



ชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
HIGH VOLTAGE IMPULSE GENERATOR



นายรัตนพงษ์ กองพันธ์ รหัส 57363382
นายอัคราวุฒิ บรรพตธรรม รหัส 57363634

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2560



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	ชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายรัตนพงษ์ กองพันธ์	รหัส	57363382
	นายอัศราวุฒิ บรรพตธรรม	รหัส	57363634
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.สรารวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2560		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ที่ปรึกษาโครงการงาน
(ดร.สรารวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มูชิตา สงฆ์จันทร์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยดนัย ภาชนะพรรณณ์)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	ชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายรัตนพงษ์ กองพันธ์	รหัส 57363382
	นายอัศราวุฒิ บรรพตธรรม	รหัส 57363634
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.สรารวุฒิ วัฒนวงศ์พิทักษ์	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์	
ปีการศึกษา	2560	

บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จำนวน 10 ชั้นแบบรูปคลื่นฟ้าผ่า พิกัดแรงดันสูงสุด 10.52 กิโลโวลต์ เพื่อเป็นต้นแบบที่ใช้ประกอบการเรียนการสอน ชุดทดลองนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ วงจรสร้างแรงดันสูงกระแสตรงที่ใช้วงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft Walton ชนิดครึ่งคลื่นและวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายชั้นใช้เป็นวงจรของมาร์กซ์ (Marx's circuit) แรงดันด้านออกกระแสตรงจากวงจรทวิแรงดันกระแสตรงที่ใช้แหล่งจ่ายเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์จะถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากผลการทดสอบพบว่า แรงดันด้านออกของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีค่ายอดของรูปคลื่นฟ้าผ่าเท่ากับ 10.52 ± 0.9735 กิโลโวลต์ และมีเวลาหน้าคลื่น/เวลาท้ายคลื่น (T_1 / T_2) เท่ากับ $3.59 \pm 0.5406 / 61.944 \pm 16.223$ ไมโครวินาที ซึ่งเวลาหน้าคลื่นและท้ายคลื่นยังไม่ผ่านตามมาตรฐาน IEEE Standard 60 กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังทำการทดสอบการเบรกดาวนั้ผ่านอากาศและการเบรกดาวนั้ผ่านอากาศไปตามผิวของฉนวนแต่ละชนิด ได้แก่ น้ำและน้ำมันเครื่องพบว่า การเบรกดาวนั้ผ่านอากาศของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างสามารถเกิดการเบรกดาวนั้ในอากาศได้ที่ระยะสูงสุดเท่ากับ 7 มิลลิเมตร ส่วนการเบรกดาวนั้ตามผิว พบว่า น้ำสามารถเกิดการเบรกดาวนั้ได้ที่ระยะสูงสุดเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และน้ำสามารถเกิดเบรกดาวนั้ไปตามผิวได้ง่ายกว่าน้ำมันเครื่อง

Project title High Voltage Impulse Generator
Name Mr. Rattanapong Kongpan ID. 57363382
Mr. Assarawut Banphottham ID. 57363634
Project advisor Mr. Sarawut Wattanawongpitak, D.Eng.
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2017

Abstract

This project presents a design and construction of 10 stages high voltage impulse generator. This generator produces lightning impulse voltages up to 10.52 kilovolts for education purpose. This generator composes of two parts: Half-wave Cockcroft Walton circuit and multi-stage Marx's circuit. The output's DC voltage of Cockcroft Walton circuit, which has input AC voltage 220 Vac is used as input voltage of Marx's circuit.

The results show that output impulse voltage of this generator has 10.52 ± 0.9735 kilovolts peak voltage. The wave front time and tail time (T_1/T_2) is $3.59 \pm 0.5406 / 61.944 \pm 16.223$ microseconds and it is not standardized according to IEEE Standard 60. Moreover, the breakdown test has two cases: the breakdown through the air and the breakdown through the air to the insulation's surfaces such as water and engine oil. It is found that occurs the breakdown through the air at maximum distance 7 millimeters. For surface breakdown, water occurs breakdown at maximum distance 6 millimeters and the breakdown of water's surface occurs easier than engine oil's surface.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณ ดร.สรารุณี วัฒนวงศ์พิทักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ พร้อมชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหา รวมไปถึงการให้คำปรึกษาในการทำรูปเล่มปริญญาานิพนธ์จนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ในโอกาสนี้ผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มูจิตา สงฆ์จันทร์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยตัญญู ภาชนะพรรณ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ และ ตรวจสอบแก้ไข ให้คำปรึกษาในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ในสุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดามารดา ครอบครัว เพื่อน และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน พร้อมกับเปิดโอกาสให้ได้เรียนรู้ในสิ่งที่สนใจเพื่อนำความรู้ที่ได้นำไปใช้ในอนาคตสืบต่อไป



ผู้ดำเนินโครงการ
รัตนพงษ์ กองพันธ์
อัศราวุฒิ บรรพตธรรม

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	3
1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์.....	4
2.1.1 ช่วงเวลาน้ำคลื่น.....	4
2.1.2 ช่วงเวลาท้ายคลื่น.....	4
2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	7
2.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น.....	8
2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์.....	10
2.4.1 การแปรของแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลา.....	10
2.4.2 ประสิทธิภาพของวงจร.....	13
2.4.3 การคำนวณหาค่าเวลาของรูปคลื่น T_1 และ T_2	15
2.5 เทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์.....	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 วงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft Walton	17
2.6.1 การคำนวณแรงดันระลอก.....	18
2.6.2 การคำนวณแรงดันตก	19
2.7 สปาร์กแก๊ปทรงกลมและการเบรกดาวนิน้อากาศ.....	20
2.7.1 ลักษณะสมบัติของสปาร์กแก๊ปทรงกลม.....	20
2.7.2 ค่าแรงดันเบรกดาวนิน้อากาศของสปาร์กแก๊ปทรงกลม	20
2.8 โปรแกรมจำลองวงจร OrCAD.....	22
บทที่ 3 การดำเนินงาน.....	23
3.1 วงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft Walton	23
3.1.1 จำนวนชั้นของวงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft-Walton.....	24
3.1.2 การเลือกใช้ตัวเก็บประจุ	24
3.1.3 การเลือกใช้ไดโอด.....	24
3.1.4 ค่ากระเพื่อมของแรงดัน (δV).....	25
3.1.5 แรงดันตก (ΔV).....	26
3.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	26
3.2.1 การคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร.....	27
3.2.2 การจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบ	31
3.3 การออกแบบและการสร้างโครงสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	33
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	36
4.1 การทดสอบวงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft Walton.....	36
4.2 การทดสอบแรงดันอัดประจุในแต่ละชั้น	37
4.3 การทดสอบเบรกดาวนิน้อากาศ	40
4.4 การเบรกดาวนิน้อากาศไปตามผิวของน้ำ.....	42
4.5 การเบรกดาวนิน้อากาศไปตามผิวของน้ำมันเครื่อง.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	47
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	47
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	49
5.3 แนวทางการพัฒนา.....	50
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้	52
ภาคผนวก ข การทดสอบแรงดันอัดประจุในแต่ละชั้น.....	55
ภาคผนวก ค การทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ	62
ภาคผนวก ง การทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ.....	65
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	68



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	2
2.1 ตารางหาค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่น T_1/T_2	13
2.2 ค่าประสิทธิภาพของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	15
2.3 ค่าเวลาของรูปคลื่น T_1 และ T_2 ของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	15
4.1 เปรียบเทียบวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton	37
4.2 เปรียบเทียบค่าแรงดันอัดประจุแต่ละชั้นจากการจำลองและการทดลอง	38
4.3 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบแรงดันอัดประจุในแต่ละชั้น	39
4.4 ผลลัพธ์จากการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ	41
4.5 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ	42
4.6 ผลลัพธ์จากการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ	44
4.7 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ	45



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน	5
2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงตามมาตรฐาน	5
2.3 การเกิดคลื่นตัดที่หางคลื่น.....	6
2.4 การเกิดคลื่นตัดที่หน้าคลื่น	6
2.5 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	7
2.6 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายขั้น (Marx's circuit)	9
2.7 ลาปลาซทรานส์ฟอร์มของวงจรถูกกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน	10
2.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม	12
2.9 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรถูกกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	14
2.10 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์	16
2.11 วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton.....	17
3.1 แผนผังการทำงานของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	23
3.2 วงจรพื้นฐานของวงจรถูกกำเนิดแบบ Cockcroft Walton.....	23
3.3 วงจรถูกกำเนิดแบบ Cockcroft Walton จำนวน 3 ขั้น.....	25
3.4 ผลของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OrCAD ของวงจรถูกกำเนิดแบบ Cockcroft Walton	25
3.5 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้น.....	27
3.6 ตัวเก็บประจุแต่ละขั้นขนาด 2.03 ไมโครฟารัด โดยการต่อขนานกัน	30
3.7 ตัวเก็บประจุไหลรวมขนาด 0.1 ไมโครฟารัด โดยการต่ออนุกรมกัน.....	31
3.8 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 10 ขั้น โดยค่าองค์ประกอบได้จากการคำนวณ	31
3.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจร	32
3.10 การออกแบบโครงสร้างด้านหน้าของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	33
3.11 การออกแบบโครงสร้างด้านหลังของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	33
3.12 ภาพจำลองโครงสร้างด้านข้างของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	32
3.13 โครงสร้างด้านหน้าของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	34
3.14 โครงสร้างด้านหลังของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์.....	34
4.1 รูปคลื่นวงจรถูกกำเนิดแบบ Cockcroft Walton จากการทดลอง.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุชั้นที่ 7	38
4.3 ลักษณะการติดตั้งสปาร์กเก็ปในการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ.....	40
4.4 การทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ.....	40
4.5 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศครั้งที่ 4	41
4.6 ลักษณะการติดตั้งสปาร์กเก็ปในการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ.....	43
4.7 การเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ	43
4.8 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำครั้งที่ 1	44
4.9 ลักษณะการติดตั้งสปาร์กเก็ปในการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำมันเครื่อง..	46



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

วิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มุ่งเน้นศึกษาถึงปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงเพื่อให้สามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้าได้ อาทิ แรงดันเกิน การเบรกดาว์นของฉนวน ความเครียดสนามไฟฟ้า เป็นต้น ในการศึกษาการเกิดเบรกดาว์นของฉนวนชนิดต่าง ๆ ในสนามไฟฟ้า จะช่วยให้สามารถออกแบบการฉนวนไฟฟ้าและป้องกันการเกิดการลัดวงจรเนื่องจากการเกิดเบรกดาว์น รวมไปถึงสภาวะแรงดันเกินต่าง ๆ จากฟ้าผ่าและการสวิตช์เปิด – ปิดวงจรในระบบไฟฟ้า กำลังตลอดจนหาวิธีป้องกันและการประสานสัมพันธ์การฉนวนเพื่อให้การฉนวนไฟฟ้าของระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สำหรับการสร้างและวัดแรงดันสูงชนิดต่าง ๆ ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์ อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังจำเป็นต้องผ่านการทดสอบแรงดันเหล่านี้ก่อนนำไปใช้งานจริงเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ทั้งในเรื่องของความสามารถทนต่อแรงดันใช้งานปกติและแรงดันเกินตามค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ ซึ่งหากกล่าวถึงการทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังแรงสูงนั้น ในส่วนของอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ใช้เป็นตัวทดสอบเพื่อสร้างสภาวะแรงดันเกินจำลองจำเป็นต้องสร้างแรงดันเกินที่ค่อนข้างสูงเพื่อให้สามารถทนต่อแรงดันเกินฟ้าผ่าหรือสวิตช์ได้จริง

ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจในหลักการและทฤษฎีจึงทำให้มีแนวคิดในการสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นเพื่อเป็นชุดทดลองในการสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ทดสอบอุปกรณ์หรือวัสดุฉนวนต่าง ๆ รวมไปถึงการใช้เป็นเครื่องมือประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Engineering)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ เพื่อเป็นชุดทดลองประกอบการเรียนการสอนในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 1.1 (ต่อ) แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	พ.ศ.2560					พ.ศ.2561				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
5. ปรับปรุงแก้ไขวงจร ของชุดทดลอง										
6. จัดทำรูปเล่มและ นำเสนอโครงการ										

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- 1) ชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่สามารถใช้ป็นสื่อการเรียนรู้ให้กับผู้สนใจและเป็นต้นแบบในการพัฒนาต่อในภายภาคหน้า
- 2) สามารถนำชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไปใช้ทดสอบค่าความคงทนแรงดันเกินในอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้จริง

1.6 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1) ค่าอุปกรณ์ไฟฟ้า	2,300 บาท
2) แผงบอร์ดวงจรและอุปกรณ์สร้างฐานชุดทดลอง	2,200 บาท
3) ค่าถ่ายเอกสาร	500 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น (ห้าพันบาท)	<u>5,000 บาท</u>
หมายเหตุ: เฉลี่ยทุกรายการ	

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่ถูกจำลองขึ้นจากสถานะแรงดันเกินที่ส่งผลต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังทำให้อุปกรณ์เสียหาย เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถทนต่อสถานะแรงดันเกินจากฟ้าผ่าและการสวิตชิง ในขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์จำเป็นจะต้องมีการทดสอบอุปกรณ์ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงโดยใช้แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันทดสอบความทนทาน ดังนั้นจึงมีการพัฒนาสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขึ้นมาทดสอบและเพื่อให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีประสิทธิภาพและเที่ยงตรงมากที่สุด สิ่งสำคัญคือการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแรงดันอิมพัลส์ ตั้งแต่ลักษณะรูปคลื่น ช่วงระยะเวลา รูปแบบวงจรพื้นฐาน วงจรแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น ไปจนถึงเทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์ และปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปคลื่นมาตรฐานของแรงดันอิมพัลส์

ตามมาตรฐาน IEC Standard 60 ได้กำหนดการคำนวณช่วงเวลาการเกิดรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐานออกเป็น 2 ช่วง คือ

2.1.1 ช่วงเวลาน้ำคลื่น

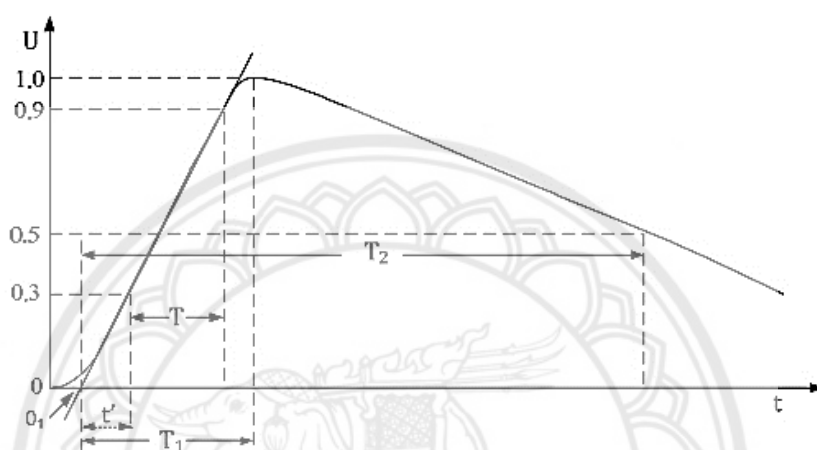
1) แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า: $T_1 = 1.67 \times (\text{ช่วงเวลาน้ำคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าเป็นร้อยละ 90 ของค่ายอด}) - (\text{ช่วงเวลาน้ำคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าเป็นร้อยละ 30 ของค่ายอด})$
เขียนให้อยู่ในรูปสูตรคำนวณ คือ $T_1 = 1.67 \times (t_{0.9V_p} - t_{0.3V_p})$

2) แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง: $T_1 = 1.67 \times \text{ช่วงเวลาน้ำคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าเป็นร้อยละ 90 ของค่ายอดหรือประมาณเป็นช่วงเวลาที่ค่ายอดของรูปคลื่น}$ เขียนให้อยู่ในรูปสูตรคำนวณ คือ $T_2 = t_{0.5V_p} \approx V_p$

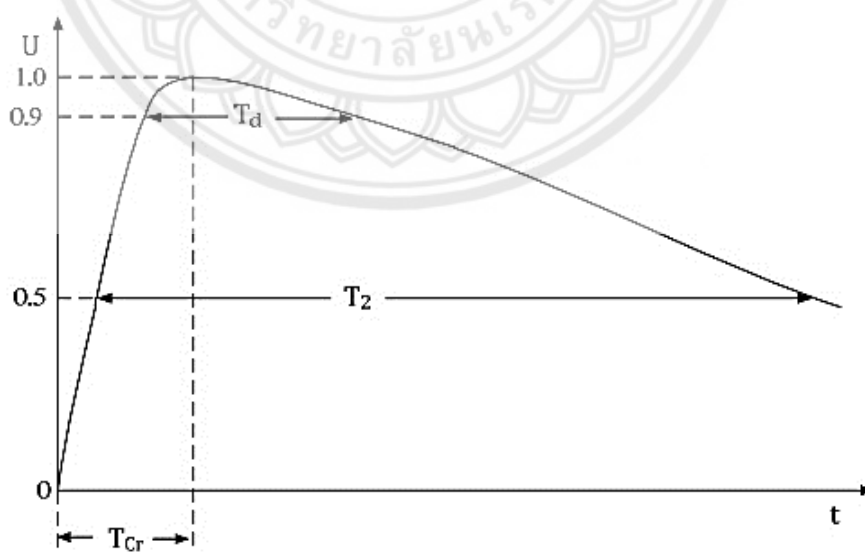
2.1.2 ช่วงเวลาท้ายคลื่น

$T_2 = \text{ช่วงเวลาที่ท้ายคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่าเป็นร้อยละ 50 ของค่ายอด}$ เขียนให้อยู่ในรูปสูตรคำนวณ คือ $T_2 = t_{0.5V_p}$

รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานจะแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ กำหนดให้ $T_1 / T_2 = 1.2/50$ ไมโครวินาที มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของรูปคลื่นร้อยละ 30 ของหน้าคลื่น $T_1 \pm 30\%$ และร้อยละ 20 ของท้ายคลื่น $T_2 \pm 20\%$ และรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดให้ $T_1 / T_2 = 250/2500$ ไมโครวินาที มีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของรูปคลื่นร้อยละ 20 ของหน้าคลื่น $T_1 \pm 20\%$ และร้อยละ 60 ของท้ายคลื่น $T_2 \pm 60\%$

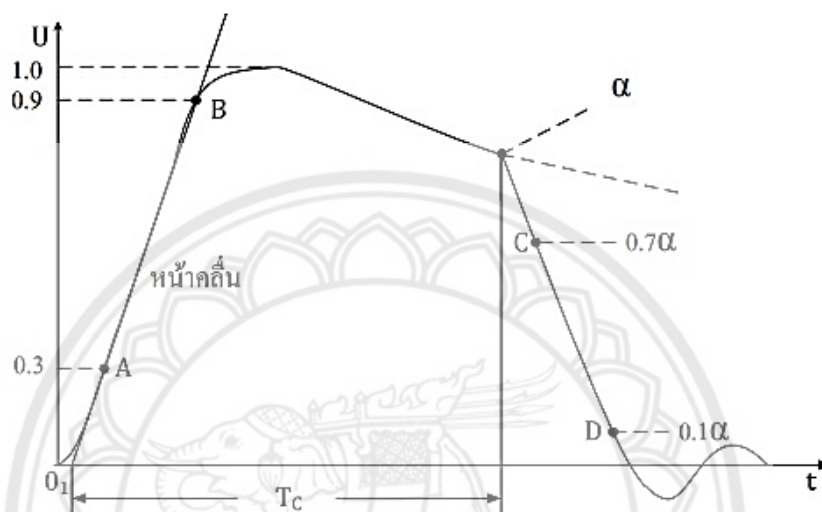


รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน
ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.



