้าง จึงใช้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ต่ออนุกรมกัน 2 ตัวต่อชั้น จะได้ค่าความจุไฟฟ้าต่อชั้น C_s = 0.6 μF และแรงดันอัดประจุต่อชั้น U_o 100 kV ฉะนั้นเครื่องกำเนิดจะมีจำนวนชั้นรวมเป็น 10 ชั้น ได้แรงดันอัดประจุรวมเป็น

$$U_o = 10\,U_o = 1000 \text{ kV}$$

โดยมีค่าความจุไฟฟ้ารวม $C_s = C_s/10 = 0.06$ μF

ฉะนั้นเครื่องกำเนิดจะมีพลังงานที่กำหนด

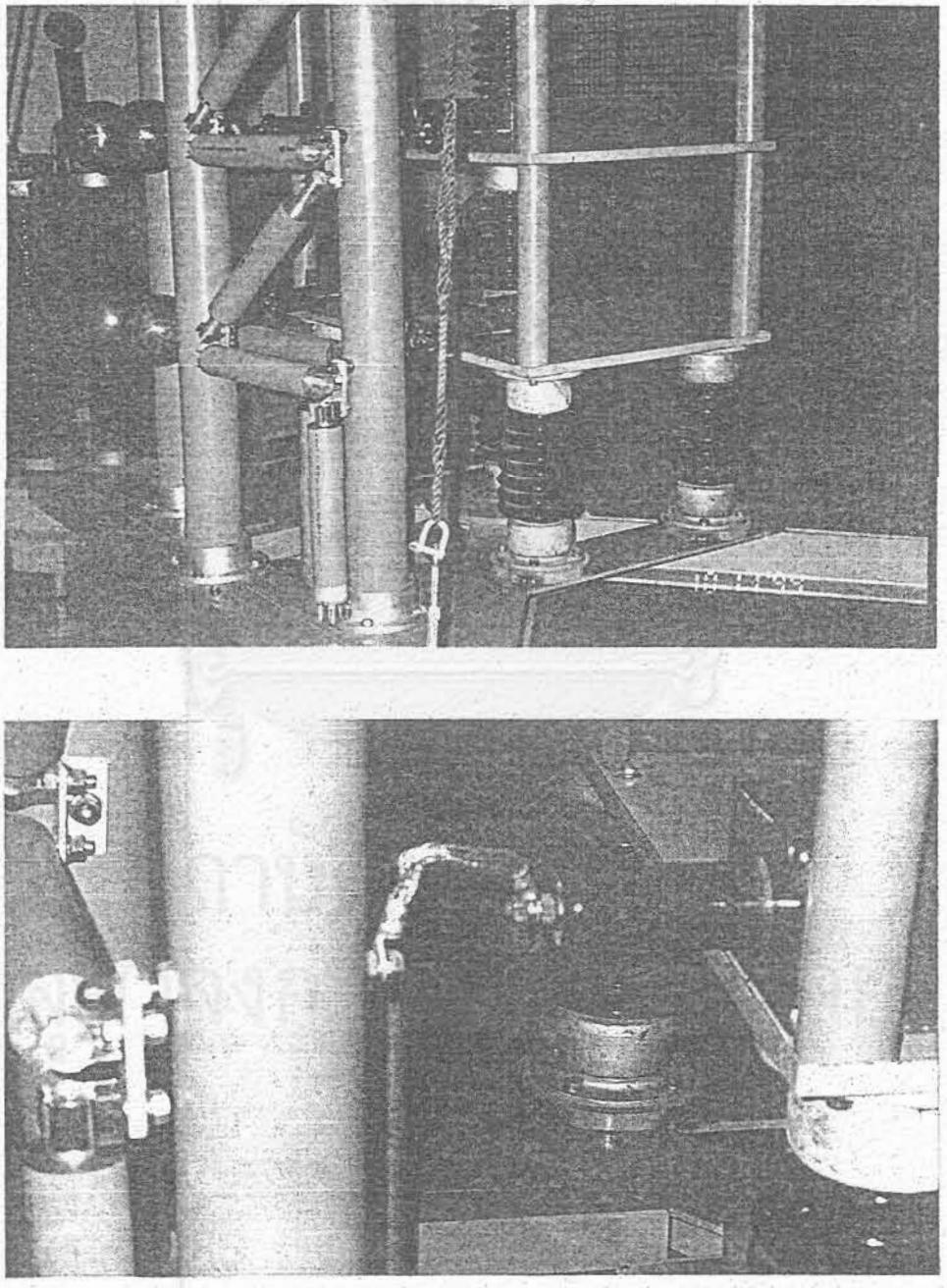
$$W = C_s U^2_o /2$$

$$= 0.06 \times 10^{-6} \times 1000^2 \times 10^6 /2 \text{ J}$$

$$= 30 \text{ kJ}$$

3.2 การออกแบบโครงสร้าง

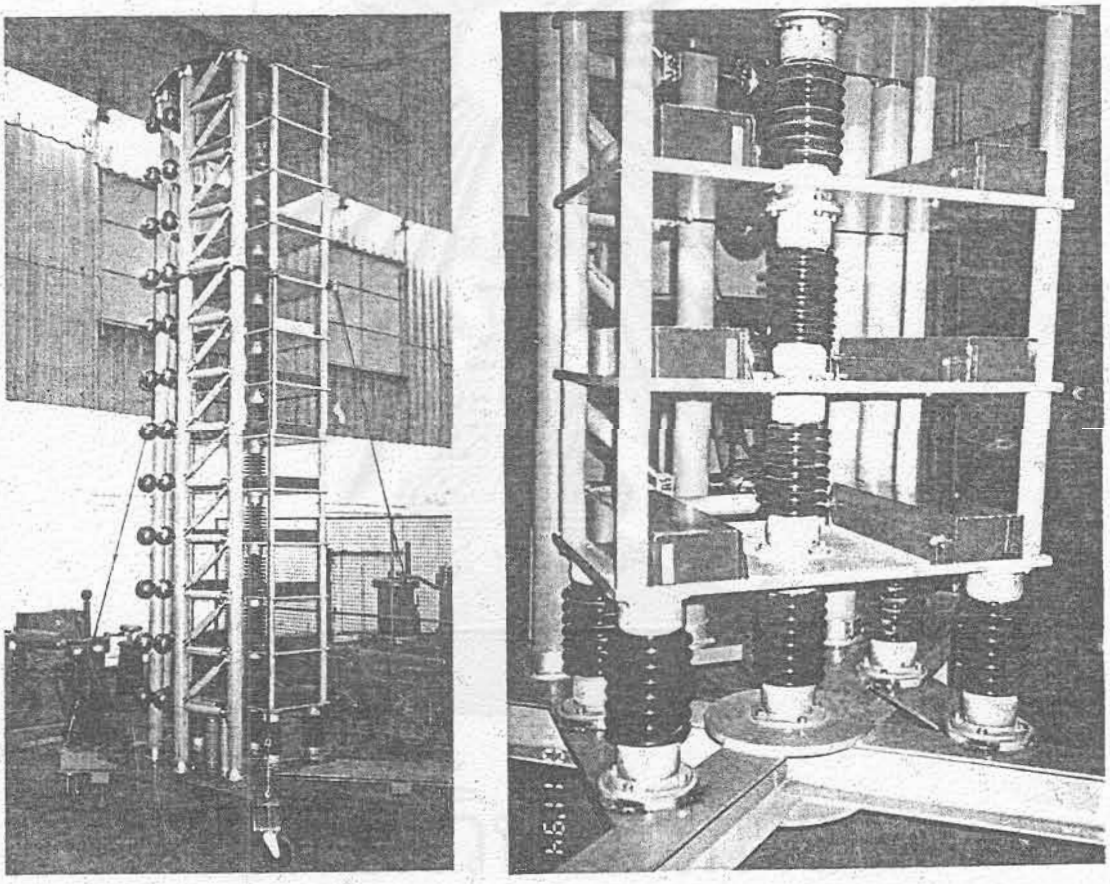
ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นแบบตัวถังเหล็ก มีปลอกฉนวนนำสายชนิดพอร์ซเลน การติดตั้งตัวเก็บประจุจึงใช้ถาดเหล็กรองรับชั้นละ 2 ตัว และใช้ถาดเหล็กเป็นตัวนำต่ออนุกรมกัน จะได้ขั้วของตัวเก็บประจุ C_s ออกมาทางปลอกฉนวนนำสายของแต่ละตัว ดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3-1 การติดตั้งตัวเก็บประจุอิมพัลส์บนถาดเหล็ก

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฉะนั้นโครงสร้างของเครื่องกำเนิดจะประกอบด้วยชั้นซ้อนกัน 10 ชั้น ฉนวนคั่นระหว่างชั้นจะต้องรับแรงดันอัดประจุ 100 kV ได้ ในที่นี้เลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบแท่ง (Post insulator) เป็นเสาฉนวนคั่นและรองรับแรงกลตรงกลางถาดเหล็ก ที่มุมถาดเหล็กจะใช้เสาฉนวนท่อพีวีซีช่วยประกอบยึดให้มั่นคงแข็งแรงยิ่งขึ้น โครงสร้างประกอบทั้ง 10 ชั้นจะตั้งอยู่บนฐานเหล็กติดล้อ เพื่อให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย เนื่องจากโครงสร้างนี้สูงถึง 5.7 เมตร เพื่อความมั่นคงในขณะเคลื่อนที่จึงโยงยึดโครงสร้างทั้ง 4 มุมของชั้นที่ 9 ลงฐานเหล็กทั้งสี่มุมด้วยเชือกฉนวนไนลอน ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ

3.3 การออกแบบการฉนวน

การใช้งานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างนี้ จะต้องตั้งอยู่ในสภาวะของบรรยากาศในห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีอากาศเป็นฉนวนภายนอก ฉะนั้นมิติภายนอกคือความสูง ความยาวความกว้างของการฉนวนจะกำหนดด้วยความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของอากาศ ซึ่งจะสัมพันธ์กับพื้นผิวฉนวนแข็ง ลักษณะพื้นผิวฉนวนมีผลสำคัญยิ่งต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กล่าวคือจะต้องมีผิวเรียบสม่ำเสมอ ไม่เก็บสะสมฝุ่นละออง หรือสิ่งสกปรกได้ง่าย ไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้พอสมควร ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับฉนวนเหลวหรือก๊าซอื่น มีความแข็งแรงทางกลเพียงพอ สามารถประกอบเข้ากับโครงสร้างหรือองค์ประกอบอื่นๆ ได้ง่าย

ฉนวนแข็งที่เหมาะจะใช้เป็นฉนวนภายนอกและเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ภายในประเทศ ได้แก่ พอร์ซเลน ท่อฉนวนพีวีซี เบกะไลท์ โพลิเอสเตอร์ฟิล์ม เป็นต้น การฉนวนของเครื่องกำเนิดนี้อาจแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