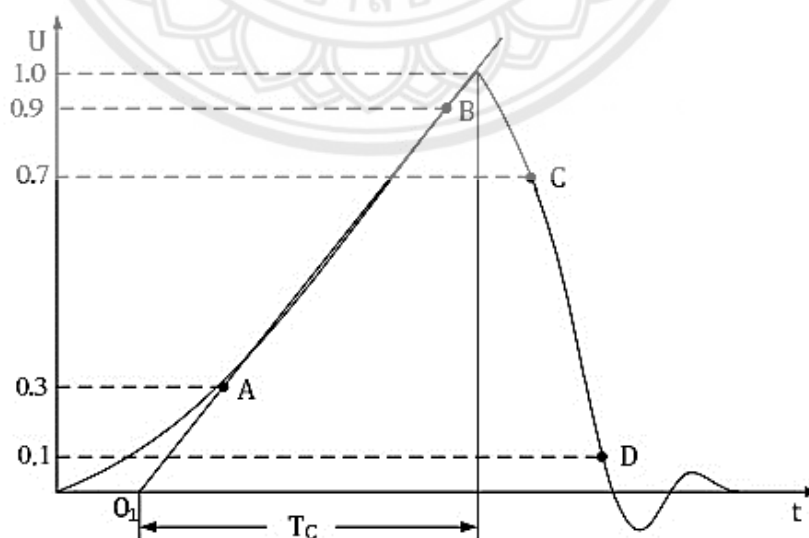
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์สวิตซ์ซึ่งตามมาตรฐาน
ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

อิมพัลส์ฟ้าผ่าคลื่นตัดจะเกิดขึ้นในขณะที่ป้อนแรงดันฟ้าผ่าอิมพัลส์เต็มคลื่น (Full-wave lightning impulse) เข้าไปที่วัสดุทดสอบ ในบางครั้งเมื่อป้อนแรงดันจนถึงค่าหนึ่งจะเกิดการรวบไฟตามผิวหรือเกิดการเบรกตัวนำผ่าทะลุวัสดุทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น เป็นผลทำให้แรงดันมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเกิดเหตุการณ์นี้อาจจะเกิดขึ้นที่ท้ายคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.3 หรืออาจเกิดที่หน้าคลื่นดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยช่วงเวลาที่เกิดคลื่นตัดจะเรียกว่า Chopped time (T_c)



รูปที่ 2.3 การเกิดคลื่นตัดที่ท้ายคลื่น

ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

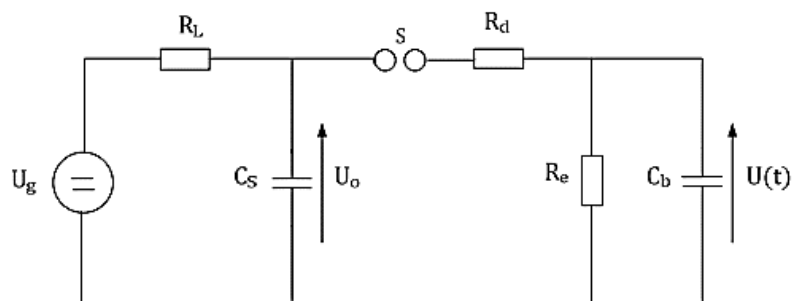


รูปที่ 2.4 การเกิดคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

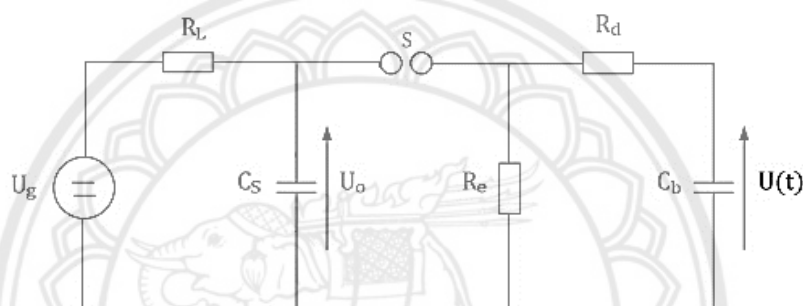
ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

2.2 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบ่งออกได้เป็น 2 วงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปวงจร (ก)



รูปวงจร (ข)

รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

วงจรพื้นฐานที่ใช้สร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามี 2 แบบ ซึ่งมีความหมายดังนี้

U_s คือ แรงดันกระแสตรงของตัวจ่าย

U_o คือ แรงดันอัดประจุกระแสตรง

C_s คือ ตัวเก็บประจุอิมพัลส์เป็นตัวเก็บพลังงาน

C_b คือ ตัวเก็บประจุโหลด

R_L คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ

R_d คือ ตัวต้านทานหน่วง

R_e คือ ตัวต้านทานปล่อยประจุ

$U(t)$ คือ แรงดันอิมพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

SG คือ สปาร์กแก๊ป

หลักการทางแรงดันกระแสตรง U_0 เป็นตัวป้อนแรงดันอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุอิมพัลส์จนได้แรงดันที่ต้องการ U_0 การอัดประจุจะผ่านความต้านทาน R_L ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุเร็วหรือช้า ค่าแรงดันอัดประจุ U_0 จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของสปาร์กแก๊ป SG นอกจากนั้นสปาร์กแก๊ปยังทำหน้าที่เหมือนสวิทช์หรือไก (Trigger) เพื่อให้ตัวเก็บประจุ C_0 ปล่อยประจุให้กับโหลด การเกิดเบรกดาวนในช่องสปาร์กแก๊ปจะดำเนินไปด้วยความรวดเร็ว ช่วงระยะเวลาการเบรกดาวนต่อเนื่องจะถี่หรือห่างขึ้นอยู่กับแรงดันกระแสตรงที่ป้อนให้กับ C_0 ถ้าปรับ U_0 ให้สูงมาก ๆ จะเกิดการเบรกดาวนที่ง่ายหรือเบรกดาวนถี่ขึ้น เมื่อเกิดเบรกดาวนที่ SG แรงดันอัดประจุ U_0 จะคร่อม R_0 และ C_0 ประจุจะถ่ายทอดไปยังวัสดุทดสอบ ซึ่งแทนด้วย C_0 การถ่ายเทหรือปล่อยประจุจะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับ R_0 และ C_0 นับเป็นช่วงเวลาน้ำคลื่น R_0 และ C_0 จึงเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาหน้าคลื่น เมื่อประจุถ่ายให้ C_0 จนเต็มประจุจะดิซชาร์จประจุไปสู่ R_0 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า R_0 ทำหน้าที่ควบคุมช่วงเวลาท้ายคลื่น

ในการบอกพิกัดของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะบอกตามค่าของพลังงานที่สะสมสูงสุดของวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งถูกกำหนดด้วยตัวเก็บประจุ C_0 และแรงดัน U_0 จากสมการที่ 2.1

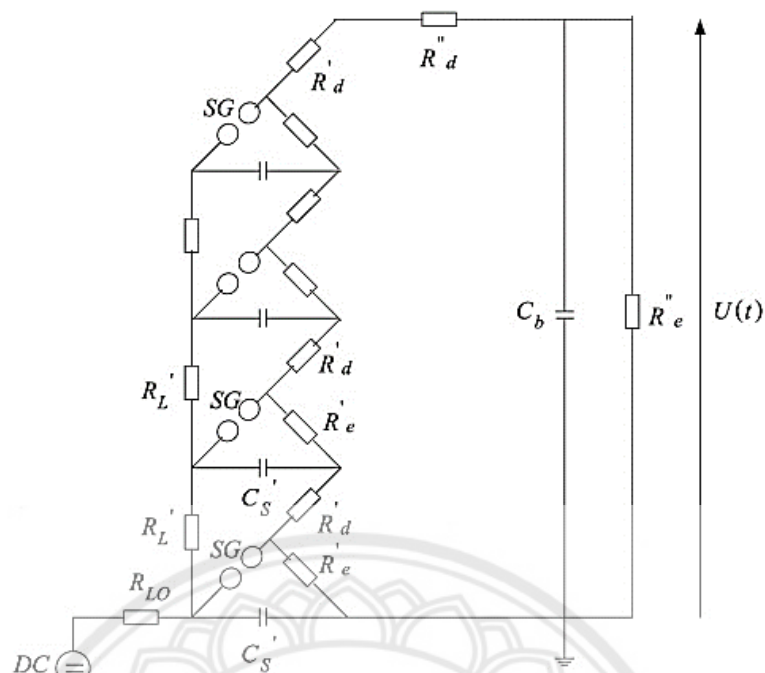
$$W_0 = \frac{1}{2} C_0 U_0^2 \quad (2.1)$$

2.3 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น

จากวงจรพื้นฐานของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ เพื่อที่จะสร้างแรงดันอิมพัลส์ให้สูงขึ้น วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ชั้นเดียวอาจไม่เหมาะกับการใช้งานจริงในทางปฏิบัติ เนื่องมาจากปัจจัยดังนี้

- 1) ขนาดของวงจรจะมีขนาดใหญ่มากเพราะอุปกรณ์ต้องทนแรงดันที่มีค่าสูง
- 2) จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาดใหญ่หรือมีค่าสูง
- 3) ทำให้เกิดโคโรน่าขึ้นที่โครงสร้างอุปกรณ์เพราะแรงดันสูงทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าได้ง่าย
- 4) ในการสร้างสปาร์กแก๊ปจะทำได้ยากเพราะการควบคุมแรงดันสูงจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้นค่าแรงดันอิมพัลส์สูง ๆ อาจสร้างได้ด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น โดยใช้วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ตามหลักการของวงจรมาร์ก (Marx's circuit) ดังในรูปที่ 2.6

หมายเหตุ: ความหมายของสัญลักษณ์ในวงจรจะเหมือนกับวงจรขั้นพื้นฐานเครื่องหมาย (') แสดงถึงเป็นค่าต่อขึ้น และเครื่องหมาย (") แสดงถึงองค์ประกอบภายนอกที่เพิ่มขึ้นเพื่อปรับปรุงคลื่น



รูปที่ 2.6 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์หลายชั้น (Marx's circuit)

ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

ค่าองค์ประกอบในวงจรดังรูปที่ 2.6 แสดงความหมายดังนี้

R_{Lo} คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแสก่อนเข้าวงจร

R_L' คือ ตัวต้านทานจำกัดกระแสต่อชั้น

C_s' คือ ค่าเก็บประจุอิมพัลส์ต่อชั้น

C_b คือ ค่าเก็บประจุโหลด

R_d' คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่นต่อชั้น

R_d'' คือ ความต้านทานปรับหน้าคลื่นภายนอก

R_e' คือ ความต้านทานปรับหางคลื่นต่อชั้น

R_e'' คือ ความต้านทานปรับหางคลื่นภายนอก

เมื่อเกิดการเบรกดาว์นจะทำให้วงจรต่อกันแบบอนุกรมจะได้ค่ารวมเป็น $C_s = C_s'/n$,

$R_d = n \times R_d'$ และ $R_e = n \times R_e'$ การสปาร์กกระหว่างสปาร์กแกปจะเกิดขึ้นที่ชั้นแรกก่อนเกิดการ

เบรกดาว์นในชั้นต่อ ๆ ไปตามลำดับ เป็นผลให้ตัวเก็บประจุ C_s' ทั้งหมดต่อกันแบบอนุกรม และได้

แรงดันสูงเป็นทวีคูณของจำนวนชั้น

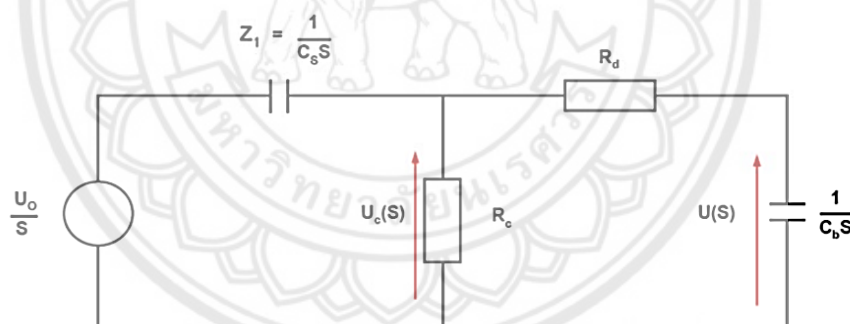
เมื่อแกปเกิดการสปาร์กหมดทุกคู่ C_s' จะต่อกันเป็นอนุกรม ฉะนั้น C_o จะได้รับประจุผ่านความต้านทานหน่วง R_d'' ต่อกันแบบอนุกรม และในที่สุดทั้ง C_s' และ C_o ต่างก็จะดีสชาร์จปล่อยประจุผ่าน R_e' และ R_d'' ต่อไปยังคงประกอบต่าง ๆ ถ้าคิดเทียบให้เป็นวงจรขึ้นเดียวตั้งวงจรพื้นฐานจะได้ค่ารวมต่าง ๆ คือ $U_o = n \times U_o'$, $C_s = C_s'/n$, $R_d = n \times R_d'$ และ $R_e = n \times R_e'$

2.4 การคำนวณวงจรแรงดันอิมพัลส์

ลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ซึ่งแปรอยู่ในเทอมของเวลาแสดงได้ด้วยค่าสูงสุดและเวลาหน้าคลื่น T_1 เวลาท้ายคลื่น T_2 ขึ้นอยู่กับค่าองค์ประกอบวงจรที่สามารถวิเคราะห์และคำนวณได้

2.4.1 การแปรของแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของเวลา

เมื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ C_s ด้วยแรงดันอัดประจุ U_o และเกิดเบรกดาวนที่สปาร์กแก๊ป SG จะทำให้ C_s ต่อกับวงจรปรับรูปคลื่น การวิเคราะห์อาจใช้ Laplace transform เขียนวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลาปลาซทรานส์ฟอร์มของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์พื้นฐาน

ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

จากวงจรในรูปที่ 2.7 ค่าแรงดันคร่อม R_c จะเขียนได้ว่า

$$U_c(s) = \frac{U_o}{s} \times \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.2)$$

เมื่อ $Z_1 = \frac{1}{C_s S}$ และ $Z_2 = \frac{R_e \left[R_d + \frac{1}{C_s S} \right]}{R_e + R_d + \frac{1}{C_b S}}$

ฉะนั้น
$$U_e = \frac{U_o (R_d R_e C_b C_s S + R_e C_s)}{R_d C_b S + R_e C_b S + R_e C_s S + R_d R_e C_b C_s S^2} \quad (2.3)$$

แรงดันที่จ่ายออกที่โหลดคิดจาก $U_e(S)$ ตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์จะได้

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

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

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

ซึ่งเขียนในแบบง่าย ๆ คือ

$$U(S) = \frac{U_o}{K} \times \frac{1}{S^2 + aS + b} = \frac{U_o}{K} \times \frac{1}{(\alpha_2 + \alpha_1)} \times \left(\frac{1}{S - \alpha_1} - \frac{1}{S - \alpha_2} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ

$$a = \frac{(R_d C_b + R_e C_s + R_e C_b)}{R_d R_e C_b C_s}$$

$$b = \frac{1}{R_d R_e C_b C_s}$$

$$K = R_d C_b$$

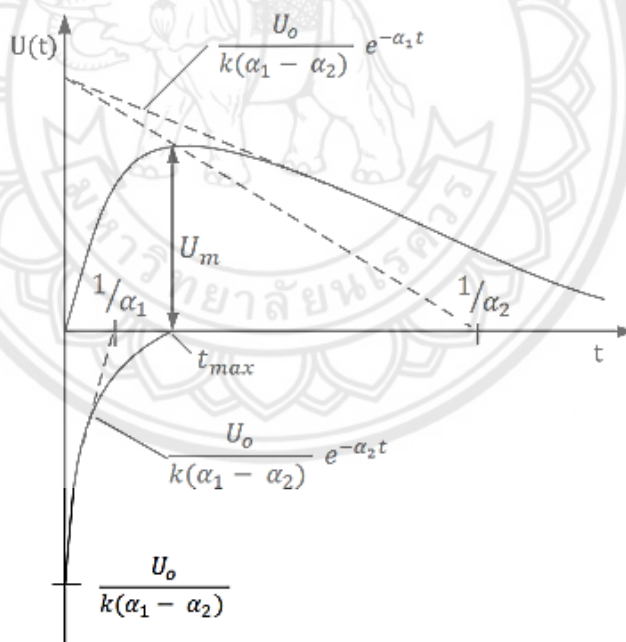
α_1, α_2 เป็นค่ารากที่สองของสมการ $S^2 + aS + b = 0$

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

จึงเขียนค่าแรงดันอิมพัลส์ในเทอมเวลาได้ว่า

$$U(t) = \frac{U_o}{K} \times \frac{1}{(\alpha_2 + \alpha_1)} \times [\exp(\alpha_1 t) - \exp(\alpha_2 t)] \quad (2.5)$$

จากสมการของแรงดันที่ได้จากวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันในเทอมของเวลาประกอบด้วยเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม ซึ่งมีค่าคงตัว (Time constant) เท่ากับ $1/\alpha_1$ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานประกอบด้วยเอ็กซ์โปเนนเชียลสองเทอม

ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

ตามนิยามของรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตามมาตรฐานที่กำหนดด้วยช่วงเวลาน้ำคลื่น และท้ายคลื่น T_1 และ T_2 ตามลำดับ มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลา $1/\alpha_1$ และ $1/\alpha_2$ ขึ้นอยู่กับ

อัตราส่วนของ T_1 / T_2 อันเป็นตัวแสดงถึงรูปลักษณะของรูปคลื่น ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับรูปคลื่นดังแสดงในตารางที่ 2.1 ค่า T_1 และ T_2 อาจหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_1 = \frac{k_2}{\alpha_2} \text{ และ } T_2 = \frac{k_1}{\alpha_1} \quad (2.6)$$

ตารางที่ 2.1 ตารางหาค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่น T_1 / T_2

T_1 / T_2 (ไมโครวินาที)	k_1	k_2	$1/\alpha_1$ (ไมโครวินาที)	$1/\alpha_2$ (ไมโครวินาที)
1.2/5	1.44	1.49	3.47	0.805
1.2/50	0.73	2.96	68.5	0.405
1.2/200	0.70	3.51	286	0.381
250/2500	0.87	2.41	2875	104

2.4.2 ประสิทธิภาพของวงจร

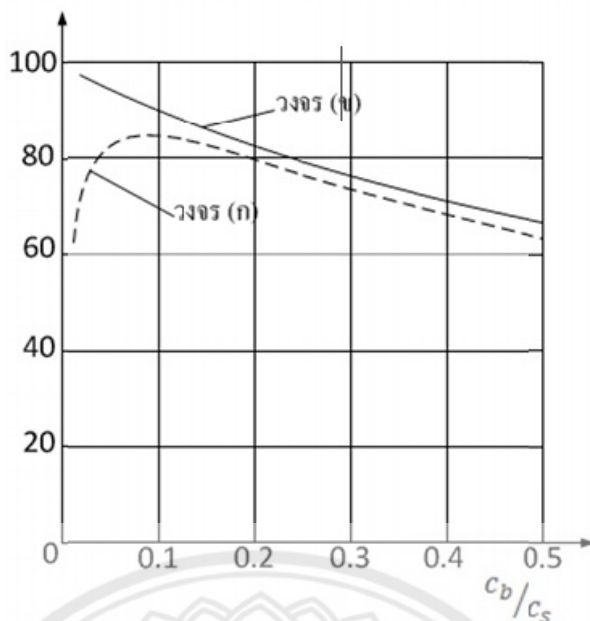
ประสิทธิภาพของแรงดันเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกสูงสุดต่อค่าแรงดันกระแสตรง U_o ที่ตัวเก็บประจุ C_s สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$\eta = \frac{U_p}{U_o} < 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ U_p คือ ค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์ $U(t)$

U_o คือ แรงดันอัดประจุให้กับ C_s

ในกรณีแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟาด่าตามมาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที ประสิทธิภาพของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะขึ้นอยู่กับค่า C_o ต่อ C_s มีค่าแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์
ที่มา : สำรวย สังสะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

ค่าประสิทธิภาพจะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ และจากค่าเวลา t_{\max} ในกราฟอิมพัลส์สามารถหาได้จาก

$$\frac{dU(t)}{dt} = 0 \quad (2.8)$$

$$-\alpha_1 e^{-\alpha_1 t_m} + \alpha_2 e^{-\alpha_2 t_m} = 0 \quad (2.9)$$

โดยที่ t_{\max} คือ เวลาขณะที่ค่าแรงดันขึ้นถึงค่ายอด U_p ฉะนั้น จะได้

$$t_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (2.10)$$

$$U_p = \frac{U_0}{\kappa(\alpha_2 - \alpha_1)} \times [e^{-\alpha_1 t_m} - e^{-\alpha_2 t_m}] \quad (2.11)$$

ค่าประสิทธิภาพเปรียบเทียบกันในแต่ละรูปแบบของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าประสิทธิภาพของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

	วงจร ก	วงจร ข
η	$\frac{R_d R_e}{(R_d + R_e)(C_b + C_s)}$	$\frac{C_s}{C_b + C_s}$

2.4.3 การคำนวณหาค่าเวลาของรูปคลื่น T_1 และ T_2

ในกรณีที่ทราบค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ถ้าจำเป็นต้องการทราบช่วงเวลาหน้าคลื่นและท้ายคลื่น อาจคำนวณค่าโดยประมาณได้จากค่า k_1 และ k_2 จากความสัมพันธ์ในตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่าเวลาของรูปคลื่น T_1 และ T_2 ของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

	วงจร (ก)	วงจร (ข)
T_1	$k_2 \times \frac{R_d R_e}{(R_d + R_e)} \times \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$	$k_2 R_d \times \frac{C_b C_s}{(C_b + C_s)}$
T_2	$k_1 (R_d + R_e)(C_b + C_s)$	$k_1 R_e (C_b + C_s)$

การคำนวณที่กล่าวแล้วข้างต้น ถือว่าวงจรที่ใช้คำนวณไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ ในทางปฏิบัติรูปคลื่นที่ได้มักจะแตกต่างไปจากค่าทฤษฎีโดยเฉพาะค่าเวลาช่วงหน้าคลื่นและค่ายอดของแรงดัน ทั้งนี้เนื่องจากในวงจรมีความเหนี่ยวนำซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้อาจทำให้เกิดแกว่งของสัญญาณได้ เพื่อขจัดคลื่นระลอกซ้อน จึงจำเป็นต้องใส่ความต้านทานหน่วง R_d การพิจารณาให้ความเหนี่ยวนำต่ออันดับกับความต้านทาน R_d และสมมติว่าผลของ R_d มีน้อย $R_d = \alpha$ ความต้านทาน R_d ที่ใส่เข้าไปจะต้องมีค่ามากกว่าค่าวิกฤติ คือ

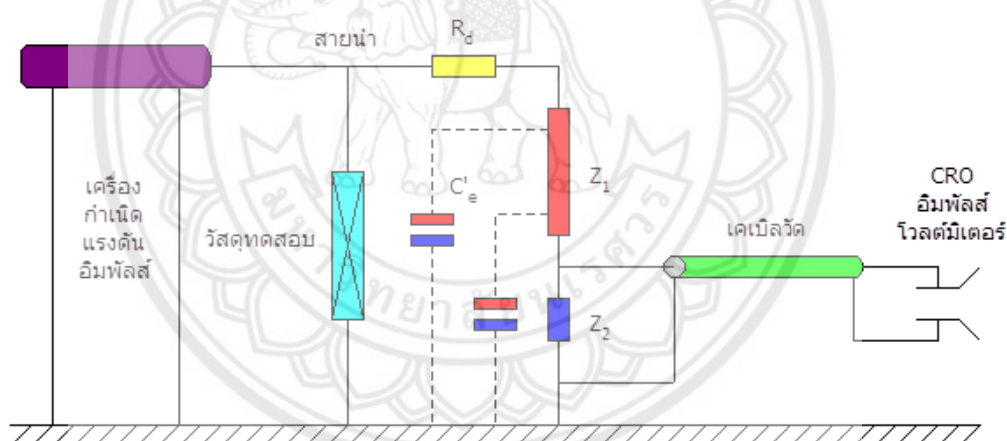
$$R_d = 2\sqrt{L \times \frac{(C_b + C_s)}{C_b C_s}} \quad (2.12)$$

2.5 เทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์เป็นการวัดค่ายอดในกรณีคลื่นเต็มหรือคลื่นตัดส่วนท้ายคลื่น ส่วนในกรณีคลื่นตัดส่วนหน้าคลื่นจะวัดค่าสูงสุดที่เหลือ สำหรับวิธีวัดค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้กันอยู่ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี คือ

- 1) วิธีวัดด้วยสปาร์กแก๊ปทรงกลม
- 2) วิธีวัดด้วยระบบแบ่งแรงดัน

เนื่องจากการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยสปาร์กแก๊ปทรงกลมทราบเพียงค่ายอดเท่านั้น แต่ไม่ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตามเวลา การเลือกใช้การวัดแบบระบบแบ่งแรงดันอาจเหมาะสมกว่า การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบแบ่งแรงดันนั้น รูปคลื่นแรงดันจะทำการวัดโดยใช้ฮอสซิลโลสโคปหรือเครื่องบันทึกแรงดันอิมพัลส์ ประกอบเข้ากับระบบแบ่งแรงดัน การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบแบ่งแรงดัน โดยทั่วไปประกอบไปด้วย 4 ส่วน คือ สายตัวนำแรงสูง ตัวแบ่งแรงดัน เคเบิลวัดแบบแนวแกนร่วม และฮอสซิลโลสโคป ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

ที่มา : <http://eestaff.kku.ac.th/~amnart/HVlectureNote/HVM.doc>

องค์ประกอบในระบบวัดแรงดันมีหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้

- 1) ตัวต้านทานหน่วงเวลา ทำหน้าที่หน่วงการแกว่งในสถานะชั่วคราวที่เกิดจากค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำกับค่าเก็บประจุของระบบแบ่งแรงดัน

2) สายตัวนำระหว่างวัสดุทดสอบกับระบบแบ่งแรงดัน ความยาวของสายตัวนำจะต้องมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความสูงของระบบแบ่งแรงดัน เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อระบบแบ่งแรงดัน ขนาดของสายตัวนำควรจะต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะไม่ทำให้เกิดโคโรน่า

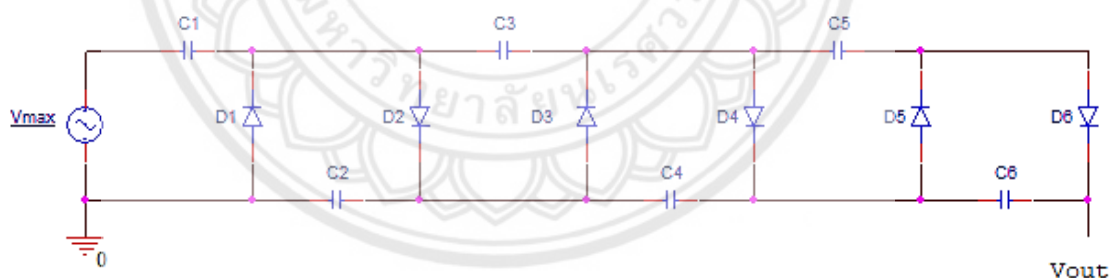
3) ระบบแบ่งแรงดัน ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้มีขนาดอยู่ที่ย่านที่อุปกรณ์วัดในภาคแรงต่ำสามารถวัดได้

4) เคเบิลวัด ทำหน้าที่ส่งสัญญาณจากภาคแรงต่ำของระบบแบ่งแรงดันมายังอุปกรณ์วัด เพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน และลดการรบกวนจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

5) ระบบสายดินทำหน้าที่เชื่อมต่อลงดินของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบทดสอบให้มีศักย์แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน

2.6 วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton

การสร้างแรงดันสูงกระแสตรงทำได้โดยอาศัยวงจรพื้นฐานสร้างแรงดันสองเท่านำมาต่อเป็นขั้นบันได ตามหลักการวงจร Cockcroft Walton ซึ่งจะใช้เป็นวงจรแหล่งจ่ายไฟให้กับชุดทดลอง เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ โดยจะรับไฟแรงดันต่ำกระแสสลับ $220V_{rms}$ ผ่านการเรียงกระแสและทวีคูณแรงดันตามจำนวนขั้นบันไดเพื่อแปลงเป็นแรงดันสูงกระแสตรง



รูปที่ 2.11 วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton

ในรูปที่ 2.11 แสดงถึงวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton ที่ได้จากการนำวงจรสร้างแรงดันกระแสตรงสองเท่ามาต่อซ้อนกันทั้งหมด 3 ชั้น คือ แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัวและไดโอด 2 ตัว โดยที่ตัวเก็บประจุ C_1 , C_3 และ C_5 เป็นตัวเก็บประจุพักประจุ ส่วนตัวเก็บประจุ C_2 , C_4 และ C_6 เป็นตัวเก็บประจุรองกระแส ในแต่ละชั้นจะสามารถสร้างแรงดันได้สองเท่า

ของค่ายอดแรงดันที่ได้จากแหล่งจ่าย คือ $2V_{max}$ ดังนั้นแรงดันขาออกรวมจะสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.13 เมื่อ n คือ จำนวนชั้นบันไดของวงจร

$$V_{out} = 2 \times n \times V_{max} \quad (2.13)$$

สำหรับไดโอดในวงจร D_2 , D_4 และ D_6 จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งบวก และ D_1 , D_3 และ D_5 จะนำกระแสในช่วงคลื่นครึ่งลบ โดยที่ตัวเก็บประจุและไดโอดแต่ละตัวจะต้องทนแรงดันเป็นสองเท่าของค่ายอดของแรงดันแหล่งจ่าย ยกเว้นตัวเก็บประจุ C_1 ที่ได้รับแรงดันเพียง V_{max}

ในกรณีที่ไม่มีโหลดต่อร่วมอยู่ด้วย วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton จะสามารถสร้างแรงดันสูงกระแสตรงได้ประมาณสองเท่าของค่ายอดตามจำนวนชั้นที่สร้าง แต่เมื่อมีโหลดมาต่อร่วมวงจรจะเกิดการดึงกระแสโหลดเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันสูงที่สร้างได้ตกลง รวมไปถึงแรงดันตกในไดโอดตัวเก็บประจุ และอุปกรณ์อื่น ๆ

2.6.1 การคำนวณแรงดันระลอก

แรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton ถึงแม้ว่าจะมีการเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดและมีตัวเก็บประจुरองกระแสเพื่อให้ได้คลื่นที่เรียบ แต่คลื่นสัญญาณที่ได้จะยังมีการกระเพื่อมอยู่เสมอ ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดให้ค่าความกระเพื่อมของสัญญาณหรือจะต้องมี Percentage ripple ค่าไม่เกินร้อยละ 3 ตามความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.14

$$\text{Percentage ripple} = \frac{\delta V}{V_{avg}} \times 100\% \quad (2.14)$$

เมื่อ Percentage ripple มีค่าไม่เกินร้อยละ 3

δV คือ ค่าแรงดันระลอกของวงจร

V_{avg} คือ ค่าแรงดันเฉลี่ย ซึ่งประมาณได้เป็นแรงดันค่ายอดของแรงดันสูงกระแสตรง

ตามมาตรฐาน IEEE Std.4-1978 กำหนดว่า ค่าของแรงดันกระแสตรงจะนิยามจากการหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ของแรงดัน ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ของการกระเพื่อม ดังสมการที่ 2.15

$$\delta V = \frac{I_L}{2 \times f \times C} \quad (2.15)$$

เมื่อ I_L คือ กระแสตรงที่จ่ายให้กับโหลด

f คือ ความถี่ของแรงดันกระแสสลับที่จะแปลงเป็นกระแสตรง

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุกรองกระแส

ถ้าวงจรชั้นบันไดมีจำนวน n ชั้น จะได้แรงดันระลอกรวม ดังสมการที่ 2.16

$$\delta V = \frac{I_L}{2 \times f \times C} \times \frac{n(n+1)}{2} \quad (2.16)$$

2.6.2 การคำนวณแรงดันตก

เมื่อมีการต่อโหลด จะทำให้แรงดันด้านออกตกลงมาเท่ากับ ΔV ซึ่งสาเหตุของการเกิดแรงดันตก เนื่องมาจากแรงดันกระแสเพิ่มที่ทำให้ตัวเก็บประจุแต่ละตัวไม่ได้เก็บสะสมประจุจนถึงค่า $2V_{\max}$ แต่จะเก็บสะสมเพียง $\Delta V = 2 \times V_{\max} - \frac{2 \times n \times I_d}{f \times C}$ และเมื่อรวมค่าของแรงดันตกในแต่ละชั้นจะได้ว่า แรงดันตกทั้งหมดจะมีค่าดังสมการที่ 2.17

$$\Delta V = \frac{I_d}{f \times C} \times \left[\left(\frac{2}{3} \times n^3 \right) + \left(\frac{1}{2} \times n^2 \right) - \left(\frac{1}{6} \times n \right) \right] \quad (2.17)$$

ถ้าจำนวนชั้นของวงจรชั้นบันไดมีมากกว่า 3 ชั้น ($n > 3$) ค่าแรงดันตกอาจคำนวณค่าโดยประมาณจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.18

$$\Delta V = \frac{I_d}{f \times C} \times \frac{2}{3} \times n^3 \quad (2.18)$$

แรงดันด้านออกกระแสตรงที่ได้จากวงจรชั้นบันไดนี้จะประมาณหาค่าได้จากสมการ 2.19

$$V_o = 2 \times n \times V_{\max} - \left(\frac{I_d}{f \times C} \times \frac{2}{3} \times n^3 \right) \quad (2.19)$$

2.7 สปาร์กแก๊ปทรงกลมและการเบรกดาวนในอากาศ

การใช้สปาร์กแก๊ปทรงกลมในการสร้างช่องว่างเบรกดาวนผ่านอากาศจะเป็นไปตามกฎการเกิดดิซชาร์จของก๊าซ คือ การเบรกดาวนจะเกิดขึ้นเมื่อความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงถึงค่าหนึ่ง นั่นก็คือ จะเกิดเบรกดาวนขึ้นเมื่อแรงดันสูงถึงค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าแรงดันเบรกดาวนสถิติที่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนแน่นอน สามารถทำซ้ำได้

2.7.1 ลักษณะสมบัติของสปาร์กแก๊ปทรงกลม

- 1) สนามไฟฟ้าระหว่างทรงกลมที่เท่ากันจะมีลักษณะเกือบสม่ำเสมอ ถ้าระยะสปาร์กแก๊ปมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม
- 2) การติดตั้ง ควรปฏิบัติตามที่ IEC Public 52 แนะนำไว้ คือ ถ้าทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 25 เซนติเมตร ควรติดตั้งในแนวนอน และถ้าทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 25 เซนติเมตร ควรติดตั้งในแนวตั้ง
- 3) ควรตัดวงจรป้อนแรงดันที่ป้อนให้กับทรงกลมทันทีหลังจากการเกิดการเบรกดาวนต่อเนื่องเป็นเวลานาน เพื่อป้องกันผิวทรงกลมเสียหาย
- 4) ค่าที่ถือว่าถูกต้องได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลาย ๆ ครั้ง (ประมาณ 5 ครั้ง) ค่าที่วัดได้ในครั้งแรกมักมีค่าที่ต่ำ อันเนื่องมาจากฝุ่นละอองที่ผิวของทรงกลม ดังนั้นก่อนใช้งานควรขัดมันและทำความสะอาดพื้นผิวทรงกลมเสียก่อน

2.7.2 ค่าแรงดันเบรกดาวนของสปาร์กแก๊ปทรงกลม

ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนของสปาร์กแก๊ปทรงกลมนั้นจะขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศหรือก๊าซ ระยะสปาร์กแก๊ปทรงกลม (D) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ (δ) ดังนั้น $U_b = f(d, D, \delta)$ เมื่อ U_b คือ แรงดันที่ทำให้เกิดสปาร์กที่แก๊ปทรงกลม

ตามมาตรฐานสากล IEC No.52 ได้กำหนดค่าแรงดันเบรกดาว์นของสปาร์กแก๊ปทรงกลม ในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน คือ

- อุณหภูมิ $t_n = 20$ องศาเซลเซียส
- ความดันบรรยากาศ $b_n = 101.3$ กิโลปาสคัล (760 มิลลิเมตรปรอท)
- ความชื้นสัมบูรณ์ $h_n = 11$ กรัมต่อตารางเมตร

ฉะนั้น ค่าแรงดันเบรกดาว์นของสปาร์กแก๊ปทรงกลมที่สภาวะห้อง U_b จะหาได้จาก สมการที่ 2.20

$$U_b = U_{bn} \times k_d \quad (2.20)$$

เมื่อ U_{bn} คือ ค่าแรงดันเบรกดาว์นที่สภาวะมาตรฐาน
 k_d คือ ตัวประกอบแปลงผันความหนาแน่นของอากาศ และมีค่าเท่ากับ δ เมื่อ δ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.05 โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ δ คำนวณได้จากสมการ ดังสมการที่ 2.21

$$\delta = \frac{b}{b_n} \times \frac{273 + t_n}{273 + t} \quad (2.21)$$

โดยที่ b คือ ความดันของอากาศอ่านจากบาโรมิเตอร์ มีค่าเป็น กิโลปาสคัล หรือ บาร์
 t คือ อุณหภูมิของห้องในขณะที่วัดเป็นองศาเซลเซียส

แต่ด้วยเนื่องจากค่าแรงดันเบรกดาว์นของสปาร์กแก๊ปทรงกลมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ความชื้นสัมบูรณ์ด้วยอัตรา 0.2% ต่อ 1 กรัมต่อตารางเมตร นั่นคือ ต้องคำนึงถึงผลความชื้นใน บรรยากาศด้วยฉะนั้น ค่าแรงดันเบรกดาว์นที่สภาวะห้อง U_b จึงต้องแก้ตัวประกอบแปลงผันความชื้น k_h คือ $U_b = U_{bn} \times k_h$ ซึ่งค่าตัวประกอบแปลงผันความชื้น คำนวณได้จากความสัมพันธ์ตาม มาตรฐาน IEC 6002-2002 คือ $k_h = 1 + [(0.02(h/\delta) - 8.5)]$ โดยที่ h คือ ความชื้นสัมบูรณ์ เป็นกรัมต่อตารางเมตร สามารถอ่านได้จากกราฟความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศในเทอมอุณหภูมิ เทอร์โมมิเตอร์กระเปาะแห้งและเปียกของไซโครมิเตอร์

2.8 โปรแกรมจำลองวงจร OrCAD

เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเขียนวงจรจำลองการทำงานและแสดงผลที่สามารถใช้งานได้ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ โดยใช้โปรแกรม OrCAD ในการช่วยวิเคราะห์และออกแบบวงจรไฟฟ้าและ Schematics วิเคราะห์ผลของวงจรหรือแสดงกราฟที่เทียบกับเวลา

เราสามารถโปรแกรม OrCAD เพื่อทำการจำลองวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ทั้งระดับแรงดันต่ำหรือแรงดันสูง ทั้งวงจรแบบขั้นเดียวหรือหลายขั้นก็สามารถทำได้ง่าย รวมไปถึงวิเคราะห์การทำงานของวงจรเพื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณ โดยค่าที่ได้จะมีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันเพื่อยืนยันถึงความถูกต้อง แต่ถ้าผลลัพธ์ที่คำนวณไม่ตรงหรือเกิดความผิดพลาดในการจำลองการทำงาน นั้นหมายความว่าวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ไม่สามารถทำงานได้จริงหรืออาจจะต้องแก้ไขในวงจรที่ออกแบบไว้นับว่าเป็นประโยชน์ที่จะทำให้ใช้เวลาในการทดลองน้อยลงและเกิดความปลอดภัยในการปฏิบัติงานมากขึ้น และเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนารูปแบบจำลองการทำงานของวงจรอื่น ๆ ได้ โดยเฉพาะทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ง่ายกว่างานทางด้านอื่น ๆ อีกด้วย



บทที่ 3

การดำเนินงาน

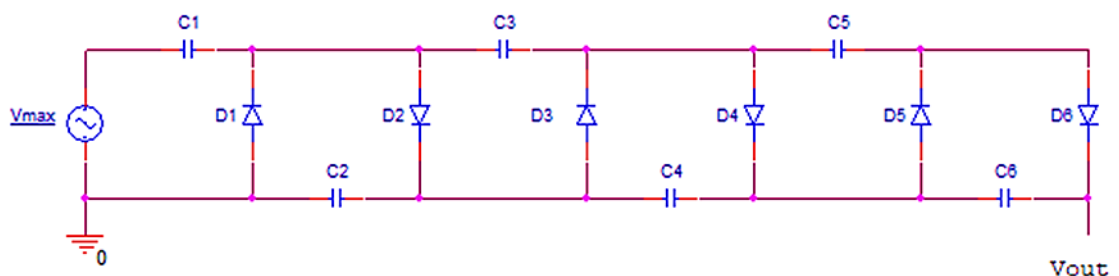
ในบทนี้จะกล่าวถึงชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขนาด 12 กิโลโวลต์ จำนวน 10 ชั้น มีวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton ขนาดไม่เกิน 2 กิโลโวลต์ โดยจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรง พร้อมกับเพิ่มระดับแรงดันเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงสูง ภายในวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton จะประกอบด้วยตัวเก็บประจุและไดโอดต่อแบบขั้นบันได การทำงานของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถแสดงแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการทำงานของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.1 วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton

วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton มีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้า 220 โวลต์และมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก 1.9 กิโลโวลต์ โดยใช้ตัวเก็บประจุและไดโอดต่อแบบขั้นบันได สามารถแสดงวงจรพื้นฐานของวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรพื้นฐานของวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton

3.1.1 จำนวนชั้นของวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft-Walton