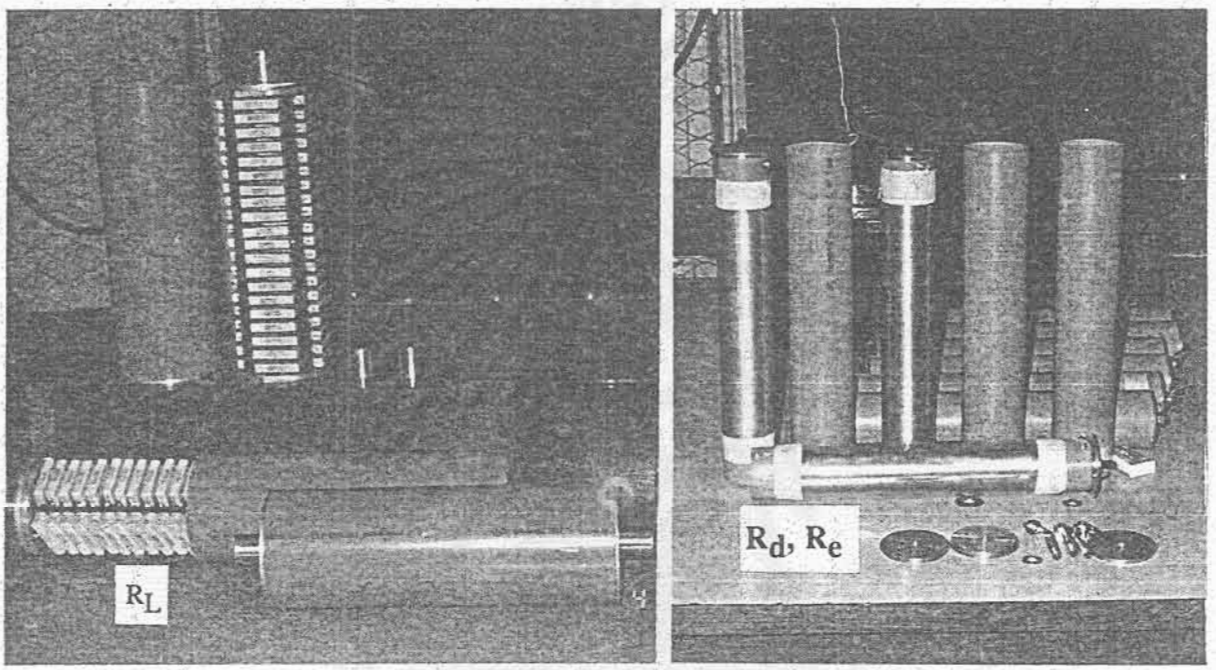
1) ฉนวนรองรับคั่นระหว่างชั้น จะใช้พอร์ซเลนมีลักษณะเป็นแท่งเสาหลัก เพื่อให้รับน้ำหนักของตัวเก็บประจุชั้นบนๆ ที่ซ้อนอยู่ถึง 10 ชั้น และรับแรงดันอัดประจุดีซีถึง 100 kV จึงเลือกใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบแท่ง Class ANSI 57-3 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ มีความสูงระหว่างชั้น 39.5 ซม. คงทนต่อแรงดันและแรงบิดได้ประมาณ 4500 กิโลกรัม ทนต่อแรงดันกระแสตรงได้ประมาณ 120 kV และทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้ 150 kV มิติดังกล่าวได้เคยใช้ออกแบบเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 4 kJ มาแล้ว [6]

นอกจากใช้ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนเป็นเสารองรับแล้ว เพื่อให้โครงสร้างมั่นคงมากยิ่งขึ้น จึงใช้ท่อพีวีซีเป็นเสาค้ำเสริมอีกสี่มุม ดังในรูปที่ 3-2 ท่อฉนวนพีวีซีเป็นวัสดุที่หาง่าย เพราะเป็นผลิตภัณฑ์ภายในประเทศ ราคาไม่แพง จากข้อมูลที่เคยใช้ท่อพีวีซีเป็นฉนวนสร้างชุดประกอบสร้างแรงดันสูงแบบคิท 100 kV [3] แสดงให้เห็นว่าท่อพีวีซีไม่ดูดซึมความชื้น อุณหภูมิใช้งานปกติ 60°C มีความต้านทานจำเพาะสูง 10^{13} - 10^{16} Ω-cm จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าท่อฉนวนพีวีซีมีความคงทนตามผิวฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ 4 kV/cm สำหรับแรงดันกระแสสลับ 50 Hz และแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μS ได้ประมาณ 6.6 kV/cm จากข้อมูลเหล่านี้จึงใช้แรงดันกระแสตรงเป็นเกณฑ์การหามิติของฉนวนพีวีซี และเมื่อคำนึงถึงแฟกเตอร์แห่งความปลอดภัย จึงเลือกความยาวฉนวนพีวีซีให้มีความยาวจำเพาะ 3.5 kV-DC/cm ฉะนั้นแรงดันอัดประจุ 100 kV ท่อฉนวนพีวีซีจะต้องมีความยาวอย่างน้อย 30 ซม. ดังในรูปที่ 3-2

2) การฉนวนองค์ประกอบความต้านทาน R_L ฉนวนแข็งยึดหรือรองรับความต้านทาน กรณีความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L จะใช้แท่งเบกะไลท์แบนทำเป็นโครงเสา 4 ขา ยึดความต้านทานแบบเส้นลวดหุ้มด้วยเซรามิกส์สำเร็จรูป โดยมีความยาวฉนวน 30 ซม. ส่วนประกอบความต้านทานนี้จะบรรจุติดตั้งในท่อฉนวนพีวีซีเพื่อป้องกันความเปรอะเปื้อนและฝุ่นละออง ดังในรูปที่ 3-3(a)

3) ในลักษณะเดียวกันองค์ประกอบความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d และ R_e ซึ่งทำด้วยเส้นลวด Ni-Fe-Cr พันบนกระบอกฉนวนพีวีซี ระหว่างรอบของเส้นลวดเปลือยจะคั่นด้วยเส้นฉนวนไนลอน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้เท่าๆ กับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด

ความต้านทาน ใช้ไมลาร์ฟิล์มเป็นฉนวนคั่นระหว่างชั้นการพัน เมื่อพันเสร็จแล้วจะติดตั้งบรรจุในกระบอกฉนวนพีวีซี เพื่อป้องกันความเปรอะเปื้อนและฝุ่นละออง และแรงกระแทกจากภายนอก และทำให้สะดวกแก่การประกอบติดตั้ง ดังในรูปที่ 3-3(b) ระยะความยาวฉนวนก็ออกแบบทำนองเดียวกับความต้านทาน R_L นั่นคือกระบอกฉนวนพันความต้านทานยาว 30 ซม. กระบอกฉนวนพีวีซีหุ้มภายนอกยาว 32 ซม.



(a) (b)

รูปที่ 3-3 การฉนวนความต้านทานจำกัดกระแส R_L และความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d, R_e

3.4 การออกแบบสร้างความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d, R_e

3.4.1 การคำนวณหาค่าความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d, R_e

ตัวความต้านทานที่ทำหน้าที่ปรับหน้าคลื่น R_d และปรับหางคลื่น R_e จะต้องเป็นความต้านทานที่ปลอดความเหนี่ยวนำ ในที่นี้ทำด้วยเส้นลวด Ni-Fe-Cr พันบนกระบอกฉนวนพีวีซี โดยพันสวนทางกัน 2 ชั้น หรือ 4 ชั้น เพื่อให้ปลอดความเหนี่ยวนำตามวิธีที่อธิบายไว้ในภาคทฤษฎี ซึ่งเป็นเทคนิคที่เคยใช้ออกแบบสร้างประสบผลสำเร็จมาแล้ว เรื่องการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบคิท 400 kV 1000 J [6]

ค่าความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d , R_e จะกำหนดด้วยรูปคลื่น 1.2/50 μS ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และค่าเก็บประจุโหลด C_b ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ [5]

$$R'_d = T_1 (C_b + C_s)/nk_2C_b.C_s$$

$$R'_e = T_2 / nk_1(C_b + C_s)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คือ เวลาหน้าคลื่นและหางคลื่นของแรงดันอิมพัลส์

กรณีของแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μS มาตรฐานจะกำหนดให้

T_1 = 1.2 μS ± 30 % (คือ 0.84 - 1.56 μS)

T_2 = 50 μS ± 20 % (คือ 40 - 60 μS)

k_1 ค่าคงตัวรูปคลื่นมาตรฐาน = 0.73

k_2 ค่าคงตัวรูปคลื่นมาตรฐาน = 2.96

n จำนวนขั้นของเครื่องกำเนิด

C_b ค่าเก็บประจุโหลด ในที่นี้เลือกให้ C_b = 1000 pF

C_s ค่าเก็บประจุอิมพัลส์รวม C_s = 60 nF

จากเงื่อนไขขีดจำกัดล่างของ T_1 = 0.84 μS และขีดจำกัดบนของ T_2 = 60 μS จะคำนวณค่าความต้านทานปรับรูปคลื่นได้

$$R'_d = 29.5\ \Omega$$

$$R'_e = 134.7\ \Omega$$

การทำความต้านทาน R'_d และ R'_e จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสสูงสุดที่ไหลผ่าน ซึ่งขึ้นอยู่กับ C_s และ C_b ซึ่งอาจคำนวณได้ [6]

กระแสสูงสุดไหลผ่าน R'_d หาจาก

$$I_{dmax} = C_b(U_o/T_1)$$

กระแสสูงสุดไหลผ่าน R'_e หาจาก

$$I_{emax} = U_o/R_e$$

จากค่ากระแสสูงสุด I_{dmax} และ I_{emax} จึงเลือกชนิดและขนาดเส้นลวดความต้านทาน ในที่นี้เลือกใช้เส้นลวดความต้าน Ni-Fe-Cr ซึ่งทนความร้อนได้สูงและอย่างต่อเนื่องได้นาน อย่างไรก็ตามการทำความต้านทาน R'_d และ R'_eยังขึ้นอยู่กับขนาดเส้นลวดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด และความยาวของกระบอกฉนวนที่ออกแบบไว้ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไหลผ่าน กำหนดด้วยความทนต่อความร้อนของท่อพีวีซี มีอุณหภูมิใช้งาน 60 °C อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ΔT อาจคำนวณได้จากสมการ [6]

$$\Delta T = W/mc$$

เมื่อ W คือพลังงานที่เกิดจากกระแสไหลผ่านความต้านทานนั้นๆ

m คือมวลของเส้นลวดความต้านทาน kg

c คือความจุความร้อนจำเพาะ kJ/kg ^{o}K

จากเงื่อนไขต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ปรากฏว่า ความต้านทาน R_d และ R_e ที่พันเสร็จแล้วให้ค่าความต้านทาน