เนื่องจากอุปกรณ์ในชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถทนแรงดันสูงสุดได้ 2 กิโลโวลต์ จึงจำเป็นต้องออกแบบวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton ให้มีแรงดันด้านออกไม่เกิน 2 กิโลโวลต์ ดังนั้น แรงดันด้านเข้าของวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton คือ $220 V_{rms}$ และแรงดันค่ายอดมีค่า $V_{peak} = 220\sqrt{2}$

จากสมการที่ (2.13) $V_{out} = 2 \times n \times V_{peak}$ เมื่อต้องการแรงดันขาออกไม่เกิน 2 กิโลโวลต์

$$\text{จะได้ } n = \frac{V_{out}}{2 \times V_{peak}} = \frac{2000}{2 \times 220\sqrt{2}} = 3.214 \text{ ชั้น}$$

ดังนั้น จำนวนชั้นที่ไม่ทำให้เกิดแรงดันขาออกสูงกว่า 2 กิโลโวลต์ มีจำนวนอยู่ที่ 3 ชั้น

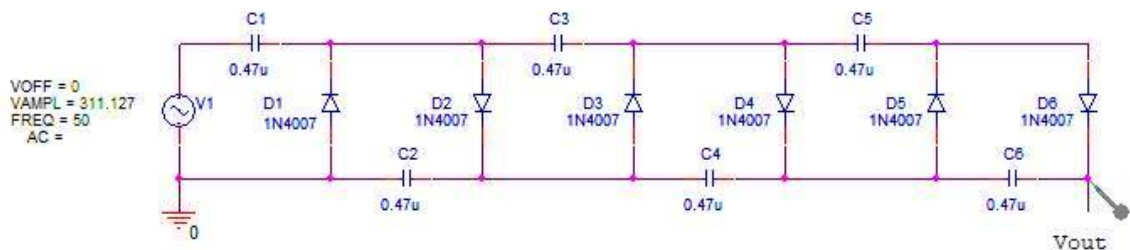
3.1.2 การเลือกใช้ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุทุกตัวต้องสามารถทนแรงดันได้ 2 เท่าของค่าแรงดันสูงสุดของแรงดันด้านเข้า นั่นคือต้องมีค่ามากกว่า 622.25 โวลต์ ตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ในท้องตลาดมีขนาด 0.47 ไมโครฟารัด ทนแรงดันได้ 650 โวลต์

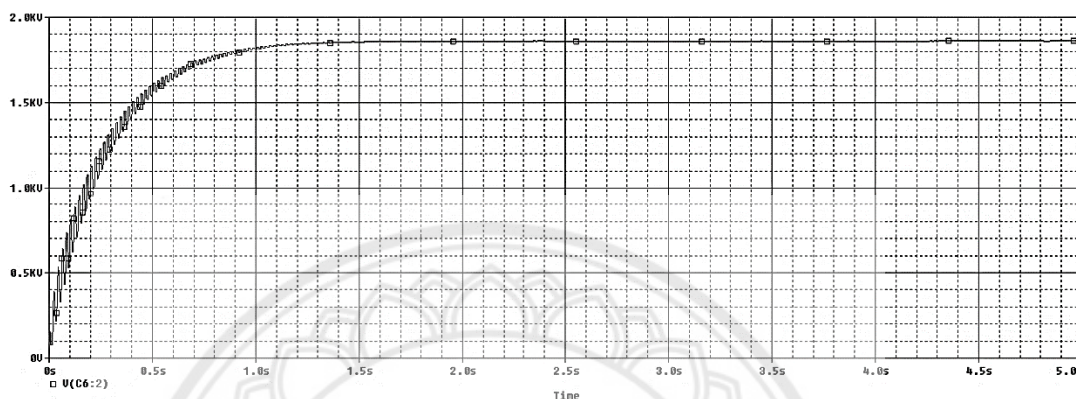
3.1.3 การเลือกใช้ไดโอด

ไดโอดที่ใช้ต่อในวงจรจะต้องทนแรงดันกลับทางเดียว (Reverse bias) ได้อย่างน้อยที่สุด 2 เท่าของค่าแรงดันสูงสุดของแรงดันเข้า จึงเลือกใช้ไดโอดเบอร์ 1N4007 ซึ่งสามารถทนแรงดันสูงสุดได้ 1,000 โวลต์

ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ในวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton สามารถจำลองวงจรในโปรแกรม OrCAD และวิเคราะห์รูปคลื่นจากการจำลองด้วยโปรแกรม OrCAD ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton จำนวน 3 ชั้น



รูปที่ 3.4 ผลของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม OrCAD ของวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton

3.1.4 ค่ากระแสเพิ่มของแรงดัน (δV)

เนื่องจาก วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton เป็นวงจรที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ตัวเก็บประจุและไดโอดในการเรียงกระแส จึงจำเป็นต้องพิจารณาว่าแรงดันของวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton มีค่ากระแสเพิ่มของแรงดันมากน้อยเพียงใด จึงทำการวิเคราะห์จากการจำลองผลในโปรแกรม OrCAD

ค่ากระแสที่เกิดขึ้นเมื่อมีการต่อโหลดของวงจร ในที่นี้โหลดจะเป็นโพรบแรงสูงที่ใช้วัดลดทอนค่าแรงดัน 1,000 : 1 นั่นคือ กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานในโพรบ 1,000 เมกะโอห์ม วัดค่ากระแสได้เป็น $I_d = 1.86$ ไมโครวินาที จึงนำค่ากระแสที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่ากระแสเพิ่มของแรงดัน

จากสมการที่ (2.16)

$$\delta V = \frac{I_d}{f \times C} \times \frac{n(n+1)}{2}$$

แทนค่าจะได้

$$\delta V = \frac{1.86 \mu}{2 \times 50 \times 0.47 \mu} \times \frac{3(3+1)}{2} = 237 \text{ โวลต์}$$

เนื่องจากโพรบแรงดันสูงมีอัตราส่วนลดทอน 1,000 : 1 ค่ากระแสเพื่อมแรงดันจึงต้องทำการคูณ 1000 เพื่อให้ได้ค่ากระแสเพื่อมจริงของแรงดัน ดังนั้น δV เท่ากับ 237 โวลต์

3.1.5 แรงดันตก (ΔV)

เมื่อมีการต่อวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton เข้ากับโหลดจะเกิดแรงดันตกขึ้น ทำให้แรงดันขาออกของวงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton มีค่าต่างจากวงจรที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม OrCAD ซึ่งสามารถหาแรงดันตกได้จากสมการที่ 2.17 ดังนี้

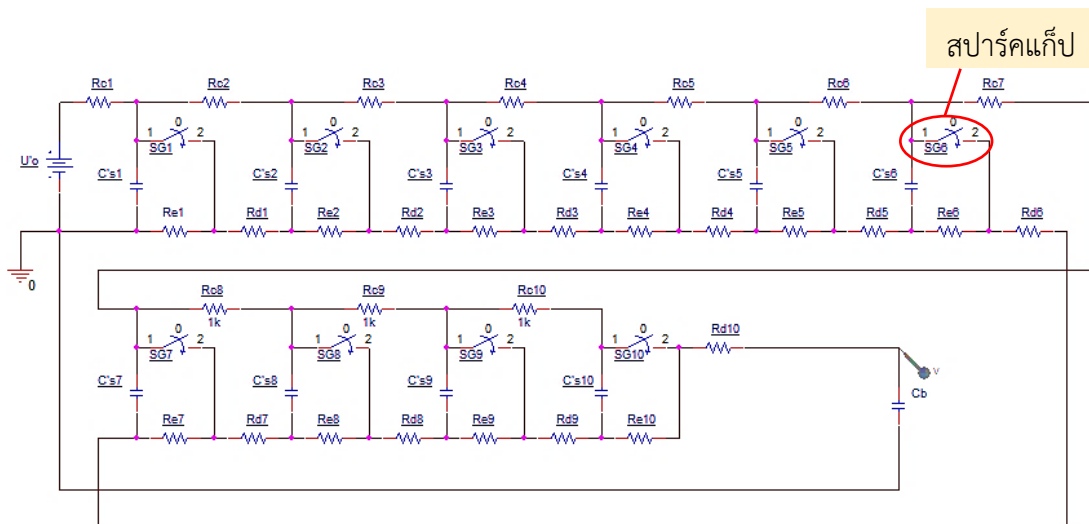
$$\Delta V = \frac{I_a}{f \times C} \times \left[\left(\frac{2}{3} \times n^3 \right) + \left(\frac{1}{2} \times n^2 \right) - \left(\frac{1}{6} \times n \right) \right]$$

$$\Delta V = \frac{1.86 \mu}{50 \times 0.47 \mu} \times \left[\left(\frac{2}{3} \times 3^3 \right) + \left(\frac{1}{2} \times 3^2 \right) - \left(\frac{1}{6} \times 3 \right) \right] = 1.741 \text{ โวลต์}$$

เพราะฉะนั้น วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton จึงมีค่าแรงดันตกลงไป มีค่าเป็น 1.741 โวลต์ นั้นหมายความว่าแรงดันขาออกที่วงจรสามารถสร้างได้ 1,867 กิโลโวลต์ จะเกิดแรงดันตก 1.741 โวลต์ จึงทำให้มีแรงดันที่จ่ายไปยังโหลดจริง ๆ อยู่ที่ประมาณ $V_{out} = 1,867 - 1.741$ เท่ากับ 1.865.529 โวลต์ นั่นคือแรงดันขาเข้าของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

3.2 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การออกแบบวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ สามารถคำนวณโดยใช้ตารางค่าแฟกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที และองค์ประกอบของวงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายขั้นแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรพื้นฐานเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบหลายชั้น

3.2.1 การคำนวณค่าองค์ประกอบของวงจร

3.2.1.1 ค่าแรงดันและพลังงานของวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ตัวเก็บประจุที่สามารถทนแรงดันสูงสุดที่ 2 กิโลโวลต์ โดยที่ขนาด U_0' คือแรงดันในแต่ละชั้นของชุดหลอดเครื่องกำเนิดแรงดันนั้นจึงกำหนด U_0' ให้มีค่าเป็น 2 กิโลโวลต์ จากความสัมพันธ์ของวงจรในหัวข้อ 2.1 จะสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$U_0 = n \times U_0'$$

$$U_0 = 10 \times 2000$$

แรงดันในการอัดประจุรวม

$$U_0 = 20 \text{ กิโลโวลต์}$$

กำหนดขนาดตัวเก็บประจุในแต่ละชั้นมีขนาด 2 ไมโครฟารัด จำนวน 10 ชั้น

โดยที่ค่าความจุไฟฟ้ารวม

$$C_s = C_s' / n$$

$$C_s = 2 \mu / 10$$

$$C_s = 0.2 \text{ ไมโครฟารัด}$$

จากรูปที่ 2.9 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพวงจร เมื่อต้องการประสิทธิภาพวงจรที่สูงจะได้

$$C_b/C_s = 0.05$$

$$C_b/0.2\mu = 0.05$$

ค่าความจุไหลรวม

$$C_b = 0.01 \text{ ไมโครฟารัด}$$

จากสมการที่ (2.1) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะมีพลังงาน

$$W_e = \frac{1}{2} C_s U_o^2$$

$$W_e = \frac{1}{2} (0.2\mu) (20k)^2$$

$$W_e = 40 \text{ จูล}$$

จะได้ว่า ชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สามารถสร้างพลังงานรวมในวงจรได้สูงสุด 40 จูล

3.2.1.2 การคำนวณหาค่าตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นและท้ายคลื่น (R_d และ R_e)

จากตารางที่ 2.1 การหาค่าแพกเตอร์ k_1 และ k_2 สำหรับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ฟาผ่าตามมาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที จะได้ค่า k_1 และ k_2 เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับรูปคลื่นคือ

$$k_1 = 0.73$$

$$k_2 = 2.96$$

$$T_1 = 1.2 \text{ ไมโครฟารัด}$$

$$T_2 = 50 \text{ ไมโครฟารัด}$$

จากสมการในตารางที่ 2.3 สามารถหาค่า R_d และ R_e ดังนี้

ค่าตัวต้านทานปรับหน้าคลื่น R_d

$$R_d = \frac{T_1}{k_2 \times \frac{C_b C_s}{C_b + C_s}} = \frac{1.2\mu}{2.96 \times \frac{(0.01\mu)(0.2\mu)}{0.01\mu + 0.2\mu}} = 42.568 \text{ โอห์ม}$$

ค่าตัวต้านทานปรับท้ายคลื่น R_e

$$R_e = \frac{T_2}{k_1(C_b + C_s)} = \frac{50\mu}{(0.73)(0.01\mu + 0.2\mu)} = 326.158 \text{ โอห์ม}$$

พารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์สำหรับวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ขั้นเดียว ซึ่งจะมีแรงดันอัดประจุรวมอยู่ที่ 20 กิโลโวลต์ เพื่อความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายจึงทำการลดระดับแรงดันด้านเข้าและขนาดอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงทำให้สามารถคำนวณแรงดันด้านเข้า ค่าความจุ ค่าความต้านทาน สำหรับวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 10 ขั้น ได้ดังนี้

สำหรับ C_b ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุโหลดที่มีความสำคัญในการสร้างหน้าคลื่นและท้ายคลื่น จะยังคงใช้ค่า C_b 0.01 ไมโครฟารัด เพื่อให้คลื่นอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ของมาตรฐานรูปคลื่น

ค่าตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นรวม

$$R_d = n \times R'_d$$

$$42.568 = 10 \times R'_d$$

$$R'_d = 42.568/10$$

ค่าตัวต้านทานปรับหน้าคลื่นแต่ละขั้น

$$R'_d = 4.257 \text{ โอห์ม}$$

และค่าตัวต้านทานปรับท้ายคลื่นรวม

$$R_e = n \times R'_e$$

$$326.158 = 10 \times R'_e$$

$$R'_e = 326.158/10$$

ค่าตัวต้านทานปรับท้ายคลื่นแต่ละขั้น

$$R'_e = 32.616 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเราจะต้องใช้ขนาดของอุปกรณ์ในแต่ละขั้นดังนี้

$$R'_d = 4.257 \text{ โอห์ม}$$

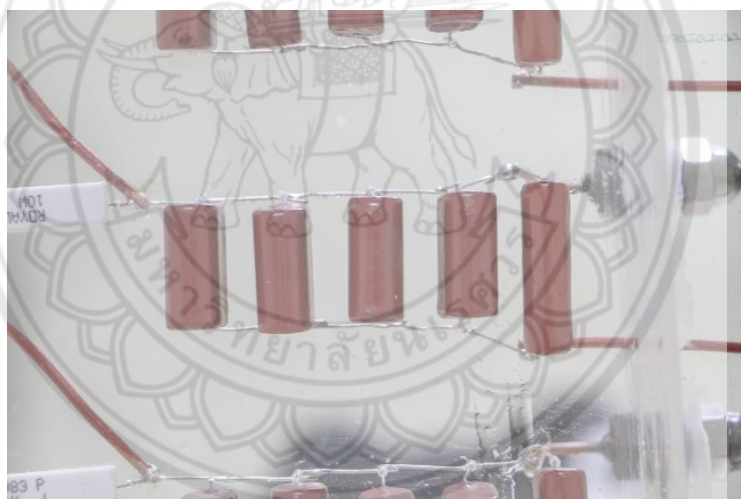
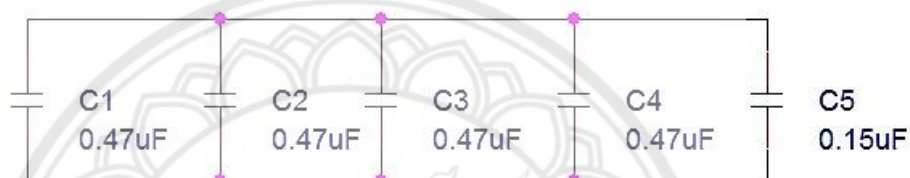
$$R'_e = 32.616 \text{ โอห์ม}$$

$$C_s = 2 \text{ ไมโครฟารัด}$$

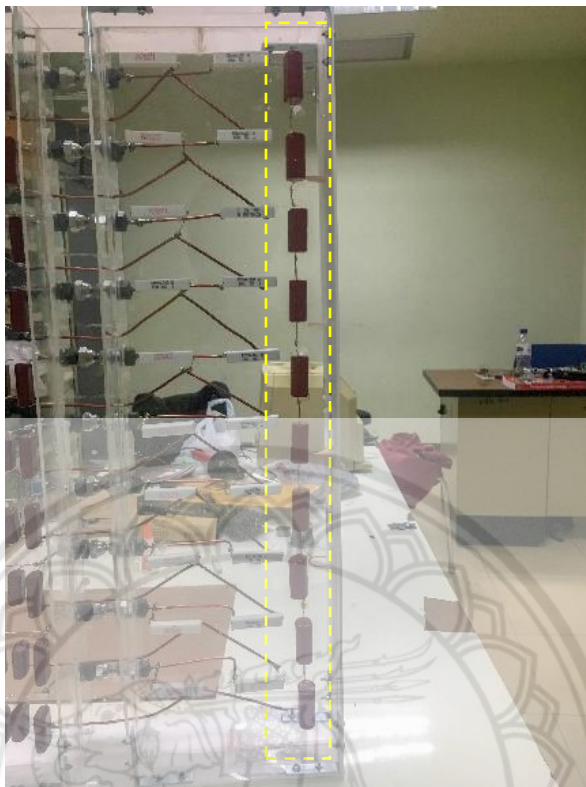
$$C_b = 0.01 \text{ ไมโครฟารัด}$$

จากการกำหนดขนาดของตัวเก็บประจุแต่ละชั้นให้สามารถทนแรงดันสูงสุดได้ 2 กิโลโวลต์ และมีขนาด 2 ไมโครฟารัด แต่ขนาดของตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้มีขนาด 0.47 ไมโครฟารัด ทนแรงดัน 2 กิโลโวลต์ และ 0.15 ไมโครฟารัด ทนแรงดัน 2 กิโลโวลต์ จึงนำตัวเก็บประจุขนาด 0.47 ไมโครฟารัด จำนวน 4 ตัว และขนาด 0.15 ไมโครฟารัด จำนวน 1 ตัว มาต่อขนานกันทำให้ได้ค่าความเก็บประจุในแต่ละชั้นมีขนาดเป็น 2.03 ไมโครฟารัด ดังรูปที่ 3.6

ตัวเก็บประจุโหลรวมนั้นจะมีขนาด 0.01 ไมโครฟารัด ทนแรงดันได้สูงสุด 20 กิโลโวลต์ เกิดจากการต่ออนุกรมกันของตัวเก็บประจุขนาด 0.1 ไมโครฟารัด ขนาด 2 กิโลโวลต์ ทั้งหมด 10 ตัว แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



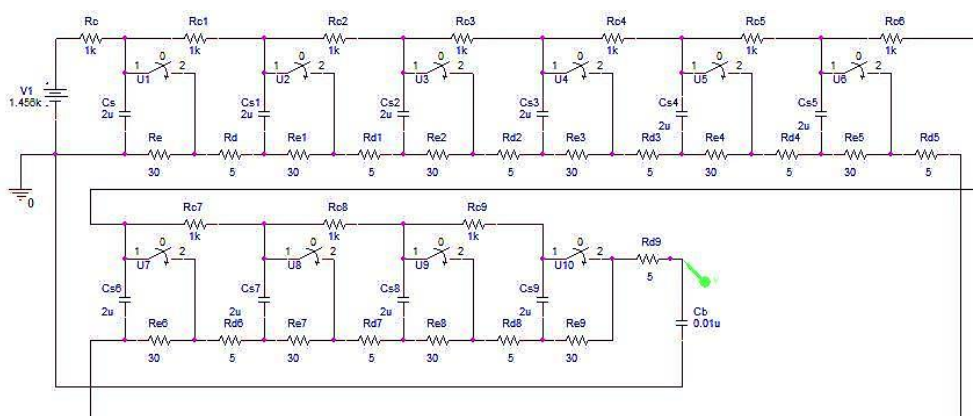
รูปที่ 3.6 ตัวเก็บประจุแต่ละชั้นขนาด 2.03 ไมโครฟารัด โดยการต่อขนานกัน



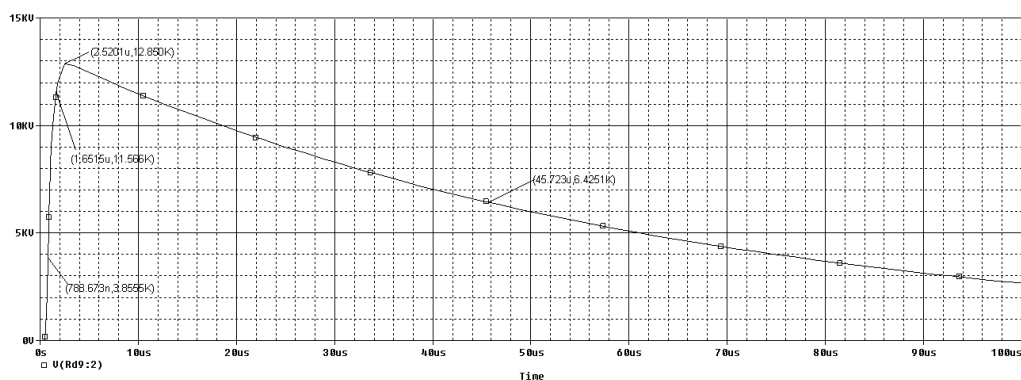
รูปที่ 3.7 ตัวเก็บประจุไหลตรงรวมขนาด 0.01 ไมโครฟารัด โดยการต่ออนุกรมกัน

3.2.2 การจำลองวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ออกแบบ

จากค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ใช้ภายในวงจรชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม OrCAD และวิเคราะห์รูปคลื่นอิมพัลส์ ดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 วงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 10 ชั้น โดยค่าองค์ประกอบได้จากการคำนวณ



รูปที่ 3.9 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้าตามมาตรฐานที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจร

จากกราฟรูปที่ 3.9 สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้ดังนี้

พบว่าแรงดันที่ได้มีค่าแรงดันยอด $V_{peak} = 12.85$ กิโลโวลต์

คำนวณช่วงเวลาหน้าคลื่นและท้ายคลื่น ;

ที่ $0.9V_{peak} = 11.565$ กิโลโวลต์ มีช่วงเวลา $t_{0.9V_{peak}} = 1.6515$ ไมโครวินาที

ที่ $0.3V_{peak} = 3.855$ กิโลโวลต์ มีช่วงเวลา $t_{0.3V_{peak}} = 0.7887$ ไมโครวินาที

ช่วงเวลาหน้าคลื่น

$$T_1 = 1.67 \times (t_{0.9V_p} - t_{0.3V_p})$$

$$T_1 = 1.67 \times (1.6515 \mu - 0.7887 \mu)$$

$$T_1 = 1.4409 \text{ ไมโครวินาที}$$

ช่วงเวลาหน้าคลื่นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 30 คือ อยู่ในช่วงเวลา 0.84 ถึง 1.56

ไมโครวินาที

ที่ $0.5V_{peak} = 6.425$ กิโลโวลต์

มีช่วงเวลา $t_{0.5V_{peak}} = 45.723$ ไมโครวินาที

ช่วงเวลาท้ายคลื่น

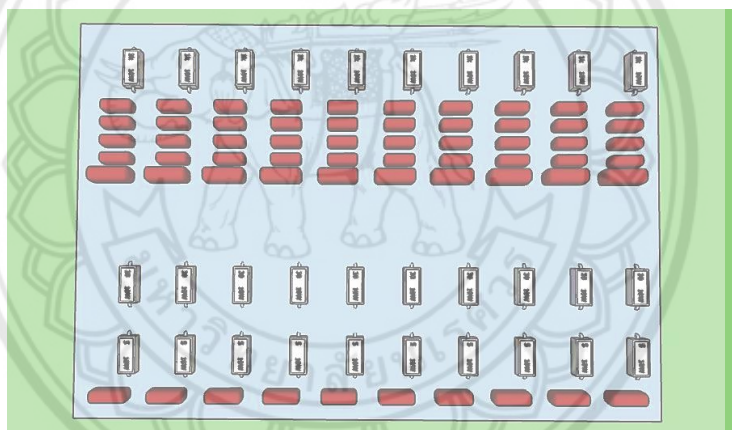
$$T_2 = t_{0.5V_{peak}}$$

$$T_2 = 45.723 \text{ ไมโครวินาที}$$

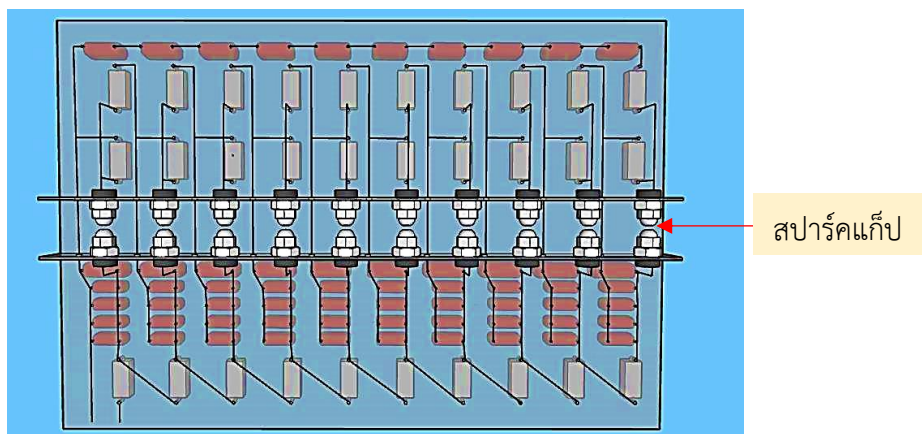
ช่วงเวลาทำยคลี่นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 20 อยู่ในช่วงเวลา 40 ถึง 60 ไมโครวินาที ช่วงเวลาหน้าคลี่นและช่วงเวลาทำยคลี่นตรงตามมาตรฐานกำหนดไว้ ฉะนั้นค่าองค์ประกอบในวงจรชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์นี้สามารถนำมาใช้ได้

3.3 การออกแบบและการสร้างโครงสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

การออกแบบโครงสร้างชุดกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใช้โปรแกรม Sketchup 2017 ก่อนสร้างจริง โครงสร้างส่วนใหญ่ของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ใช้แผ่นอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร โดยที่แผ่นอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ขนาด 46×69 เซนติเมตร เป็นส่วนของแผ่นวงจรชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ด้านหน้าเป็นส่วนวางตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 3.9 ด้านหลังเป็นส่วนการเดินวงจรและส่วนของสปาร์กแก๊ปทรงกลม แสดงดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ

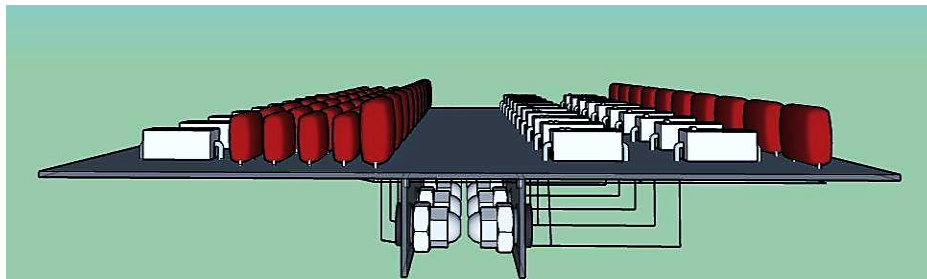


รูปที่ 3.10 การออกแบบโครงสร้างด้านหน้าของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 3.11 การออกแบบโครงสร้างด้านหลังของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จากรูปที่ 3.12 แสดงถึงโครงสร้างด้านข้างซึ่งจะเห็นส่วนของสปาร์กแก๊ปทางอยู่ด้านล่าง โดยแผ่นยึดสปาร์กแก๊ปใช้แผ่นอะคริลิกขนาด 5×69 เซนติเมตรติดขนานกัน ระยะห่างระหว่างแผ่นอะคริลิกยึดสปาร์กแก๊ปห่างกัน 5.2 เซนติเมตร



รูปที่ 3.12 ภาพจำลองโครงสร้างด้านข้างของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

จากนั้นจึงสร้างชุดทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ 3.13 และ รูปที่ 3.14 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างด้านหน้าและโครงสร้างด้านหลังของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 3.13 โครงสร้างด้านหน้าของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 3.14 โครงสร้างด้านหลังของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์



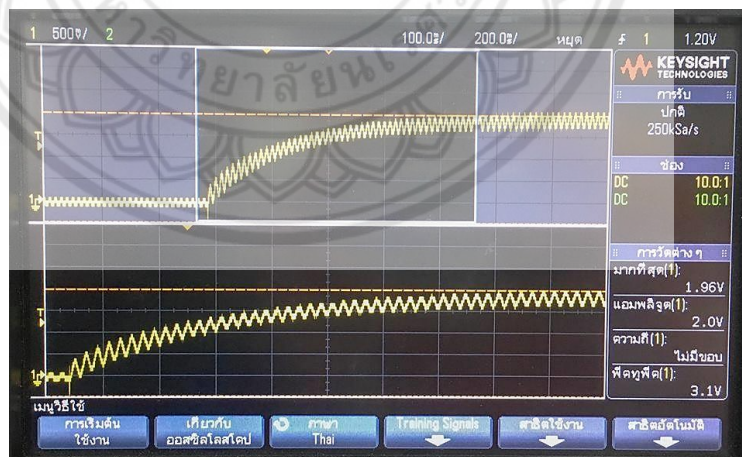
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในการทดสอบชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน 1.2/50 ไมโครวินาที จะมีการทดสอบอย่างน้อย 5 ครั้งเพื่อให้สามารถยืนยันความถูกต้องได้มากที่สุด โดยเริ่มจากการตรวจสอบวงจรแหล่งจ่ายทั้งแรงดันกระแสเพิ่ม แรงดันตก ก่อนที่จะทดสอบแรงดันอัด ประจุแต่ละชั้นของชุดทดลองและในขั้นตอนสุดท้ายคือการทดสอบเบรกดาว์นผ่านอากาศ ฝิวน้ำ และ ฝิวน้ำมันเครื่อง โดยกำหนดให้ทดสอบที่ระยะห่างของสปาร์กแก๊ปเท่ากันทั้งหมดคือ 5 มิลลิเมตร เพื่อเปรียบเทียบหน้าคลื่น ท้ายคลื่น ร้อยละความผิดพลาด รวมไปถึงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานจากชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

4.1 การทดสอบวงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft Walton

การทดสอบวงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft Walton เพื่อดูค่าแรงดันกระแสเพิ่ม ค่าแรงดันตก รวมไปถึงเปรียบเทียบผลลัพธ์ทั้งจากการจำลองวงจรในโปรแกรม OrCAD และจากผลการทดลอง เทียบกับมาตรฐาน



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นวงจรทวิแรงดันแบบ Cockcroft Walton จากการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 แสดงถึงสัญญาณแรงดันจากการวัดค่าแรงดันด้านออกของวงจรทวิแรงดัน จะสังเกตเห็นว่าแรงดันจะถูกขยายให้มีความมากขึ้นตามจำนวนชั้นของวงจรและสัญญาณจะถูกกรองให้

เรียบมากขึ้น เมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่งสัญญาณที่ได้จะมีความกระเพื่อมน้อยลงใกล้เคียงกับผล
รูปคลื่นจากการจำลองในโปรแกรม OrCAD

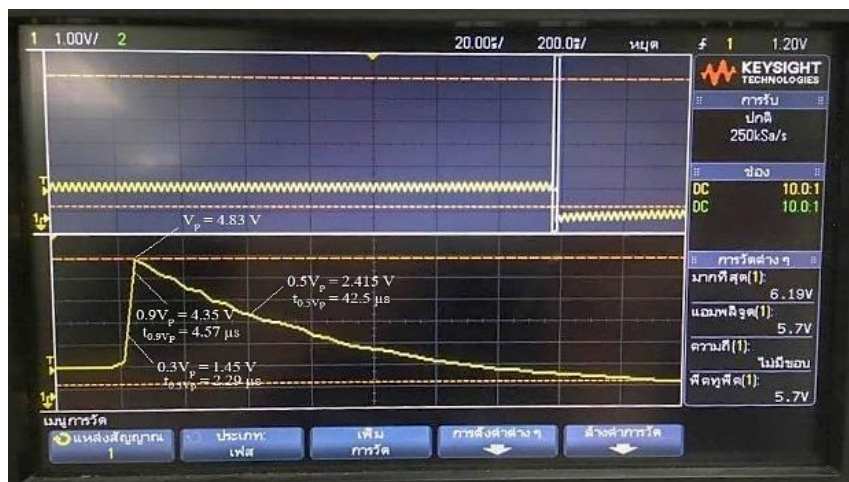
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบวงจรทีวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton

ประเภท การทดสอบ	แรงดัน กระเพื่อม (โวลต์)	แรงดันตก (โวลต์)	ค่าความผิดพลาดของ ค่าแรงดันกระเพื่อม (ร้อยละ)	ค่าความผิดพลาด ของค่าแรงดันตก (ร้อยละ)
ค่าจากการจำลอง ในโปรแกรม OrCAD	237.000	1.741	12.696	0.093
ค่าจากการ ทดลองจริง	332.000	2.434	17.785	0.130

จากตารางที่ 4.1 เมื่อทำการเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม OrCAD และจากการ
ทดลองจริงเทียบกับค่าตามมาตรฐานกำหนดให้ร้อยละความผิดพลาดของแรงดันกระเพื่อมมีค่าไม่เกิน
ร้อยละ 3 ซึ่งในตารางพบว่า แรงดันมีค่าความกระเพื่อมค่อนข้างสูงเนื่องมาจากการเลือกใช้ตัวเก็บ
ประจุที่มีค่าต่ำจึงทำให้ค่าความกระเพื่อมมีค่าที่สูง แต่ค่าแรงดันตกจะมีค่าน้อยมากซึ่งจากระดับ
แรงดันที่ตกลงมา 1.741 โวลต์ ถือว่ายอมรับได้ในทางการทดสอบระดับแรงดันสูง

4.2 การทดสอบแรงดันอัดประจุในแต่ละชั้น

ในการทดลองนี้จะทดสอบวงจรชุดทดลองเพื่อดูแรงดันอัดประจุในแต่ละชั้นที่บ่งบอกถึง
พฤติกรรมของตัวเก็บประจุในการชาร์จและคายประจุ รวมไปถึงช่วงเวลาหน้าคลื่นและท้ายคลื่นที่
เป็นไปได้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าจากการจำลองในแต่ละชั้น ซึ่งจะเริ่มดูพฤติกรรมจากชั้นที่ 2 ไปจนถึง
ชั้นที่ 10 โดยจะทำการทดสอบชั้นละ 2 ครั้งแล้วจึงหาค่าเฉลี่ยของแต่ละชั้นและค่าของชั้นที่ 1
ไว้เนื่องจากมีช่วงเวลาในการชาร์จและคายประจุที่ไวมากจึงทำให้ไม่สามารถนำมาพิจารณาช่วงเวลา
หน้าคลื่นและท้ายคลื่นได้ ผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 4.2 สามารถสรุปข้อมูลเปรียบเทียบผลลัพธ์ในแต่ละ
ชั้นได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุชั้นที่ 7 (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าแรงดันอัดประจุแต่ละชั้นจากการจำลองและการทดลอง

ชั้นที่	ค่าจากการจำลองในโปรแกรม OrCAD		ค่าจากการทดลองจริง		ค่าความคลาดเคลื่อน	
	T_1 (ไมโครวินาที)	T_2 (ไมโครวินาที)	T_1 (ไมโครวินาที)	T_2 (ไมโครวินาที)	T_1 (ร้อยละ)	T_2 (ร้อยละ)
2	1.458	46.250	5.430	62.500	272.428	35.135
3	1.475	45.915	11.264	62.500	663.661	36.121
4	1.598	45.930	9.945	62.500	522.340	36.077
5	1.525	45.766	4.509	72.500	195.672	58.415
6	1.499	45.800	9.219	62.690	515.010	36.878
7	1.478	45.716	11.841	67.500	701.150	47.651
8	1.473	45.717	3.900	62.360	164.766	36.404
9	1.470	45.630	4.815	72.500	227.551	58.887
10	1.463	45.580	9.477	72.500	547.779	59.061

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นในแต่ละชั้นของชุดทดลองมีค่าที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาหน้าคลื่นจะมากกว่าของช่วงเวลาท้ายคลื่นที่มีค่าที่ค่อนข้างสม่ำเสมอและค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า เวลาในการชาร์จ - คายประจุที่เข้าไปเพียงไม่กี่วินาที

ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นอย่างมาก หมายความว่า ความรวดเร็วในการชาร์จ - คายประจุเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการทดสอบ

สำหรับช่วงเวลาหน้าคลื่น ชั้นที่ 8 จะใช้เวลาในการชาร์จประจุรวดเร็วที่สุดเพียง 3.9 ไมโครวินาที ในขณะที่ชั้นที่ 7 ใช้เวลานานถึง 11.841 ไมโครวินาที สังเกตเห็นได้ว่า ค่าเวลาที่ห่างกันระดับไมโครวินาทีทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 164.766 เป็นร้อยละ 701.15 สำหรับช่วงเวลาหลังคลื่นหรือเวลาที่ใช้การคายประจุในแต่ละชั้นจะใช้เวลาที่ไม่ต่างกันมากนัก โดยที่ชั้นที่ 8 จะใช้เวลารวดเร็วที่สุดมีค่าอยู่ที่ 62.36 ไมโครวินาที และชั้นที่ 5, 9 และ 10 จะใช้เวลานานที่สุดคือ 72.5 ไมโครวินาที

จากชุดข้อมูลในแต่ละชั้นสามารถทราบถึงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันอัดประจุสรุปได้ดังนี้

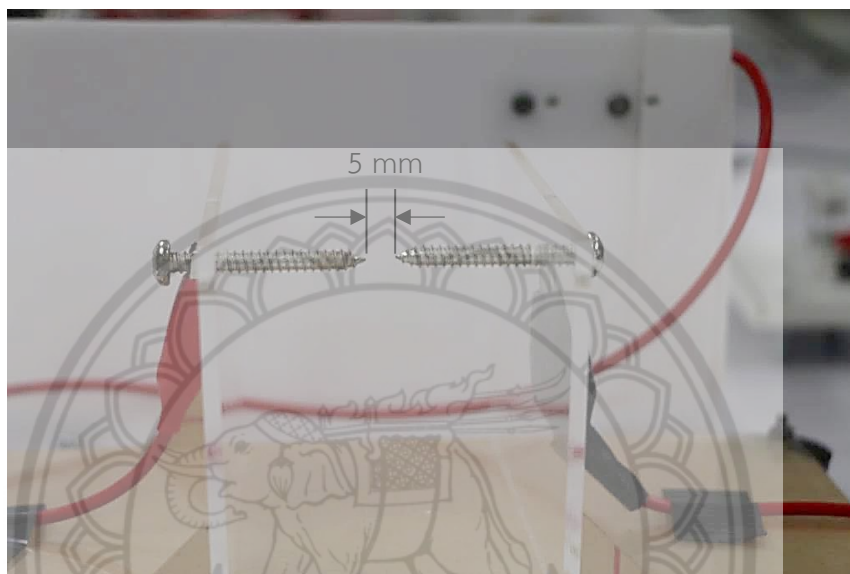
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบแรงดันอัดประจุในแต่ละชั้น

ประเภทการทดสอบ	ค่าเฉลี่ย		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	T_1 (ไมโครวินาที)	T_2 (ไมโครวินาที)	T_1 (ไมโครวินาที)	T_2 (ไมโครวินาที)
ค่าจากการจำลอง	1.4932	45.8116	0.4430	0.2012
ค่าจากการทดลองจริง	7.8222	66.3944	3.1289	4.8548

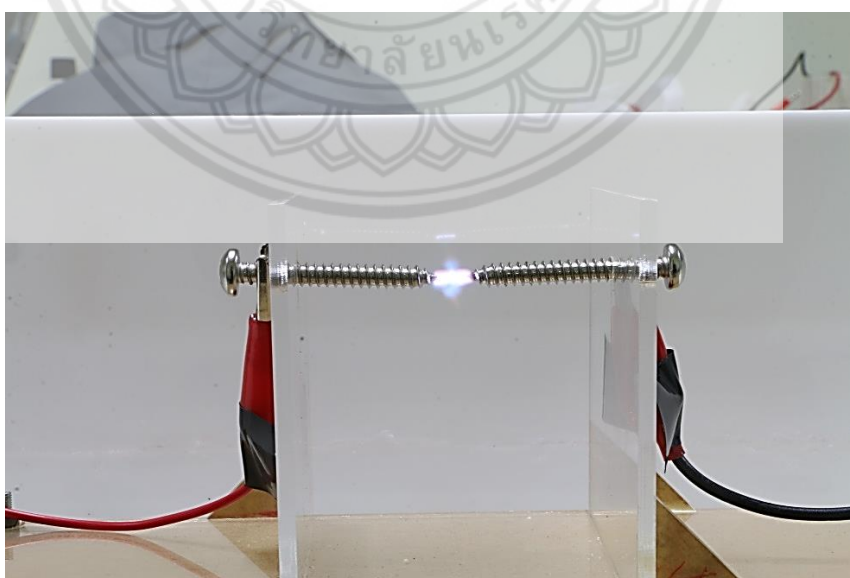
จากตารางที่ 4.3 จากค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาหน้าคลื่น/ท้ายคลื่นจากการจำลองตรงตามมาตรฐานซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้และมีค่าเบี่ยงเบนที่น้อยมาก เท่ากับ $1.4932 \pm 0.0443 / 45.8116 \pm 0.2012$ ไมโครวินาที ถือว่าชุดข้อมูลมีการกระจายตัวน้อย สำหรับช่วงเวลาหน้าคลื่น/ท้ายคลื่นที่ได้จากการทดลองจริง เท่ากับ $7.8222 \pm 3.1289 / 66.3944 \pm 4.8548$ ไมโครวินาที การทดลองจริงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากกว่า 1 นั่นคือ ชุดข้อมูลมีค่าที่กระจายไม่คงที่และค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาหน้าคลื่นและท้ายคลื่นที่ได้ไม่ตรงตามมาตรฐาน มีค่าเกินช่วงที่ยอมรับได้