$$R_d' = 33 \text{ Ohms}$$

$$R_e' = 114 \text{ Ohms}$$

3.4.2 การประกอบสร้างความต้านทาน R_d, R_e

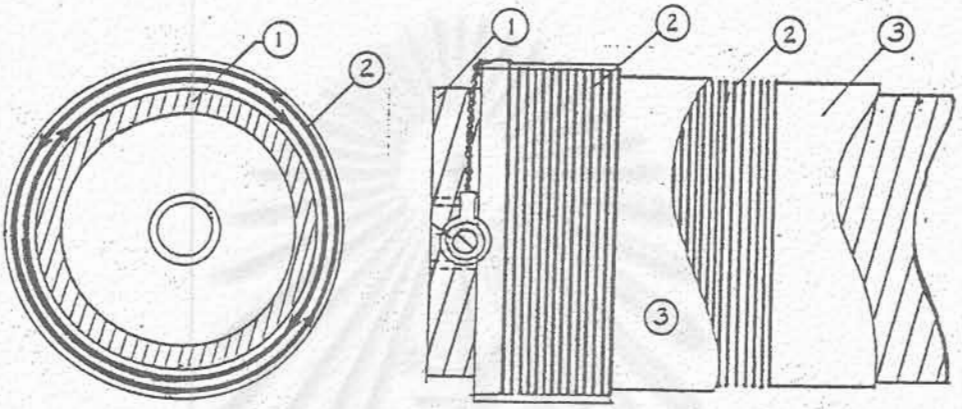
คุณสมบัติที่สำคัญของความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d, R_e ก็คือ ควรเป็นความต้านทานปลอดความเหนี่ยวนำ ทนความร้อนได้สูง ในที่นี้จะทำด้วยเส้นลวดความต้านทานเปลือย Ni-Fe-Cr พันบนกระบอกพีวีซี โดยพันสองชั้นสวนทางกัน แต่ละชั้นจะมีความต้านทานเป็นสองเท่าของค่าความต้านทานรวม เพราะทั้งสองชั้นต้องต่อขนานกัน การพันเส้นลวดลักษณะนี้กระแสจะไหลสวนทางกันทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไหลในลวดความต้านทานรวมหักล้างกันหมด และการพันสองชั้นขนานกันจะช่วยให้ความต้านทานมีกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากมวลของเส้นลวดรวมกันมากขึ้น การพันแต่ละชั้นต้องให้ได้ความต้านทานใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อให้กระแสไหลในแต่ละชั้นเท่ากัน ระหว่างรอบของเส้นลวดเปลือยคั่นด้วยเส้นเอ็นไนล่อนที่มีขนาดเท่าๆ กับเส้นลวดความต้านทาน และระหว่างชั้นของการพันจะคั่นด้วยแผ่นฉนวนโพลิเอสเตอร์ฟิล์ม ดังในรูปที่ 3-4 การเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเส้นลวดความต้านทาน R_d', R_e' ใช้วิธีการคำนวณหาเช่นเดียวกับการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 1000 J [6]

3.4.3 การประกอบติดตั้ง R_d' และ R_e'

ความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d' และ R_e' บรรจุอยู่ในท่อฉนวนพีวีซี ที่ปลายทั้งสองของกระบอกความต้านทาน จะมีหัวต่อแท่งอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ยาว 3 ซม. สำหรับเสียบยึดเข้ากับสปริงก้ามปูตรึงอยู่กับเสาฉนวนพีวีซีสองเสา ซึ่งแต่ละเสาจะยึดสปริงก้ามปูเป็นที่เสียบร่วมหัวต่อความต้านทาน R_d' กับ R_e' โดยเสาหนึ่งต่อเข้ากับหางเกลียวทองเหลืองยึด

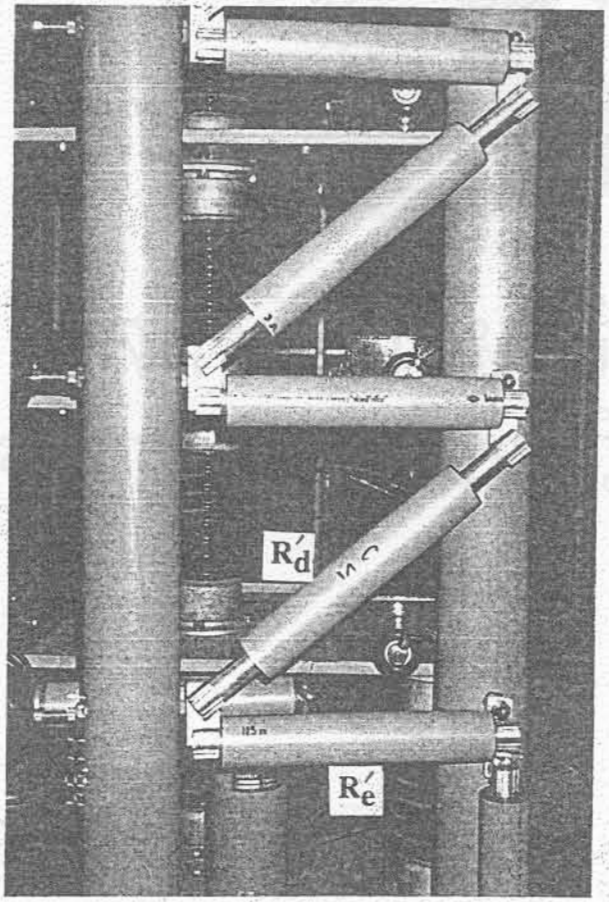
I17382988

สปาร์กแกปทรงกลม ส่วนที่อีกเสาหนึ่งต่อเข้ากับตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s การใช้สปริงก้ามปูเป็นที่เสียบต่อองค์ประกอบความต้านทานเช่นนี้ ทำให้สะดวกและง่ายต่อการประกอบตั้ง ช่วยให้การปรับเปลี่ยนค่าความต้านทาน R'_d และ R'_e ทำได้สะดวก โดยการต่อขนานความต้านทานเพิ่มเข้าไป หรือเปลี่ยนความต้านทานกระบอกใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-4 การพันความต้านทานปรับรูปคลื่น R'_d, R'_e

คือ 1 - ท่อพีวีซี , 2 - เส้นลวด Ni-Cr ขนานกับเส้นเอ็น , 3 - แผ่นฉนวนโพลิเอสเตอร์ฟิล์ม



รูปที่ 3-5
การประกอบติดตั้ง R'_d, R'_e

3.5 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L)

3.5.1 การหาค่าความต้านทาน R_L

ค่าความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L ขึ้นอยู่กับค่าพิกัดกระแสของตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง I_o ขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และอัตราการเพิ่มแรงดัน $\Delta U_o/\Delta t$

ตัวจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงที่จะใช้ในที่นี้มีค่าจำกัดกระแส $I_o = 20$ mA ฉะนั้นอัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุสูงสุดจึงหาได้จากความสัมพันธ์

$$i = C_s \Delta U_o/\Delta t$$

$$\Delta U_o/\Delta t = I_o/C_s$$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละชั้น $C_s = 0.6\ \mu F$

ฉะนั้นอัตราการเพิ่มแรงดันสูงสุดที่ตัวจ่ายสามารถทำได้

$$\Delta U_o/\Delta t = 20 \times 10^{-3}/0.6 \times 10^{6}$$

$$= 33.3 \text{ kV/sec.}$$

แรงดันอัดประจุต่อขั้น $U_o = 100$ kV

กำหนดเงื่อนไขการดีสชาร์จไม่เกิน 3 ครั้งต่อนาที

ฉะนั้นการอัดประจุใช้เวลาอย่างน้อยครั้งละ 20 วินาที

นั่นคือ อัตราการเพิ่มแรงดันอัดประจุ $\Delta U_o/\Delta t \leq 5$ kV/sec

ถ้าคิดกระแสอัดประจุสูงสุด 20 mA

ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุได้ $= 5 \times 10^{3}/20 \times 10^{-3}\ \Omega$

$$= 250\ k\Omega$$

ฉะนั้นความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุต่อชั้น $R'_L = 25\ k\Omega$

3.5.2 การประกอบสร้างความต้านทาน R_L

ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ นอกจากจะต้องมีค่าโอห์มสูงแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันอัดประจุ 100 kV และมีกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินไปเมื่อเวลาใช้งาน

โดยเหตุที่ความต้านทาน R_L ไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับค่าความเหนี่ยวนำ จึงเลือกใช้ความต้านทานสำเร็จรูปแบบเส้นลวดพัน (wire wound) หุ้มด้วยเซรามิกส์ที่หาซื้อได้ง่าย และมีขนาดโอห์มและวัตต์ให้เลือกหลายขนาด มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมขนาด 1 cm x 1 cm ยาว 5 cm มีปลายขั้วเส้นลวดสำหรับต่อกันทั้งสองปลาย จึงออกแบบให้ความต้านทานย่อยหุ้มเซรามิกส์ยึดอยู่บนโครงเบกะไลท์ 4 ขา ดังรูปที่ 3-6 ยึดหัวท้ายโครงเบกะไลท์ด้วยหน้าแปลนอะลูมิเนียม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้ใส่ท่อพีวีซีขนาด 4 นิ้วได้พอดี โครงเบกะไลท์มีความยาว 30 cm. และเพื่อให้ความต้านทานย่อยแต่ละตัวรับแรงดันไม่เกิน 1.3 kV ใช้ความต้านทานย่อยจำนวนไม่น้อยกว่า 79 ตัวต่ออนุกรมกัน แต่ละขาเบกะไลท์จึงเจาะรูร้อยเส้นลวดขั้วความต้านทานจำนวน 20 รู โดยแต่ละรูมีระยะห่างเท่าๆ กันประมาณ 1.5 cm ความต้านทานย่อยต่ออนุกรมกันด้วยการบัดกรี

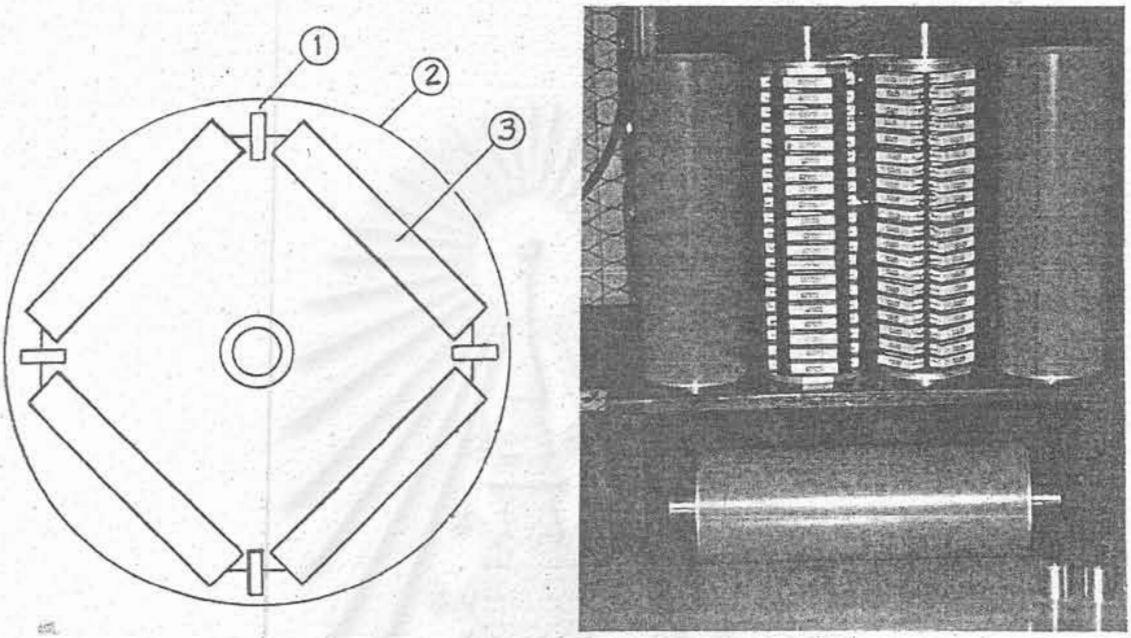
ความต้านทาน R_L ที่ต้องการประมาณ 25 kΩ ประกอบจากความต้านทานย่อยสำเร็จรูป 79 ช่วง แต่ละช่วงจะมีความต้านทานประมาณ 316 Ω ซึ่งจะมีกำลังไฟฟ้ากำหนดด้วยกระแส และแรงดันอัดประจุ สมมติให้กระแสอัดประจุเฉลี่ยไม่เกิน 10 mA ที่แรงดัน 100 kV ฉะนั้นกำลังไฟฟ้าอัดประจุที่ความต้านทาน R_L จะต้องรับได้ คือ 1000 W

เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานและกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ จึงเลือกค่าความต้านทาน 680 Ω 10 W สองตัวต่อขนานดันมาต่ออนุกรมกัน 79 ช่วงบนโครงเบกะไลท์ 4 ขา ได้ความต้านทานประมาณ 26 kΩ และมีกำลังไฟฟ้า 1580 W บรรจุติดตั้งในกระบอกพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 32 ซม. ปิดหัวท้ายด้วยหน้าแปลนอะลูมิเนียม ที่ปลายกระบอกแต่ละด้านจะมีหัวต่อแท่งอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม. ยาว 3 ซม. สำหรับจับยึดด้วยสปริงก้ามปู ดังแสดงในรูปที่ 3-6

3.5.3 การประกอบติดตั้งความต้านทาน R_L

ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L ที่บรรจุอยู่ในท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. ยาว 32 ซม. นี้ จะประกอบติดตั้งยึดในแนวดิ่งเข้ากับเสาฉนวนพีวีซีหมุนได้ที่ยึดสปาร์กแกปทรงกลม ความต้านทาน R_L จะประกอบอยู่ระหว่างชั้นของเครื่องกำเนิด โดยยึดด้วยสปริงก้ามปู ที่ยึดอยู่ที่ปลายก้านเกลียวทองเหลืองสปาร์กแกปทรงกลม และต่อทางไฟฟ้าเข้ากับตัวเก็บประจุและสปาร์กแกปทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3-7 การต่อด้วยสปริงก้ามปูเช่นนี้ นอกจากจะทำให้สะดวกและง่ายต่อการประกอบติดตั้งแล้ว ยังสามารถช่วยให้สามารถต่อตัวเก็บประจุชั้นต่างๆ ขนานกันกี่ชั้นก็ได้ หรือต่อขนานกันเป็นชุดๆ แล้วต่อชุดต่างๆ เหล่านี้อนุกรมกัน ซึ่ง

ช่วยให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปรับเพิ่มค่าความจุไฟฟ้ามากขึ้นได้ เมื่อแรงดันที่ต้องการสร้างนั้นต่ำลง ดังเช่นในกรณีที่โหลดมีค่าความจุไฟฟ้าสูงมากขึ้น



รูปที่ 3-6 การยึดตัวความต้านทานย่อยบนโครงเบกะไลท์ 4 ขา

1 - แท่งเบกะไลท์

2 - ความต้านทานย่อยเส้นลวดพันหุ้มเซรามิกส์

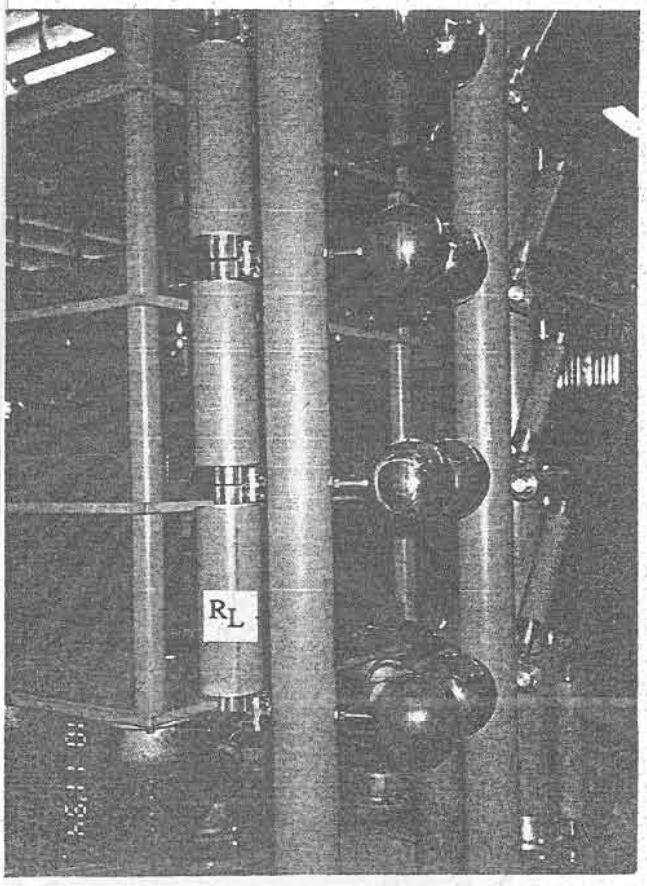
3 - หน้าแปลนอะลูมิเนียม

3.6 การออกแบบสปาร์กแกปและการติดตั้ง

3.6.1 ขนาดสปาร์กแกปทรงกลม

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีแรงดันอัดประจุรวม 1000 kV แบ่งออกเป็น 10 ขั้น แต่ละขั้นจะมีแรงดันอัดประจุที่กำหนดเป็น 100 kV ใช้ทรงกลมทองแดงทำหน้าที่เป็นสปาร์กแกปชั้นละ 1 คู่ โดยที่ระยะแกประหว่างทรงกลมทองแดงสูงสุดต้องรับแรงดันอัดประจุ 100 kV ได้โดยไม่เกิดโคโรน่า สนามไฟฟ้าของสปาร์กแกปจะอยู่ในเกณฑ์ใกล้สม่ำเสมอ เพื่อให้เกิดเบรกดาวน์ในแกปเป็นแบบเบรกดาวน์โดยตรง (direct breakdown) และเกิดเบรกดาวน์ได้ต่อเนื่องตามลำดับตลอดแกป 10 คู่ ในระยะเวลาอันสั้น การทำงานของสปาร์กแกปจะต้องเริ่มต้นตั้งแต่แกปคู่ล่างก่อน ซึ่งมีแกปช่วย และไกสวิตช์ แล้วเกิดสปาร์กในแกปคู่บนถัดไปตามลำดับ คือจะต้องไม่เกิด

สปาร์กแบบไร้ความแน่นอน ขนาดแรงดันที่จะทำให้เกิดสปาร์กนั้น อยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม และระยะแกประหว่างทรงกลม



รูปที่ 3-7 การประกอบขีดความต้านทาน R_L เข้ากับเสาฉนวนด้วยสปริงล็อกก้ามปู

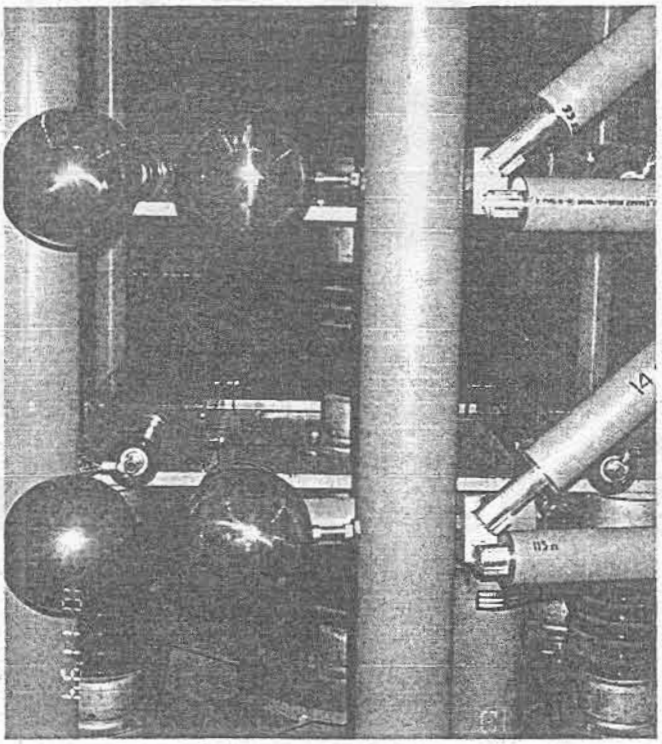
การเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมสปาร์กแกป จะเลือกจากขนาดแรงดันอัดประจุแต่ละชั้น คือ 100 kV ตามมาตรฐานสากล IEC Publ. 52 [7] ทรงกลมที่อยู่ในเกณฑ์จะมี 3 ขนาด คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. 12.5 ซม และ 15 ซม. ซึ่งมีค่าแรงดันเบรกดาวน์สูงสุด คือ 123 kV, 146 kV และ 177 kV ตามลำดับ ค่าแรงดันนี้เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะบรรยากาศมาตรฐาน คือ อุณหภูมิ 20°C ความดันบรรยากาศ 760 mmHg [4] แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติ สภาวะอากาศของห้องจะเกิดเบรกดาวน์ได้ง่ายขึ้น เพราะอุณหภูมิสูงกว่า และความดันน้อยกว่า มีฝุ่นละอองซึ่งทำให้เกิดเบรกดาวน์ง่าย และเมื่อใช้งานแล้วพื้นผิวทรงกลมซึ่งทำด้วยทองแดงจะมีผิวขรุขระอันเกิดจากสปาร์กมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ง่ายเช่นกัน ฉะนั้นเพื่อให้สปาร์กแกปทำงานได้อย่างที่มีความเชื่อมั่นและแน่นอนสูง จึงเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม 15 ซม. เท่ากันทั้ง 10 ชั้น

3.6.2 การติดตั้งสปาร์กแกป

ขนาดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นกำหนดด้วยระยะของสปาร์กแกป ฉะนั้นเพื่อให้เครื่องกำเนิดสามารถปรับสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ขนาดต่างๆ ได้ตามที่ต้องการ จึงต้องมีการปรับระยะสปาร์กแกปได้ การปรับระยะแกปทำได้โดยตรึงทรงกลมทองแดงข้างหนึ่งของแต่ละชั้นให้คงที่อยู่บนเสาฉนวนพีวีซีเดียวกัน ส่วนทรงกลมทองแดงอีกข้างหนึ่งก็ยึดอยู่บนเสาฉนวนพีวีซีอีกเสาหนึ่ง ซึ่งสามารถหมุนได้ด้วยมือ หรือขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ติดตั้งที่ฐานเสาที่บังคับระยะไกลได้ ทำให้สามารถปรับระยะแกปได้พร้อมๆ กัน

เสาฉนวนที่ใช้ยึดสปาร์กแกปทรงกลมทำด้วยท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว Class 13.5 การยึดทรงกลมเข้ากับเสาฉนวนใช้เกลียวและปลอกเกลียวทองเหลืองฝังตั้งฉากกับความยาวตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อพีวีซี ก้านเกลียวที่ยึดทรงกลมทองแดงสามารถปรับเข้าออกได้ จึงช่วยให้ปรับระยะแกปของทรงกลมแต่ละลูกได้

ปลายก้านเกลียวทองเหลืองของทรงกลมด้านหนึ่ง(ที่หมุนได้) จะต่อเข้ากับขั้วของตัวเก็บประจุ อิมพัลส์ด้วยทองแดงถัก เพื่อช่วยให้เสาฉนวนยึดทรงกลมหมุนได้สะดวก ส่วนปลายก้านเกลียวทองเหลืองของทรงกลมอีกข้างหนึ่งจะต่อเข้ากับสปริงก้ามปู เป็นที่ต่อร่วมของหัวต่อความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d และ R_e ดังแสดงในรูปที่ 3-8



รูปที่ 3-8 สปาร์กแกปทำด้วยทรงกลมทองแดง 15 ซม.ϕ ยึดอยู่บนเสาฉนวนพีวีซีขนาด 4 นิ้วϕ

บทที่ 4

การทดลองและการวิเคราะห์ผล

เป้าหมายหลักของการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นี้ก็คือ การสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μS ที่โหลดเก็บประจุ 1000 pF และค่าแรงดันอัดประจุที่กำหนด 1000 kV เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ส่วนใหญ่ที่พัฒนาออกแบบสร้างขึ้นมาเองทั้งหมด ยกเว้นตัวเก็บประจุอิมพัลส์ C_s และตัวเก็บประจุโหลด C_b ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศ ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ การฉนวนองค์ประกอบความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L ความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d, R_e สปาร์กแกป และเทคนิคการยึดแน่นทางกลขององค์ประกอบ ฉะนั้นเพื่อตรวจสอบดูว่าผลของการประกอบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะได้ผลตามเป้าหมายที่กำหนดไว้หรือไม่ จึงต้องมีการทดสอบ โดยใช้มาตรฐาน IEC Publ.60-1976 เป็นเกณฑ์ตัดสินพิจารณาคุณภาพของผลงาน เพื่อการวิเคราะห์และประเมินผล จึงมีการทดสอบดังต่อไปนี้

1) การทดสอบการฉนวนขององค์ประกอบแต่ละชั้น
2) การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบความต้านทาน
3) การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน
4) การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดันอัดประจุที่กำหนด
5) การทดสอบที่โหลดต่างๆ

4.1 การทดสอบการฉนวนองค์ประกอบแต่ละชั้น

การฉนวนได้แก่ ฉนวนรองรับคั่นระหว่างชั้น ได้แก่ ลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน เสาพีวีซีคั่นระหว่างชั้น โครงเบกะไลท์ยึดความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L และท่อฉนวนพีวีซีที่ใช้เป็นแกนพันความต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d และปรับหางคลื่น R_e

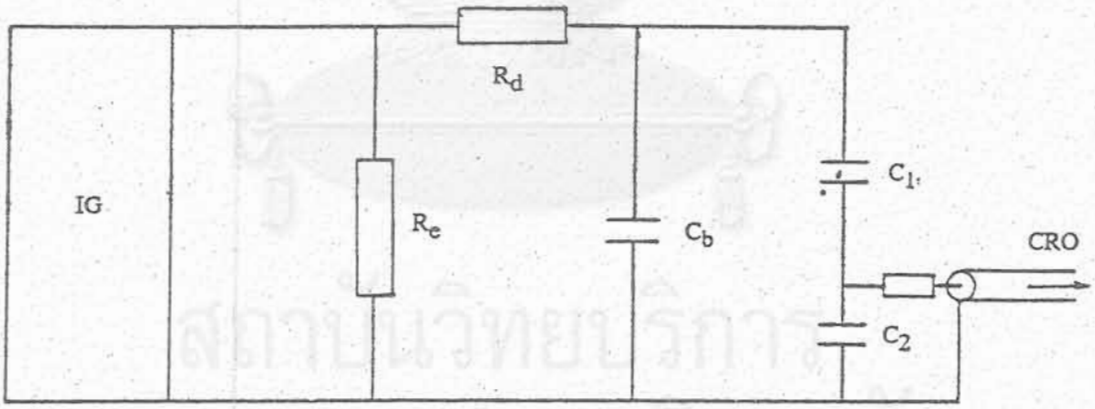
4.1.1 การทดสอบการฉนวนรองรับแต่ละชั้น

โดยเหตุที่ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดแต่ละชั้น ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว ตัวละ 1.2 μF 50 kV ต่ออนุกรมกัน จึงได้พิกัดแรงดันอัดประจุสูงสุดแต่ละชั้น 100 kV และเพื่อให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุยาวนาน จึงให้ตัวเก็บประจุอิมพัลส์รับแรงดันอัดประจุสูงสุดไม่เกิน 92 % ของพิกัด โดยการเพิ่มจำนวนชั้นของเครื่องกำเนิดเป็น 12 ชั้น จะได้ค่าแรงดัน

อัดประจุรวมสูงสุดเป็น 1100 kV ฉะนั้นการทดสอบการฉนวนแต่ละชั้นจึงทดสอบโดยการป้อนด้วยแรงดันสูงกระแสตรง 100 kV ที่สภาวะของห้องเป็นเวลา 2 นาที พบว่าการฉนวนของโครงสร้างรองรับสามารถทนต่อแรงดันสูงกระแสตรง 100 kV ได้ โดยไม่เกิดโคโรนาหรือดีสชาร์จใดๆ

4.1.2 การทดสอบการฉนวนของความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d และ R_e

จากการออกแบบเครื่องกำเนิด กำหนดให้แรงดันอัดประจุแต่ละชั้นเท่ากับ 100 kV-DC ฉะนั้นความต้านทานปรับรูปคลื่น R_d และ R_e แต่ละชั้นจะต้องทนต่อแรงดันดีสชาร์จจากแรงดันอัดประจุนี้ได้ การใช้งานเมื่อเกิดการดีสชาร์จให้กับวงจร R-L-C อาจทำให้เกิดแรงดันเกินเนื่องจากออสซิลเลชันได้ การทดสอบการฉนวนของ R_d และ R_e จึงทดสอบโดยการดีสชาร์จจากแรงดันอัดประจุ 120 kV ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 4 ขั้น 400 kV ให้กับความต้านทาน R_d และ R_e ทีละชุดๆ ละ 10 ครั้ง จนครบ 12 ชุด ดังวงจรทดสอบในรูปที่ 4.1 ผลการทดสอบโดยการพิจารณาจากออสซิลโลแกรมของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ทดสอบ พบว่าองค์ประกอบความต้านทานปรับรูปคลื่นทั้งหมดทนต่อแรงดันทดสอบอิมพัลส์ 120 kV ได้ทุกชั้น



รูปที่ 4-1 แสดงวงจรทดสอบการฉนวนของ R_d และ R_e

IG	=	เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 4 kJ
R_d, R_e	=	ความต้านทานปรับหน้าคลื่นและหางคลื่นตามลำดับ
C_b	=	ตัวเก็บประจุโหลด
C_1, C_2	=	โวลเตจดิไวเดอร์
CRO	=	ออสซิลโลสโคป

4.2 การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบความต้านทาน

เนื่องจากความต้านทาน R_d และ R_e ได้จากการพัฒนาเส้นลวดความต้านทาน Ni-Fe-Cr บนกระบอกฉนวนพีวีซี โดยมีแผ่นฉนวนโพลิเอสเตอร์ฟิล์มคั่นระหว่างชั้นความต้านทาน การใช้งานของความต้านทานในด้านอุณหภูมิจึงกำหนดด้วยอุณหภูมิใช้งานของท่อพีวีซี นั่นคือ 60 °C การทดสอบอุณหภูมิเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบความต้านทาน R_d และ R_e ทำได้โดยการดีสชาร์จแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ให้กับความต้านทาน R_d และ R_e ทีละคู่ ตามวงจรทดสอบในรูปที่ 4.1 บันทึกอุณหภูมิและค่าความต้านทานที่สภาวะของห้องก่อนลงมือทำการทดสอบ ทำการดีสชาร์จให้ได้แรงดันอิมพัลส์จ่ายออกมาที่โหลด 100 kV ดีสชาร์จแรงดันอิมพัลส์ต่อเนื่องกัน 10 ครั้ง โดยมีเวลาอัดประจุประมาณ 1 นาที เมื่อดีสชาร์จครบ 10 ครั้ง ก็นำความต้านทาน R_d' และ R_e' มาวัดอุณหภูมิ แล้วทำการดีสชาร์จให้กับความต้านทานนั้นรอบใหม่อีก 10 ครั้ง เมื่อดีสชาร์จครบ 10 ครั้งแล้วก็ทำการวัดอุณหภูมิเช่นเดิม ทำเช่นนี้จนครบ 6 รอบ หรือดีสชาร์จบนความต้านทานนั้นจนครบ 60 ครั้ง ผลของการทดสอบได้ค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นและความต้านทานของ R_d' และ R_e' ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิและความต้านทานของ R_d' และ R_e' หลังจากดีสชาร์จแรงดันอัดประจุที่จำนวนครั้งต่างๆ กัน ที่แรงดันอิมพัลส์ที่โหลด 100 kV

จำนวนครั้งดีสชาร์จ	ตัวความต้านทาน R_d'		ตัวความต้านทาน R_e'	
	อุณหภูมิ °C	ความต้านทาน Ω	อุณหภูมิ °C	ความต้านทาน Ω
1	29.5	34.15	31.3	114.4
10	30.8	34.16	44.3	114.8
20	33.3	34.17	50.4	115.0
30	34.0	34.17	53.7	115.0
40	34.2	34.17	54.3	115.0
50	34.2	34.17	54.3	115.0
60	34.2	34.17	54.3	115.0

หมายเหตุ ทดสอบที่สภาวะของห้อง ความชื้น 68 % ความดันบรรยากาศ 763 mm.Hg.
อุณหภูมิห้องเริ่มทดลอง 28.2 °C และสิ้นสุดการทดลอง 30.2 °C

4.3 การทดสอบการสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน

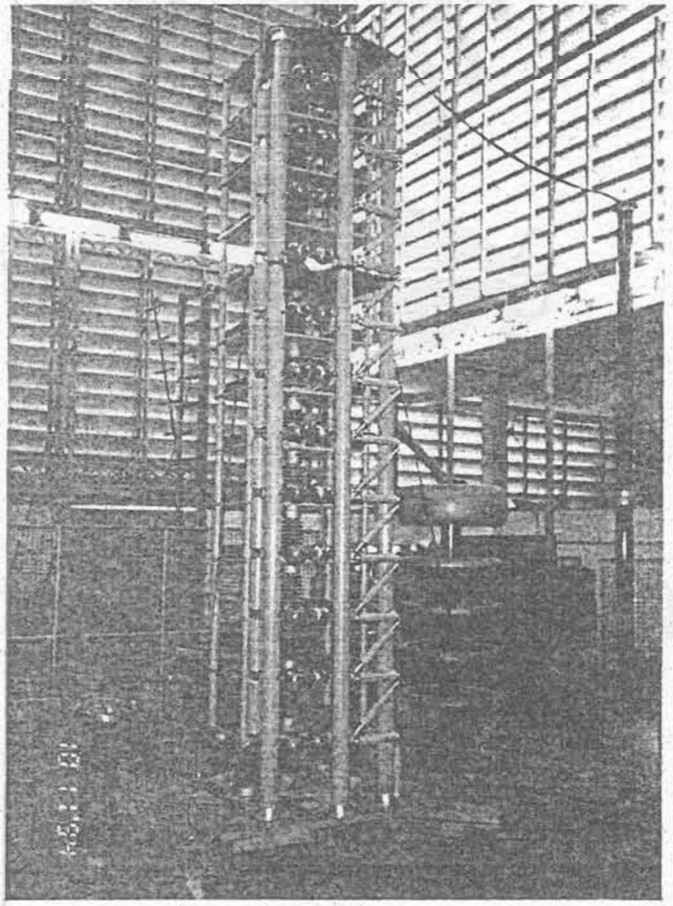
รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์มาตรฐานกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 และเวลาช่วงหางคลื่น T_2 ไว้คือ