4.3 การทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ

ในการทดลองจะใช้สกรูปลายแหลม 2 ตัวเพื่อทำให้เกิดการเบรกดาวนผ่านอากาศ โดยใช้แผ่นอะคริลิกเป็นแท่นยึดสปาร์กแก๊ปในขณะที่ทำการวัดผล เมื่อระดับแรงดันสูงมากพอเกินค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเบรกดาวนเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ และปรากฏผลลัพธ์จากการวัดสัญญาณรูปคลื่นด้วยดิจิตอลออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 ลักษณะการติดตั้งสปาร์กแก๊ปในการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ



รูปที่ 4.4 การทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศครั้งที่ 4 (ภาคผนวก ค)

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์จากการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศ

ครั้งที่ทดสอบ	T_1 (ไมโครวินาที)	T_2 (ไมโครวินาที)	V_p (กิโลโวลต์)	ค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับมาตรฐาน	
				T_1 (ร้อยละ)	T_2 (ร้อยละ)
1	3.130	44.100	11.723	160.833	11.800
2	4.175	70.000	11.216	247.900	40.000
3	3.131	57.500	10.456	160.900	15.000
4	3.340	52.500	9.885	178.333	5.000
5	4.175	85.62	9.315	247.900	71.240

ตารางที่ 4.4 พบว่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นในแต่ละครั้งที่ทดสอบมีความสม่ำเสมอ ค่าความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาหน้าคลื่นจะมากกว่าช่วงเวลาท้ายคลื่น แม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลาท้ายคลื่นจะน้อยกว่าแต่ค่าที่ได้ค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ เวลาในการชาร์จ - คายประจุที่เข้าไปเพียงไม่กี่วินาทีทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นอย่างมาก หมายความว่า ความรวดเร็วในการชาร์จ - คายประจุเป็นเรื่องที่สำคัญมากในการทดสอบ

จากการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง พบว่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นในขั้นที่ 1 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยใช้เวลาในการชาร์จประจุเพียง 3.13 ไมโครวินาที มีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 160.833 ในขณะที่ขั้นที่ 2

และ 5 ใช้เวลานานที่สุด 4.175 ไมโครวินาที มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ร้อยละ 247.9 สำหรับช่วงเวลาหลังคลื่นหรือเวลาที่ใช้การคายประจุขั้นที่ 1 ใช้เวลาเพียง 44.1 ไมโครวินาที ในขณะที่ขั้นที่ 5 ใช้เวลานานถึง 85.62 ไมโครวินาที และในการทดสอบแต่ละครั้งแรงดันคายอดมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการทดสอบที่ควรจะใช้ผลจากการทดสอบในครั้งแรก ๆ และระยะห่างของสปาร์กแก๊ปสูงสุดที่ยังคงทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้อยู่ คือ 7 มิลลิเมตร

จากชุดข้อมูลในการทดสอบแต่ละครั้งสามารถทราบถึงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันอัดประจุ สรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศ

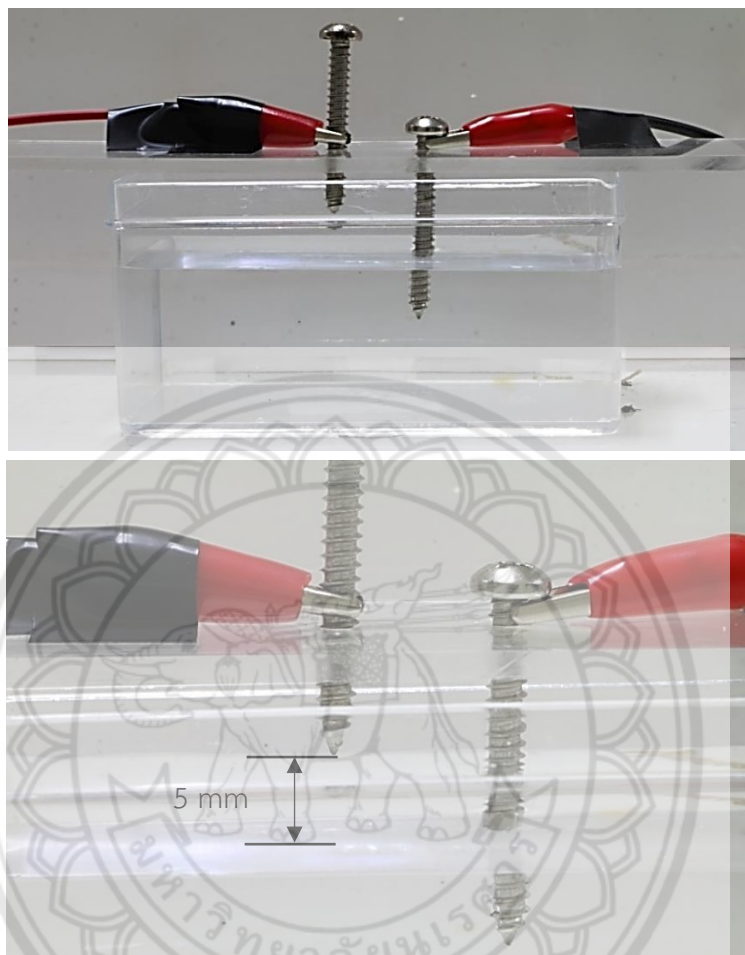
ประเภท การทดสอบ	ค่าเฉลี่ย		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	T_1 (ไมโครวินาที)	T_2 (ไมโครวินาที)	T_1 (ไมโครวินาที)	T_2 (ไมโครวินาที)
การทดสอบ เบรกดาวน์ผ่าน อากาศ ทั้งหมด 5 ครั้ง	3.5902	61.9440	0.5407	16.2234

จากตารางที่ 4.5 จากค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาน้ำคลื่น/ท้ายคลื่นจากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศทั้งหมด 5 ครั้ง เท่ากับ $3.5902 \pm 0.5407 / 61.944 \pm 16.2234$ ไมโครวินาที ชุดข้อมูลที่ได้พบว่าข้อมูลของช่วงเวลาน้ำคลื่นมีการเกาะกลุ่มกันมากกว่าข้อมูลของช่วงเวลาย้ายคลื่นที่ชุดข้อมูลค่อนข้างกระจายไม่สม่ำเสมอ และค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาน้ำคลื่นและท้ายคลื่นที่ได้ไม่ตรงตามมาตรฐาน มีค่าเกินช่วงที่ยอมรับได้

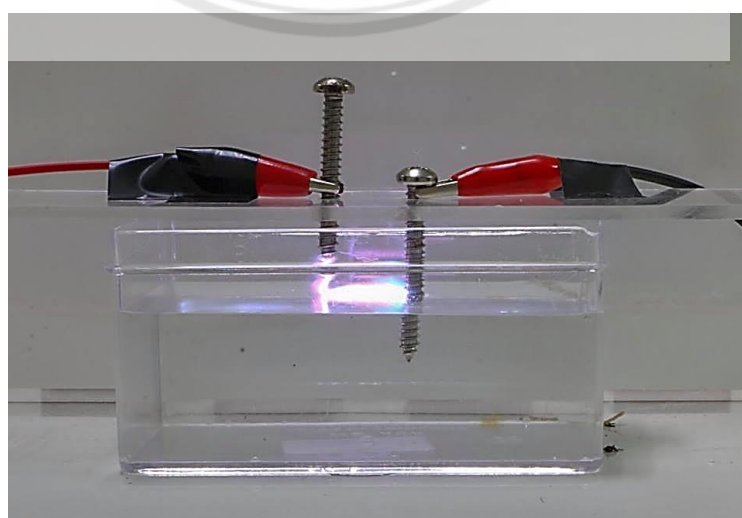
4.4 การเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ

การเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำจะใช้สกรูปลายแหลม 2 ตัวเป็นสปาร์กแก๊ป โดยปลายด้านที่รับไฟแรงสูงจะอยู่เหนือผิวน้ำระยะห่าง 5 มิลลิเมตรและปลายอีกด้านที่ต่อกับสายกราวด์จะจุ่มลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และเกิดการขึ้นดั่งแสดงในรูปเบรกดาวน์ที่ 4.7

ซึ่งน้ำที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นน้ำกลั่นบริสุทธิ์ที่มีค่าความนำทางไฟฟ้า 1 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และได้ผลลัพธ์จากการวัดสัญญาณรูปคลื่นด้วยดิจิทัลออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.6 ลักษณะการติดตั้งสปาร์กแก๊ปในการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ



รูปที่ 4.7 การเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำครั้งที่ 1 (ภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.6 ผลลัพธ์จากการเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ

ครั้งที่ทดสอบ	T_1 (มิลลิวินาที)	T_2 (มิลลิวินาที)	V_p (กิโลโวลต์)
1	1.044	10.000	4.182
2	0.501	60.000	3.992
3	0.334	13.500	3.802
4	0.668	15.000	3.802
5	0.167	10.750	2.661

ตารางที่ 4.6 จะพบว่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นในแต่ละครั้งที่ทดสอบค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ ในขณะที่ช่วงเวลาย้ายคลื่นในแต่ละครั้งที่ทดสอบค่าที่ได้กระจายไม่สม่ำเสมอ และในการทดสอบแต่ละครั้งแรงดันคายยอดมีแนวโน้มที่จะลดลงเรื่อย ๆ บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการทดสอบที่ควรจะใช้ผลจากการทดสอบในครั้งแรก ๆ

จากการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง พบว่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นในขั้นที่ 5 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยใช้เวลาในการชาร์จประจุ 0.167 มิลลิวินาที ในขณะที่ขั้นที่ 1 ใช้เวลานานที่สุด 1.044 มิลลิวินาที สำหรับช่วงเวลาหลังคลื่นหรือเวลาที่ไ้การคายประจุขั้นที่ 1 ใช้เวลารวดเร็วที่สุดอยู่ที่ 10 มิลลิวินาที

ในขณะที่ชั้นที่ 2 ใช้เวลานานที่สุดถึง 60 มิลลิวินาที และระยะห่างของสปาร์กแก๊ปสูงสุดที่ยังคงทำให้เกิดการเบรกดาวนได้คือ 6 มิลลิเมตร

จากชุดข้อมูลในการทดสอบแต่ละครั้งสามารถทราบถึงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดันอัดประจุ สรุปได้ดังนี้

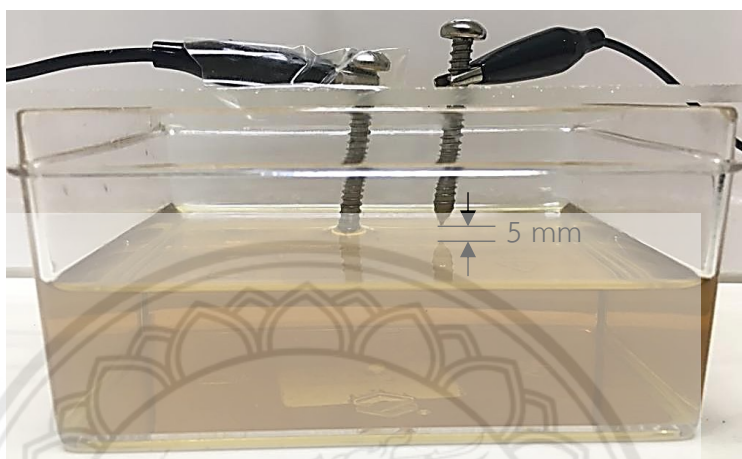
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไป
ตามผิวของน้ำ

ประเภท การทดสอบ	ค่าเฉลี่ย		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	T_1 (มิลลิวินาที)	T_2 (มิลลิวินาที)	T_1 (มิลลิวินาที)	T_2 (มิลลิวินาที)
การทดสอบ เบรกดาวนผ่าน อากาศไปตาม ผิวของน้ำ ทั้งหมด 5 ครั้ง	0.5430	21.8500	0.3367	21.4225

จากตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาน้ำเคลื่อน/ท้ายคลื่นจากการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำทั้งหมด 5 ครั้ง เท่ากับ $0.5430 \pm 0.3367 / 21.8500 \pm 21.4225$ มิลลิวินาที ชุดข้อมูลที่ได้ พบว่า ข้อมูลของช่วงเวลาน้ำเคลื่อนมีการเกาะกลุ่มกันมากกว่าข้อมูลของช่วงเวลาย้ายคลื่นที่ชุดข้อมูลค่อนข้างกระจายไม่สม่ำเสมอ และค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาน้ำเคลื่อนและท้ายคลื่นที่ได้ไม่ตรงตามมาตรฐาน เพราะน้ำกลั่นที่ใช้เป็นฉนวนในการทดสอบมีค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำมากหากเทียบกับอากาศหรือน้ำธรรมดา ทำให้การถ่ายเทประจุเป็นไปได้ช้ากว่าที่ควร ดังนั้นจึงส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้ใช้เวลานานมากขึ้น อีกทั้งการทดสอบรูปแบบนี้ไม่ได้ถูกระบุในมาตรฐานการทดสอบอุปกรณ์ที่จะใช้การทดสอบผ่านอากาศจึงไม่สามารถเทียบกับมาตรฐานโดยตรงได้

4.5 การเบรกตาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำมันเครื่อง

ในการทดสอบจะใช้น้ำมันเครื่องของรถจักรยานยนต์ สกรูปลายแหลมด้านที่รับไฟแรงสูง จะอยู่เหนือผิวน้ำมันเครื่องระยะห่าง 5 มิลลิเมตรและปลายอีกด้านที่ต่อกับสายกราวด์จะจุ่มลงไปใ้น้ำมันเครื่อง ดังแสดงที่รูป 4.9



รูปที่ 4.9 ลักษณะการติดตั้งสปาร์กแก๊ปในการทดสอบเบรกตาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำมันเครื่อง

ผลลัพธ์จากการทดสอบ คือ การเบรกตาวนผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำมันเครื่อง ไม่สามารถทำให้เกิดการเบรกตาวนขึ้นได้ เนื่องจากน้ำมันเครื่องมีค่าความเป็นฉนวนสูงและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอที่จะให้เกิดการเบรกตาวนขึ้นได้

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองเพื่อให้ได้ผลลัพธ์สุดท้าย สามารถสรุปซึ่งผลลัพธ์ของการทดลองจากการดำเนินงาน ปัญหาที่พบเจอระหว่างการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะแนวทางวิธีแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้จัดทำขึ้นมาเพื่อเป็นชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งเป็นแรงดันที่สามารถจำลองสถานะแรงดันเกินที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าและส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้ โดยที่ชุดทดลองนี้จะจำลองรูปแบบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐานรูปคลื่น 1.2/50 ไมโครวินาที จำนวนขั้นของวงจรทั้งหมด 10 ขั้น ใช้วงจรทวีแรงดันแบบ Cockcroft Walton เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจร สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์ได้สูงถึง 12.85 กิโลโวลต์ มีพิกัดพลังงานสะสมสูงสุดอยู่ที่ 40 จูล

จากการทดลองเพื่อทดสอบวงจรแหล่งจ่าย ในการพิจารณาถึงแรงดันกระเพื่อมและแรงดันตกของวงจรทวีแรงดันที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายนั้น พบว่า วงจรทวีแรงดันมีค่าความกระเพื่อมของแรงดันค่อนข้างสูง ซึ่งมีผลมาจากการเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุน้อย ในที่นี้ใช้ค่าความจุ 0.47 ไมโครฟารัด ทำให้การกรองสัญญาณไม่เรียบเท่าที่ควร แต่ค่าแรงดันตกนั้นมีค่าน้อย เพราะกระแสที่จ่ายให้โหลดหรือวงจรชุดทดลองมีค่าต่ำอยู่ที่ระดับไมโครแอมแปร์ ต่อมาคือการทดสอบเพื่อวัดค่าแรงดันอัดประจุในแต่ละขั้นของวงจรชุดทดลอง ทำการเปรียบเทียบช่วงเวลาหน้าคลื่นและท้ายคลื่นกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ให้ผลลัพธ์ที่มีค่าความผิดพลาดในช่วงเวลาหน้าคลื่นค่อนข้างมาก โดยจะพบว่าช่วงเวลาที่เข้าไปเพียงไม่กี่ไมโครวินาที จะทำให้ค่าความผิดพลาดนั้นผิดเพี้ยนไปจากมาตรฐานเพราะในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าเพื่อให้อุปกรณ์สามารถทนต่อสถานะแรงดันเกินจากฟ้าผ่าจริง ๆ ได้นั้นอุปกรณ์ควรที่จะทนต่อแรงดันกระชากค่าสูงในช่วงเวลาที่รวดเร็ว อีกสาเหตุหนึ่งจะมาจากแรงดันอัดประจุในแต่ละขั้นไม่สามารถชาร์จประจุได้เต็มเพราะ ระยะเวลาสปาร์กเก็ปที่ใกล้กันมากจึงทำให้เกิดการเบรกดาวนและถ่ายเทประจุเสียก่อนและสุดท้ายคือการทดสอบเบรกดาวนที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 รูปแบบ พบว่าการทดสอบเบรกดาวนผ่านอากาศให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีช่วงเวลาหน้าคลื่น/ท้ายคลื่น เท่ากับ

3.5902 ± 0.5407/61.944 ± 16.2234 ไมโครวินาที ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามมาตรฐาน แต่ช่วงเวลาหน้าคลื่นช้ากว่าที่มาตรฐานกำหนดเพราะใช้เวลาในการชาร์จประจุที่นานกว่ามาตรฐาน ส่วนช่วงเวลาท้ายคลื่นนั้นตรงตามมาตรฐานในหลาย ๆ ครั้งที่เกิดการเบรกดาวนส์คายยอดของแรงดันที่ได้ตกลงเนื่องมาจากการชาร์จประจุไม่เต็มในตัวเก็บประจุ โดยการทดสอบเบรกดาวนส์ผ่านอากาศมีระยะห่างของการเบรกดาวนส์สูงสุดอยู่ที่ 7 มิลลิเมตร ซึ่งโดยรวมแล้วชุดทดลองยังคงมีความไม่เสถียรต่อการนำไปใช้งานทดสอบจริงหรือการทดสอบอุปกรณ์ต่อแรงดันฟ้าผ่า

ในการทดสอบเบรกดาวนส์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ พบว่า รูปคลื่นที่ได้จะใช้เวลาในการชาร์จและคายประจุนานกว่าการทดสอบเบรกดาวนส์ผ่านอากาศ โดยมีค่าอยู่ที่ $0.5430 \pm 0.3367/21.8500 \pm 21.4225$ มิลลิวินาที เนื่องจากความสามารถในการนำไฟฟ้าในน้ำกลั่นนั้นมีค่าต่ำมากหากเทียบกับความสามารถในการนำไฟฟ้าของอากาศหรือน้ำธรรมดาที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่า จึงทำให้ช่วงเวลาหน้าคลื่นและท้ายคลื่นใช้เวลานานระดับมิลลิวินาที รวมไปถึงค่ายอดของแรงดันก็ตกลงมามากเช่นเดียวกัน และรูปคลื่นยังคงมีการแกว่ง (Oscillation) รวมถึงค่าพุ่งของสัญญาณรูปคลื่น (Overshoot) ดังนั้นการทดสอบในลักษณะนี้อาจไม่เหมาะสมหากจะทดสอบอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าโดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวกลาง โดยน้ำกลั่นมีระยะห่างของการเบรกดาวนส์สูงสุดอยู่ที่ 6 มิลลิเมตร และสุดท้ายคือการทดสอบการเบรกดาวนส์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำมัน พบว่า ไม่สามารถวัดผลลัพธ์ออกมาได้ เนื่องจากความเป็นฉนวนของน้ำมันที่มีค่าความเป็นฉนวนสูง การทำให้เกิดการเบรกดาวนส์ได้นั้นจำเป็นต้องมีระดับแรงดันที่สูงกว่านี้มาก ดังนั้นการทดสอบอุปกรณ์ที่ต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ต้องมีระดับแรงดันที่มากขึ้น ซึ่งแรงดันด้านนอกที่ชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์สร้างได้จะมีช่วงแรงดันในช่วง 12 ถึง 13 กิโลโวลต์ การเบรกดาวนส์ในฉนวนเหลวตัวอย่างเช่นน้ำมันนั้นจะมีค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงกว่า 100 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งระยะห่างที่ทำการทดลอง คือ 5 มิลลิเมตรหรือ 0.5เซนติเมตร นั่นคือจะมีความเครียดของสนามไฟฟ้าเพียง 24 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร เพื่อให้เกิดการเบรกดาวนส์ขึ้นอาจแก้ไขโดยการลดระยะห่างระหว่างสกรูปลายแหลมกับผิวน้ำมันเครื่องลงเพื่อให้มีความเครียดของสนามไฟฟ้ามากขึ้น

ในการทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะพบว่า ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ทั้งในเรื่องของค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ทั้งตัวต้านทานตัวเก็บประจุ หรือแม้กระทั่งระยะสปาร์กแก๊ปของการเบรกดาวนส์ที่อาจส่งผลต่อการชาร์จประจุไม่เต็มในแต่ละขั้น รวมไปถึงค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัด ทั้งนี้วงจรของชุดทดลองเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ที่ได้ออกแบบขึ้นมานั้น ยังไม่ได้คำนึงถึงค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ของวงจรที่ส่งผลต่อช่วงเวลา

หน้าคลื่นและค่ายอดของคลื่น จำเป็นจะต้องออกแบบค่าความต้านทานเพิ่มเติมโดยใช้ตัวต้านทานเพื่อปรับปรุงคลื่นภายนอก และระบบที่สามารถควบคุมระยะสปาร์กแก่ปทีดีและปลอดภัย

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1) การหาขนาดตัวเก็บประจุในท้องตลาดเพื่อให้ได้ตามที่ต้องการทำได้ยาก มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดแรงดันที่ทนได้สูงสุดที่สามารถหาซื้อได้ คือ 2,000 โวลต์และราคาที่ย่อมเยา ข้อเสนอนี้คือ ศึกษาแหล่งข้อมูลที่ขายอุปกรณ์เพิ่มเติมในอินเทอร์เน็ต ทั้งเรื่องขนาดและราคาที่เหมาะสม

2) การปรับระยะสปาร์กแก่ปทีดีทำได้ยาก เมื่อเกิดการเบรกดาวนขึ้นมีโอกาที่ระยะสปาร์กแก่ปทีดีจะคลาดเคลื่อนไปมาอาจทำให้การชาร์จประจุในตัวเก็บประจุในแต่ละขั้นไม่เท่ากัน ข้อเสนอนี้คือ ควรมีการออกแบบการปรับระยะสปาร์กแก่ปทีดีเสถียรและมั่นคงให้มากขึ้น เช่น ใช้เฟืองปรับระยะให้ได้ตามต้องการหรือใช้ระบบควบคุมเข้ามามีบทบาท เพื่อให้สามารถปรับระยะสปาร์กแก่ปทีดีระยะไกลได้

3) ข้อจำกัดในเรื่องของอุปกรณ์เครื่องมือวัด ในการต่อโพรบแรงสูงเข้าสู่ดิจิทัลออสซิลโลสโคป เนื่องจากไม่มีหัวแปลงที่ต่อร่วมกันได้จึงทำให้การต่อร่วมกันค่อนข้างยุ่งยาก ทำให้สัญญาณรูปคลื่นที่วัดได้มีผลตอบสนองทางเวลาที่ช้า ข้อเสนอนี้คือ ใช้โพรบที่สามารถต่อเข้ากับดิจิทัลออสซิลโลสโคปได้สะดวก

4) วงจรมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูง การปรับระยะสปาร์กแก่ปทีดียังคงขาดในเรื่องของการป้องกันอันตรายจากไฟฟ้าแรงสูง ข้อเสนอนี้คือ ควรมีการสวมถุงมือป้องกันไฟฟ้า และสวมใส่ที่อุดหู เนื่องจากการเบรกดาวนมีระดับแรงดันที่สูงและเกิดเสียงดัง

5) ถึงแม้จะได้รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นแรงดันอิมพัลส์คล้ายกับมาตรฐาน แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของหน้าคลื่นและยอดคลื่นอยู่ ข้อเสนอนี้คือ ออกแบบค่าความต้านทานปรับปรุงคลื่นภายนอกในวงจรให้เหมาะสมเพื่อขจัดปัญหาความเหนียวน่าที่เกิดจากคลื่นระลอกซ้อนในวงจรที่ส่งผลให้รูปคลื่นที่ได้ในทางปฏิบัติไม่ตรงตามมาตรฐาน

5.3 แนวทางการพัฒนา

- 1) ออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างสปาร์กแก๊ปที่มากขึ้นเพื่อความสะดวกในการปรับระยะโดยการเพิ่มขนาดของแรงดันด้านเข้าของวงจรให้สูงมากขึ้น
- 2) ออกแบบให้สามารถปรับระยะของสปาร์กแก๊ปได้สะดวกโดยใช้ระบบไกสวิตช์และระบบควบคุมที่สั่งการให้เบรกดาวนได้ทันทีเมื่อแรงดันอัดประจุมีค่าสะสมในแต่ละขั้นที่สูงเท่ากัน
- 3) ลดขนาดอุปกรณ์ลงเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายโดยสามารถที่จะลดจำนวนชิ้นลงและเพิ่มขนาดแรงดันขาเข้าแทนและยังคงมีระดับแรงดันด้านออกที่เป็นไปตามที่ต้องการ
- 4) ออกแบบให้ชุดทดลองสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกมากขึ้นโดยการเพิ่มล้อรองรับน้ำหนักที่สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายและสามารถที่จะถอดแยกส่วนเพื่อนำชุดทดลองมาทดสอบแยกได้
- 5) ใช้ระบบดิจิทัลในการแสดงผลถึงระยะห่างของสปาร์กแก๊ปแต่ละขั้น เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดสอบให้มากขึ้น



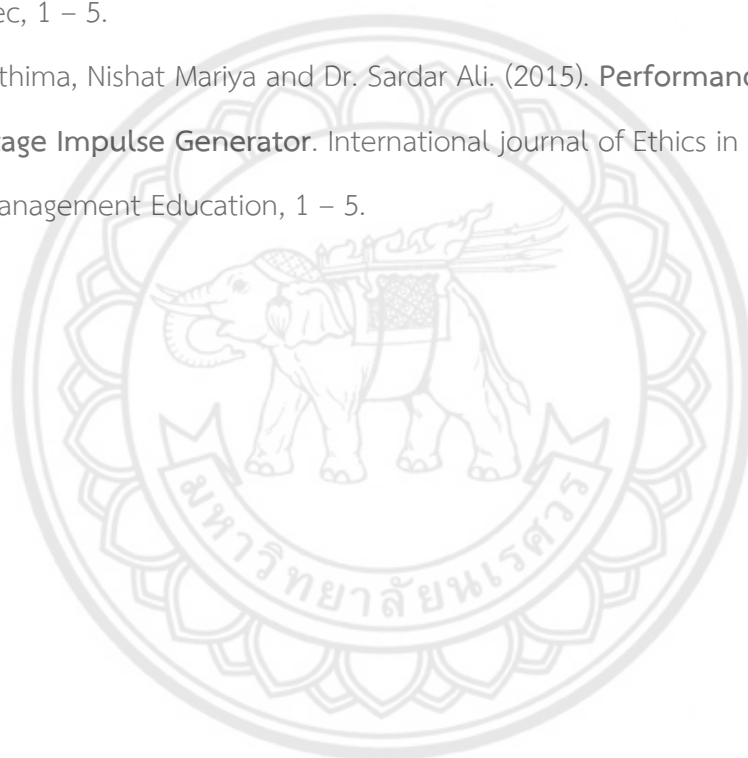
เอกสารอ้างอิง

สำรวย สังสะอาด. (2549). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ

ธีรุตม์ บุญพรหม, พลวิทย์ สิริรัตน์บรรจง. (2557). **เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 40kV 32J**. ปรินญา
นิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ล้านนาเชียงใหม่

Prajapati Yash, Sejpal Rahul and Shubham Dave. (2016). **Multistage Impulse Voltage
Generator**. International journal of Advance Research in Engineering, Sci. &
Tec, 1 – 5.

Shazia Fathima, Nishat Mariya and Dr. Sardar Ali. (2015). **Performance of a Muti -
Stage Impulse Generator**. International journal of Ethics in Engineering &
Management Education, 1 – 5.





ภาคผนวก ก

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้

Maintenance**Performance Test**

Verify the probe accuracy by measuring a 25 kV dc $\pm 0.25\%$ voltage source. When used with a compatible dc voltmeter, the probe should measure the source with $\pm 1\%$ accuracy. No calibration adjustments are provided.

Cleaning

Use a soft cloth dampened in distilled water to clean the 80K-40. Never use solvents or abrasive cleaners. Make sure the 80K-40 is dry before reuse.

LIMITED WARRANTY & LIMITATION OF LIABILITY

Each Fluke product is warranted to be free from defects in material and workmanship under normal use and service. The warranty period is one year and begins on the date of shipment. Parts, product repairs and services are warranted for 90 days. This warranty extends only to the original buyer or end-user customer of a Fluke authorized reseller, and does not apply to fuses, disposable batteries or to any product which, in Fluke's opinion, has been misused, altered, neglected or damaged by accident or abnormal conditions of operation or handling. Fluke warrants that software will operate substantially in accordance with its functional specifications for 90 days and that it has been properly recorded on non-defective media. Fluke does not warrant that software will be error free or operate without interruption.

Fluke authorized resellers shall extend this warranty on new and unused products to end-user customers only but have no authority to extend a greater or different warranty on behalf of Fluke. Warranty support is available if product is purchased through a Fluke authorized sales outlet or Buyer has paid the applicable international price. Fluke reserves the right to invoice Buyer for importation costs of repair/replacement parts when product purchased in one country is submitted for repair in another country.

Fluke's warranty obligation is limited, at Fluke's option, to refund of the purchase price, free of charge repair, or replacement of a defective product which is returned to a Fluke authorized service center within the warranty period.

To obtain warranty service, contact your nearest Fluke authorized service center or send the product, with a description of the difficulty, postage and insurance prepaid (FOB Destination), to the nearest Fluke authorized service center. Fluke assumes no risk for damage in transit. Following warranty repair, the product will be returned to Buyer, transportation prepaid (FOB Destination). If Fluke determines that the failure was caused by misuse, alteration, accident or abnormal condition of operation or handling, Fluke will provide an estimate of repair costs and obtain authorization before commencing the work. Following repair, the product will be returned to the Buyer transportation prepaid and the Buyer will be billed for the repair and return transportation charges (FOB Shipping Point).

THIS WARRANTY IS BUYER'S SOLE AND EXCLUSIVE REMEDY AND IS IN LIEU OF ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. FLUKE SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY SPECIAL, INDIRECT, INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OR LOSSES, INCLUDING LOSS OF DATA, WHETHER ARISING FROM BREACH OF WARRANTY OR BASED ON CONTRACT, TORT, RELIANCE OR ANY OTHER THEORY.

Since some countries or states do not allow limitation of the term of an implied warranty, or exclusion or limitation of incidental or consequential damages, the limitations and exclusions of this warranty may not apply to every buyer. If any provision of this Warranty is held invalid or unenforceable by a court of competent jurisdiction, such holding will not affect the validity or enforceability of any other provision.

Fluke Corporation
P.O. Box 9090
Everett, WA 98206-9090
U.S.A.

Fluke Europe B.V.
P.O. Box 1186
5602 BD Eindhoven
The Netherlands

5/94

FLUKE®**80K-40
High Voltage Probe****Instruction Sheet****Introduction**

The Model 80K-40 is a high voltage accessory probe designed to extend the voltage measuring capability of an ac/dc voltmeter up to 40,000 volts Overvoltage Category I. This means the probe can only be used to make measurements on energy limited circuits within equipment. Examples include high voltage within televisions or photo copy machines. DO NOT use this probe to measure high voltages on power distribution systems. The probe is a precision 1000:1 voltage divider formed by two matched resistors. The unusually high input impedance offered by these resistors minimizes circuit loading and thereby, optimizes measurement accuracy. A special plastic body houses the divider and provides the user with isolation and protection from the voltage being measured.

Specifications

The 80K-40 will achieve rated accuracy when used with a voltmeter (ac or dc) having an input impedance of $10\text{ M}\Omega \pm 1.0\%$. * Specifications for the probe are as follows:

† Voltage Range: 1 kV to 40 kV dc or peak ac, 28 kV rms ac

Input Resistance: 1000 M Ω

Division Ratio: 1000: 1 (1000X attenuator)

Accuracy DC:

20 kV to 35 kV: $\pm 1\%$ at 20°C to 30°C; add 1% at 10°C <20°C and >30°C to 45°C. (For total measurement accuracy add accuracy specification of voltmeter being used.)

0 kV to <20 kV and >35 kV to 40 kV: $\pm 2\%$.

Accuracy AC: 60 Hz, $\pm 5\%$.

Safety: Meets IEC 1010-2-031:1993, Type B, 40 kV dc or, peak ac, 28 kV rms ac, Overvoltage Category I (voltages derived from limited energy transformer).

* The input impedance of Autoranging Fluke handheld digital multimeters varies as a function of range. The only range that deviates significantly from $10\text{ M}\Omega$ is the 3V (Models 21, 23, 25, 27, 70, 73, 75, 77) or 4V (Models 10, 11, 12, 29, 79, 83, 85, 86, 87, 88) range where the impedance is 11.11 M Ω . To enhance the measurement accuracy when using this range, apply a correction factor of 0.99, i.e. multiply the displayed reading by .99.

† This probe is intended for low energy applications such as CRT and similar circuits. Above 2000 meters altitude, and up to 5000 meters, derate linearly the working voltage from 40 kV peak to 28 kV peak, and derate linearly the transient overvoltage from 80 kV peak to 57 kV peak. Transient overvoltage refers to micro-second duration impulses caused by lightning or load switching. See International Electrotechnical Commission Publication 664-1980, Clause 3.9 Table II, and Appendix A.

Measurement Considerations

Before attempting to use the 80K-40, the following paragraphs should be read and understood. Particular attention should be given to Operator Safety.

PN 481978

January 1978, Rev.9, 3/97



© 1978, 1996, 1997 Fluke Corporation, All rights reserved. Printed in U.S.A.

All product names are trademarks of their respective companies.

รูปที่ ก.1 เอกสารข้อมูลโพรบแรงดันสูง FLUKE 80K-40

ที่มา : www.oninecomponents.com

Operator Safety

-  Indicates the operator must refer to an explanation in this manual.
-  Indicates terminals at which lethal voltages may exist.

Warning

- To avoid damage or electric shock:
 - Use within ratings and under dry (no condensation) conditions.
 - The 80K-40 user should be familiar with, and exercise, all possible high voltage safety practices.
 - When making a measurement, never make body contact with the probe tip or the red portion of the probe. Always hold the probe by its black handle.
 - Before making a measurement, make sure that the tab side of the output connector is connected to the voltmeter's low input terminal.
 - The clip lead must be attached to earth ground.

Voltmeter Compatibility

Accuracy of the meter is not included in the accuracy of the probe, and must be added to the probe accuracy to determine system accuracy.

The 80K-40 is mechanically compatible with any ac or dc voltmeter or multimeter capable of accepting a standard spaced, 0.75" (19mm) double, banana plug, having standard, .160" (4mm) plugs.

The 80K-40 probe is electrically compatible with any ac or dc voltmeter or multimeter that has an input impedance of 10 MΩ ±1%. Voltmeters or multimeters with other input impedances require the use of an external shunt or a correction factor to obtain an accurate measurement. Higher impedance voltmeters or multimeters should be equipped with a shunt, and lower impedance voltmeters or multimeters should be assigned correction factors. Applicable formulas follow:

- a. The following formula is used to determine the value of an external shunt resistor (meter impedance >10 MΩ):

$$R_s = \frac{R_m \times 10}{R_m - 10}$$

Where: R_s = Shunt resistance in MΩ
 R_m = Voltmeter input impedance in MΩ (>10 MΩ)

Example: If $R_m = 20\text{ M}\Omega$,

$$R_s = \frac{20 \times 10}{20 - 10} = \frac{200}{10} = 2.0\text{ M}\Omega$$

- b. Use the following formula to calculate a correction factor (meter impedance <10 MΩ):

$$C_f = \frac{1.11 + R_m}{1.11 \times R_m}$$

Where: C_f = Correction factor (multiplier for meter reading)
 R_m = Voltmeter input impedance in MΩ

Example: If $R_m = 1\text{ M}\Omega$,

$$C_f = \frac{1.11 + 1}{1.11 \times 1} = \frac{2.11}{1.11} = 1.901$$

Therefore: A meter reading of 0.526 volts represents an input of: $0.526 \times 1.901 = 1$ or 1 kV.

Circuit Loading

The 80K-40 represents a 1000 MΩ load to the circuit being measured, or 1 μA per 1 kV. Table 1 shows the circuit loading and input/output characteristics of the probe over its measurement range.

Table 1. 80K-40 Circuit Loading and Input/Output Characteristics

Input Voltage	Loading Current	Output Voltage
10V	10 nA	10 mV
100V	100 nA	100 mV
1 kV	1 μA	1V
10 kV	10 μA	10V
20 kV	20 μA	20V
30 kV	30 μA	30V
40 kV	40 μA	40V

Operation

Use the following procedure to operate the 80K-40:

1. Select and energize a compatible voltmeter.
2. Equip the voltmeter with a suitable shunt, if required.
3. Select an appropriate voltage range (1 volt reading per 1000 volt input. See Table 1).
4. Connect the probe's output leads to the voltmeter input terminals.
5. Connect the probe's clip lead to ground. See OPERATOR SAFETY.
6. Connect probe tip to circuit being measured and observe voltmeter reading. Apply correction factor to reading when necessary.

Theory Of Operation

The 80K-40 High Voltage probe, is designed to extend the voltage measurement range of an ac/dc voltmeter up to 40,000 volts. Electrically, the probe is a passive attenuator as shown in Figure 1. Its high input impedance (1000 MΩ), as well as its accuracy and stability characteristics are achieved through the use of special thick film resistors. When the probe is connected to a voltmeter with a 10 MΩ input resistance the probe becomes an accurate 1000:1 divider. Notice that the divider depends upon a ground lead to complete the low side of the circuit path. Therefore, this connection must always be secure before attempting a voltage measurement. Otherwise, instrument damage or a shock hazard will result.