$T_1 = 1.2\ \mu S \pm 30\ \%$ นั่นคือ $0.84 \leq T_1 \leq 1.56\ \mu S$

$T_2 = 50\ \mu S \pm 20\ \%$ นั่นคือ $40 \leq T_2 \leq 60\ \mu S$

ยิ่งกว่านั้นมาตรฐานยังได้กำหนดลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไว้ว่า รูปคลื่นจะมีแรงดันพุ่งเกิน อันเนื่องจากออสซิลเลชันได้ไม่เกิน 5 % ของค่ายอด

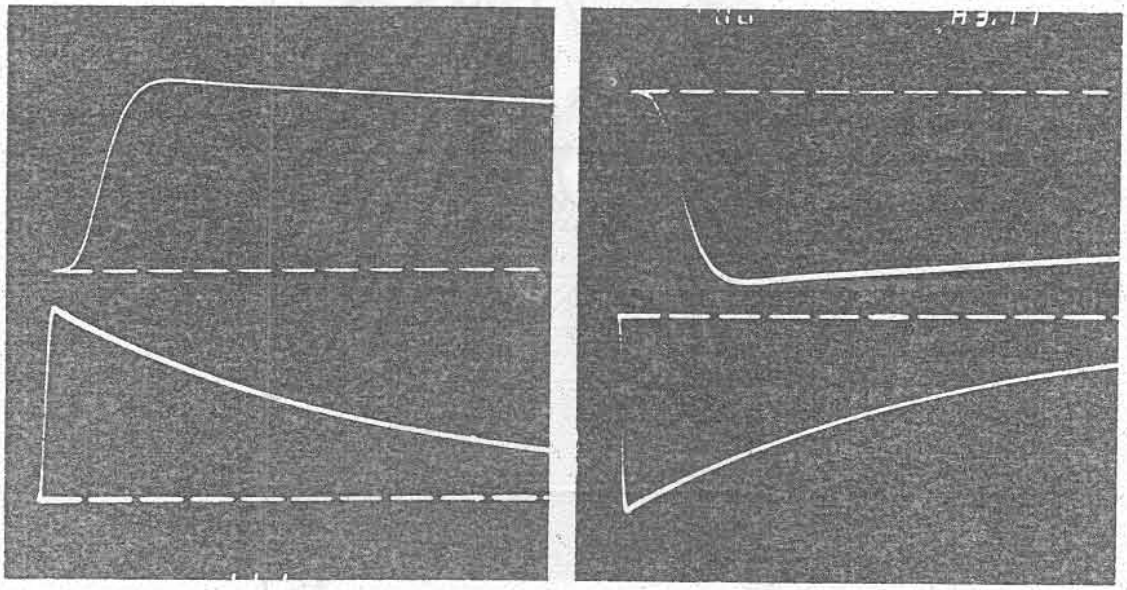
เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่พัฒนาออกแบบสร้างขึ้นตามหลักการวงจรของมาร์กซ์ วงจร B มีโครงสร้างแบ่งออกเป็น 12 ชั้น ดังรูปที่ 4.2 แต่ละชั้นประกอบด้วยตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 2 ตัวๆ ละ 1.2 μF 50 kV ต่ออนุกรมกันจะได้ความจุไฟฟ้าต่อชั้น C_s' เท่ากับ 0.6 μF แรงดันอัดประจุสูงสุดแต่ละชั้น 92 kV เมื่อตัวเก็บประจุทั้งหมดดีสชาร์จจะต่อกันแบบอนุกรม จะได้ความจุไฟฟ้ารวมเป็น 50 nF ความต้านทานปรับรูปคลื่นรวม $R_d = 396\ \Omega$ และ $R_e = 1368\ \Omega$



รูปที่ 4-2 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้าง 1000 kV 30 kJ

4.3.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่โหลดกำหนด 1000 pF

เพื่อทำการตรวจสอบรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้น ว่าได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ จึงทดลองป้อนแรงดันอัดประจุให้กับเครื่องกำเนิดที่ประกอบเสร็จแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีโหลดตัวเก็บประจุ 1000 pF และเริ่มต้นป้อนแรงดันอัดประจุขั้นละ 33 kV และวัดแรงดันที่สร้างขึ้นด้วยอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ 400 kV ซึ่งมีความจุไฟฟ้าภาคแรงสูง 500 pF ปรากฏว่าแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นมีรูปคลื่นได้ตามที่มาตรฐานกำหนดทุกประการ คือ ได้เวลาช่วงหน้าคลื่น 1.2 μS และช่วงหางคลื่น 51 μS และไม่มีแรงดันพุ่งเกินทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ดังออสซิลโลแกรมในรูปที่ 4.3 a และ b ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพ 90.4 %



a) b)

รูปที่ 4-3 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 358 kV ที่ได้จากเครื่องกำเนิดที่ออกแบบสร้าง สเกลเวลาหน้าคลื่น(บน) 1 μS/div และหางคลื่น(ล่าง) 10 μS/div

4.3.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่ค่าโหลดเก็บประจุต่างๆ

ในทางปฏิบัติ ค่าเก็บประจุโหลดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์อาจมีค่าแตกต่างจากค่าที่กำหนดคือ 1000 pF ซึ่งอาจมากกว่าหรือน้อยกว่าได้ ฉะนั้นเพื่อตรวจสอบดูว่าเครื่องกำเนิดที่ออกแบบสร้างนี้ จะยังสามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้รูปคลื่นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอยู่หรือไม่ จึงทดลองเปลี่ยนค่าโหลดเก็บประจุตั้งแต่ 500 pF จนถึง 2000 pF ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แรงดันอิมพัลส์ที่โหลดเก็บประจุต่างๆ จากเครื่องกำเนิดที่มี C_s = 50 nF, R_e = 1380 Ω และ R_d ปรับค่าได้ตั้งแต่ 408 Ω ถึง 558 Ω

โหลด C_b (pF)	T_1 (μS)	T_2 (μS)	η (%)
500	0.85	50	85.7
1000	1.2	51	83.3
2000	1.48	54	82.3

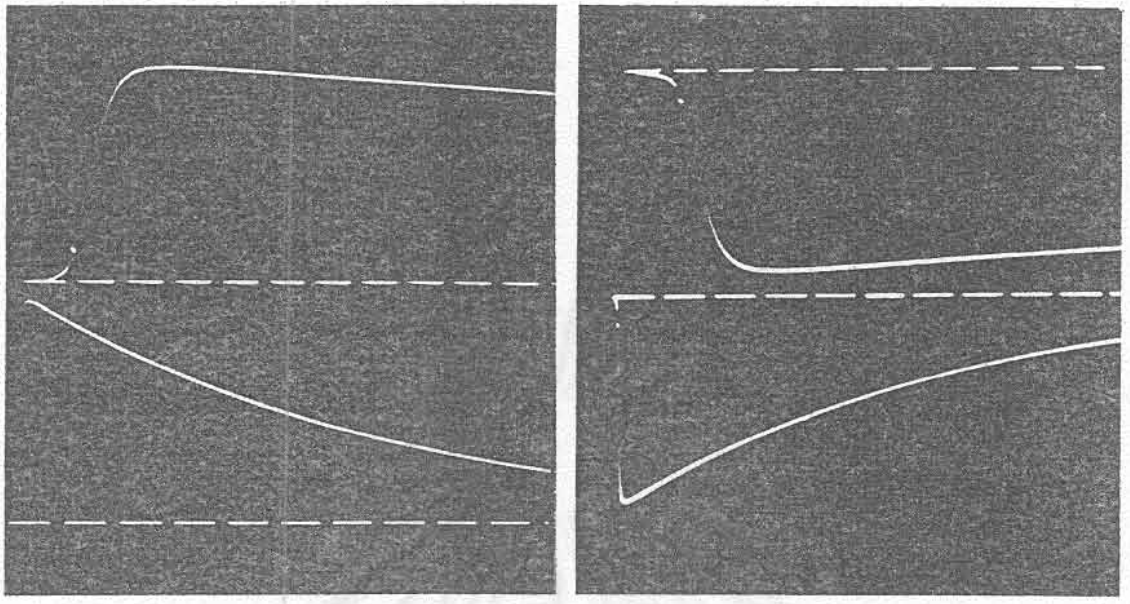
* ที่โหลด C_b = 500 pF (ค่าเก็บประจุของโวลเตจดิไวเดอร์) เกิดแรงดันพุ่งเกินประมาณ 4 %

4.3.3 การทดสอบสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดันอัดประจุกำหนด

เป้าหมายของการทดสอบนี้ก็คือ การสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดันอัดประจุรวมสูงสุด 1000 kV หรือแรงดันอัดประจุต่อชั้นเท่ากับ 84 kV โดยทดลองเริ่มป้อนแรงดันอัดประจุที่ระดับต่ำประมาณ 33 kVแล้วเพิ่มแรงดันอัดประจุให้สูงขึ้นเป็นลำดับ โดยเพิ่มขึ้นทีละประมาณ 10 kV ต่อชั้น จนถึง 84 kV ทำทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ทุกระดับแรงดันที่ป้อนทำการบันทึกรูปคลื่นแรงดันที่สร้างขึ้น และประสิทธิภาพของการสร้างแรงดัน แรงดันที่สร้างขึ้นจะวัดด้วยอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน 1200 kV มีความต้านทานภาคแรงสูง 19.5 kΩ และเวลาตอบสนอง 18 ns ทำการทดลองสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดันอัดประจุ 1000 kV ทั้งขั้วบวกและขั้วลบไม่น้อยกว่า 40 ครั้งอย่างต่อเนื่อง ได้รูปคลื่นตามมาตรฐานกำหนดดังในรูปที่ 4.4 แสดงว่าเครื่องกำเนิดที่ออกแบบสร้างนี้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ที่แรงดันกำหนดได้ตามที่ออกแบบไว้

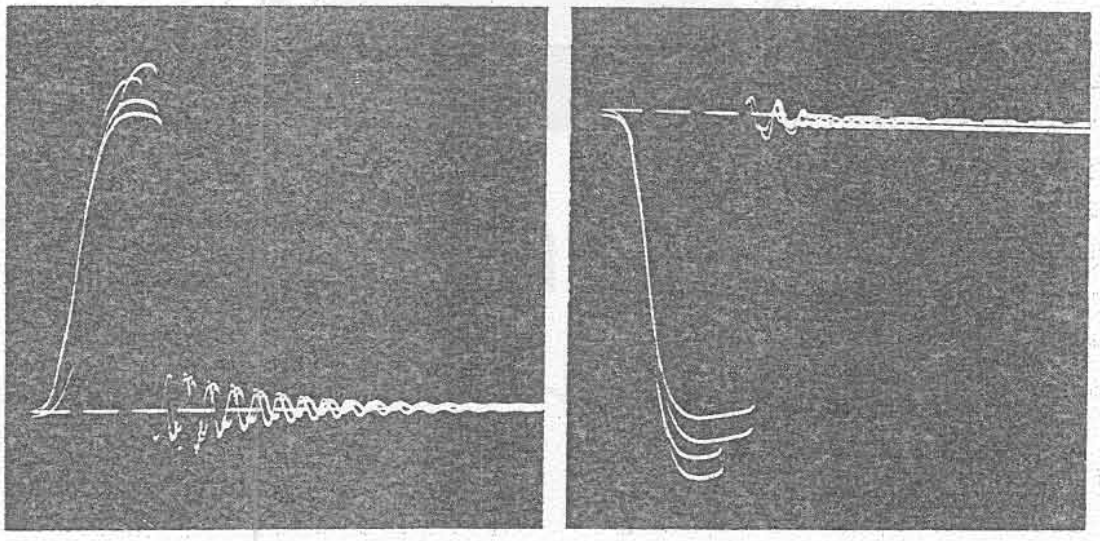
4.4 การทดลองสร้างรูปคลื่นตัดด้วยแกป

การทดสอบให้เกิดรูปคลื่นตัดเป็นการทำให้เกิดการยุบตัวของแรงดันอย่างรวดเร็ว เพื่อดูว่าเครื่องกำเนิดสามารถสร้างรูปคลื่นตัดได้หรือไม่ และเป็นการตรวจสอบความคงทนของการฉนวนต่อสภาวะทรานเซี้ยนท์ได้หรือไม่ โดยทำให้เกิดคลื่นตัดด้วยร็อดแกปที่ระดับต่างๆ ได้รูปคลื่นตัดตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.5



a) ขั้วบวก b) ขั้วลบ

รูปที่ 4-4 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นจากแรงดันอัดประจุ 1000 kV
ตัวเก็บประจุโหลด 1000 pF ได้แรงดันจ่ายออก 830 kV
สเกลเวลารูปคลื่นบน 1 μS/div และรูปคลื่นล่าง 10 μS/div

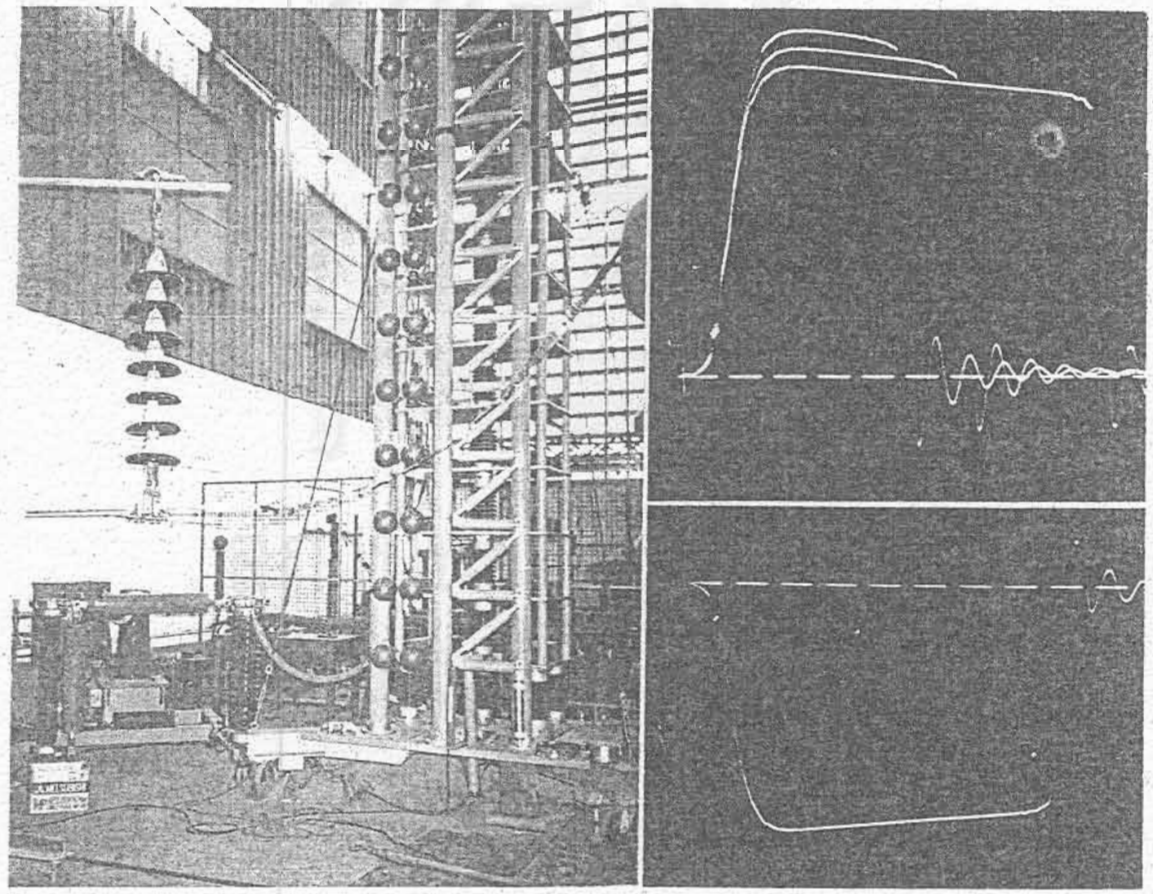


รูปที่ 4-5 การทำให้เกิดรูปคลื่นตัดที่หางคลื่นที่แรงดันอัดประจุประมาณ 300-400 kV
(สเกลเวลา 1μS/div)

4.5 การทดลองใช้งาน

เพื่อเป็นการพิสูจน์ให้เห็นว่าเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้สามารถใช้งานได้จริง จึงทดลองใช้ทดสอบหาค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วยแขวน

การทดสอบหาค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วยแขวน ANSI Cl. 52-4 จำนวน 7 ลูกมาต่อกันเป็นพวง ดังในรูปที่ 4.6 ลูกถ้วยแขวนแต่ละลูกมีค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตเท่ากับ 125 kV ขั้วบวก และ 130 kV ขั้วลบ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ANSI C 29.2 [8] การหาค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ($U_{b50\ \%}$) ของพวงลูกถ้วยจะหาโดยวิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ [4] ซึ่งได้ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตขั้วบวกเท่ากับ 666 kV และขั้วลบเท่ากับ 629 kV ดังออสซิลโลแกรมของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ที่แสดงการเกิดวาบไฟตามผิวของพวงลูกถ้วยที่หางคลื่นแรงดัน ทั้งขั้วบวกและขั้วลบที่แสดงในรูปที่ 4.6 (สเกลเวลา 1μS/div)



รูปที่ 4-6 การทดลองใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้าง ทำการทดสอบหาค่าวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติพวงลูกถ้วยแขวน ANSI cl.52-4 จำนวน 7 ลูก

บทที่ 5
สรุปผลและแนวคิดต่อเนื่อง

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ ที่ออกแบบสร้างขึ้นเองเกือบทั้งหมด ยกเว้นตัวเก็บประจุอิมพัลส์ของเครื่องกำเนิดเท่านั้นที่สั่งซื้อจากต่างประเทศ ใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่ผลิตได้ภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ และใช้เทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงเป็นพื้นฐานของการออกแบบสร้าง และอาศัยข้อมูล ประสบการณ์ที่สะสมจากการศึกษาพัฒนาออกแบบสร้างองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องกำเนินแรงสูงที่ผ่านมา ช่วยให้การเลือกวัสดุและการออกแบบมิติเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและความเชื่อมั่นได้ สูงผลของการออกแบบสร้างพอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผล

1) โครงสร้าง

ลักษณะโครงสร้างได้อาศัยรูปแบบของต่างประเทศมาดัดแปลงให้เหมาะสมกับวัสดุที่มีหรือจัดหาได้ภายในประเทศ การเลือกมิติต่างๆ ของการฉนวนภายนอกคำนึงถึงสภาวะอากาศของประเทศ ที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง การประกอบสร้างทำได้ง่าย โครงสร้างมีลักษณะง่ายต่อการตรวจเช็ค การต่อทางไฟฟ้าและทางกลมีความมั่นคง สามารถสับเปลี่ยนได้ง่าย ยิ่งกว่านั้นโครงสร้างยังเอื้ออำนวยต่อการเพิ่มจำนวนชั้นให้มากขึ้นในกรณีที่ต้องการแรงดันสูงขึ้น

2) ค่าที่กำหนด

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มี 12 ชั้น มีค่าที่กำหนดคือ

- แรงดันอัดประจุรวมสูงสุด 1100 kV และพลังงานรวม 30 kJ
- ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ 12 ชั้น มีความจุไฟฟ้ารวม C_s = 50 nF
- ค่าองค์ประกอบความต้านทานปรับรูปคลื่นแต่ละขั้นกำหนดจากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุโหลด C_b = 1000 pF ได้ R_d' = 33 Ω และ R_e' = 114 Ω

3) การสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์

จากค่า R_d และ R_e ที่กำหนดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μS ได้ตามมาตรฐานกำหนดทุกประการ โดยที่ค่าความจุไฟฟ้าของโหลดถึง 2000 pF และประสิทธิภาพที่ค่าโหลดนี้ได้สูงถึง 82.3 %

4) ในกรณีที่โหลดมีค่าความจุไฟฟ้ามากกว่านี้ เครื่องกำเนิดนี้ก็สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยลดค่าความต้านทาน R_d ให้น้อยลง

5) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้น สามารถใช้ทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า (BIL) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กับระบบที่ต่อลงดินโดยตรง ได้ถึง 245 kV ซึ่งมีค่า BIL เท่ากับ 950 kV

6) เครื่องกำเนิดที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการเรียนการสอน การวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง และจะเป็นต้นแบบของการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ที่จะนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อทดสอบและพัฒนาผลิตภัณฑ์อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ผลิตขึ้น เช่น ลูกถ้วยฉนวน สวิตช์ เซอร์กิตเบรเกอร์ กับดักแรงดันเกิน หม้อแปลงไฟฟ้า และเคเบิลแรงสูง เป็นต้น

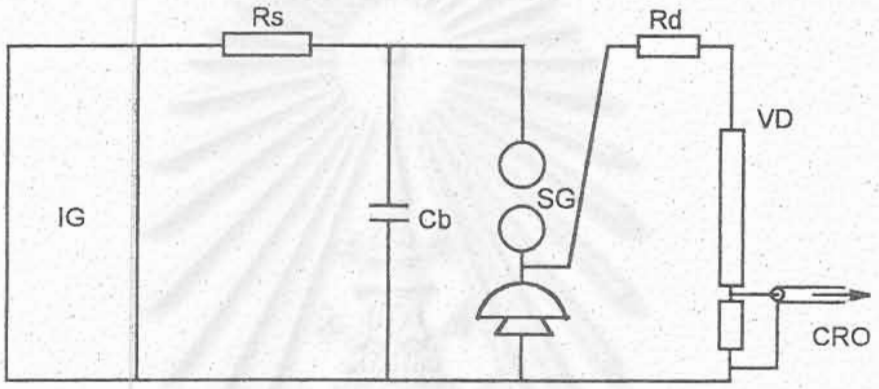
5.2 แนวคิดต่อเนื่อง

เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบสร้างขึ้นนี้ มีโครงการที่จะนำไปพัฒนาสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 2500 kV/μS เพื่อใช้ศึกษาวิจัยคุณภาพของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนต่อไป