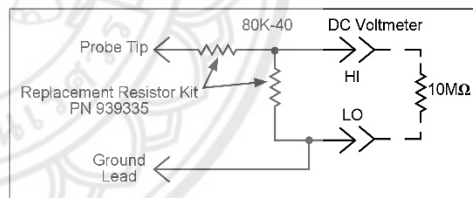
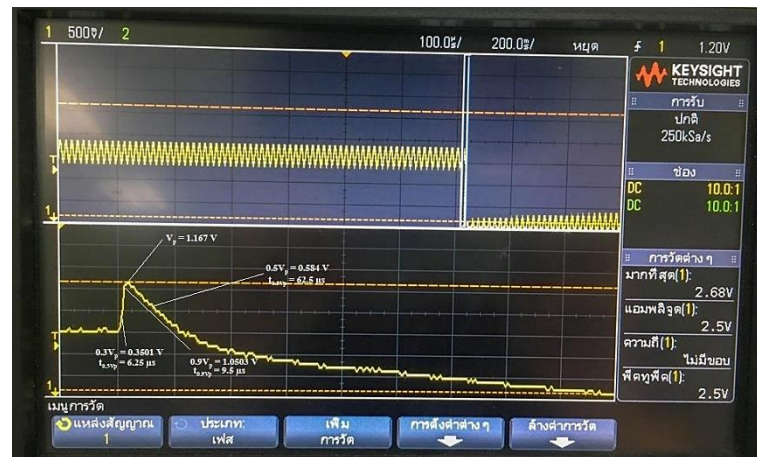


Figure 1. 80K-40 Simplified Circuit Diagram

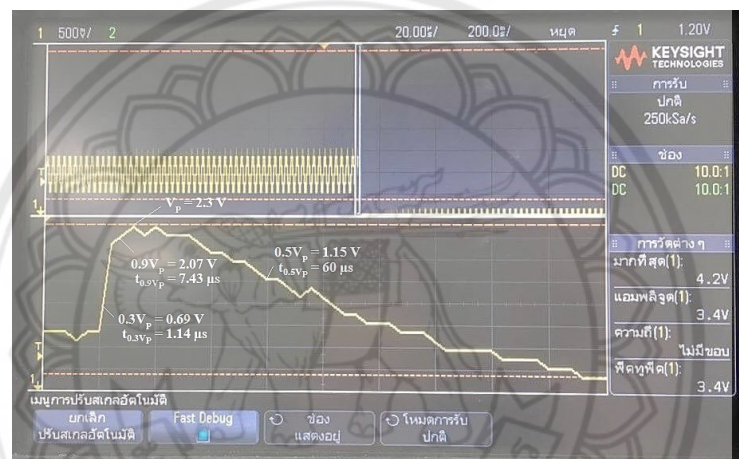
รูปที่ ก.2 เอกสารข้อมูลโพรบแรงดันสูง FLUKE 80K-40

ที่มา : www.onlinecomponents.com

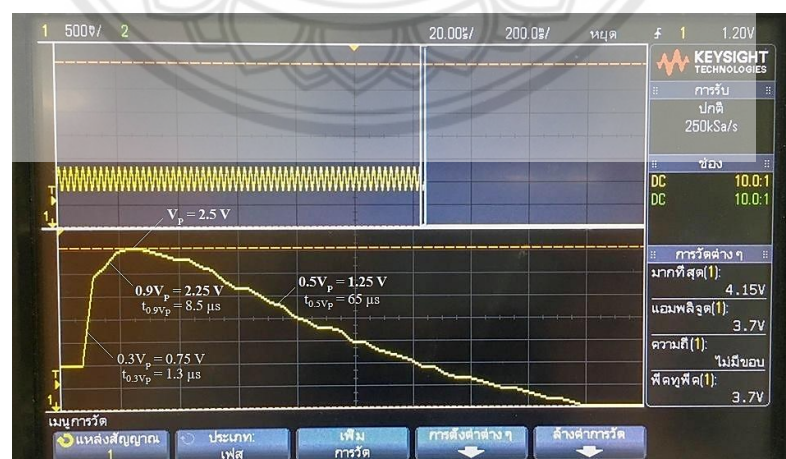




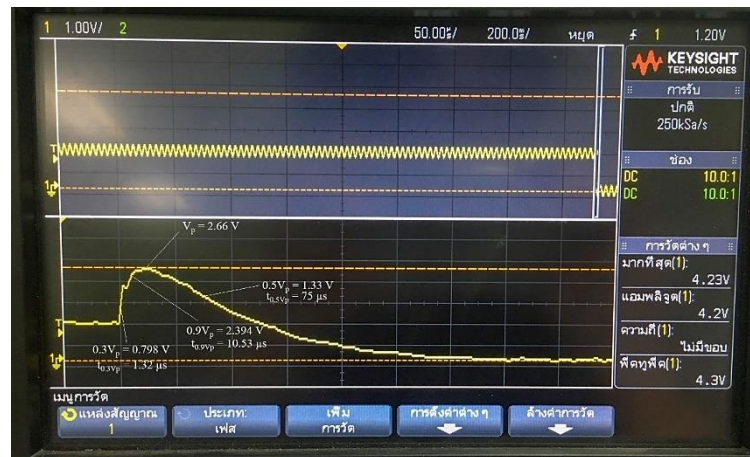
รูปที่ ข.1 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 2



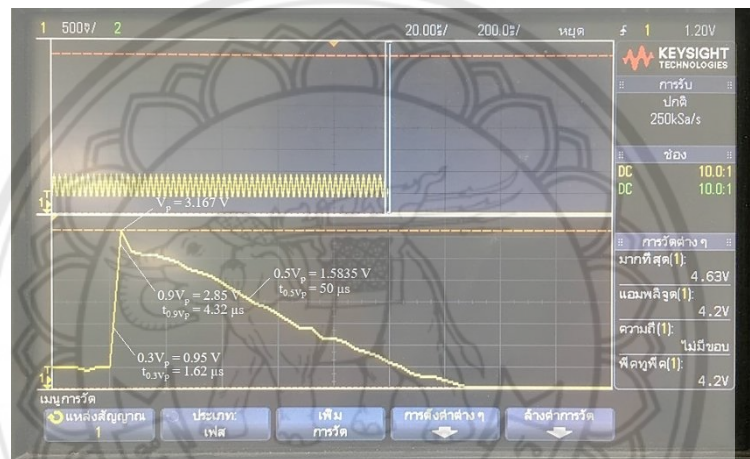
รูปที่ ข.2 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 3 ครั้งที่ 1



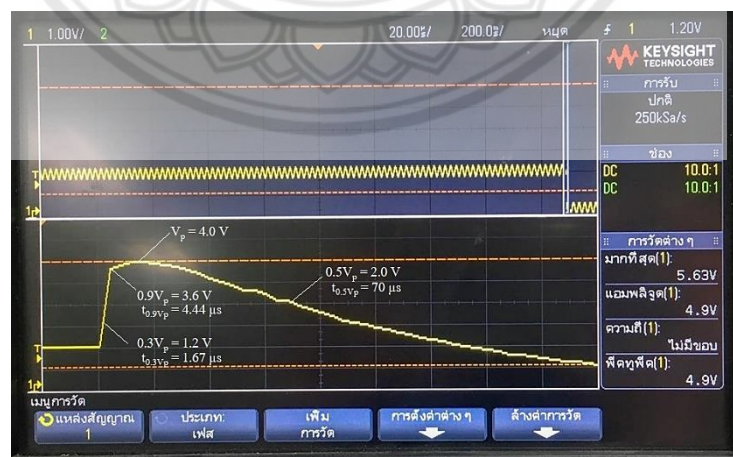
รูปที่ ข.3 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 3 ครั้งที่ 2



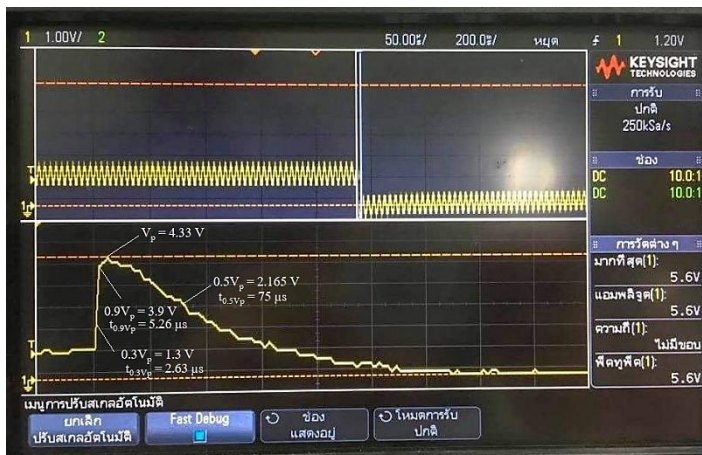
รูปที่ ข.4 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 4 ครั้งที่ 1



รูปที่ ข.5 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 4 ครั้งที่ 2



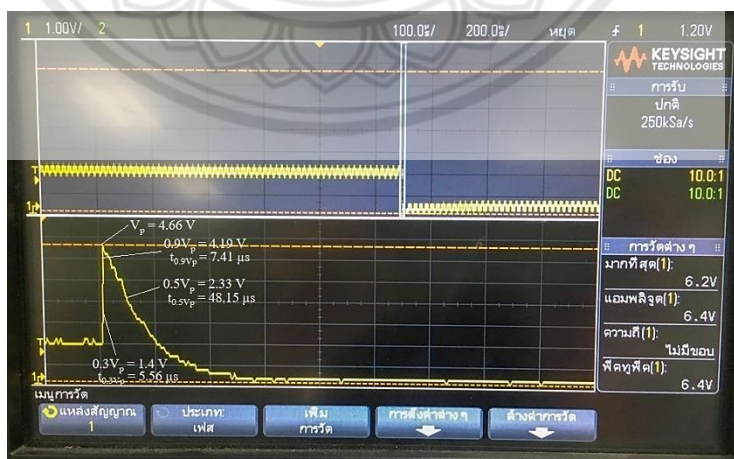
รูปที่ ข.6 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 5 ครั้งที่ 1



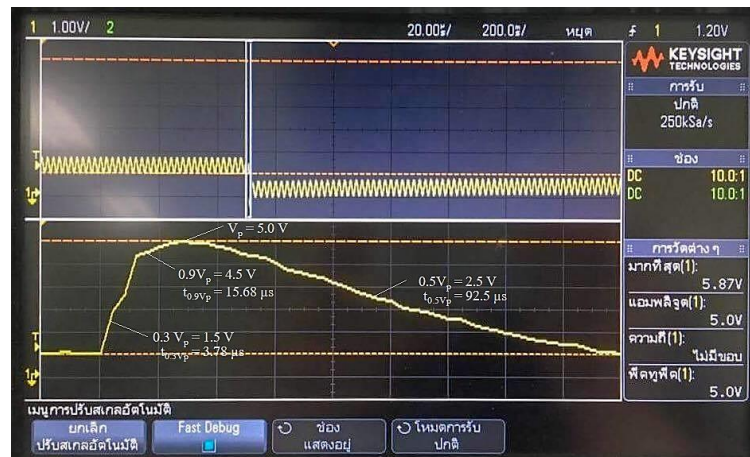
รูปที่ ข.7 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 5 ครั้งที่ 2



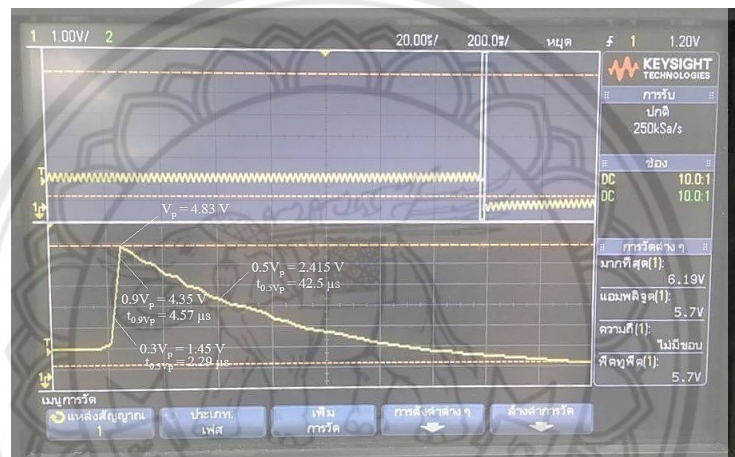
รูปที่ ข.8 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 6 ครั้งที่ 1



รูปที่ ข.9 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 6 ครั้งที่ 2



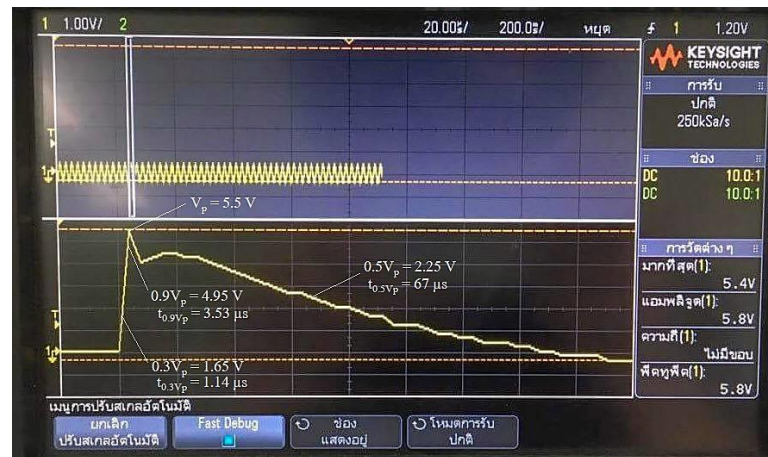
รูปที่ ข.10 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 7 ครั้งที่ 1



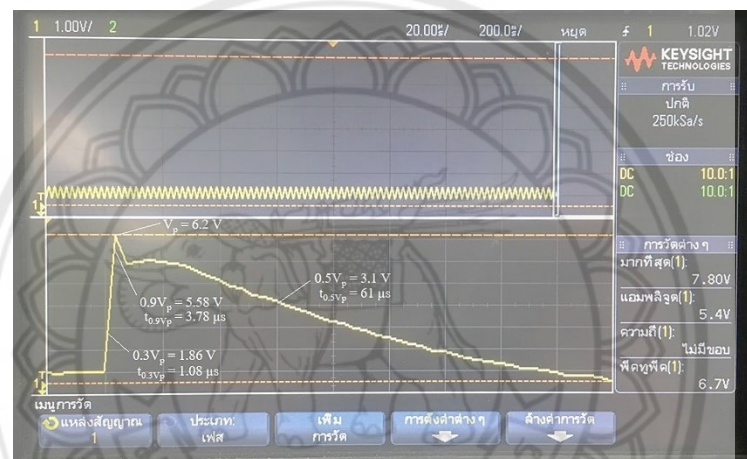
รูปที่ ข.11 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 7 ครั้งที่ 2



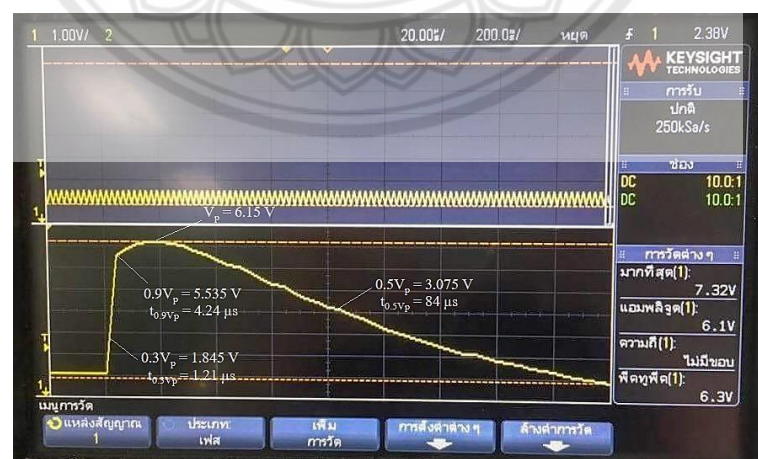
รูปที่ ข.12 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 8 ครั้งที่ 1



รูปที่ ข.13 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 8 ครั้งที่ 2



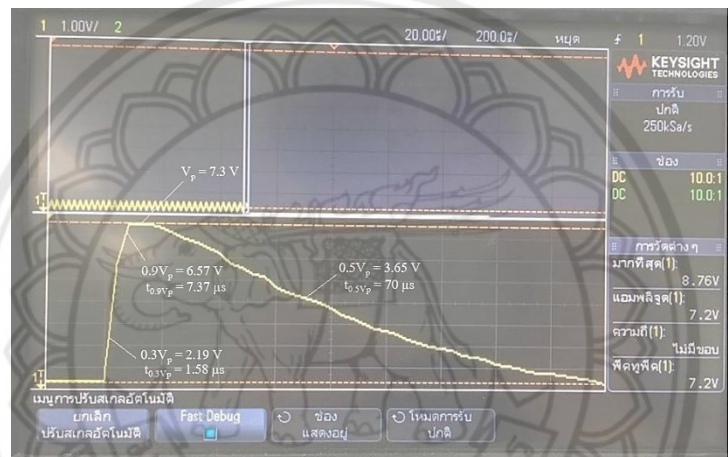
รูปที่ ข.14 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 9 ครั้งที่ 1



รูปที่ ข.15 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 9 ครั้งที่ 2



รูปที่ ข.16 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 10 ครั้งที่ 1

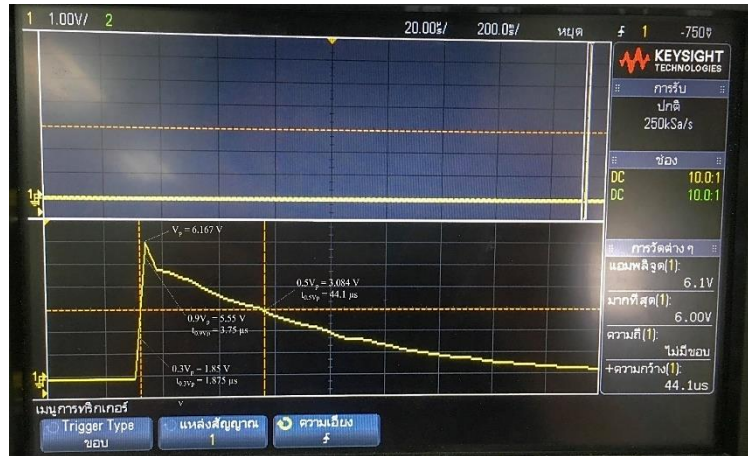


รูปที่ ข.17 รูปคลื่นของแรงดันอัดประจุขั้นที่ 10 ครั้งที่ 2



ภาคผนวก ค

การทดสอบเบรกดาว์นผ่านอากาศ



รูปที่ ค.1 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศครั้งที่ 1



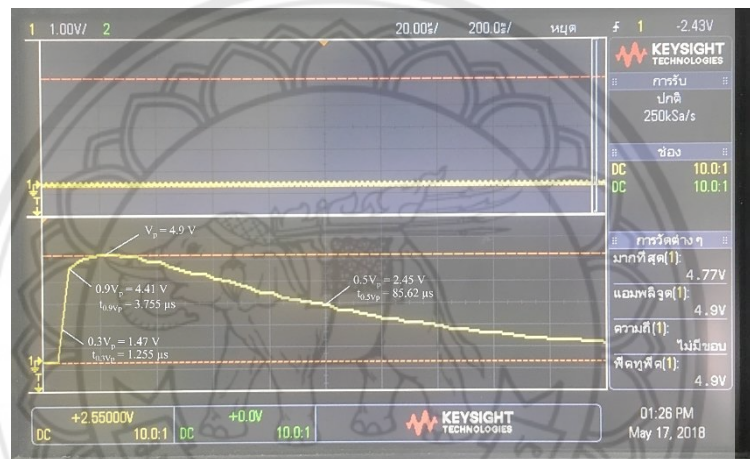
รูปที่ ค.2 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศครั้งที่ 2



รูปที่ ค.3 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศครั้งที่ 3



รูปที่ ค.4 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศครั้งที่ 4



รูปที่ ค.5 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศครั้งที่ 5

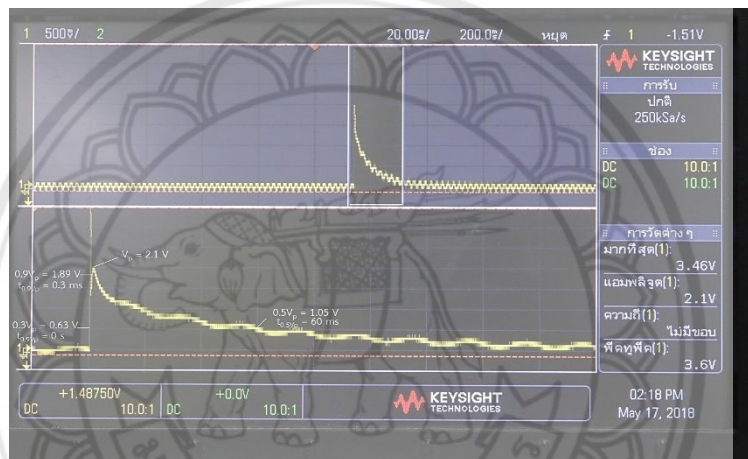


ภาคผนวก ง

การทดสอบเบรกดาวน้ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำ



รูปที่ ง.1 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำครั้งที่ 1



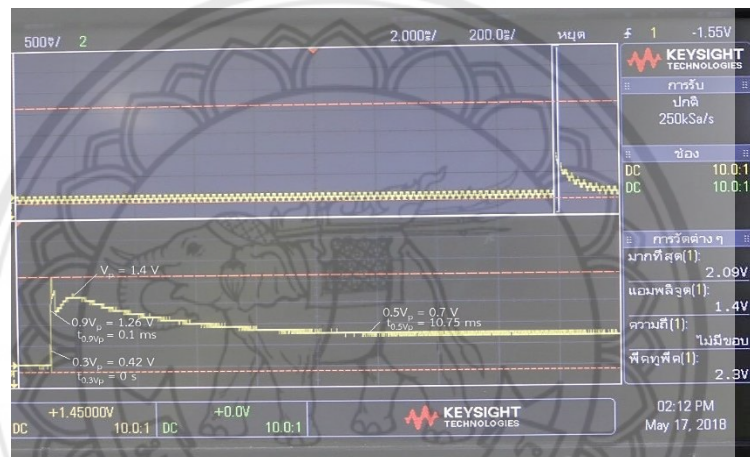
รูปที่ ง.2 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำครั้งที่ 2



รูปที่ ง.3 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำครั้งที่ 3



รูปที่ ง.4 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำครั้งที่ 4



รูปที่ ง.5 รูปคลื่นอิมพัลส์จากการทดสอบเบรกดาวน์ผ่านอากาศไปตามผิวของน้ำครั้งที่ 5