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูงส่วนใหญ่หรือเกือบทั้งหมด เป็นแบบสายขึงอากาศ ซึ่งใช้ลูกถ้วยฉนวนเป็นตัวยึดหรือรองรับสายไฟ ฉะนั้นลูกถ้วยฉนวนเหล่านี้จึงมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันอิมพัลส์จากฟ้าผ่า หากลูกถ้วยฉนวนมีคุณสมบัติทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าไม่ได้ ก็จะทำให้ลูกถ้วยเสียหายเกิดการเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลน (puncture) ลูกถ้วยจะเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวรและเป็นเหตุให้เกิดผิดพร่อง (fault) ขึ้นในระบบส่งจ่าย ทำให้การส่งพลังงานไฟฟ้าต้องหยุดชะงัก มีผลต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่าย นับเป็นผลเสียหายต่อเศรษฐกิจและอุสาหกรรม ดังนั้นในมาตรฐานลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนยุคปัจจุบัน จึงได้เพิ่มข้อกำหนดคุณสมบัติของลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กับสายส่งแบบขึงอากาศจะต้องมีความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นชันได้ ในประเทศไทยการไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งเป็นผู้ใช้ลูกถ้วยฉนวนในระบบส่งจ่ายเป็นจำนวนมาก ต่างก็ประสบปัญหาที่ลูกถ้วยฉนวน หลังจากติดตั้งใช้งานไประยะหนึ่งจะเกิดการเจาะทะลุเนื้อพอร์ซเลนเป็นจำนวนปีละมากๆ และสันนิษฐานว่า อาจเกิดจากฟ้าผ่าที่มีแรงดันรูปคลื่นชัน

ทางห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้มองเห็นปัญหาของการไฟฟ้าที่ต้องการใช้ลูกถ้วยที่มีคุณภาพ เพื่อขจัดปัญหาความผิดพร่องของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า หรือไฟฟ้าดับเนื่องจากลูกถ้วยฉนวนที่ไม่มีคุณภาพ และเป็นการช่วย

เหลือการพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนภายในประเทศตามนโยบายรัฐบาล จึงเห็นสมควรอย่างยิ่ง ที่จะได้มีการพัฒนาออกแบบสร้างอุปกรณ์ชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันดังกล่าว โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน1000kVนี้เป็นตัวจ่ายดีสชาร์จให้กับตัวเก็บประจุโหลดประมาณ 6 nF 600 kVที่ต่อขนานไว้ด้วยสปาร์กแกปที่ต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบคือ ลูกถ้วยฉนวนดังวงจรในรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน

IG = Impulse generator (Marx's circuit)

Rs = Series resistor

Cb = Load capacitor

SG = Crawbar spark gap

Rd = Damping resistor

VD = Resistor voltage divider

CRO = Oscilloscope

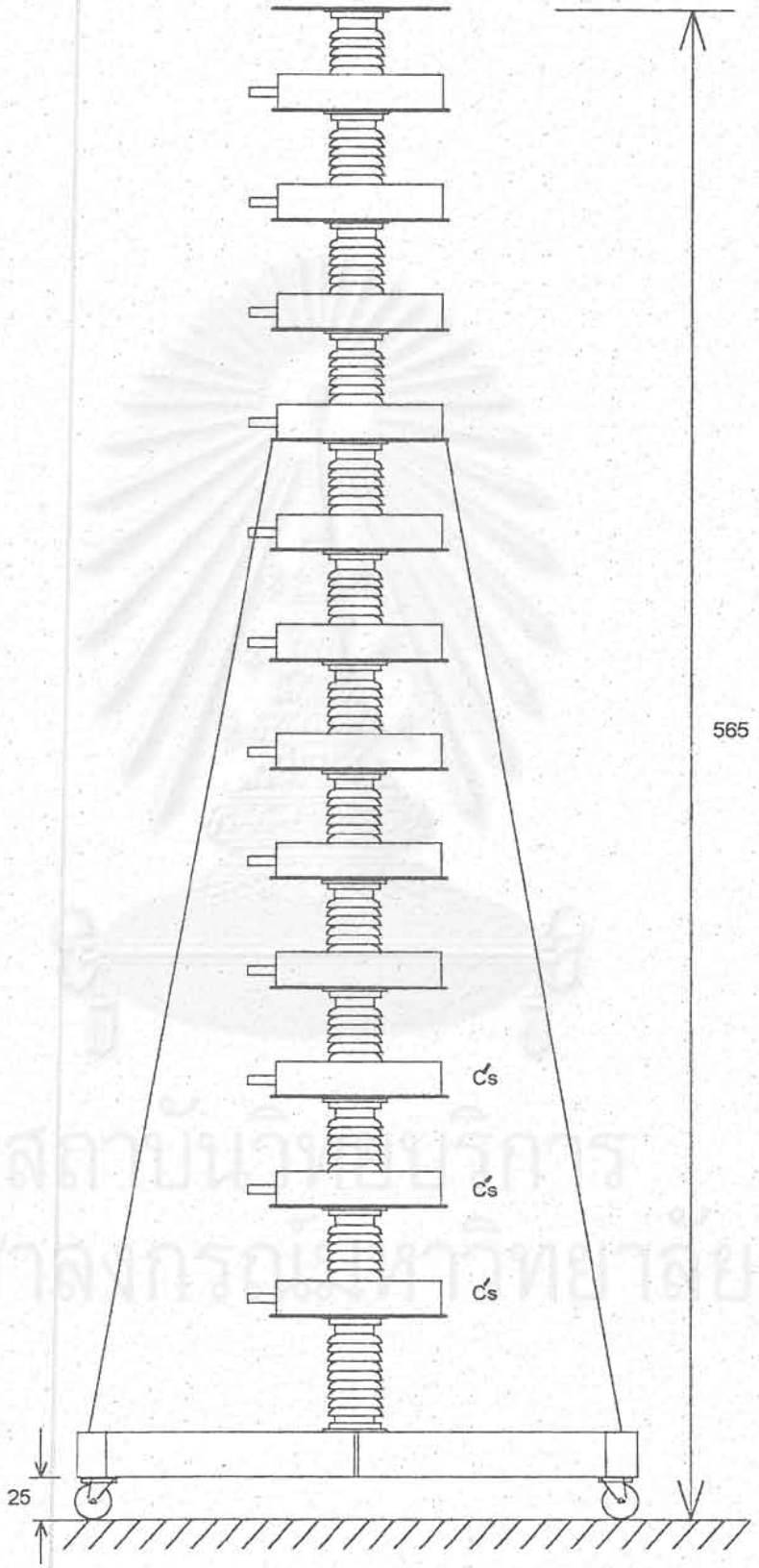
เอกสารอ้างอิง

1. IEC Standard Publ. No.71-1976, Insulation Co-ordination
2. Report on the High-Voltage Laboratory, Supplement to the Request for a New Impulse Generator Rated 1400 kV 70 kJ, H.V.Lab. Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, August 1988, Submitted to the Swiss Government.
3. สำรวย สังข์สะอาด, "อุปกรณ์ชุดประกอบสร้างแรงดันสูง 100 กิโลโวลต์" วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ฉบับที่ 2, ธันวาคม 2532 - พฤษภาคม 2533 หน้า 83-92
4. IEC Standard Publ. No.60 High-Voltage Test Techniques
5. Kuffel, E., Zaengl. W.S., High-Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, Oxford, 1984
6. สำรวย สังข์สะอาด, "เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 kV 1000 J" รายงานผลการประดิษฐ์ ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์ ฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, มีนาคม 2536
7. IEC Standard Publ. No.52-1960, High-Voltage Measurement by Means of Sphere-gaps
8. ANSI Standard C 29.2-1977, Porcelain and Toughened Glass Insulators (Suspension Type)

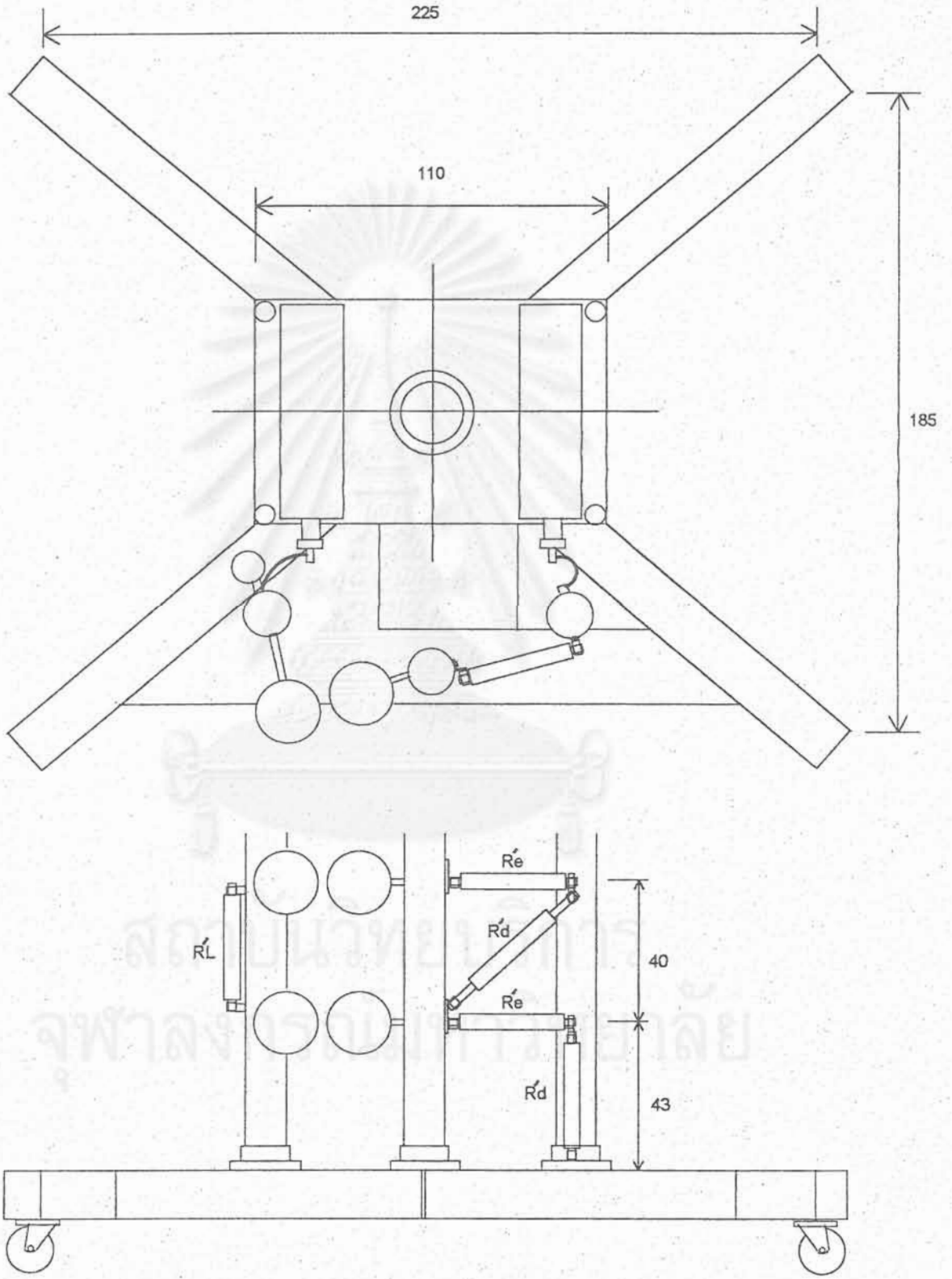
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ผ-1 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ



รูปที่ ผ-2 รายละเอียดด้านหน้าและฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 1000 kV 30 kJ